Automatisiertes und prozessüberwachtes Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von
MEng Achim Breckweg
aus Recke

Hauptberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald, MBA

Tag der Einreichung:	24. Mai 2006
Tag der mündlichen Prüfung:	14. Februar 2007

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2007

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen **13**

1 Einleitung **16**

1.1 Problemstellung 16
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise 17

2 Ausgangssituation **19**

2.1 Begriffe und Definitionen 19
2.2 Stand der Technik beim kraftreduzierten Clinchen 22
2.2.1 Konstruktive Verringerung des Zangengewichts 22
2.2.2 Verfahren zur Reduzierung der Fügekraft 23
2.2.3 Einrichtungen zum Radialfügen 27
2.3 Prozessüberwachung beim umformtechnischen Fügen 28
2.4 Auswertung der Prozessdaten beim Radialclinchen 29
2.5 Folgerungen aus dem Stand der Technik und der Forschung 32

3 Analyse der Fügeaufgabe und Ableitung von Anforderungen an das automatisierte Radialclinchen **33**

3.1 Analyse des Produktspektrums und der produktionstechnischen Randbedingungen 33
3.1.1 Analyse des Produktspektrums 34
3.1.2 Analyse der produktionstechnischen Randbedingungen 36
3.2 Analyse des Radialclinchprozesses 37
3.3 Auftretende Mängel im Fügeprozess 39
3.4 Analyse neuronaler Netze für die Prozessfehlerklassifikation beim Radialclinchen 40
3.5 Analyse der Normen für die Untersuchung der Verbindungsfestigkeit beim Clinchen 42
3.6 Automatisierungshemmnisse 43
3.7 Analyse der Einflussfaktoren bei der Gestaltung und dem Einsatz von Anlagen zum automatisierten Radialclinchen 44
3.8 Folgerungen aus der Analyse und den Automatisierungshemmnissen sowie Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten 45

3.9 Ableitung von Anforderungen an Gesamtsystem und Teilsysteme zum automatisierten Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe 47
3.9.1 Definition von Teilfunktionen und Zuordnung zu Teilsystemen 47
3.9.2 Anforderungen an das Gesamtsystem 48
3.9.3 Anforderungen an das Fügesystem 49
3.9.4 Anforderungen an das Niederhaltersystem 49
3.9.5 Anforderungen an das Prozessüberwachungssystem 50
3.9.6 Anforderungen an das Bereitstellungs- und Handhabungssystem 51

4 Konzeption von Teilsystemen für das automatisierte Radialclinchen 52

4.1 Lösungsalternativen für Teilsysteme 52
4.1.1 Grundaufbau der Fügeeinrichtung 53
4.1.2 Zangenaufbau 54
4.2 Niederhaltersystem 55
4.3 Erfassung der Prozesskennwerte 56

5 Optimierung der Verbindungsfestigkeit und Ableitung von Wirkzusammenhängen für das Radialclinchen 58

5.1 Versuchsaufbau und Sensorik zur Ermittlung grundlegender Einflussfaktoren auf die Verbindungsfestigkeit 58
5.2 Experimentelle Untersuchung der Verbindungsfestigkeit beim Radialclinchen - Einfluss der Stempelgeometrie auf die Verbindungsfestigkeit beim Radialclinchen 59
5.2.1 Verbindungsfestigkeiten beim Radialclinchen mit einteiliger Matrize 61
5.2.2 Verbindungsfestigkeiten beim Radialclinchen mit mehrteiliger Matrize 64
5.3 Zusammenfassung und Folgerungen aus den Untersuchungen zur Verbindungsfestigkeit 67
5.4 Berechnung der Parameterzusammenhänge zwischen Fügekraft, Fügezeit und Drehzahl 68
5.4.1 Ableitung der Wirkzusammenhänge zwischen Fügekraft, Fügezeit und Drehzahl 68

5.4.2 Experimentelle Verifikation der Zusammenhänge zwischen Fügezeit, Drehzahl und Fügekraft 71
5.5 Folgerungen 72

6 Entwicklung eines Berechnungsverfahrens für die Fügekraft beim Radialclinchen sowie Verifikation der Ergebnisse 73

6.1 Ermittlung der prozessrelevanten Einflussfaktoren und Eingrenzung grundlegender umformtechnischer Zusammenhänge 73
6.2 Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Fügekraft beim Radialclinchen 75
6.3 Berechnung der Radialclinchgrößen Vorschubgeschwindigkeit, Hubzustellung, Radialkonstante und Kontaktflächenverhältnis 76
6.4 Berechnung des Fügekraftverlaufs beim Radialclinchen 77
6.4.1 Berechnung der Fügekraft in der Fügephase I 77
6.4.2 Berechnung der Fügekraft in der Fügephase II 80
6.5 Berechnung der Auffederung der Fügeeinrichtung und der Niederhalterkraft 85
6.6 Vergleich des theoretisch ermittelten Kraftverlaufs mit experimentellen Untersuchungen 86
6.7 Folgerungen 88

7 Entwicklung einer Prozessfehlerklassifikation auf der Basis von neuronalen Netzen sowie deren Verifikation 89

7.1 Grundlagen und Vorgehensweise 89
7.2 Klassifikation der Fehler beim Radialclinchen 90
7.3 Analyse der Signale für den Radialclinchprozess 92
7.4 Spezifizierung der Ein- und Ausgabevektoren 95
7.5 Verfahren zur Ermittlung der Netzparameter beim Radialclinchen 96
7.6 Parametrisierung der neuronalen Netze 97
7.7 Validierung der Prozessüberwachung und Fehlerklassifikation 98
7.8 Folgerungen 99

8 Realisierung und Erprobung einer Versuchsanlage für das flexibel automatisierte Radialclinchen 101

8.1 Gesamtaufbau der Versuchsanlage 101
8.2 Aufbau der Teilsysteme und Komponenten 102
8.2.1 Handhabungssysteme 102
8.2.2 Bereitstellungssystem 102
8.2.3 Fügewerkzeug zum Radialclinchen 103
8.2.4 Niederhalter 104
8.2.5 Prozessüberwachungssystem 105
8.3 Programmablauf in der Versuchsanlage 106
8.4 Erprobung der Versuchsanlage am Beispiel von Spannbändern für LKW-Kraftstofftanks 107
8.4.1 Arbeitsablauf der Versuchsanlage und Fügeprozess beim Radialclinchen 107
8.4.2 Fügekraftreduzierung 109
8.4.3 Versuchsergebnisse und Verbindungsfestigkeiten 110
8.4.4 Gesamtablaufzeit und Verfügbarkeit der Versuchsanlage 111
8.5 Erkenntnisse und Folgerungen aus der Erprobung 113

9 Zusammenfassung und Ausblick 115

10 Summary 117

11 Literaturverzeichnis 122

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die umsatzstärksten Industriezweige des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland sind der Maschinenbau und die Kraftfahrzeugindustrie [Stati04]. Damit zählen blechverarbeitende Industriezweige zu den wirtschaftlichen und technischen Schlüsselindustrien in Deutschland. Im internationalen Wettbewerb wird diese Position durch eine hohe Produktivität und hohe Innovationsdichte gehalten.

Durch neue Werkstoffe wie Magnesiumlegierungen, höher- und höchstfeste Stähle und den verstärkten Einsatz von Klebstoffen und vorbeschichteten Blechen ändern sich auch die Anforderungen an die Verarbeitung der Halbzeuge [Brüd04]. Höher- und hochfeste Stähle werden mit dem Ziel des Karosserieleichtbaus [Schu97] eingesetzt, der zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs beiträgt [Brüd03]. Ins Blickfeld geraten dabei die umformtechnischen Fügetechniken Clinchen und Stanznieten mit Halbhohlniet. Gefordert sind flexible Fügeverfahren, mit denen unterschiedliche Werkstoffe gefügt werden und die die Kombination von Fügeverfahren zulassen [Wenz04].

Zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen müssen gleichbleibende Verbindungseigenschaften gewährleistet sein [West03]. Hierbei hat das Clinchen als umformtechnisches Fügeverfahren Vorteile gegenüber dem Punktschweißen [Röhr99]. So entstehen beim Fügen durch Clinchen keine giftigen Gase und Schweißspritzer, eine Versprödung des Materials, eine Beschädigung der Werkstückoberfläche aufgrund von Wärmeeintrag tritt nicht auf und eine Vielzahl von Werkstoffen und Blechdicken kann gefügt werden [Mend03, Schr05].

Da die Schweißbarkeit von Aluminium und Aluminiumlegierungen zum Teil eingeschränkt ist [Cape03], gilt das Widerstandspunktschweißen von Aluminium aufgrund der hohen erforderlichen Schweißströme und des Elektrodenverschleißes als anspruchsvoll [Dick98]. Aufgrund der geringen Prozesskosten und der guten Automatisierbarkeit des Clinchprozesses unter industriellen Bedingungen [Muts94] ist das Clinchen in der Industrie weit verbreitet. Dabei wird die Bedeutung von umformtechnischen Fügeverfahren auch in Verbindung mit dem Kleben in Zukunft noch steigen [Mess00, Schr99, Grot05].

Ein wesentliches Hemmnis bei der Anwendung von umformtechnischen Fügeverfahren sind die hohen Fügekräfte [Grot05, Hufe00, Kühn01, Lieb95]. Die Fügekräfte wirken als Reaktionskräfte auf die Fügeeinrichtungen. Um die einwandfreie Qualität der Verbindungselemente zu gewährleisten, müssen die meist als offene Rahmenkonstruktion ausgeführten Fügeeinrichtungen steif ausgelegt sein. Die steife Auslegung führt bei nicht stationären manuellen und automatischen Anwendungen zu schweren und somit schlecht handhabbaren Clincheinrichtungen. Damit die Clincheinrichtungen besser eingesetzt werden können, muss der Kraftbedarf des Fügeprozesses gesenkt werden.

Gleichzeitig ist die Qualität der Fügepunkte vor dem Hintergrund der Vermeidung von Nacharbeit, Ausschuss und haftungsrechtlichen Konsequenzen durch verschärfte Produkthaftung im Produktionsprozess zu gewährleisten [Meye05]. Zur Senkung personal- und kostenintensiver Maßnahmen, wie einer zerstörenden Prüfung oder der Einbringung von Sicherheitsfügepunkten, ist eine Prozessüberwachung notwendig. Diese Prozessüberwachung sollte die Klassifikation von Fehlern ermöglichen, wie sie aus dem Schleifen [Kuhl05] oder Schweißen [Krau00] bekannt ist, um eine fehlerspezifische Strategie verfolgen zu können und die Einbindung in MES-Systeme (Manufacturing-Execution Systems) mit einer schnellen Reaktion auf eintretende Ereignisse zu ermöglichen [Muss05].

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Der Einsatz von flexiblen kraftreduzierten Clinchverfahren erfordert die ganzheitliche Betrachtung des Clinchprozesses sowie die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens. Um die Prozesskräfte für eine Anlagenauslegung ermitteln zu können, ist ein Berechnungsmodell zu entwickeln. Zur Überwachung der Qualität der Clinchung in der Fertigung muss eine Prozessüberwachung entwickelt werden. Zur schnellen Reaktion auf unzulässige Prozesszustände ist eine Fehlerklassifikation notwendig. Ziel der Arbeit ist es daher, grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse zum kraftreduzierten Clinchen zu erarbeiten und die technische Umsetzbarkeit des Prozesses durch die Entwicklung einer Fügeeinrichtung und einer Prozessüberwachung nachzuweisen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind folgende Teilaufgaben zu erfüllen:

- Das wissenschaftliche Erarbeiten fügeaufgabenspezifischer und technischer Einflussfaktoren auf das kraftreduzierte, umformtechnische Fügen mittels Clinchen.

- Die Entwicklung eines Berechnungsmodells für die Fügekraft auf der Basis der umformtechnischen Zusammenhänge bei einem Verfahren zur Kraftreduzierung.

- Die Entwicklung einer Prozessüberwachung mit Fehlerklassifikation.

- Konzeption, Aufbau und Erprobung einer Fügeeinrichtung zum flexibel automatisierten Clinchen mit integrierter Prozessüberwachung für den Nachweis der technischen Umsetzbarkeit.

Hierzu wird zunächst der derzeitige Stand der Technik beim umformtechnischen Fügen und bei Verfahren zur Fügekraftreduktion untersucht. Vielversprechende Ansätze zur Kraftreduzierung beim Clinchen werden ausgewählt und weiterverfolgt. Durch die Analyse von Produkten und Produktspektren, der Fügeaufgabe und der Automatisierungshemmnisse werden die Anforderungen an das Fügesystem identifiziert. Basierend auf diesen Anforderungen werden Lösungsalternativen für Teilsysteme der Fügeeinrichtung und die Prozessüberwachung erarbeitet. Durch eine Optimierung der Fügewerkzeuge mit einem Versuchsaufbau wird die Verbindungsfestigkeit der Clinchverbindungen nachgewiesen.

Weiterführende Untersuchungen ermöglichen die Entwicklung theoretischer Grundlagen für die Modellbildung zur Berechnung der Fügekraft. Auf der Basis der Berechnungen werden die ausgewählten Teilsysteme ausgelegt und zu einem Gesamtsystem integriert. Mit diesem Gesamtsystem wird die Prozessüberwachung mit Fehlerklassifikation entwickelt. Anhand von Versuchen erfolgt die Überprüfung der theoretischen Grundlagen zur Fügekraft und zur Prozessüberwachung mit Fehlerklassifikation. Untersuchungen mit Versuchsbauteilen liefern Aussagen zur Qualität der Verbindungselemente sowie zu erreichbaren Taktzeiten. Die Erprobung erbringt wichtige Hinweise zur Umsetzbarkeit und zu möglichen Weiterentwicklungen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In der Blech verarbeitenden Industrie ist das umformtechnische Fügen von Bauteilen durch Clinchen verbreitet. Das umformtechnische Fügen erfolgt heute noch weitgehend mit linearer Fügebewegung der Werkzeuge. Die hohen Prozesskräfte erfordern schwere Werkzeuge. Große Ausladungen der Werkzeuge sind mit robotergeführten oder mobilen Einrichtungen schlecht zu realisieren.

Für das kraftreduzierte Fügen gibt es Ansätze, weiteres Anwendungspotenzial für das Clinchen zu erschließen. So kann die Kraftreduzierung durch eine hämmernde Stempelbewegung, partielle Werkstofferwärmung oder durch eine Bewegung auf dem Kegelmantel erreicht werden. Diese Verfahren haben spezifische Nachteile wie Lärmentwicklung, hohe Investitionskosten oder mangelnde Flexibilität in Kombination mit dem Halbhohlstanznieten. In Anlehnung an die vorhandenen Werkzeuge war die Motivation für die vorliegende Arbeit die Entwicklung eines kraftreduzierten umformtechnischen Fügeverfahrens mit radial überlagerter Bewegung. Für dieses Verfahren fehlten bisher jedoch grundlegende Untersuchungen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, wissenschaftliche Erkenntnisse über das Radialclinchen zu erarbeiten, eine Versuchsanlage zu konzipieren und zu realisieren sowie die technische Umsetzbarkeit nachzuweisen.

Im Stand der Technik wurden gewichtsreduzierte Fügezangenkonzepte und Ansätze zur Kraftreduzierung dargestellt. Für den vielversprechenden Ansatz der Stempelbewegung auf der Rosettenbahn wurde der Stand der Technik bei den Radialclincheinrichtungen mit Möglichkeiten der Prozessüberwachung aufgezeigt. Neuronale Netze sind hierbei zur Prozessüberwachung und zur Fehlerklassifikation geeignet. Im Rahmen der Anforderungsanalyse wurde mit einer Umfrage und umfangreichen Expertengesprächen der Istzustand beim automatisierten umformtechnischen Fügen aufgearbeitet. Die auftretenden Prozessfehler und die neuronalen Netze wurden analysiert. Technische und organisatorische Automatisierungshemmnisse sind die hohe Fügekraft und die schlechte Zugänglichkeit zur Fügestelle sowie hohe Typen- und Variantenvielfalt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Analyse wurden Anforderungen an das Gesamt- und die Teilsysteme abgeleitet. Es wurden Lösungsalternativen für Werkzeuggestaltung, Zangenkonzeption, Prozessdatenerfassung und Prozessüberwachung erarbeitet. Basierend auf der Durchführung experimenteller Untersuchungen wurde der Nachweis erbracht, dass beim

Radialclinchen gleiche Verbindungsfestigkeiten wie beim konventionellen Clinchen bei statischen Scher-, Kopf- und Schälzugfestigkeitsuntersuchungen erreicht werden. Die Untersuchungen belegen die Einsetzbarkeit von standardmäßigen Matrizen für das Radialclinchen. Durch die Beschreibung von Wirkzusammenhängen konnten produktionstechnisch relevante Prozesszusammenhänge zwischen Fügezeit, -kraft und -drehzahl ermittelt und dargestellt werden.

Das komplexe Werkstoffverhalten beim Radialclinchen wurde ausgehend von der Phasenteilung des Fügeprozesses in eine Durchsetzphase und in eine Stauchphase beschrieben und die Fügekraft des Radialclinchens berechnet. Bei der Modellierung wurden Ansätze zur Kontaktflächenberechnung aus dem Taumelpressen übertragen. Das Modell ist die Grundlage für ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Fügekraft unter Berücksichtigung der partiell eingeleiteten Fügekraft. Das Berechnungsmodell wurde durch Experimente mit verschiedenen Blechwerkstoffen und Fügegeschwindigkeiten verifiziert.

Zur Überwachung des Verbindungsprozesses und zur Klassifikation von Fehlern wurde ein System auf der Basis neuronaler Netze entwickelt. Hierbei wurden aussagekräftige Merkmale aus den Prozesssignalen Weg, Kraft, Drehzahl und Drehmoment extrahiert. Für die besonders geeigneten Backpropagation Netze wurde ein Verfahren zur Parametrisierung und Festlegung der Topologie und Lernregeln aufgezeigt. Das entwickelte Netz wurde in einer Standard-Softwareumgebung realisiert. Durch Versuche konnte gezeigt werden, dass unzulässige Prozesszustände mit einer hohen Genauigkeit erkannt werden. Die Prozessfehler konnten gut klassifiziert werden. Abschließend erfolgte die Erprobung des Gesamtsystems in einer Versuchsanlage zum flexibel automatisierten Radialclinchen. Mit der Erprobung an repräsentativen Bauteilen aus dem Nutzfahrzeugbereich konnte die Umsetzbarkeit des Radialclinchens in einer automatisierten Fertigungszelle nachgewiesen werden. Die Versuchsanlage zum flexibel automatisierten Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe erfüllt die gestellten Anforderungen. Nach der Analyse der Fehler und der Berücksichtigung der aufgezeigten Verbesserungspotenziale können die Voraussetzungen für den industriellen Einsatz des automatisierten Radialclinchens geschaffen werden. Durch die Entwicklung des flexibel automatisierten Radialclinchens wurden neue Einsatzmöglichkeiten für die umformtechnische Fügetechnik erschlossen.

10 Summary

Automated and process monitored radial spot clinching of higher strength sheet metal

Introduction

Spot clinching is an innovative mechanical joining method with a high potential for the joining of sheet metal. The advantages of the spot clinching process are the little introduction of heat into the material, high joint strengths and a simple process. However the widespread application of mechanical joining methods suffer from the high joining forces which are required to produce a joining element. These joining forces can reach up to 100 kN depending on the strength of the material and the thickness of the sheet metal to be joined. This results in heavy process equipment which is difficult to handle especially in automated robot applications. Flexible combinations with other cold joining methods like semi-tubular riveting are not possible. Additionally up to now process monitoring systems are not able to give a detailed answer to the reason of process problems. This would be beneficial for the integration in production systems to allow a predefined strategy in case of malfunctions.

Thus the goal of the work presented is the development of a new and flexible spot clinching method for reducing the joining force dramatically and optimising the strength of the joining elements. It is based on the development of a theoretical approach for the calculation of the joining forces, allowing the dimensioning of joining equipment and additionally a process monitoring system with a failure classification for the safe production was developed.

Analysis of the current situation

For the introduction into the current situation of spot clinching basic clinching methods are shown and an exemplary joining process is depicted. The challenges of high joining forces in spot clinching are widely known in industry and there have been various approaches to tackle the problem. One approach is to use light weight tooling equipment. Three designs of light weight tooling equipment are shown. However the core problem of high joining forces due to the process are not addressed by this concept. Another, more promising approach is the reduction of joining forces by using an alternative joining process. Different joining methods are ex-

amined and evaluated. Joining processes with a superimposed movement have a high potential for force reduction, generate low noise and are widely known in industry for riveting applications. Especially the punch path on a hypocycloid path allows a flexible combination with semi-tubular riveting and is therefore selected for further developments.

To meet the industrial requirements for the new joining process a survey in relevant industries was carried out. The following systems and parameters were examined: the machines for radial riveting, current process monitoring systems and methods, product range, the main boundary conditions with respect to production technique, the main obstacles for automation and possible problems in the joining process. Questions in respect to strengths and properties of the sheet metal used, surface conditions, number of joints per product, main diameter of the clinching elements, number of variants and remaining production time for a spot clinch element and existing automation problems were raised and answered.

Based on the survey and a technical literature review the main areas of development and the boundary conditions for the further development of radial clinching were deducted.

Design of subsystems for radial clinching

Based on the first process knowledge alternative approaches were developed in a morphologic procedure and optimal concepts for the set up of a demonstrator of a radial clinching system were selected. The following subsystems were considered:

- Basic tool geometry
- Allocation of the radial motor
- Relevant information for the process monitoring system
- Procedure for evaluating the information

Experimental verification of the joint strength and concepts for industrial applications

A prerequisite for the acceptance in industry is the high strength of the joining elements. The joining elements have to have the same characteristics particularly to common clinch joints produced by a conventional punch movement. Therefore a joining system was set up and experiments with various punch diameters and geometries were carried out with standard industrial cavities. The results show that the joining elements with radial clinching achieve the same strength as conventional joining elements. Furthermore a model for the interrelation of the parameter joining force, revolution and joining time in two approaches was introduced and verified. The model allows the calculation of production parameters based on this basic knowledge.

Theoretical approach

In order to determine and quantify the parameters for radial clinching theoretical and extensive experimental investigations were carried out on the joining force for radial clinching, i. e. strength of material, sheet metal thickness, punch diameter, work hardening exponent, factor of superimposement and process speed. For this purpose, the influencing parameters were identified. The wide variety of parameters was focused and a process description for radial clinching was illustrated. The parameters can be categorised in parameters belonging to the material, to the tooling, to the process and parameters of the clinching element.

Derived from the analysis of the whole radial clinching process two main process phases were identified and drawn in a force time diagram. The first phase is the phase which can be compared to deep drawing. The second phase can be described as a compression of the material. Due to the complex material behaviour in metal forming processes an approach known from massive forming was transferred to the radial clinching in order to be able to describe the rolling effect on the contact area. The process parameters for stroke in feed and radial constant were calculated. Based on the process parameters the relationship of contact area for each process phase the joining force was calculated. These figures were the basis for the calculation of the first and the second phase. The force calculation was based on deformation resistance and the deformation coefficient was intergraded to calculate

the shaping force for the first phase. The force development was depicted in a load-displacement diagram. For the second phase the shape force for plastic deformation was introduced and the mean compression stress with the mean shaping factor was calculated using the upper boundary method based on the calculation of the specific shape performance. With integration of the calculation of the yield stress the joining force for the second phase can be calculated and shown in a load-displacement diagram. To complete the force calculation and to extract the bending of the die holder the die holder bending factor was calculated and allowed for the model. The three parts of the calculation were integrated and used to compare the real forces with the calculated for two different materials. The comparison shows a good compliance with the calculated force and is thus a valid verification of the model.

Process control

For means of statistical process control neuronal networks offer a variety of advantages. Therefore neuronal networks are used to realise the process surveillance with the aim to classify process problems and to apply a failure strategy. The software for the neuronal network was developed based on the neuronal networks tool box of Matlab´s Simulink software. So it is possible to develop a tailored software for process monitoring even with limited software capacities.

The development of a failure classification starts with the selection and measurement of relevant signals. In a second step useful methods to analyse the signals are determined and significant characteristics are extracted. Based on the preparatory work models of neuronal networks are developed and selected.

The developed neuronal networks are based on back propagation and a certain number of neurons in the hidden layer. The developed network were validated by using new sample data. The results show a good respond to failure detection.

Conclusion

As proof of the technical feasibility and for verification of the theoretical results a pilot system for an automatic radial clinching system was realised and tested on an exemplary product. The potential for the force reduction and the strength of the joined elements were shown. A force reduction from up to 80 percent is possible

without any compromises in the strength of the joining elements. Furthermore the developed process monitoring system was implemented and tested. 6 percent of wrongly clinched elements were not detected, whereas the accuracy of the correct classification laid by 84,8 percent. A mal clinching detected was allocated to the right class in most of the times. Compared to conventional clinching tooling the weight of the prototype system was reduced from 180 kg to 137 kg.

With the realisation of the developed radial spot clinching system and the control system based on neuronal network the technical feasibility of a force reduced clinching technology was proven.

Outlook

For an industrial application of the radial spot clinching system the following further developments will allow a wide spread application:

- Development of radial clinching tools with a higher number of revolutions per minute,
- Reduction of the number of experiments for training the process monitoring system based on neuronal networks,
- Reduction of the clinching systems accelerated mass to reduce the dynamic behavior of the system,
- Integration of a riveting system to enlarge the application areas of the radial spot clinching system.

The work shows the technical feasibility of the approach to use radial clinching as a method for force reduced clinching.