

Lightweight Construction Using Cold Forming of Mechanical Joining Elements

The subject of „lightweight construction“ is what everyone is talking about, not least due to the regulation of CO₂ emissions for new European cars to 95 grams in 2020. The weight reduction of a single nut may seem pointless; however, there are two clear main reasons for an in-depth consideration of this type of C-goods: On the one hand, the high volume of joining elements in a passenger vehicle; in the region of the drive train and chassis of a mid-

range passenger vehicle alone, this is close to 23 kg of joining elements [1]. On the other hand, joining elements demonstrate a high potential for geometric lightweight construction due to the normatively conditioned (over)dimensioning based on simplifying assumptions within the analytical basis, the so-called „Alexander Technique“ [2]. By applying adapted numerical design methods, a significant weight reduction is possible by adhering to given structural and mechanical constraints. In this case, partial volumes which do not directly contribute to the bearing capacity [3] are definitively reduced.

Leichtbau durch Kaltumformung mechanischer Verbindungselemente

Dr.-Ing. Peter Unseld,
Dr.-Ing. Levente Kertesz und
Dr.-Ing. Günther Meßmer, Spaichingen

Nicht zuletzt durch die Reglementierung des CO₂-Ausstoßes für europäische Neuwagen auf 95 Gramm im Jahr 2020 ist das Thema „Leichtbau“ in aller Munde. Die Gewichtsreduktion an einer einzelnen Mutter mag zunächst nur wenig Sinn machen, jedoch sprechen zwei Hauptgründe klar für eine eingehende Betrachtung dieser Art von C-Gütern: Zum einen die Masse an Verbindungselementen in einem Pkw; alleine im Bereich des Antriebsstrangs und des Fahrwerks eines

Mittelklasse-Pkws sind dies zirka 23 kg Verbindungselemente [1]. Zum anderen zeigen Verbindungselemente durch die normativ bedingte (Über)-Dimensionierung auf Basis vereinfachender Annahmen innerhalb der analytischen Grundlage, der sogenannten „Alexander Theorie“ [2], hohes Potenzial für geometrischen Leichtbau. Unter Anwendung angepasster numerischer Auslegungsmethoden ist eine signifikante Massenreduktion unter Einhaltung gegebener struktureller Randbedingungen möglich. Hierbei werden Teilvolumina, die nicht unmittelbar zur Tragfähigkeit [3] beitragen, definiert reduziert.

Gesamtheitliche Auslegungsstrategie

Um die resultierenden Produkt- und Bauteileigenschaften erfassen, vorhersagen und optimieren zu können, müssen der jeweils durchlaufende Fertigungsprozess, die „Wertschöpfungshistorie“, und die sich daraus ergebenden „intrinsischen“ Einflussgrößen (zum Beispiel Werkstofffehler, Eigenspannungen infolge der eingebrachten Erhöhung der Versetzungsdichte/Kaltverfestigung) in eine gesamtheitliche Betrachtung einbezogen werden. Somit ist in Anlehnung an Ashby [4] das Zusammenwirken von Werkstoff/Material, Konstruktion (Form und Gestalt), Fertigung und Funktion in eine Gesamt-Auslegungsstrategie mit zu berücksichtigen.

Angepasste Werkstoffe

Im Bereich mechanischer Verbindungselemente finden auf Basis normativer Vorgaben [5, 6] unlegierte Stähle [7, 8], Einsatzstähle [9] und Vergütungsstähle [10] Anwendung. Bainitische Werkstoffgüten, wie beispielsweise der Werkstoff 7MnB8 (1.8976), zeigen hohes Leichtbaupotenzial, indem diese gute Zähigkeitseigenschaften (Umformbarkeit) für die Kaltmassivumformung bei ausreichenden Festigkeitseigenschaften auch ohne anschließende Schlusswärmebehandlung bieten.

Das Eigenschaftsprofil derartiger Stähle wird durch eine Kombination aus temperaturregelmäßigem Walzen unter Zusatz von

Mikrolegierungselementen eingestellt. Die gewünschten mechanischen Eigenschaften am Mutterkörper werden über eine abgestimmte Kombination der Walzdrahtfestigkeit aus dem Ziehabzug und der innerhalb der Umformung eingebrachten Kaltverfestigung erzielt. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs 7MnB8 ist nachfolgender Tabelle zu entnehmen.

Konstruktion durch gekoppelte numerische Berechnungsverfahren

Im Teilgebiet Umformung wird das Fließverhalten des Werkstoffs in Abhängigkeit verschiedener Parameter abgebildet. Ergebnisse derartiger numerischer Abbildungen sind neben

	C	Si	Mn	P	S	Al	B	Mo	Nb	Ti	V
Min.						0,015					
Max.	0,12	0,60	2,00	0,025	0,015		0,005	0,5	0,09	0,22	0,20

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung in Masseprozent: Werkstoff 7MnB8 (1.8976).

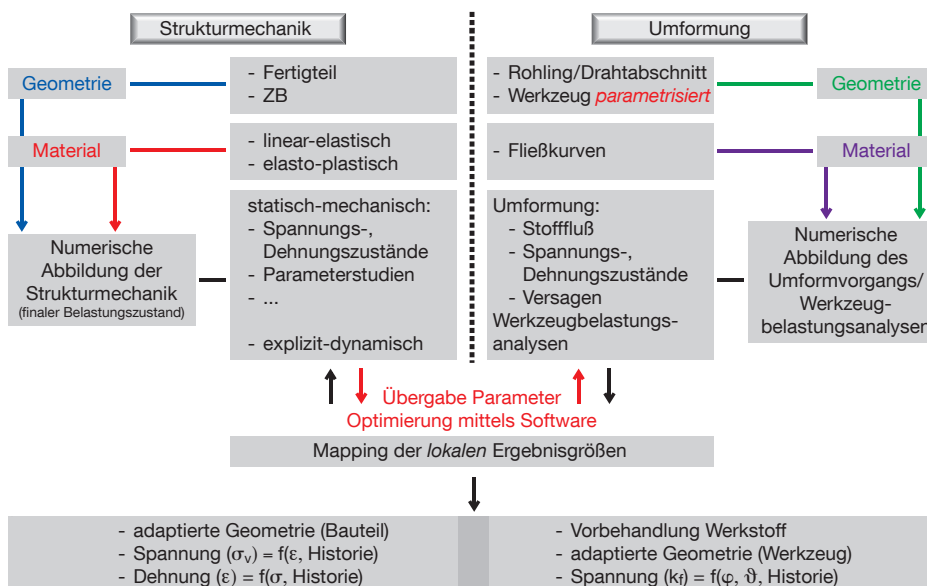


Bild 1: Gesamtheitliche numerische Auslegungsmethode im Bereich „Fasteners“.

der finalen Geometrie orts aufgelöste Spannungs- und Dehnungszustände infolge des Umformvorgangs. Diese werden als Initialgrößen/ Optimierungsvariablen einer strukturellen Auslegung zugänglich gemacht.

Als Ergebnisse der numerischen Betrachtung der Strukturmechanik werden Variablen wie zum Beispiel der Vergleichsspannungszustand und die plastische Dehnung einer Optimierungssoftware als Optimierungsvariablen verfügbar gemacht, um den Umformprozess in Abhängigkeit des herrschenden Lastkollektivs unter Einhaltung umformtechnischer Randbedingungen zu optimieren. Somit können das Zieldesign, die Umformparameter oder die Materialien zielgerecht adaptiert werden (Bild 1).

Fertigung

Gemäß Koop und Wiegels [11] dienen Umformprozesse heutzutage nicht nur der Erzeugung von Werkstücken oder Halbzeugen mit komplexer Gestalt aus Rohteilen mit

einfacher Geometrie. Sie ermöglichen auch eine gezielte Beeinflussung der Werkstoff- und Bauteileigenschaften wie Festigkeit, Zähigkeit, Lebensdauer, etc. Hinsichtlich der Anlagentechnik zeigt Bild 2 eine der weltgrößten horizontalen Mehrstufenpressen mit sechs Umformstationen und einer Gesamtpresskraft von 9.000 kN, die 2010 am Standort Spaichingen installiert wurde.

Die wesentlichen Vorteile der Kaltumformung [12] gegenüber der Warmumformung ergeben sich durch

- den Entfall der notwendigen Erwärmung des Umformguts vor der Umformung,
- hohe Maß- und Formgenauigkeit (innerhalb bestimmter Toleranzen),
- hohe erreichbare Oberflächengüten,
- eine Fertigung mit hoher Arbeitsproduktivität beziehungsweise hoher Mengenleistung,
- geringe Werkstoffverluste,
- günstige strukturelle Eigenschaften infolge Kaltverfestigung, zum Beispiel nicht unterbrochener Faserverlauf.

Funktion

Zentrale Größe der strukturellen Auslegung von Muttern ist die sogenannte „kritische“ Einschraubtiefe beziehungsweise die erforderliche Mutterhöhe. Diese liegt vor, wenn die Tragfähigkeit der ineinandergreifenden Gewindegänge gleich der des freien belasteten Schraubengewindes ist.

Gemäß Kloos und Thomala [15] gilt, dass diese kritische Einschraubtiefe und damit die Abstreiffestigkeit von einer Vielzahl von Faktoren, die sich zum Teil gegenläufig beeinflussen, abhängt. Dies sind die Gewindeform, der Gewindenennendurchmesser und die -steigung, die Gewindetoleranzen, die Mutterform und Schlüsselweite, die relative Festigkeit und Zähigkeit der Werkstoffe, der Belastungszustand, sowie eventuell vorhandene Gewindeeinsätze.



Bild 2: Horizontale 6 Stufen-Kaltumformpresse mit 9.000 kN Presskraft.

Nach [13] ist es durch das Berechnungsmodell nach Alexander [2] möglich, das Abstreifen des Bolzen- und/oder Muttergewindes vorherzusagen. Die Gleichung zur Berechnung der erforderlichen Einschraubtiefe beziehungsweise Mutterhöhe für den Fall des „Muttergewindeabstreifens“ (Scherfestigkeitsverhältnis $0,4 < R_s < 1$) lautet gemäß Formel 1 beziehungsweise für den Fall des „Bolzengewindeabstreifens“ (Scherfestigkeitsverhältnis $1 < R_s < 2,21$) nach Formel 2:

Formel 1

$$m_{\text{eff min}} = \frac{A_s \cdot R_{mB} \cdot P}{0,6 \cdot C_1 \cdot C_3 \cdot \pi \cdot d \cdot \left[\frac{P}{2} + (d - D_2) \cdot \tan 30^\circ \right] \cdot R_{mM}} + 0,8 \cdot P$$

Formel 2

$$m_{\text{eff min}} = \frac{A_s \cdot P}{x \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \left[\frac{P}{2} + (d_2 - D_1) \cdot \tan 30^\circ \right]} + l_B \cdot \left[1 - \frac{D_m}{D_1} \cdot \frac{\frac{P}{2} + (d_2 - D_m) \cdot \tan 30^\circ}{\frac{P}{2} + (d_2 - D_1) \cdot \tan 30^\circ} \right]$$

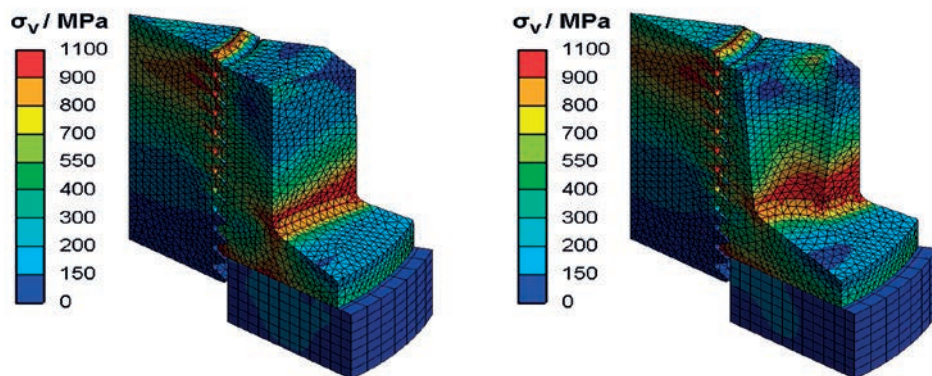


Bild 3: Vergleichsspannungszustand σ_v (von Mises) auf Basis eines Prüflastversuchs nach DIN EN ISO 898-2 [5]. Links: Sechskantmutter, rechts: Leichtbaumutter, jeweils mit Flansch M 14 x 1,5.

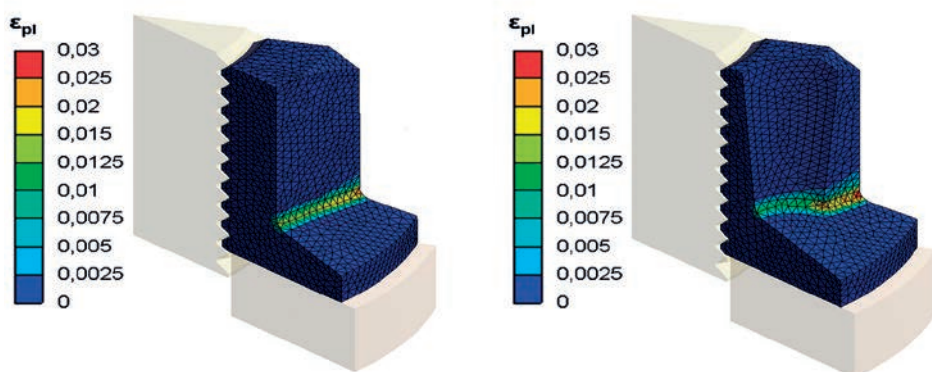
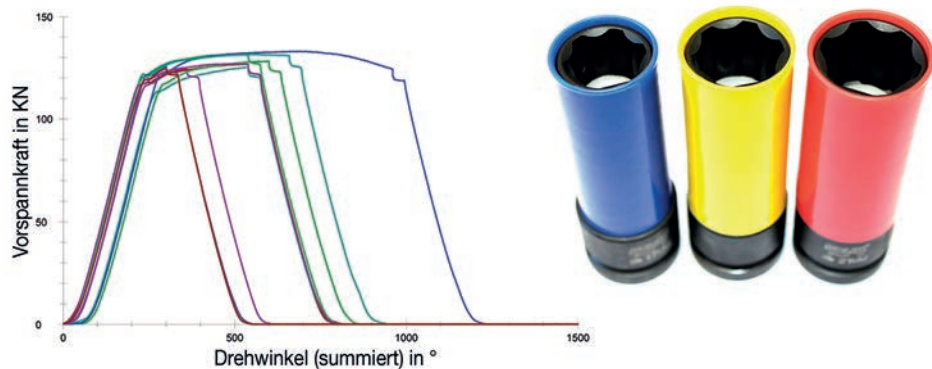


Bild 4: Plastische Vergleichsdehnung ϵ_{pl} auf Basis eines Prüflastversuchs nach DIN EN ISO 898-2 [5]. Links: Sechskantmutter, rechts: Leichtbaumutter, jeweils mit Flansch M 15 x 1,5.



							Mittl. Kopfdurchmesser: 10,5 mm			
Legende	Nr	Max M_A Nm	M_G Step 1 Nm	M_K Step 1 Nm	Max M_A Step 1 Nm	F_v Step 1 kN	μ_{ges} Step 1	μ_G Step 1	μ_K Step 1	Max F_v kN
	17	468,36	106,07	305,46	433,24	131,99	0,31	0,15	0,44	-
	18	426,29	109,55	310,27	420,87	125,56	0,33	0,16	0,47	-
	19	453,69	124,80	290,80	436,16	125,37	0,33	0,19	0,44	-
	20	493,51	122,52	335,06	472,16	124,69	0,37	0,19	0,51	-
	21	485,19	103,63	303,59	485,19	126,74	0,32	0,15	0,46	-
	22	466,74	112,15	294,54	466,74	128,23	0,32	0,16	0,44	-
	23	495,88	108,38	277,14	495,88	124,36	0,31	0,16	0,42	-
	24	468,75	119,26	277,13	468,75	130,98	0,30	0,17	0,40	-
	25	484,53	123,29	301,71	472,11	126,69	0,34	0,19	0,45	-
	26	506,00	128,38	337,45	469,76	124,83	0,38	0,20	0,51	-

Bild 5: Vorspannkraftverlauf bis zum Versagensfall „Bruch im freien belasteten Gewinde des Bolzens“ unter Verwendung eines sog. „Surface Driven“- Werkzeugs.

Es wird offensichtlich, dass die Berechnung der erforderlichen Mutternhöhe von Annahmen wie den Festigkeitsminderungsfaktoren C_1 , C_2 beziehungsweise C_3 abhängig ist, wodurch im Allgemeinen eine Überdimensionierung der Mutterkörper und somit eine Gewichtserhöhung notwendig wird.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der ortsauflösenden numerischen Auslegung einer M14 x 1,5-Sechskantmutter mit Flansch anhand eines Prüflastversuchs nach [5] beispielhaft dargestellt (Bild 3). Die Festigkeitseigenschaften des Mutterkörpers basieren auf ortsauflösenden Ergebnissen der Umformsimulation, welche auf die Fertigteilgeometrie übertragen wurden. Für den Bolzen wurde ein bilinear isotropes Materialmodell auf Basis der vorgegebenen Härtewerte ($H_{\text{Bolzen}} = 320 \text{ HV30} - 380 \text{ HV30}$) definiert [14]. Die Gegenlage wurde bei allen Simulationen als „quasi starr“ definiert.

Werden die Ergebnisse der strukturmekanischen Simulationen für die Referenzgeometrie mit den Ergebnissen für die Leichtbaumutter verglichen, zeigen sich sowohl unter Betrachtung des Vergleichsspannungszustandes (von Mises) als auch der plastischen Vergleichsdehnung analoge Ergebnisse.

Neben der Einbeziehung von Ergebnissen aus ergänzenden numerischen Parametervariationen auf Basis stofflicher, geometrischer und/oder Systemparameter (Reibwert) wurden umfassende Versuchsreihen durchgeführt, welche nicht nur die strukturmekanischen Randbedingungen im verbauten Zustand, sondern ebenfalls Randbedingungen innerhalb des Verschraubprozesses berücksichtigten. So wurden beispielsweise unter Kenntnis des analytischen Ansatzes zur Beanspruchung und Haltbarkeit von Kraftangriffsflächen und Montagewerkzeugen [15] umfangreiche Versuche mit unterschiedlichsten Werkzeugen für den Montage- und Servicefall durchgeführt, um das Konstruktionsprinzip von Schraubverbindungen „Bruch im freien belasteten Gewinde des Bolzens“ einzuhalten.

Auf Basis der analytischen und numerischen Auslegung konnte unter Einbeziehung der durchgeführten Versuche mit statischen und dynamischen Belastungszuständen aufgezeigt werden, dass es möglich ist, unter Einhaltung gegebener strukturmekanischer Randbedingungen eine Massenminimierung durch definierte Reduktion von Teilvolumina, die nicht unmittelbar zur Tragfähigkeit beitragen, zu vollziehen.

Fazit

Durch die Entwicklung einer patentierten Leichtbaumutter (Bild 6) konnten nachfolgende Ziele erreicht werden:

- signifikante Massenreduktion von bis zu 20 Prozent gegenüber konventionellen Norm-Muttern [16, 17, 18, 19],

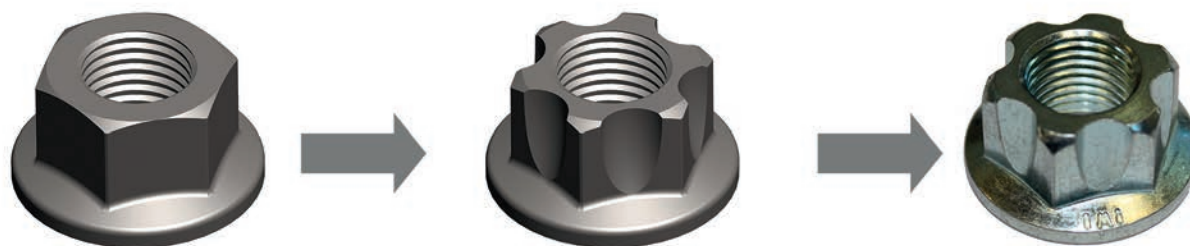


Bild 6: Entwicklung der Leichtbauvariante am Beispiel einer Sechskantmutter mit Flansch, M14 x 1,5.

Bilder: Autoren

- Entfall der Wärmebehandlung (Vergüten) zur Erzielung einer Festigkeitsklasse „10“ gemäß DIN EN ISO 898-2 [5],
 - Gewährleistung der Verschraubung mit konventioneller Schraubtechnik, das heißt keine Notwendigkeit zur Adaptierung der Schraubenanlagen,
 - Kostenreduzierungs-potenzial von bis zu 10 Prozent.
- Unter anderem arbeitet die HEWI G. Winker GmbH & Co. KG in Kooperation mit

einem namhaften deutschen OEM aktuell daran, eine Teilefamilie von Muttern unter Anwendung des beschriebenen Leichtbauprinzips in den Großserieneinsatz zu überführen. ■

Literatur

[1] Ernst, Ch. S.; Göbbels, R.; Olschewski, I.: Leichtbaupotentiale massivumgeformter Komponenten im Pkw, Abschlussmeeting Initiative Massiver Leichtbau; Oktober 2013.

[2] Alexander, E. A.: Analysis and Design of Threaded Assemblies; Society of Automotive Engineers, International Automotive Engineering Congress and Exposition; Detroit, Report- No.770420; 1977.

[3] Definition Tragfähigkeit: Festigkeitsverhalten gekerbter Bauteile, im vorliegenden Fall Muttern, gegenüber mechanischer Beanspruchung.

[4] Ashby, M. F.: Materials Selection in Mechanical Design; 3. Auflage; Oxford: Butterworth-Heinemann; 2005.

[5] DIN EN ISO 898-2: Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl; Teil 2: Muttern mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regelgewinde und Feingewinde; Deutsche Fassung; August 2012.

[6] DIN EN ISO 2320: Sechskantmuttern aus Stahl mit Klemmteil; Mechanische und funktionelle Eigenschaften; Deutsche Fassung; März 2009.

[7] DIN EN 10263-1: Walzdraht, Stäbe und Draht aus Kaltstauch- und Kaltfließpressstählen; Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung; Februar 2002.

[8] DIN EN 10263-2: Walzdraht, Stäbe und Draht aus Kaltstauch- und Kaltfließpressstählen; Teil 2: Technische Lieferbedingungen für nicht für eine Wärmebehandlung nach der Kaltverarbeitung vorgesehene Stähle; Deutsche Fassung; Februar 2002.

[9] DIN EN 10263-3: Walzdraht, Stäbe und Draht aus Kaltstauch- und Kaltfließpressstählen; Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Einsatzstähle; Deutsche Fassung; Februar 2002.

[10] DIN EN 10263-4: Walzdraht, Stäbe und Draht aus Kaltstauch- und Kaltfließpressstählen; Teil 4: Technische Lieferbedingungen für Vergütungsstähle; Deutsche Fassung; Februar 2002.

[11] Koop, R.; Wiegels, H.: Einführung in die Umformtechnik; 1. Auflage ed.; Verlag der Augustinus Buchhandlung; Aachen, 323pp.; 1998.

[12] VDI 3137: Begriffe, Benennungen, Kenngrößen des Umformens; Januar 1976.

[13] VDI 2230: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen; Februar 2003.

[14] DIN EN ISO 898-1: Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl; Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regelgewinde und Feingewinde; Deutsche Fassung; August 2009.

[15] Kloos, K.-H.; Thomala, W.: Schraubverbindungen – Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung; 5. Auflage; Springer- Verlag Berlin Heidelberg New-York; 2007, ISBN 3-540-21282-9.

[16] DIN EN 1661: Sechskantmuttern mit Flansch; Europäische Fassung; Februar 1998.

[17] DIN EN 1664: Sechskantmuttern mit Klemmteil und Flansch, Ganzmetallmuttern, Europäische Fassung; Februar 1998.

[18] DIN EN 14218: Sechskantmuttern mit Flansch, Feingewinde; Europäische Fassung; September 2003.

[19] DIN EN 1667: Sechskantmuttern mit Klemmteil und Flansch; Europäische Fassung; Februar 1998.

HEWI G. Winker GmbH & Co. KG, Dellinger Weg 1, 78549 Spaichingen

Die HEWI G. Winker GmbH & Co. KG ist seit über 50 Jahren weltweit bekannt als zuverlässiger Partner im Bereich Verbindungstechnik mit höchsten Ansprüchen. Das Unternehmen mit derzeit 500 Mitarbeitern gilt nicht nur als Spezialist für Teile mit Innengewinde, speziell im Bereich Fahrwerkstechnik für Pkw und Lkw, sondern auch als Ideenschmiede, aus der hochinnovative Lösungen im Bereich komplexer kaltumgeformter Fließpressteile kommen.



Dr.-Ing. Peter Unsel



Dr.-Ing. Levente Kertesz



Dr.-Ing. Günther Meßmer