

2. Pforzheimer Werkstofftag

TAGUNGSBAND

26. September 2013
CongressCentrum Pforzheim
www.pforzheimer-werkstofftag.de

HOCHFORM

CLUSTER INITIATIVE
METALL · DENTAL · MEDIZIN
PRÄZISIONSTECHNIK AUS PFORZHEIM



HOCHSCHULE PFORZHEIM

Impressum

Herausgeber: Prof. Dr. Ansgar Häfner, Prof. Dr. Norbert Jost, Prof. Dr. Karl-Heinz Rau, Prof. Dr. Roland Scherr,
Prof. Dr. Christa Wehner, Prof. Dr. Hanno Beck (geschäftsführend; hanno.beck@hs-pforzheim.de)

Ausgabe: September 2013

ISSN-Nr.: 0946-3755

**TAGUNGSBAND ZUM
2. PFORZHEIMER WERKSTOFFTAG**
Band 145

**der Publikationsserie „Focus Werkstoffe“
Norbert Jost, Roman Klink (Hrsg.)**

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost, Roman Klink Vorwort der Herausgeber | 6 |
| Prof. Dr.-Ing. Frank Henning – Fraunhofer Institut für Chemische Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik am KIT Innovative Leichtbaukonzepte und deren technische Umsetzung | 7 |
| Ursula Christian – Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien, Hochschule Pforzheim Systematische Vorgehensweise bei der Schadensanalyse, demonstriert am Beispiel von zwei Federbrüchen | 15 |
| Thomas Dann – Schneeberger GmbH Einsatz eines magnetischen Längenmesssystems in Werkzeugmaschinenumgebungen und die daraus resultierenden Herausforderungen für die Werkstoffauswahl | 29 |
| Prof. Dr.-Ing. Matthias Golle – Hochschule Pforzheim Zukunftsperspektiven in der Stanztechnik | 39 |
| Andreas Adler – Kramski GmbH Konzeption und Fertigung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen | 45 |
| Michael Däbritz – Varioplast Konrad Däbritz GmbH Ressourcenschonende Leichtbau-Verpackung in Kunststoff-Hybrid-Bauweise | 53 |
| Timo Schuler – RIA-Polymers GmbH Gewichtsreduzierung durch Leichtbau mit PP-Compounds | 65 |
| Regina Weinland – Hochschule Pforzheim Gezielte Werkzeugtemperierung für optimierte Spritzgießbauteile | 71 |
| Horst Opielka Vom Stahl zum Aluminium und von der Knetlegierung zum Guss. Zu Qualitätskriterien von Aluminium-Gusslegierungen | 95 |

**Miriam Eisenbart – Forschungsinstitut für Edelmetalle
und Metallchemie**

Herstellungs- und Anwendungsmöglichkeiten massiver
metallischer Gläser auf Edelmetallbasis **101**

Bernd Seeger – Witzenmann GmbH

Labor trifft Feld – wenn die Laborprobe ins Feld geht.
Werkstoffauswahl bei stark streuender Korrosionslast **117**

Corinna Ruess – Profiltech Stufenbandprofile GmbH

Fertigungs- und Einsatzmöglichkeiten von gefrästem Stufenband **131**

**Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge
der Hochschule Pforzheim**

140

Vorwort der Herausgeber

Aufgrund der erfreulichen Tatsache, dass der 1. Pforzheimer Werkstofftag zu einem vollen Erfolg für alle Beteiligten geworden war, lag die Bestrebung nahe, die Tagung als jährliche Institution im Pforzheimer Veranstaltungsgeschehen zu etablieren. Und die bisherige Entwicklung im Verlauf der Vorbereitung hat uns wieder einmal recht gegeben. Zahlreiche Anmeldungen lagen zum Redaktionsschluss bereits vor, so dass auch diesjährig bereits jetzt von einer gut besuchten Tagung zu sprechen ist.

Aufgrund zahlreicher Anregungen seitens der Industrie, die ja primär von dem Tagungsangebot profitieren soll, haben die Veranstalter das Leitthema Leichtbau gewählt, auch mit dem Hintergedanken, hier ein Thema gefunden zu haben, dass vor allem dem Nutzen zukünftiger Fragestellungen in Bezug auf wirtschaftliche, energiesparende und ressourcenschonende Entwicklungen in der industriellen Fertigung dienlich sein soll.

Neben den klassischen Leichtbaukomponenten wie Leichtmetalle und Kunststoffe im Allgemeinen, sollen hier auch die hybriden Konstruktionsmaterialien wegen ihres hohen Freiheitsgrades in strukturellem Design besondere Erwähnung finden. Es sind aber nicht ausschließlich Leichtbauvorträge aufgenommen worden, so dass uns ein sehr abwechslungsreiches Programm erwartet, aus dem die Teilnehmer im zweiten Teil der Veranstaltung wahlweise Kunststoff- oder Metallvorträge besuchen können.

Wir freuen uns also Ihnen eine sehr ausgewogene Zusammenstellung an interessanten Vortragsthemen präsentieren zu können, die allesamt einen direkten Bezug zur industriellen Fertigung haben. Des Weiteren erhoffen wir uns wieder viele anregende Diskussionen rund um die Vortragsthemen und darüber hinaus. Aus organisatorischen Gründen hat es sich als dienlicher erwiesen die Veranstaltung im CCP auszurichten. Wir möchten uns hier bei der Stadt Pforzheim und besonders dem Team der WSP für ihre professionelle Unterstützung bedanken ohne die diese Veranstaltung in diesem Rahmen nicht möglich gewesen wäre. Ein herzlicher Dank auch an die Vortragenden, Teilnehmer und alle weiteren Helfer für ihr Kommen und Engagement. Die Veranstaltung hat dann ihren Sinn und Zweck erfüllt, wenn sich Menschen und Ideen begegnen, die vorher nichts oder nur wenig voneinander gewusst haben und vielleicht einen Konsens finden, der eine gemeinsame Entwicklung zur Folge hat. In diesem Sinne wünschen wir Ihnen viel Freude am regen Informationsaustausch vor Ort und bei der Lektüre des Tagungsbandes.

Pforzheim, im September 2013

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost
Roman Klein

Innovative Leichtbaukonzepte und deren technische Umsetzung

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning,
Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT),
Institut für Fahrzeugsystemtechnik am KIT

Leichtbau als Umsetzung einer Entwicklungsstrategie

Leichtbau ist eine Schlüsseltechnologie für sparsame, emissionsarme und gleichzeitig preiswerte Fahrzeuge für das 21. Jahrhundert. Gewicht einzusparen ist schon lange ein wichtiges Ziel der Automobilentwicklung, denn leichtere Fahrzeuge verbrauchen weniger Kraftstoff und stoßen weniger Schadstoffe aus. Gerade auch elektrisch angetriebene Fahrzeuge müssen möglichst leicht sein, um alltagstaugliche Reichweiten zu erzielen. Fahrzeugstrukturen aus Leichtbauwerkstoffen sollen aber auch die Insassen bei einem Unfall ebenso gut schützen wie herkömmliche Werkstoffe. Zudem sollen sie wirtschaftlich in den geforderten Stückzahlen herstellbar sein. Mit diesem Hintergrund hat der Forschungsschwerpunkt Leichtbau in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Leichtbau ist die Umsetzung einer Entwicklungsstrategie, die darauf ausgerichtet ist, unter vorgegebenen technischen Randbedingungen die geforderte Funktion durch ein System minimaler Masse zu realisieren. Dabei muss die Systemzuverlässigkeit über die gesamte Produktlebenszeit gewährleistet sein. Leichtbau bedeutet aber nicht nur die Verringerung des Gewichts, sondern auch die Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems. Leichtbau erfordert einen ganzheitlichen, interdisziplinären Ansatz, der sich in die Bereiche Methoden, Werkstoffe und Produktion einteilen lässt. Effiziente Leichtbaulösungen hängen neben den technischen Anforderungen zudem auch von den ökonomischen, ökologischen und sozialen Randbedingungen ab. Somit ist effizienter Leichtbau mehr als eine reine Gewichtsminimierung, ein Konstruktionsprinzip oder ein Werkstoff mit geringer Dichte. Er erfordert eine klare Definition der Randbedingungen und eine systemische Betrachtung.

Faserverbund als Leichtbauwerkstoff

Werkstoffe lassen sich auf unterschiedliche Weise optimieren, um hohe Festigkeiten und Steifigkeiten bei geringem Gewicht zu erzielen. Metalle werden mit anderen Metallen in bestimmten Anteilen legiert, Kunststoffe mit verschiedenen Komponenten copolymerisiert oder zu entsprechenden Blends verarbeitet. Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination verschiedener Werkstoffe miteinander, um die positiven Eigenschaften des einen mit denen des anderen Werkstoffs zu kombinieren. Die einfachste Methode ist die Herstellung von Werkstoffverbunden, in denen z. B. äußere Schalen aus einem anderen Material erstellt werden

als der Innenraum, weil beide unterschiedlich beansprucht werden und unterschiedliche Funktionen erfüllen müssen. Eine andere Möglichkeit, um die Eigenschaften von zwei Werkstoffen zu kombinieren, sind die Verbundwerkstoffe. Dabei werden Werkstoffe wie Kunststoffe, Keramik oder Metalle mit unterschiedlichen Materialien, wie beispielsweise in Form von Fasern oder Geweben, kombiniert. Auf makroskopischer Ebene sind die einzelnen Phasen des Verbundwerkstoffs somit nicht mehr ersichtlich.

Der Faserverbundwerkstoff besteht aus zwei Komponenten: einer einbettenden Matrix und den verstärkenden Fasern. Durch Wechselwirkung der Eigenschaften der beiden Komponenten ergeben sich die neuen, optimierten Eigenschaften des Verbundwerkstoffs, welcher mit der einzelnen Komponente an sich nicht erzielbar wäre. Faserverbundwerkstoffe besitzen herausragende Materialeigenschaften bei gleichzeitig geringer Dichte und haben sich daher bereits in der Luft- und Raumfahrt sowie im Rennsport bewährt. In Bezug auf den automobilen Leichtbau werden Faserverbundwerkstoffe zunehmend Stahl in der Fahrzeugstruktur ersetzen und somit zur Gewichtsreduktion signifikant beitragen.

Im Zuge der Integration von Faserverbundkomponenten in bestehende und neue Fahrzeugsysteme, entstehen weitreichende, interdisziplinäre Forschungsfelder. Diese erstrecken sich von Berechnungsmethoden für monolithische Faserverbundbauteile über faserverbundgerechte Konstruktionsweisen bis hin zur komplexen Thematik der Multi-Material-Bauweise und Hybridisierung. Um in diesem Kontext leichte und leistungsfähige Bauteile und Komponenten herzustellen, ist es essenziell, Kompetenzen aus den Bereichen Methoden, Werkstoffe und Produktion (MWP-Ansatz) zu bündeln. Die Komplexität technischer Bauteile bedingt zudem die Notwendigkeit der Funktionsintegration, damit strukturelle Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen in der Anwendung umsetzbar sind.

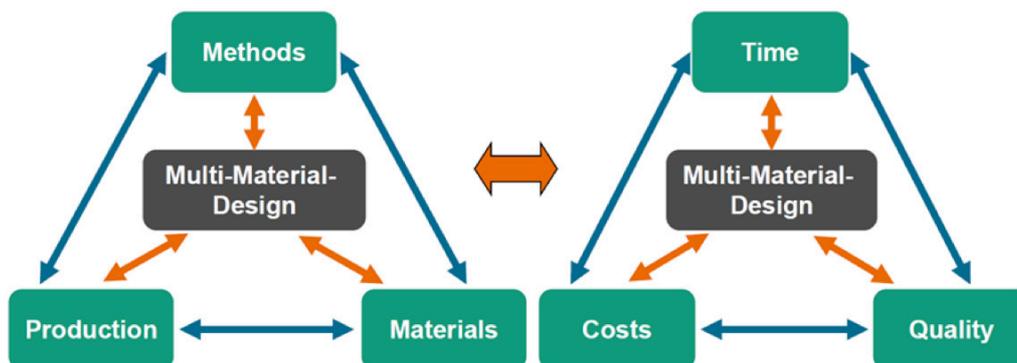


Bild 1: Der interdisziplinäre Ansatz, der die Bereiche Methoden, Werkstoffe und Produktion ganzheitlich betrachtet, führt zu neuen Konstruktionsmethoden des Multi-Material-Designs. Neben der interdisziplinären Betrachtung müssen für eine erfolgreiche und serienfähige Umsetzung auch Kosten, Zeit und Qualität berücksichtigt werden.

Faserverbundtechnologien für die Großserienproduktion von Leichtbaustrukturen

Leichtbau erfordert großserienfähige, robuste Produktionsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen. In dieser Hinsicht sind nur Fertigungsverfahren mit duromerer und thermoplastischer Matrix für den Leichtbau relevant.

Bei den duromeren Kurzfaserverbunden werden im Wesentlichen das sogenannte Bulk Moulding Compound (BMC) und das Reinforced Resin Injection Moulding (R-RIM) eingesetzt.

Die Verarbeitung von kurzglasfaserverstärkten Thermoplasten, bei welchen die Verstärkungsfasern in einem vorangegangenen Compoundierprozess in den Kunststoff eingearbeitet wurden, erfolgt durch Spritzgießen. Aufgrund der größeren Anzahl von freiliegenden Faserenden bei gleichem Fasergehalt wirken sich kurzfaserverstärkte Kunststoffe im Vergleich zu langfaserverstärkten verstärkt negativ auf den Verschleiß von Maschine und Werkzeug aus. Zudem bieten Langfaserverbunde durch bessere Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften ein größeres Potenzial als möglicher Strukturwerkstoff.

Ein bedeutender Vertreter der duromeren langfaserverstärkten Kunststoffe ist das SMC (Sheet Moulding Compound). Die Fasern sind in eine duroplastische Matrix eingebettet, die sich nach dem Aushärten nicht mehr umformen lässt. Vorteile von SMC sind geringe Dichte, Formstabilität, Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit. Außerdem lassen sich bei SMC besonders hohe Oberflächeneigenschaften erzielen, sodass sich der Werkstoff zur Herstellung von Verkleidungsteilen für Fahrzeuge eignet. Die aktuelle Forschung zielt darauf, starke Qualitätsschwankungen sowohl beim Halbzeug als auch bei den daraus gefertigten Bauteilen auf ein Minimum zu reduzieren sowie eine größere Bandbreite von Materialeigenschaften zu verwirklichen.

Auch langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) erobern sukzessive neue Anwendungen in Bereichen der Fahrzeugindustrie. LFT-Technologien werden insbesondere zur Herstellung komplex geformter Bauteile in der Großserienfertigung eingesetzt, wobei sie im Vergleich zu endlosfaserverstärkten Thermoplasten geringere Faservolumenanteile aufweisen. Die Technologien der Langfaserverbundwerkstoffe gliedern sich in die drei Bereiche der glasmattenverstärkten Thermoplaste (LFT-GMT), der langfaserverstärkten Thermoplast-Granulate

(LFT-G) und der Langfaserthermoplast-Direkt-Prozesse (LFT-D). Die mechanischen Eigenschaften von langfaserverstärkten Thermoplasten sind ausreichend für semistrukturale Komponenten. In Kombination mit endlosfaserverstärkten Halbzeugen können langfaserverstärkte Thermoplaste auch für strukturelle Bauteile interessant werden.

Zur großserienfähigen Herstellung struktureller Faserverbundbauteile werden endlosfaserverstärkte Kunststoffe eingesetzt. Eines der bedeutendsten Verfahren zur Fertigung dieser Bauteile ist das Resin Transfer Moulding (RTM)-Verfahren. Beim RTM-Verfahren werden Textilhalbzeuge in Form von Wirrfasermatten, Gelegen oder Geweben in einen endkonturnahen Zustand gebracht. Der sogenannte Preform (Vorformling) wird anschließend in ein Formwerkzeug positioniert. Das zweiteilige Formwerkzeug wird geschlossen und ein duromeres Harzsystem unter Druck in das Formwerkzeug injiziert. Unter Wärme und Druck härtet das Bauteil aus. Durch das RTM-Verfahren entstehen Strukturbauteile mit hoher Festigkeit und hochwertiger Oberfläche. Allerdings müssen einzelne Zwischenschritte derzeit noch manuell ausgeführt werden, was Zeit und Geld kostet. Die aktuelle Forschung konzentriert sich daher auf die Entwicklung einer hochautomatisierten RTM-Fertigungskette, die es ermöglicht, komplexe Hochleistungsfaserverbunde in hohen Stückzahlen wirtschaftlich herzustellen. Damit sollen die Zykluszeiten der RTM-Technologie signifikant gekürzt und die Produktionskosten gesenkt werden. Ziel der Forschung ist zum einen die Weiterentwicklung und Optimierung der Einzeltechnologien – beginnend vom Zuschnitt über das automatisierte Drapieren von Textilien, der Entwicklung großserienfähiger Werkzeugkonzepte bis hin zur Infiltration der Fasern mit schnellaushärtenden Harzsystemen.

Technologiecluster Composites (TC²) und Entwicklung ganzheitlicher Prozessketten für Leichtbaustrukturen

Um die Industrialisierung von Faserverbundbauteilen im Automobilbau voranzutreiben, regte das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg die Gründung eines Technologieclusters Composites (TC²) an. In diesem Cluster werden die Kräfte verschiedener Forschungseinrichtungen im Bereich Verbundwerkstoffe in Baden-Württemberg gebündelt, um gemeinsam die technischen Schwierigkeiten bei der Industrialisierung von Faserverbundbauteilen im Automobil zu überwinden und somit umweltfreundliche Mobilität für das 21. Jahrhundert bereitzustellen. Dadurch wird die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit Baden-Württembergs langfristig gestärkt. Zu den Forschungspartnern gehören das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und die Universität Stuttgart, die Fraunhofer-Gesellschaft mit mehreren Instituten, das Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf, das Automotive Simulation Center Stuttgart (ASCS) sowie die Hochschulen Ravensburg-Weingarten, Esslingen und Konstanz. Der Lehrstuhl für Leichtbautechnologie, geleitet durch Prof. Dr.-Ing. Frank Henning, am KIT wurde aufgrund seiner Vernetzung in der Forschungslandschaft Süddeutschlands, die im Kompetenzzentrum für Fahrzeugleichtbau (KFL) und dem Innovationscluster für hybriden Leichtbau (KITe hyLITE) etabliert wurde, mit der Koordination des Gesamtprojektes beauftragt. Das Projekt TC² soll den Grundstein für eine langfristige Zusammenarbeit der Partner im Bereich Automobilleichtbau legen.

TC² zielt auf die Industrialisierung der RTM- und SMC-Prozesskette zur Fertigung von Struktur- und Außenhautbauteilen aus Faserverbund, mit dem Ziel des serienfähigen Fahrzeugleichtbaus in Verbindung mit innovativen Fertigungskonzepten und -technologien. Herausragendes Merkmal von TC² ist die ganzheitliche Betrachtung der technologischen Herausforderungen, die nicht von Einzelproblemen ausgeht, sondern Zusammenhänge innerhalb durchgängiger Ketten in den Fokus stellt. Für die Industrialisierung werden insbesondere eine durchgängige Kette für die effiziente Massenproduktion sowie eine durchgängige Kette für die virtuelle Produktentwicklung benötigt. Die Schaffung dieser beiden Prozessketten, technologisch und virtuell, steht im Zentrum der Arbeiten in TC². Dafür ist es auch notwendig, Simulationsmethoden und Modelle für die Verbundwerkstoffe zu entwickeln und zu verbessern, um die gesamte Kette – von der Herstellung des Materials bis zum Endprodukt – numerisch abbilden zu können. Dies ermöglicht zum einen die Berücksichtigung relevanter Herstellungseffekte in

der Simulation und Auslegung. Zum anderen erlaubt sie eine iterative Strukturoptimierung und bereitet somit den Weg für eine ganzheitliche Produktentwicklung.

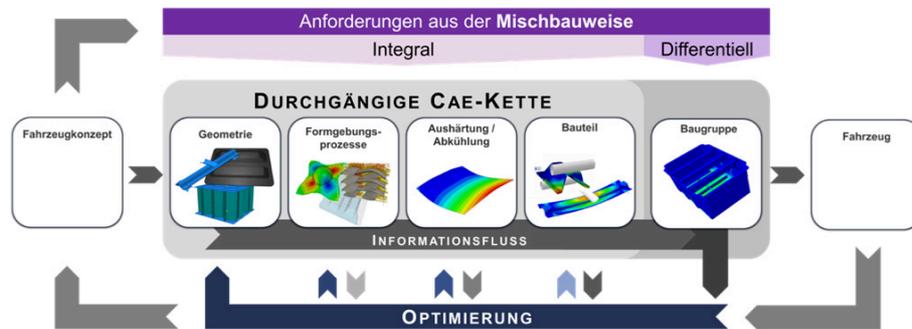


Bild 2: Durchgängige virtuelle Prozesskette für eine ganzheitliche Produktentwicklung von Faserverbundbauteilen.

**Systematische Vorgehensweise bei der
Schadensanalyse, demonstriert am Beispiel von
zwei Federbrüchen**

Ursula Christian,
Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien (IWWT),
Hochschule Pforzheim

Zusammenfassung

Für eine erfolgreiche Schadensbeurteilung ist die systematische Vorgehensweise bei der Untersuchung von entscheidender Bedeutung. Bei den hier vorgestellten zwei Beispielen handelt es sich um Federn aus KFZ-Motoren, deren Bruch zu einer Reihe von Ausfällen geführt hat. Die Fehlerursache war unklar und erst eine umfangreiche Analyse, unter Zuhilfenahme aller in einem gut ausgestatteten Metallographielabor zur Verfügung stehenden Untersuchungsmöglichkeiten, führte zum Erfolg und zur Problemlösung.

Vorgehensweise und Fehleranalyse

Systematik der Untersuchung

Bei der Untersuchung sollte grundsätzlich eine einerseits möglichst umfangreiche, andererseits aber auch eine möglichst spezifische Datensammlung zu einem genauen Bild über die Schadensausprägung führen. Dabei ist das Stereomikroskop als optimierte Lupe das geeignete, wenn nicht sogar das ideale Instrument zum Einstieg in die Untersuchung. Zum einen ermöglicht es einen dreidimensionalen Überblick in einen Vergrößerungsrahmen von 8- bis 200-fach, zum anderen wird durch diese Art der Untersuchung noch eine farbgetreue Wiedergabe der Oberflächen- bzw. Bruchstruktur gewährleistet. Es lassen sich Anlauffarben, Reflexionen, Rastlinien und eventuelle weitere Fehlstellen besser erkennen als mit jeder anderen Untersuchungsmethode.

Anschließend erfolgt dann am besten eine Prüfung der evtl. im Stereomikroskop schon als versagensrelevant erkannten Stellen im Rasterelektronenmikroskop. In dem Vergrößerungsbereich von 15- bis zu mehr als 10.000-fach und einer gleichzeitig herausragenden Tiefenschärfe, lassen sich Bruchmorphologie, Ausbreitung und eventuelle Mikrofehlstellen gut erkennen. Außerdem ermöglicht die EDX Analyse die Ermittlung einer zielgenauen Zusammensetzung kleinster Partikel und/oder interessierender Probenstellen.

Das dabei gewonnene Bild ist entscheidend bei der anschließenden Erstellung der metallographischen Schliffe. Zielführend ist die Auswahl der Trennebene in Längs- oder Querrichtung. Die Betrachtung der gut präparierten Proben erfolgt in der Regel im ungeätzten und im geätzten Zustand bei Vergrößerungen zwischen 50- und 1.000-fach.

Sind dann noch Zweifel an der Ursache vorhanden, bietet es sich an, nach einem Gutteil zu suchen, das entweder aus ausfallfreien Zeiten stammt oder als Rückstellmuster vorhanden sein sollte.

Praxisbeispiel 1 – Untersuchung einer Spiralfeder

Das erste hier vorgestellte Beispiel behandelt eine gebrochene Spiralfeder, die in einem Hydraulikbremssystem eines Kraftfahrzeuges eingebaut war. Bei diesem Fahrzeugtyp handelt es sich um ein Abraumfahrzeug, das bei der Erzgewinnung im Minenbetrieb eingesetzt wird. Der Bruch dieser Feder löste Fahrzeugbrände aus, zwei in Südafrika und einen in England. Die Untersuchungen der beiden ersten Ausfallmuster, die vom Fahrzeughersteller veranlasst wurden, führten nicht zum Abstellen des Fehlers. Mit der Schadensanalyse der Feder aus dem dritten Brand wurde das Steinbeiszentrum Werkstoffentwicklung und Prüfung an der Hochschule Pforzheim beauftragt. Es standen Bruchsegmente der ersten beiden Ausfälle sowie die gebrochene Feder aus dem dritten Brandschaden zur Verfügung.

Die Feder war aus einem hochlegierten austenitischen Stahldraht hergestellt, der durch eine Wärmebehandlung ausscheidungsgehärtet werden kann. **Bild 1** zeigt das aus ausscheidungsgehärteten Martensit bestehende Gefüge.

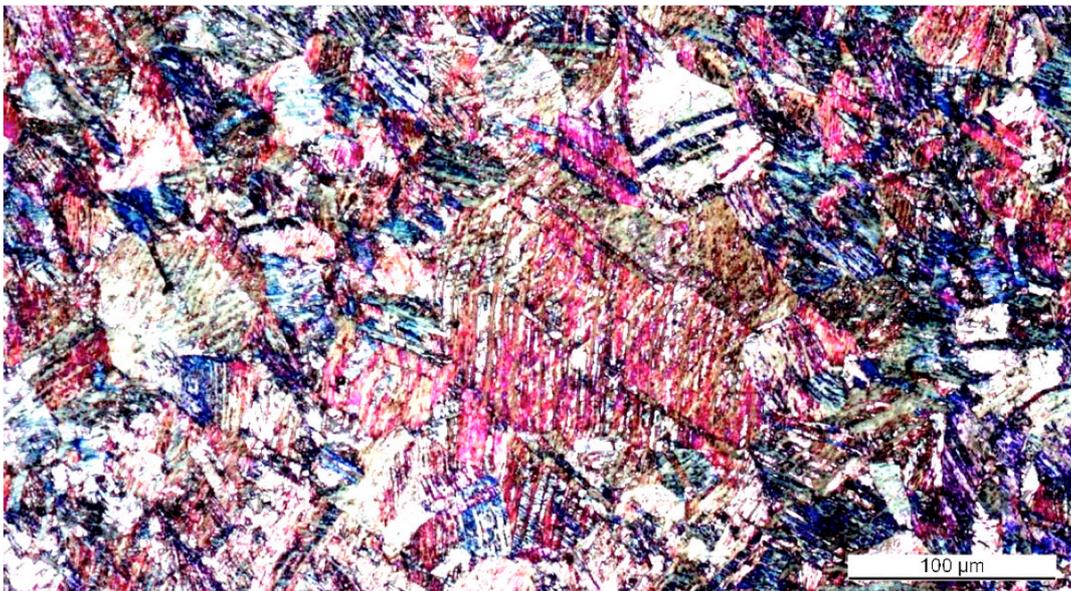


Bild 1

Stereomikroskopische Untersuchung

Bei der Betrachtung der drei Schadensmuster unter dem Stereomikroskop zeigt sich sehr schnell, dass alle Muster neben dem primären bruchrelevanten Riss noch weitere Anrisse aufweisen, die ausnahmslos von der Federinnenseite ausgehen. Das widerlegte zunächst die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen, die den Bruchausgang an der Außenseite erkannt haben wollten. Die Drahtoberfläche weist stellenweise einen grauen Belag auf, (**Bild 2**).



Bild 2

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung

Die nachfolgende Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop lässt eine leicht belegte Bruchfläche mit einer für hochfeste Federwerkstoffe typischen, verformungsarmen Dauerbruchstruktur erkennen. Auf Grund der geringen plastischen Formbarkeit sind hier die Schwingungslinien nur schwach ausgebildet und daher bildtechnisch schwer dokumentierbar, (**Bild 3**).

An der Drahtoberfläche zeigt sich eine recht narbige Oberflächenstruktur mit Einschlüssen. Die EDX-Analyse dieser Partikel gibt deutliche Hinweise auf Rückstände von Ziehmitteln und Salz (offensichtlich aus der Drahtfertigung stammend), (**Bild 4**).

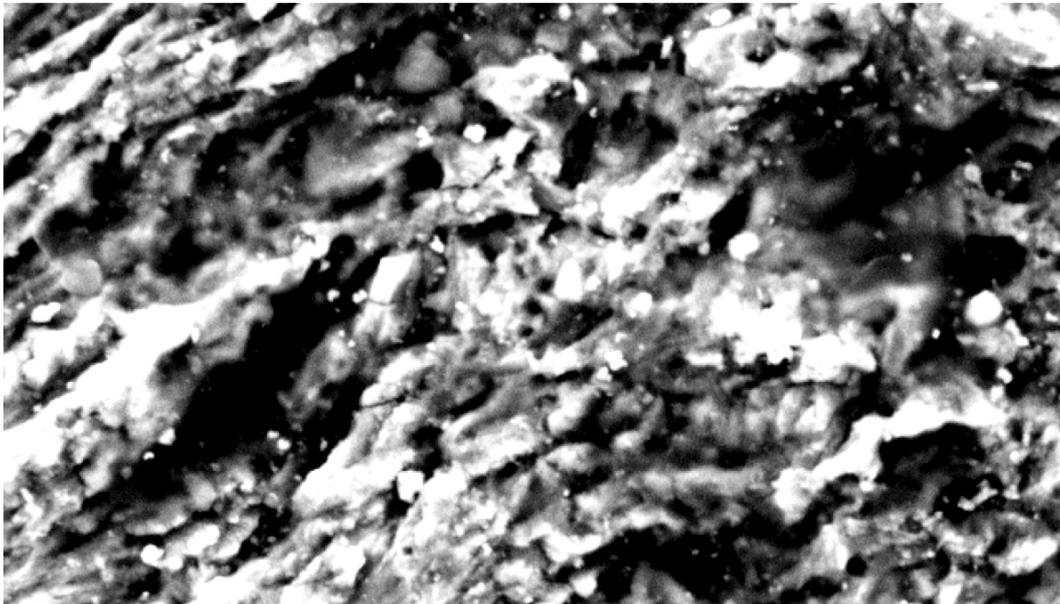


Bild 3

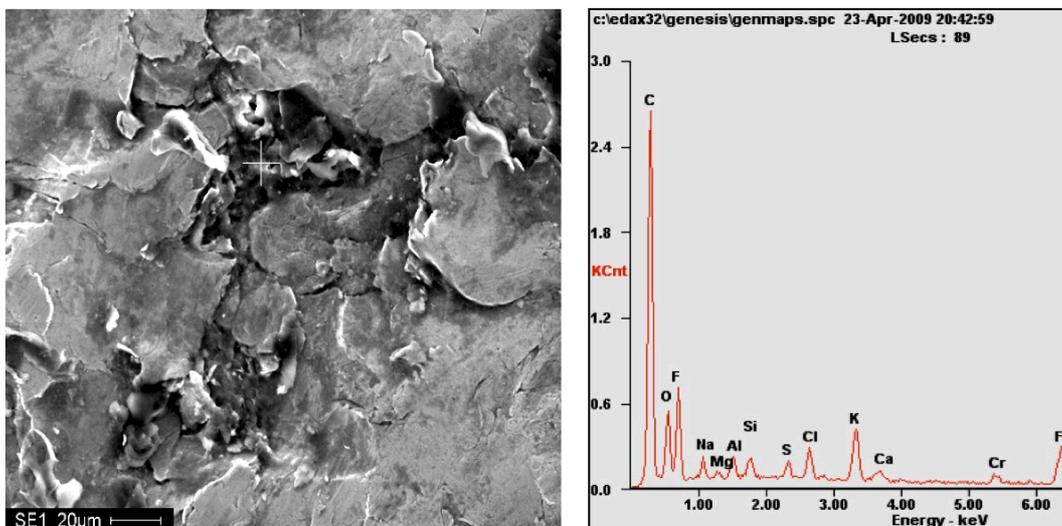


Bild 4

Lichtmikroskopische Untersuchung

Als nächster Schritt erfolgt die zielgenaue Probenahme und Präparation der metallographischen Schlitze. In dem vorliegenden Fall standen zum einen die Bruch- und die Rissflächen im Fokus des Interesses, zum anderen wurde versucht, die grauen Partikel in den Vertiefungen zielpräparatorisch exakt anzuschneiden. Der Rissverlauf und vor allem die Rissausläufe zeigen das typische Fehlerbild für eine hier aktiv am Bruchgeschehen beteiligte Spannungsrisskorrosion, die in dem stark verformten Gefüge sowohl trans- wie auch interkristallin verläuft, (Bild 5). Partiiell sind Korrosionsbeläge sichtbar. Eine punktuelle Analyse einer

mit Salz gefüllten Vertiefung zeigt, dass hier eindeutig die Rissausgänge lokalisiert werden können, (**Bild 6**, siehe Pfeil).

Die hier im praktischen Betrieb eingewirkten permanenten Änderungen der Beanspruchungsspannungen, infolge der zyklischen Federbewegung führen dann zu einer raschen Rissausbreitung, die die spannungsinduzierte Rissgeschwindigkeit massiv vergrößert. Dieses Fehlerbild wird als Schwingungsrisskorrosion bezeichnet.



Bild 5

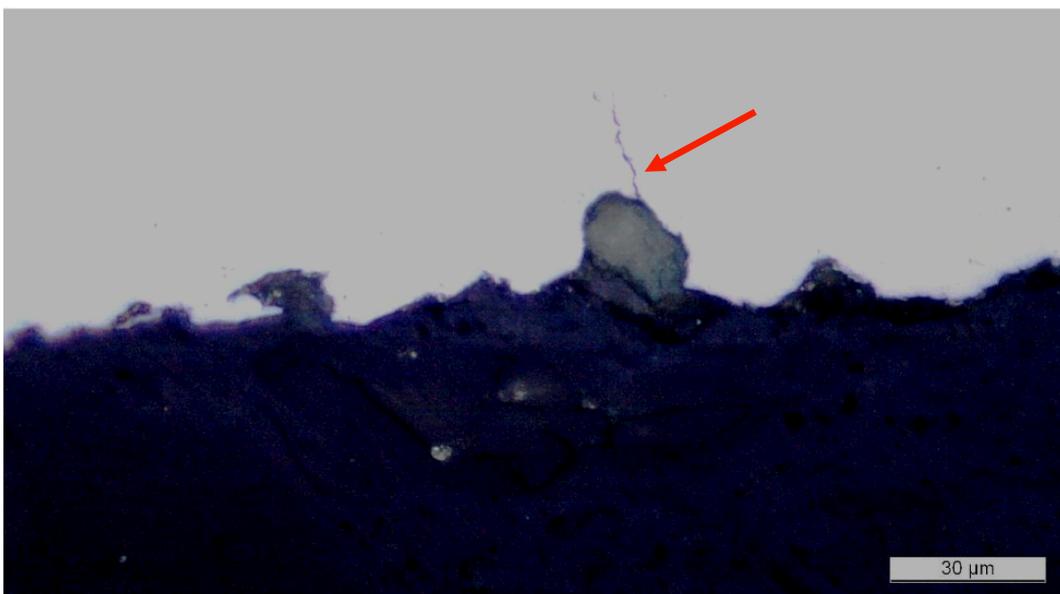


Bild 6

Es stellte sich nun für den Motorenhersteller die Frage, warum das Versagen eines über lange Zeit einwandfrei arbeitenden Systems, so plötzlich gehäuft auftritt. Um dies zweifelsfrei zu klären, wurde nach einer Feder gesucht, die über einen langen Zeitraum unbeschadet gelaufen war.

Vergleichsuntersuchung

Das zur Verfügung gestellte Vergleichsmuster wies weder analytisch noch in seinen Festigkeitseigenschaften Unterschiede zu den Schadensteilen auf; auch die Gefügeausbildung war vergleichbar.

Bei der Gegenüberstellung der Oberflächenmorphologien und der Gefügeausbildung im oberflächennahen Bereich wird jedoch sofort deutlich, dass das Vergleichsmuster eine deutlich verhämmerte Struktur besitzt, die als ein markanter Hinweis auf eine hier vorliegende Kugelstrahlbehandlung gewertet werden kann. Die **Bilder 7 und 8** zeigen jeweils auf der linken Seite das Vergleichsmuster und auf der rechten das Ausfallteil.

Eine Oberflächenbehandlung durch Kugelstrahlen wird in der Praxis sehr häufig und mit sehr guten Ergebnissen appliziert, werden dadurch doch im praktischen Einsatz in effektiver Weise gefährliche auftretende Zugspannungen „abgepuffert“ und damit die Anfälligkeit für Spannungsrisskorrosion deutlich vermindert. Außerdem platzen durch eine solche Strahlbehandlung die Salzreste von der Oberfläche ab und evtl. vorhandene scharfkantige Vertiefungen verschwinden. Dies alles führt zu einer Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und der Dauerfestigkeit.

Für den vorliegenden Fall konnte so der Schaden als eindeutig geklärt betrachtet werden, da die Strahlbehandlung in der Vorschrift zwar zwingend vorgeschrieben war, in einzelnen Chargen jedoch offensichtlich (und dies entweder bewusst aus Einspargründen oder auch unbewusst) nicht durchgeführt wurde.

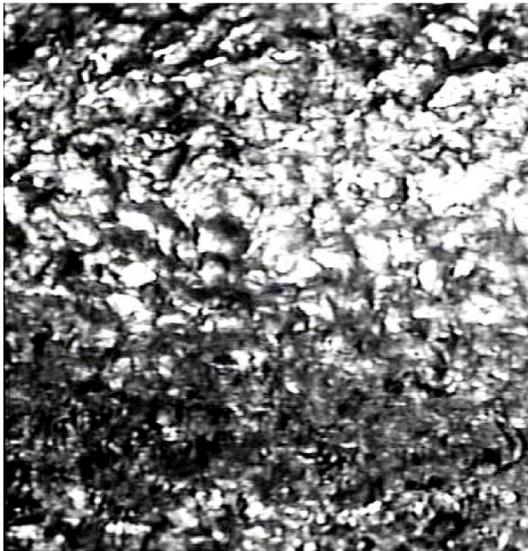


Bild 7

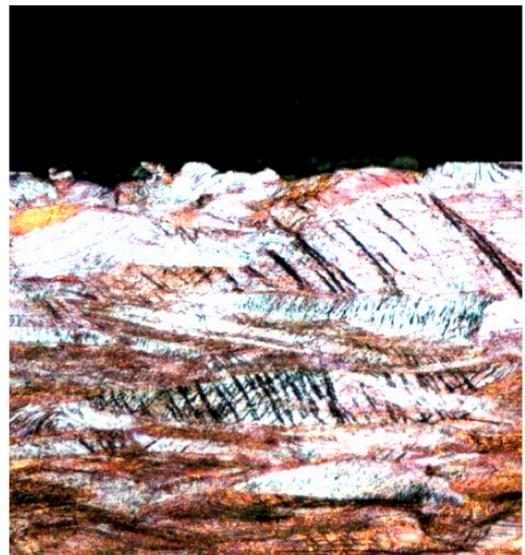
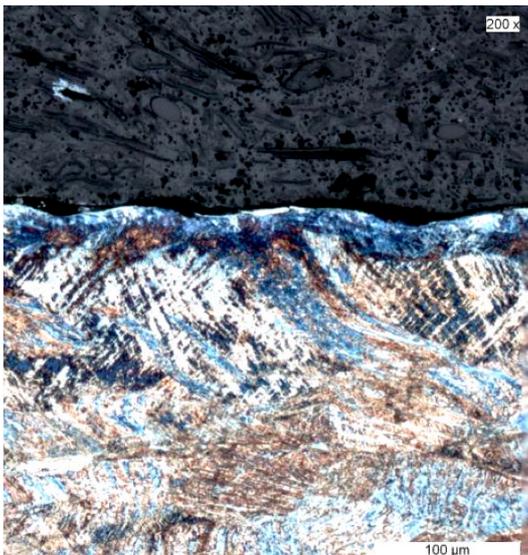


Bild 8

Praxisbeispiel 2 – Untersuchung einer Blattfeder

Das zweite Beispiel, in diesem Fall eine gebrochene Blattfeder, war als Ventilfeder in einem PKW eingebaut. Der Bruch des Stanzteiles verlief direkt unterhalb der Befestigung auf Biegung beanspruchten Stelle. Die Folge waren Motorenausfälle, die zu allem Überfluss plötzlich und dann auch zunehmend gehäuft auftraten, (**Bild 9**). Für die Untersuchung standen wieder mehrere ausgefallene Teile zur Verfügung.

Bei dem verwendeten Werkstoff handelte es sich um einen Federstahl, dessen Gefüge und Härte als absolut regelgerecht und in Ordnung eingestuft werden konnte, (**Bild 10**).

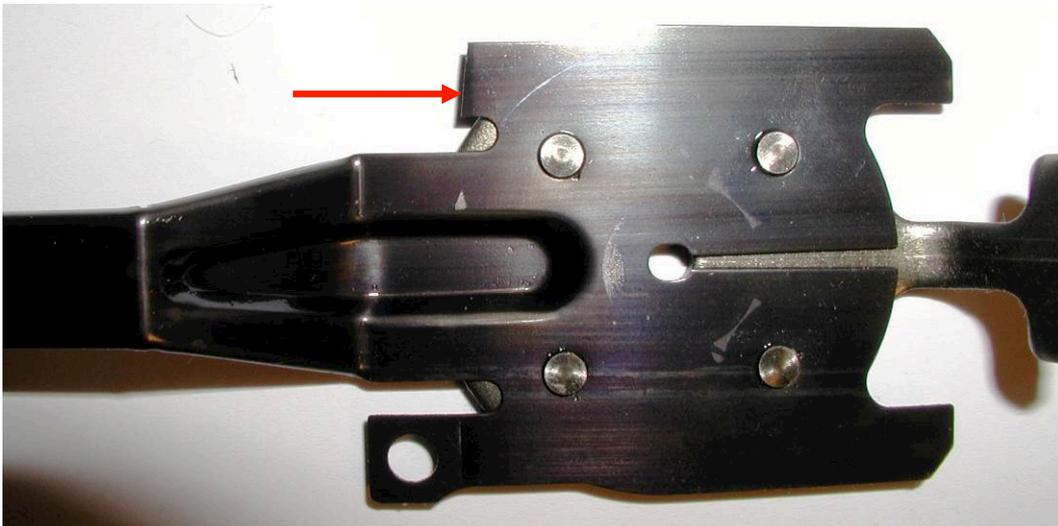


Bild 9

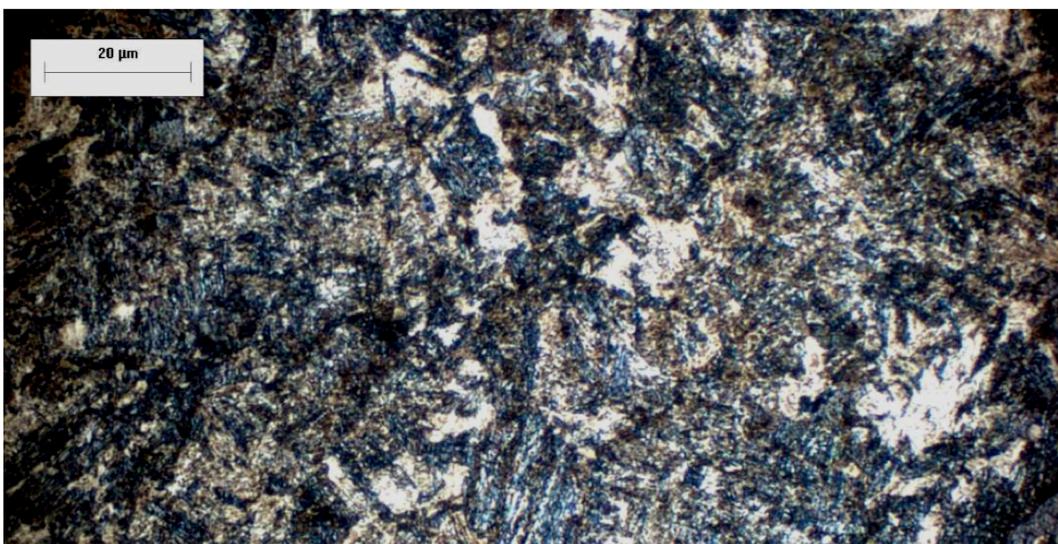


Bild 10

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung

Da die Bruchuntersuchung im Stereomikroskop keinen direkten Aufschluss über die Bruchursache gab und auch keinerlei weitere Anrisse zu erkennen waren, erfolgte die Betrachtung der Fraktur im Rasterelektronenmikroskop. Hier zeigte sich klar, dass der Bruchausgang auf der Unterseite der Feder liegt, mithin auf der Bruchkante des Stanzgrates, und an der Oberkante im Druckbereich als Scherrestbruch endet, (**Bild 11**).

Dabei wird offensichtlich, dass hier die Stanzkante morphologisch nicht das klare Bild von Glanz- und Bruchanteilen aufweist, sondern sich zum Teil ein Schnittgrat über die gesamte Trennfläche zieht, (**Bild 12**). Die Bruchstruktur ist dabei typisch für einen Dauerbruch eines hochfesten Werkstoffes, (**Bild 13**).



Bild 11

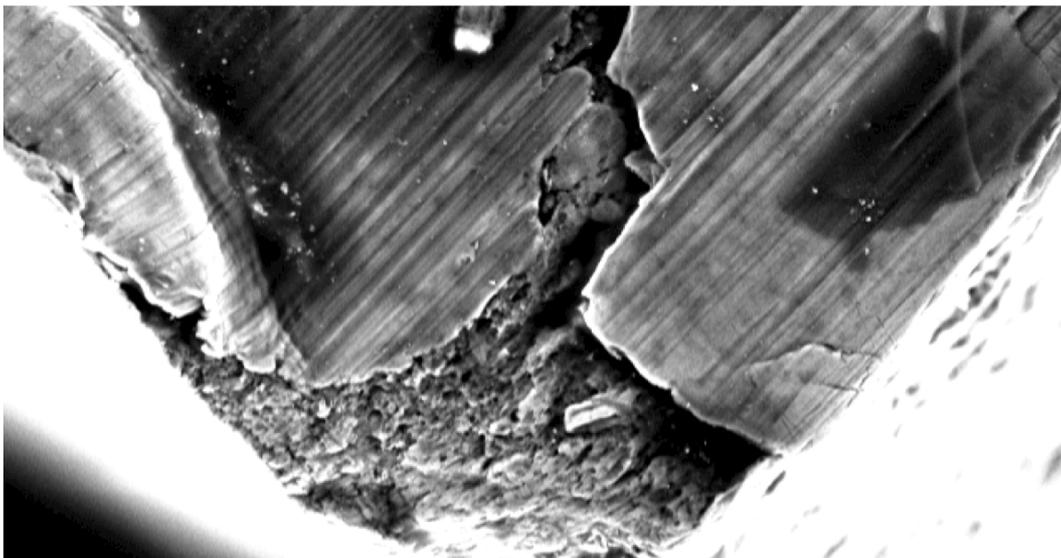


Bild 12

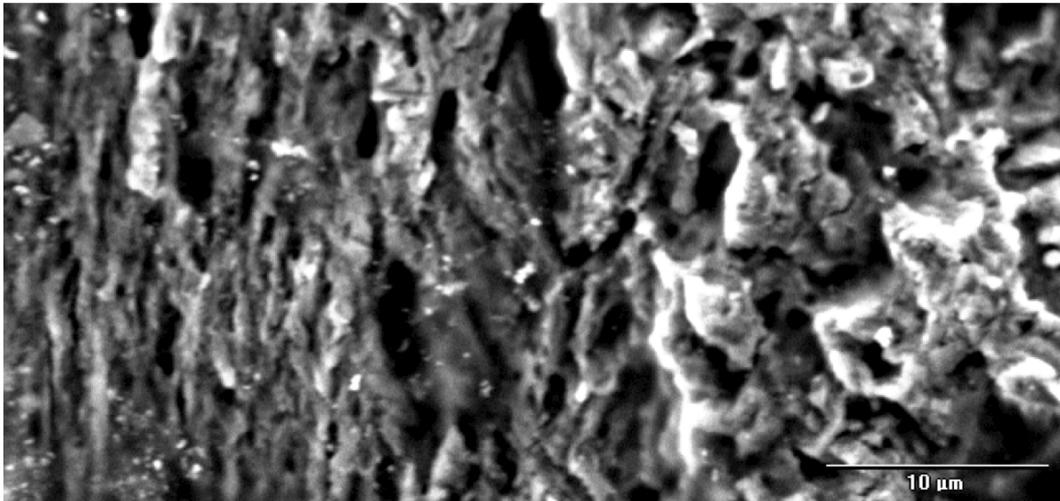


Bild 13

Aufgrund des bisher vorliegenden Befundes erschien es nunmehr sinnvoll, die Stanzgrate der ausgefallenen Teile nochmals intensiv im Stereomikroskop zu untersuchen.

Stereomikroskopische Untersuchung der Stanzgrate

Bei der nochmaligen Betrachtung konnte dokumentiert werden, dass die Grate an den fehlerhaften Teilen eine auffallend blaue Farbe aufweisen, wie sie typischerweise bei der Erwärmung auf ca. 300 °C in Form der entsprechenden Anlassfarbe bei Stahl auftritt, (**Bild 14**). Zudem zeigt sich, dass im Bereich des Bruches im Bereich der Ausstanzung, und dies beidseitig, die Grate qualitativ extrem schlecht ausgebildet sind, (**Bild 14**, unten).

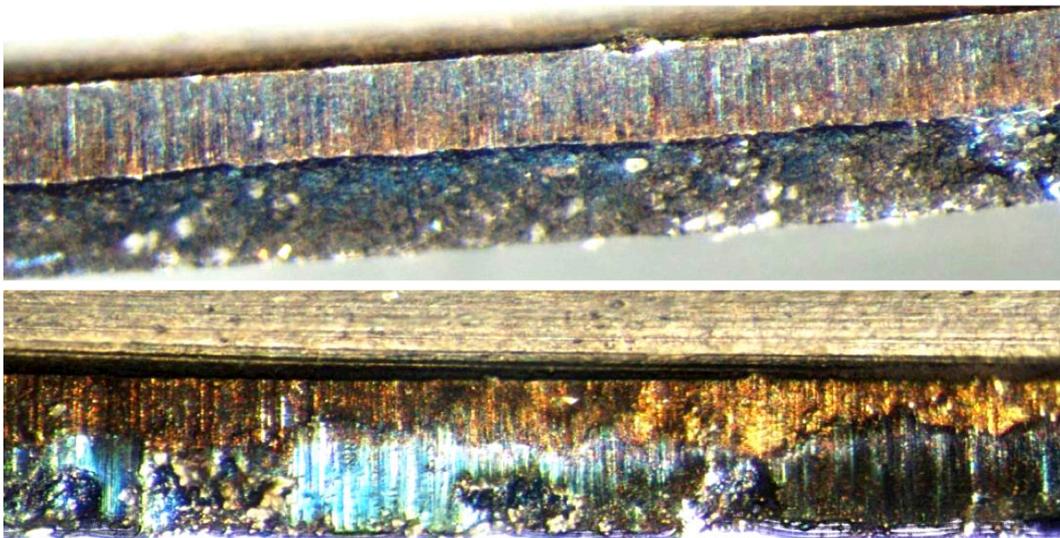


Bild 14

Lichtmikroskopische Untersuchung

Ein Flachschliff im Bruchbereich direkt in der Ebene des Rissausganges sollte weitere Erkenntnisse bringen. Bei hoher Vergrößerung und ausgehend von der schlechten Bruchkante der Stanzung zeigte sich zunächst ein weiterer Anriss, (**Bild 15**). Nach dem Ätzen wird insbesondere die starke Verformung, die diese Kante offensichtlich beim Stanzen erhalten hat, sehr schön sichtbar, (**Bild 16**).

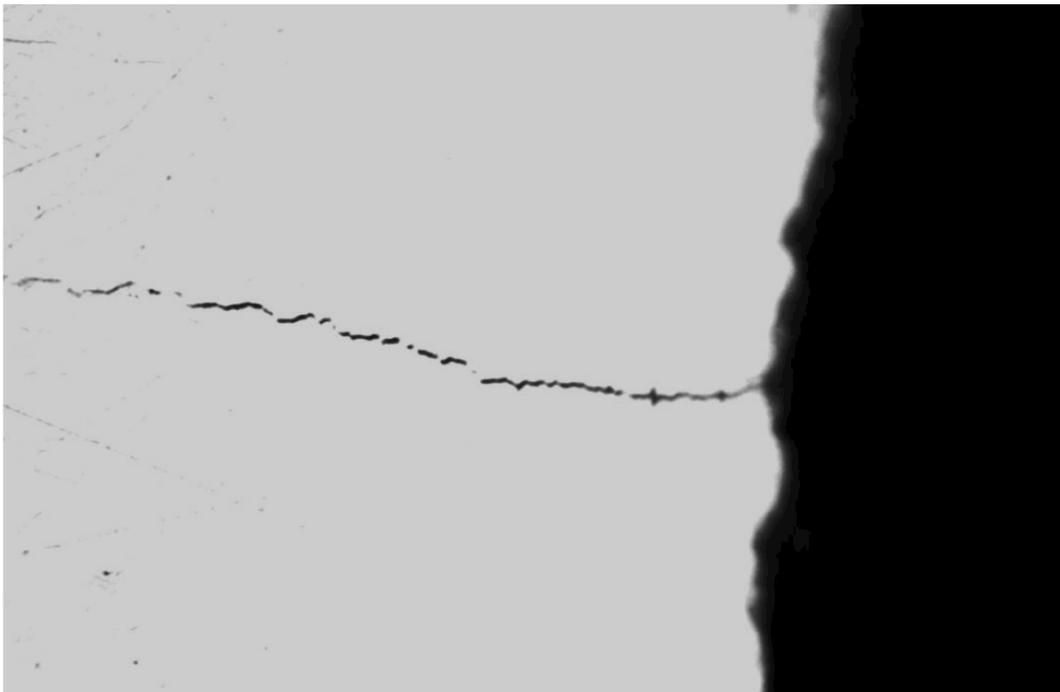


Bild 15

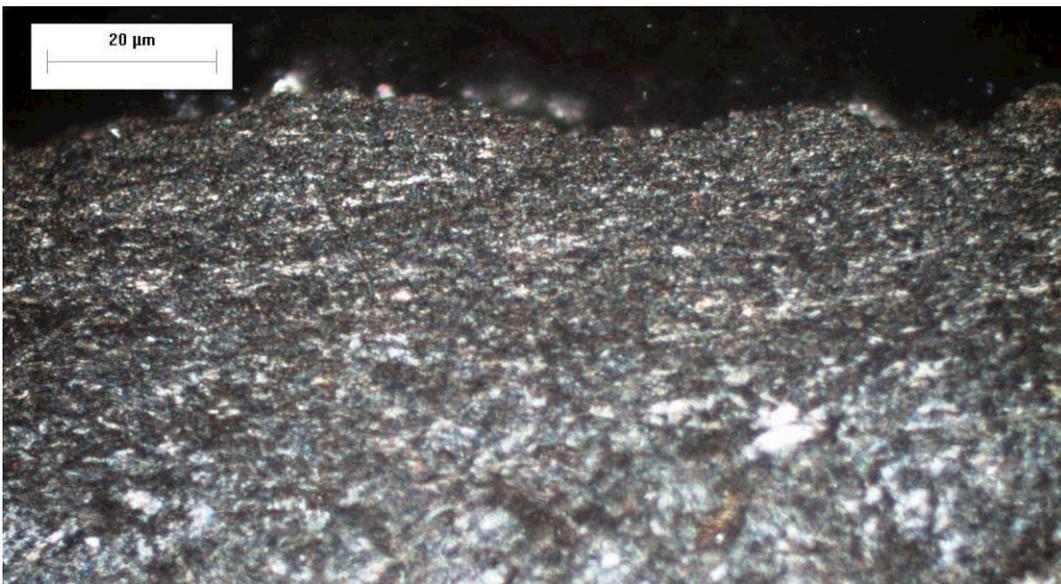


Bild 16

Vergleichsuntersuchung

Auch für diesen Fall standen für eine Verifizierung der aus der durch die Untersuchung gewonnen Erkenntnisse, wieder Rückstellmuster, hier aus dem im Vorfeld ordnungsgemäß abgelaufenen Feldversuchs, zur Verfügung. Die Untersuchung zeigt sowohl stereomikroskopisch wie auch im Mikroschliff, dass der Stanzgrat bei den ausgefallenen Teilen erheblich schlechter ausgeführt ist, (**Bilder 17 und 18**, Rückstellmuster oben).

Als Nachweis für eine hier eingewirkte Versprödung durch Erwärmung und für die schlechte Stanzkante als Ausfallursache, wurde im Labor ein Biegeversuch durchgeführt, der dann durch sein eindeutiges Ergebnis den endgültigen Beweis erbrachte, (**Bild 19**).

Damit war dann letztlich zweifelsfrei klar herausgearbeitet, dass ein unsachgemäßer Stanzprozess und die damit verbundene Erwärmung und Verformung ausfallursächlich waren. Der Hersteller nahm dieses Ergebnis zum Anlass, seitdem eine blaue Verfärbung sowohl für den Stanzbetrieb als auch für die Eingangskontrolle als Qualitätsmerkmal einzuführen. Offenbar mit Erfolg, denn in der Folge sind keine weiteren Ausfälle bekannt geworden.

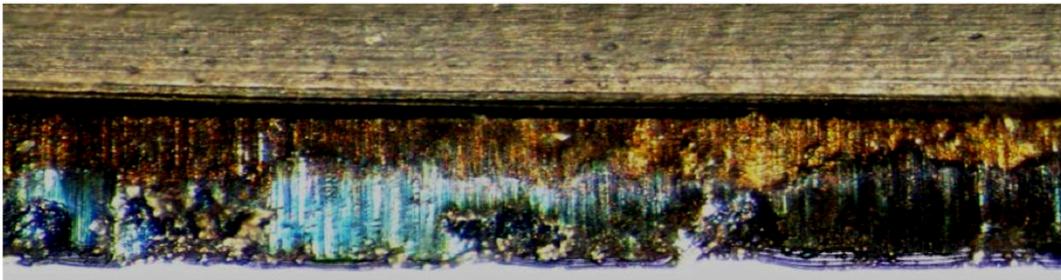


Bild 17

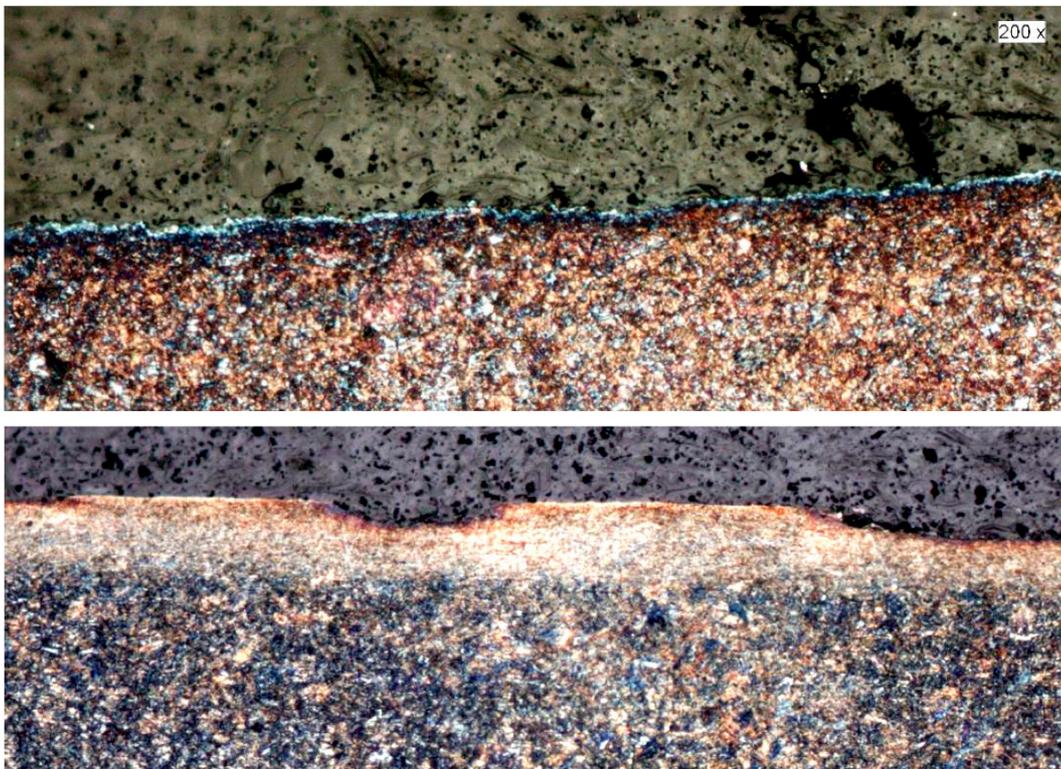


Bild 18

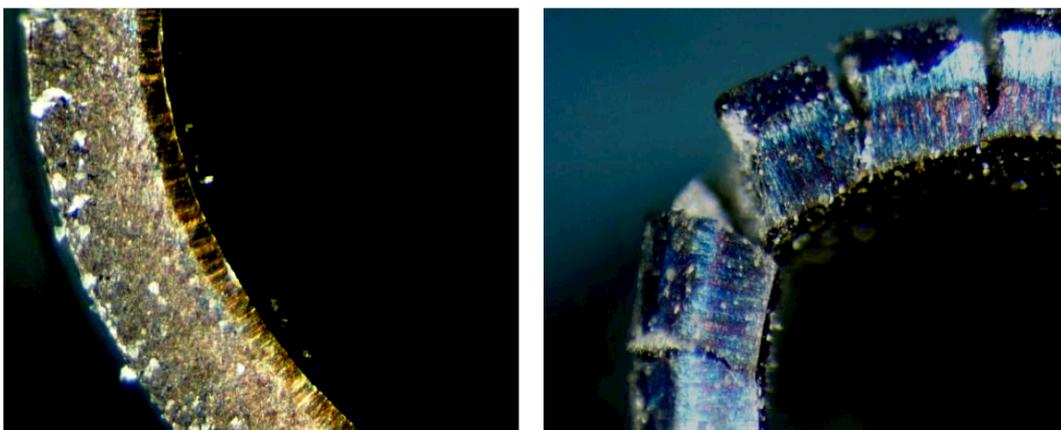


Bild 19

**Einsatz eines magnetischen Längenmesssystems
in Werkzeugmaschinenumgebungen und die
daraus resultierenden Herausforderungen für die
Werkstoffauswahl**

Thomas Dann,
Schneeberger GmbH

Einleitung

Als klassischer Vertreter eines mittelständischen Unternehmens im Bereich Maschinenbau liegt der Fokus der Firma SCHNEEBERGER seit der Gründung im Jahre 1923 auf präziser mechanischer Lineartechnik für die Werkzeugmaschinen- und Halbleiterindustrie. Mit dem Einstieg in die Entwicklung mechatronischer Systeme für die Wegmessung begann ein Weg des Aufbaus von immer neuen Kompetenzen, um den Kundenanforderungen optimal gerecht werden zu können.

Längenmesssystem AMS auf Basis einer magnetischen Maßverkörperung und eines magnetoresistiven Abtastsystems

Die Idee, die Profilschienenführungen mit integrierter Wegmessung zu kompletieren, existiert seit Beginn der 90er Jahre. Ernsthafte Ansätze können bei SCHNEEBERGER auf 1997 datiert werden, da hier begonnen wurde, eigene Kompetenzen zur Integration von Wegmesssystemen aufzubauen.

Die Basis für die Integration ist ein robustes Messsystem, welches an nicht genutzten Flächen der Profilschienenführung eingebaut werden kann.

Bei SCHNEEBERGER fiel die Wahl auf magnetoresistive Sensoren, die bezüglich Auflösung, kundenspezifischer Herstellbarkeit in Halbleiterprozessen, Entwicklungspotenzial und Bauraumbedarf deutliche Vorteile gegenüber optischen oder induktiven Systemen bieten.

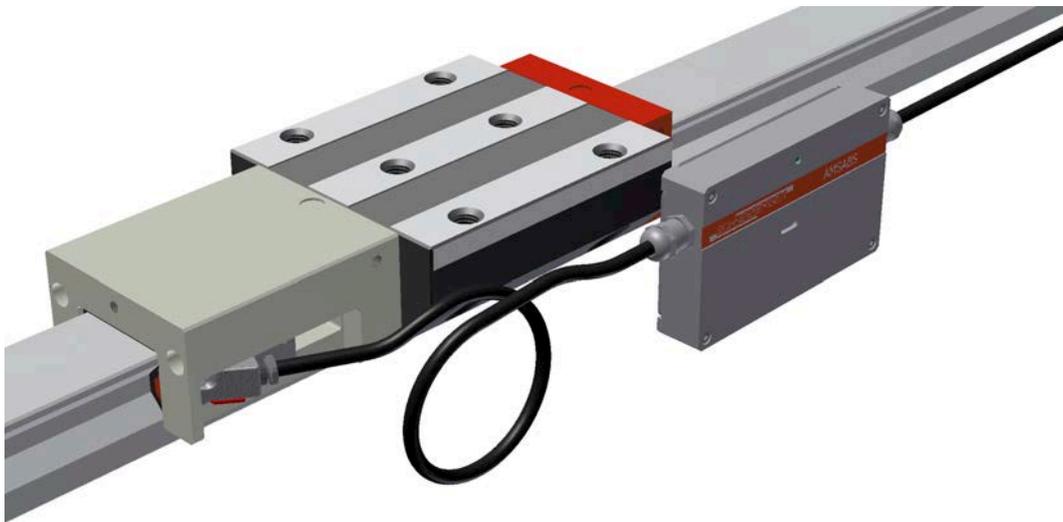


Bild 1: Profilschienenführung mit integriertem Messsystem

Das Grundprinzip der integrierten Wegmessung mit magnoresistiven Sensoren

Um ein Wegmesssystem in eine Profilschienenführung zu integrieren, muss die Maßverkörperung in der Profilschiene untergebracht werden. In eine in die Schiene geschliffene Nut (1) wird ein magnetisierbares Stahlband eingeklebt (2) und die Maßverkörperung (3) aufgebracht. Ein hartes Abdeckband (4) schützt das Maßband vor Verschleiß und mechanischer Beschädigung. Der so geschaffene Maßstab wird dann mit dem magnoresistiven Sensor abgetastet, welcher in einem Lesekopf untergebracht wird, der als eigenständige Baugruppe mit dem Führungswagen verbunden wird.

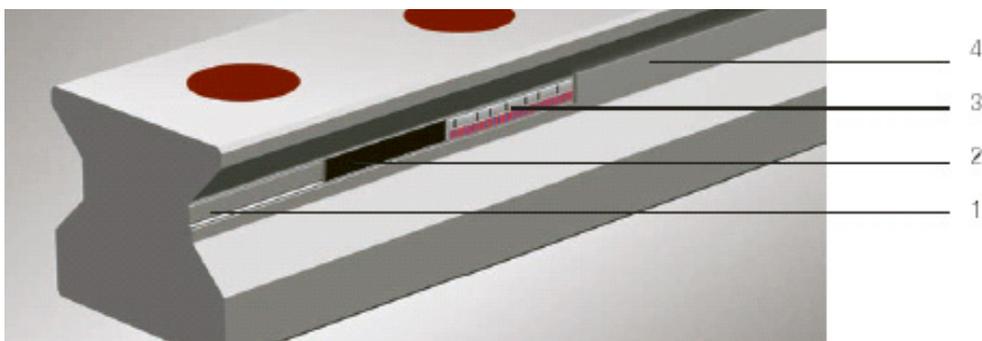


Bild 2: Schiene mit Maßverkörperung

Vorteile der integrierten Wegmessung

Direkte Wegmessung in den Achsen von Werkzeugmaschinen erhöht die Genauigkeit der Bearbeitung. Es stehen heute hierzu Systeme basierend auf einem Glasmaßstab in einer Kassette, die separat am bewegten Teil befestigt werden, und Systeme, die in die Profilschienenführung integriert sind, zur Auswahl. Die integrierten Systeme bieten Vorteile hinsichtlich der Genauigkeit durch die gute thermische Kopplung an die Maschinenbasis, durch die Messung nahe am Bearbeitungsprozess sowie die optimale Ausrichtung des Maßstabes durch die Führungsschiene. Aber auch im Bereich der Lagerhaltung von Ersatzteilen lassen sich beträchtliche Einsparungen realisieren, da ein Lesekopf für alle Baugrößen der Führungen verwendet werden kann. Die Kosten während der Nutzung werden vor allem durch die Tatsache bestimmt, dass integrierte Systeme für die sichere Funktion im Gegensatz zu Glasmaßstäben keine Sperrluft benötigen. Durch die Verwendung von AMS werden über die gesamte Lebensdauer einer Werkzeugmaschine Einsparungen von bis zu 10.000 € erzielt.

Technische Herausforderungen aufgrund der Messtechnik und des Einsatzumfeldes

Umgebungseinflüsse

Das Haupteinsatzgebiet der oben beschriebenen Wegmesssysteme ist in allen Arten von Werkzeugmaschinen. Das bedeutet, dass sie einem weiten Feld von Umgebungseinflüssen ausgesetzt sind. Hierzu zählen die vielen unterschiedlichen Typen von Kühlschmiermitteln, die für die Bearbeitung zum Einsatz kommen. Ebenso die zur Schmierung der mechanischen Führungen und Antriebsspindeln eingesetzten Öle und Fette. Besonders aber die Partikel aus den Zerspanungs- und Schleifprozessen. Diese Teile können in sehr unterschiedlichen Größen und Härten vorliegen. Sie dringen abhängig von den Abstreifersystemen und den Bewegungsprofilen über kurz oder lang in den Führungswagen und damit auch in den Bereich des Messkopfes ein. Es bildet sich dadurch innerhalb des Raumes des Kopfes ein Gemisch aus Kühlschmiermitteln, Schmiermitteln und Partikeln. Diese Mischung kann je nach Konzentration eine stark abrasive Wirkung haben und bei längerem Stillstand der Achse zum Verharzen und somit zum Festkleben der Bauteile führen.

Abhängig von der Einbaulage des Messkopfes kann zusätzlich eine starke Beaufschlagung mit Kühlschmiermittel erfolgen, die das Schmiermittel von der Schiene abwäscht und zum Trockenlauf der Gleiter und der Abstreifer führt.

Ein weiterer Effekt, der verhindert werden muss, ist das Eindringen von Flüssigkeiten in den Bereich der elektronischen Bauteile. Dies führt zu einem Quellen der Vergusswerkstoffe und zu einer Korrosion der Leiterbahnen sowie der Verbindungsstellen und damit zu Funktionsstörungen und Ausfällen des Messsystems.

Technische Lösungen

Die oben beschriebenen Einflüsse machen es notwendig, bei der Sensorik wie auch bei der Auswahl und Verarbeitung der Werkstoffe für den Lesekopf neue Wege zu gehen.

Um unempfindlich gegenüber Verschmutzungseinflüssen zu sein, ist die Sensorik auf Basis von magnetoresistiven Sensoren aufgebaut. Das hat den Vorteil, dass die zwangsläufig immer vorhandenen Öle und Partikel keinen Einfluss auf die sichere Funktion haben. Bedeutet jedoch, dass nur nichtmagnetische Werkstoffe als Umhausungsmaterial in Frage kommen. Vor dem Hintergrund der zusätzlichen Notwendigkeit der chemischen Beständigkeit der Materialien und der guten Verformbarkeit wird unlegiertes Ti2; 3.7035 c2 mit einer Dicke von 0,1 mm verwendet.



Bild 3: Aufbau Sensor

Der Aufbau der Umhausung der Leiterplatte ist so gestaltet, dass eine druckdichte Kapselung nach IP 68 durch das Verschweißen von zwei Titanhalbschalen entsteht. Dadurch ist sichergestellt, dass keine Flüssigkeiten in den Bereich der

elektronischen Bauteile eindringen können. Beide Halbschalen werden dabei stirnseitig ohne Zusatzstoffe mit einem Festkörperlaser mit einem Spot der Größe 0,2 mm verschweißt. Die technische Anforderung liegt hier in der Ebenheit der beiden Schalen und in der gleichmäßigen Anpressung der Teile während der Bearbeitung. Ein Spalt zwischen den Teilen hat zur Folge, dass die Schweißung undicht wird und die Leiterplatte zerstört werden kann. Die flexible Leiterplatte wird dabei ebenso wie die Sensorchips vollständig umschlossen. Jede Baugruppe wird nach dem Verschweißen einer Dichtigkeitsprüfung unterzogen. Durch die Gestaltung in Form einer Blattfeder ist die gesamte Abtastbaugruppe in der Lage, die Toleranzen aus der Fertigung der Bauteile wie auch die lastbedingten Verschiebungen aufzunehmen, ohne die sichere Funktion der Abtastung zu beeinflussen.

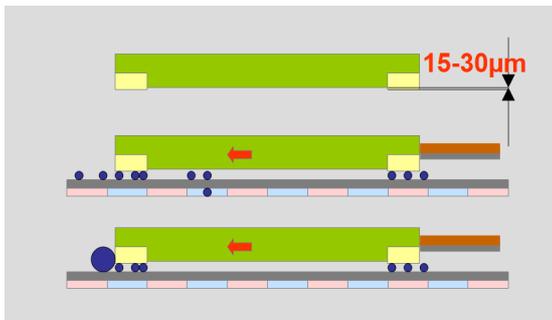


Bild 4: Funktion Gleiter

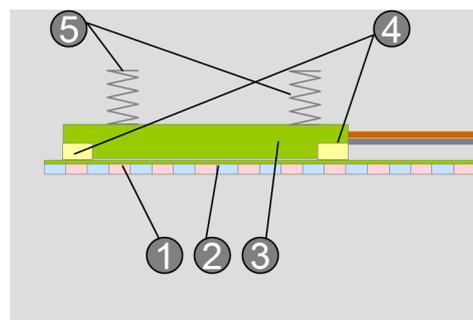


Bild 5: Aufbau Gleiter

Die Abtasteinheit (3) wird mittels Gleitstücken (4) auf einem konstanten Abstand zum Maßband (1) und dem darüber liegenden Abdeckband (2) in der Schiene gehalten. Dies hat sich als sehr sichere Bauweise bei Verschmutzung erwiesen. Kleine Schmutzpartikel, wie sie typischerweise im Schleifprozess vorkommen, werden überfahren. Größere Partikel werden durch die Gleitelemente zur Seite geschoben, Späne dagegen durch die Querabstreifer im Gehäuse am Eindringen gehindert. Die Gleitstücke werden mittels Druckfedern (5) mit einer Flächenpressung von ca. 1 N/mm² gegen die Oberfläche des Abdeckbandes des Maßstabes gedrückt. Das Abdeckband mit einer Dicke von 0,08 mm besteht aus einer Kobalt Basis Legierung. Um die engen Toleranzen der Dicke einzuhalten, ist das Band kaltgewalzt mit einer sehr guten Oberflächenqualität und einer Härte von HRC 50. Mit dieser Ausführung ist sichergestellt, dass das Abdeckband an der Schiene über die gesamte Lebensdauer des Systems keinen Verschleiß hat. Um das Eindringen von Flüssigkeiten und damit das Ablösen oder Aufwölben des Maßbandes zu verhindern, wird das Abdeckband an beiden Längsseiten und an den Enden mit der Führungsschiene verschweißt.

Ein weiterer wesentlicher Punkt um die Langlebigkeit des Produkts sicherzustellen ist, dass die beiden Gleitstücke gleichmäßig an das Band angedrückt werden, so dass keine Kantenläufer entstehen, die das Band zerstören und möglicherweise für einen einseitigen Abtrag der Gleitstücke sorgen. Da die Linearführungen für eine Verfahrgeschwindigkeit bis zu 4 m/s ausgelegt sind, müssen auch die Gleitstücke bis zu dieser Geschwindigkeit sicher an der Bandoberfläche anliegen.

Bezüglich der Wahl der Werkstoffe der Gleitstücke sind mehrere Kriterien zu beachten. Das Material muss eine hohe Abriebfestigkeit bei Vorliegen von abrasiven Partikeln haben. Weiterhin muss die Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Substanzen gegeben sein. Hinsichtlich der Befestigung der Gleiter an den Titanschalen kam eine bisher verwendete Klebeverbindung nicht mehr in Frage, da diese nicht die notwendige Festigkeit bei allen heute verwendeten Kühlschmiermitteln gewährleistete. Nachfolgend werden drei Entwicklungsschritte mit unterschiedlichen Gleiterwerkstoffen und den dadurch notwendigen unterschiedlichen Arten der Befestigung beschreiben. Alle Versuche wurden unter Kühlschmiermittel mit einer Zumischung von Schleifkorund der Körnung 40 µm in einer Schleifmaschinenachse durchgeführt.

Ausgangspunkt waren Gleitelemente aus Lagerbronze CuSn 6. Die Gleitelemente wurden mittels Hartlötten auf Titanträgerplatten befestigt und diese dann durch Laserschweißen an der Titanschale befestigt. Es zeigte sich dabei, dass die Verschleißwerte speziell bei Vorliegen der Korundpartikel nicht den Anforderungen entsprachen. Bei einigen Kühlschmiermitteln konnte außerdem ein Quellen des Werkstoffes festgestellt werden. Nächste Versuche wurden mit Titangleitstücken ausgeführt, die direkt mit den Titanschalen verschweißt werden konnten. Da Titan im Allgemeinen schlechte tribologische Eigenschaften aufweist, wurde die Oberfläche durch das Oxygen Diffusion Hardening (ODH) verändert. Durch Diffusion von Sauerstoff in die Gitterstruktur von Titan wird eine Härtung der Oberfläche bewirkt. Hier zeigte sich in den Versuchen eine gute chemische Widerstandsfähigkeit, die Härteschicht schwankte jedoch prozessbedingt stark, so dass der geforderte Standweg nicht in jeden Fall erreicht werden konnte.

Erst Gleitelemente aus Zirkonoxid erfüllten die Anforderungen in allen Punkten. Zur Fixierung mit der Titanschale liegen sie in einer formschlüssigen Fassung aus Titan, die mit der Titanschale des Gehäuses durch Schweißen verbunden werden kann.

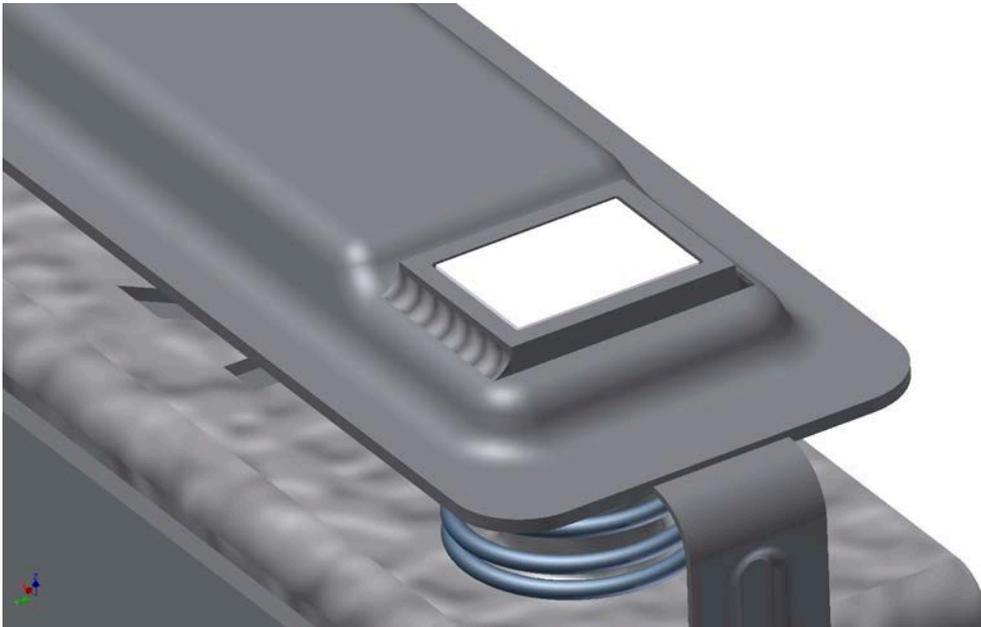


Bild 6: Ausführung Rahmen

Die Oberfläche des Gleitstückes hat einen Ra Wert von $0,2 \mu\text{m}$. Versuche mit Kühlschmiermittel und zugesetztem Schleifkorund der Körnung $40 \mu\text{m}$ zeigen nur sehr geringe Verschleißerscheinungen an den Gleitfüßen.

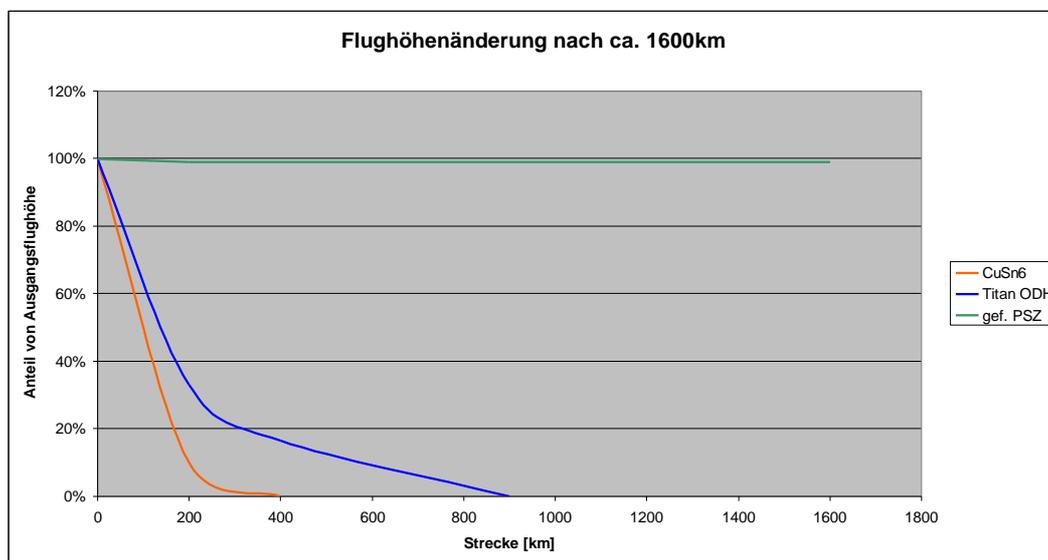


Bild 7: Verschleiß

Zusammenfassung und Bewertung

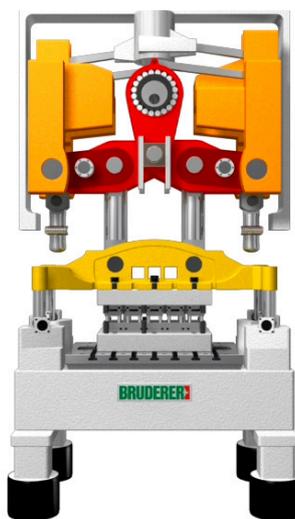
Die in die Profilschienenführungen integrierten Wegmesssysteme finden eine immer weitere Verbreitung in klassischen Werkzeugmaschinen. Dies ist vor allem auf die Notwendigkeit zurück zu führen, dass die Maschinen immer genauer, effizienter und im Betrieb kostengünstiger werden müssen. Mit dem Einsatz der integrierten Messsysteme können diese Forderungen der Werkzeugmaschinenhersteller erfüllt werden. Voraussetzungen waren jedoch die Umsetzungen der oben beschriebenen technischen Anforderungen an die Beständigkeit und die Verschleißfestigkeit der Bauteile, da diese Teile immer einer hohen Schmutzbelastung ausgesetzt sind.

Zukunftsperspektiven in der Stanztechnik

Prof. Dr.-Ing. Matthias Golle,
Hochschule Pforzheim

Einleitung

In der Auslegung und Herstellung von Stanz- und Umformwerkzeugen auf der einen sowie der Konstruktion von Fertigungsanlagen auf der anderen Seite, sind innerhalb der letzten 30 Jahre enormere Technologiesprünge erreicht worden. Bei Stanzwerkzeugen reichen diese von den handgefeilten Schneidelementen aus Werkzeugstahl bis zu den auf automatischen Maschinen erodierten Hartmetallschneidaktivelementen mit Genauigkeiten von wenigen Mikrometern. Im Bereich der Umformwerkzeuge wurden kosten- und zeitintensive Versuchswerkzeuge dank aussagekräftiger FE-Umformsimulationen praktisch bedeutungslos. Erst dadurch wurden die kurzen Produktzyklen und die zahlreichen Derivatfahrzeuge in der europäischen Automobilindustrie möglich. Einlegepressen und langsam laufende Stanzautomaten wurden, zumindest in Europa, fast vollständig durch Hochleistungsstanzautomaten mit vollständigem rotatorischen und translatorischen Massenausgleich bei Tischlängen von über 2 m ersetzt, die Hubzahlen von über 2.000 1/min erreichen können. Im Bereich des Karosseriebaus wurden zur Herstellung großflächiger Blechteile hochautomatisierte Pressenlinien mit Servodirektantrieb eingeführt, die die Ausbringung im Vergleich zu den Compact Crossbar-Transferpressen um bis zu 50 % gesteigert haben. Diese Innovationen haben die globale Wettbewerbsfähigkeit gerade von deutschen Unternehmen in der Vergangenheit gewährleistet. Doch welche Entwicklungen und Technologien können diesen Vorsprung gegenüber den asiatischen Mitbewerbern zukünftig sicherstellen?



*Bild 1: Schematische Darstellung eines Hochleistungsstanzautomaten mit vollkommenem Massenausgleich
[Bild: Bruderer]*

Technologische Zukunftstrends

Servotechnologie

Die Servotechnik bestimmt zunehmend die Entwicklung von Werkzeugen, Pressen- und Stanzanlagen. Immer mehr Fertigungsoperationen werden in den Pressenprozess integriert.

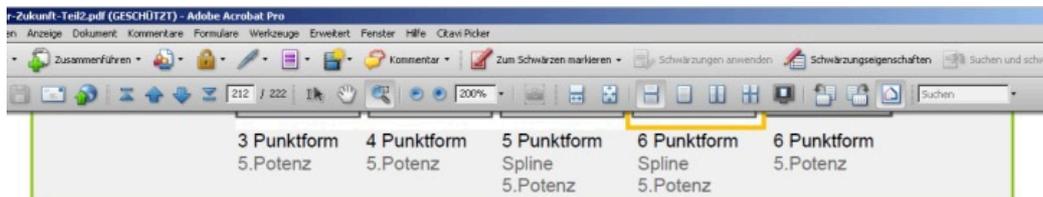
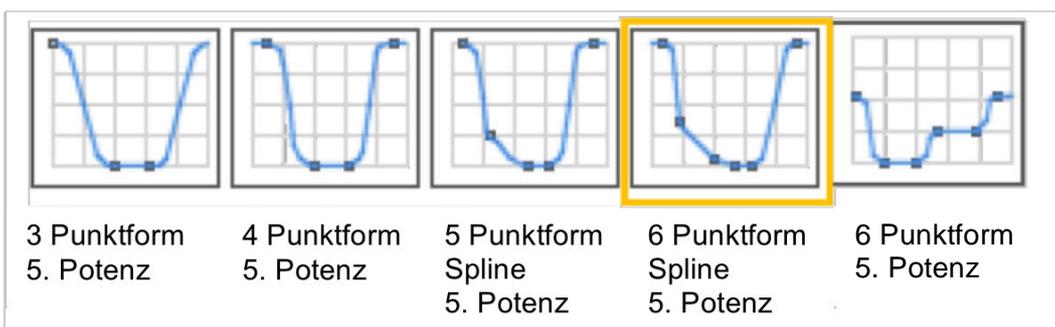


Bild 2: Beispielhafte Bewegungskurven einer Servopresse mit Spindeltrieb [Bilder: H&T]

Intelligente Werkzeuge und Anlagen

Sensoren und mechatronische Komponenten ermöglichen die Erfassung von Maschinenzustand, Werkzeugbelastungen, Verschleiß der Aktivelemente sowie Blechwerkstoffkennwerten und Aktoren erlauben einen wissensbasierten Prozesseingriff.

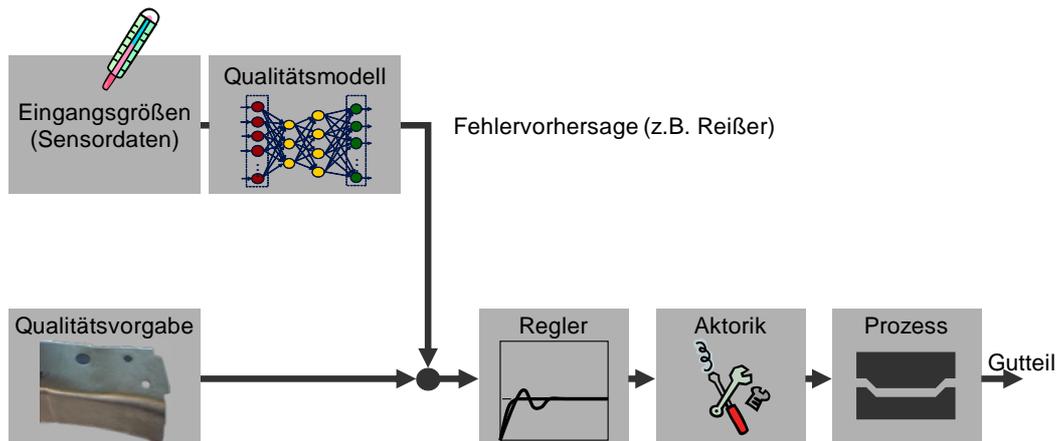


Bild 3: Schematischer Aufbau einer Prozessregelung von Pressenanlagen mit einer Qualitätsvorhersage und einem automatischen Prozesseingriff

Angepasste Bauteilqualität

Innovative Verfahren und Werkzeugtechnologien ermöglichen eine an die spezifischen Anforderungen angepasste Bauteilqualität.

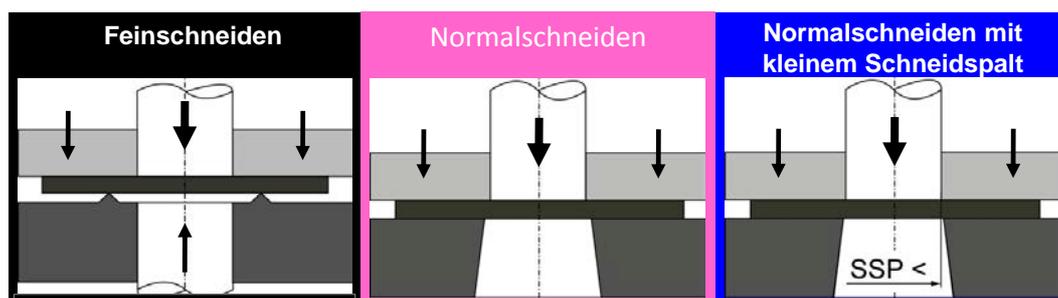


Bild 4: Normalschneiden mit kleinem Schneidspalt als Alternative zum Feinschneiden bei geringeren Anforderungen an die Bauteilqualität [nach Hörmann]

Miniaturisierung

Die Weiterentwicklung von Verfahren und Werkzeugtechnologien erlaubt die umformtechnische Herstellung kleinster Bauteile.

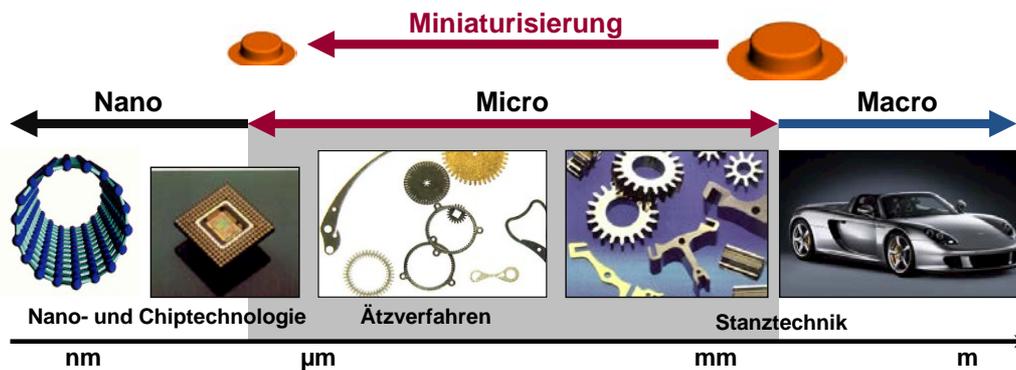


Bild 5: Mikrostanstechnik als Alternative zu Ätzverfahren

Hybride Baugruppen

Die Verbindung von elektronischen, mechatronischen und mechanischen Komponenten mit Kunststoffen ermöglicht die Integration von vielen Funktionen in eine Baugruppe.



Bild 6: Beispielhafter Metall-Kunststoffverbund [Bild: Kummer]

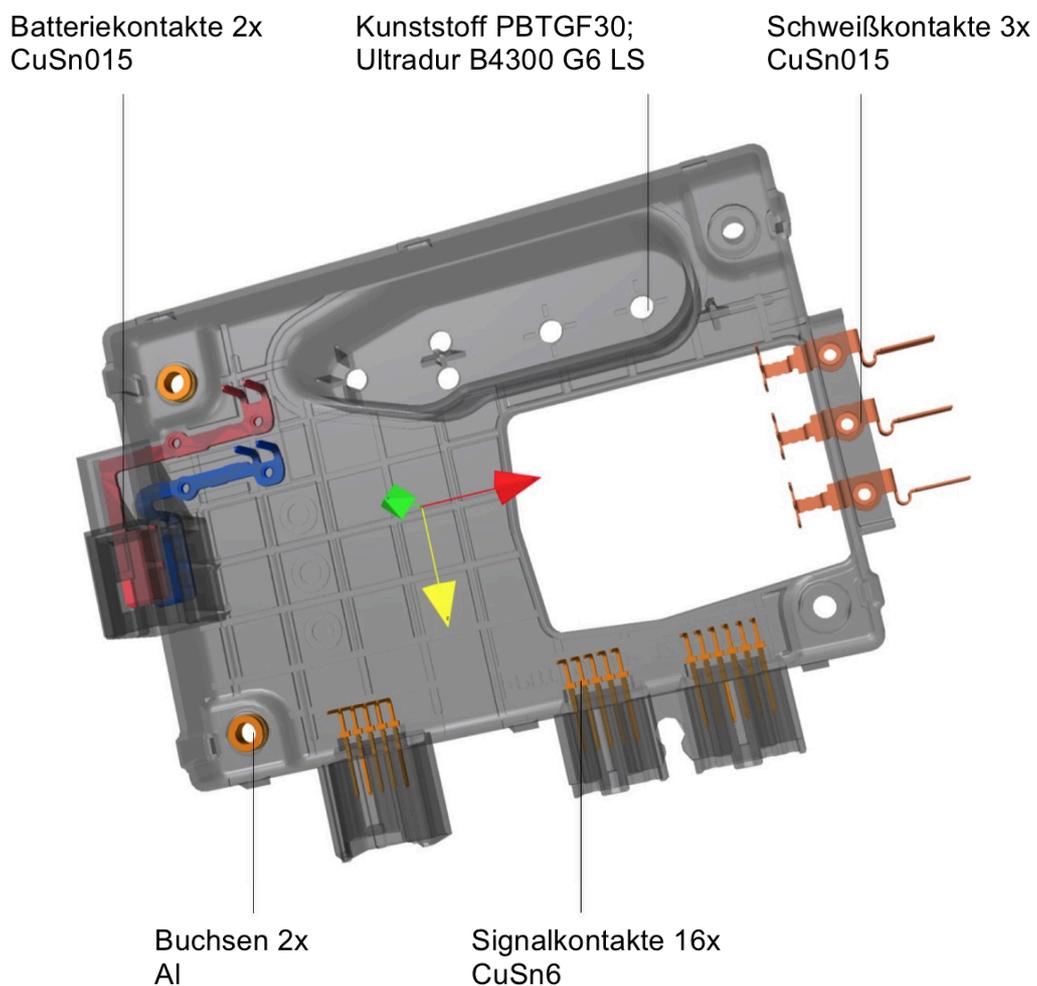
Konzeption und Fertigung von Kunststoff- Metall-Hybridbauteilen

Andreas Adler,
Kramski GmbH

Projektbeispiel Gehäuserahmen

Zur Einführung in die Thematik „Hybridbauteile“ werden an einem konkreten Projekt die merkmalsprägenden Details vorgestellt:

- Verwendete Kunststoffmaterialien
- Metalleinlegeile: Material, Oberflächen, Funktionen
- Unterscheidung: eingespritzte und montierte Einlegeile

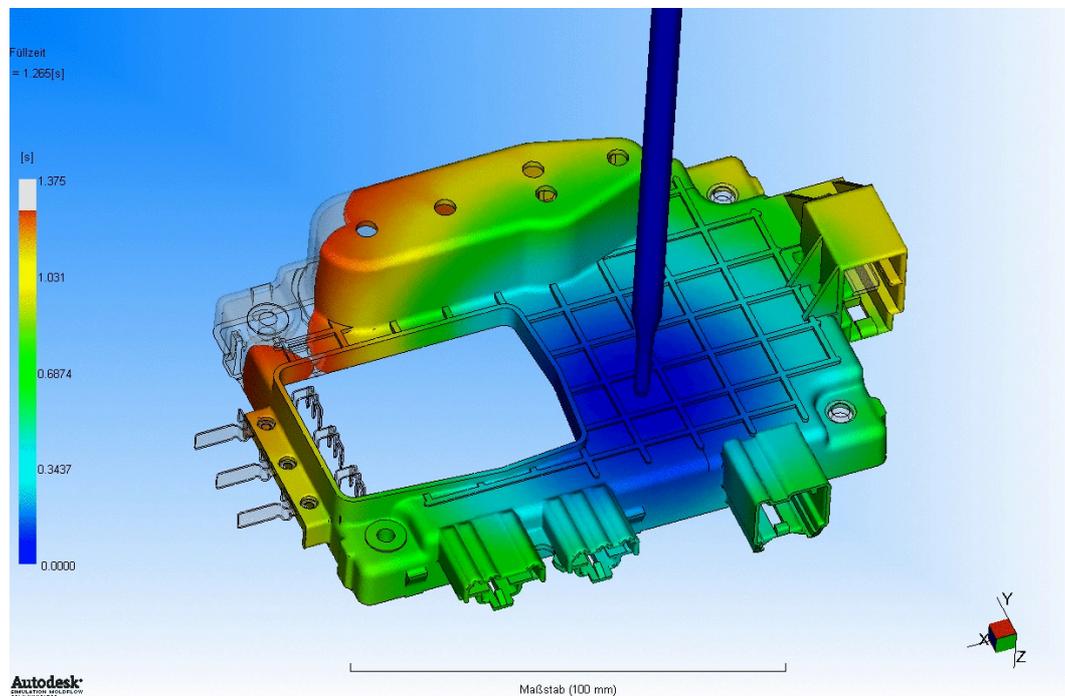


Füllstudie Gehäuserahmen

Simulation von Angussvarianten und Spritzgießparametern

Ziel

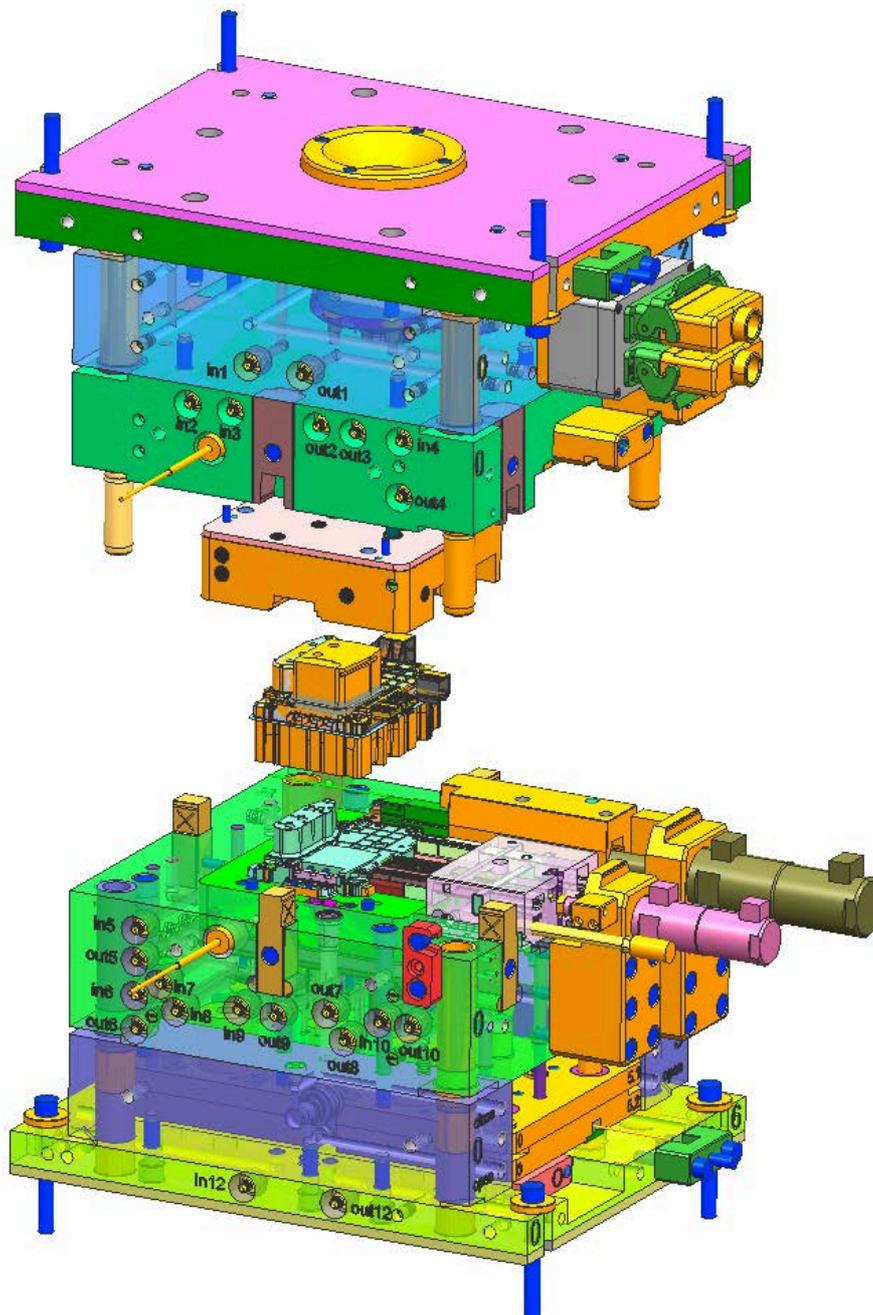
- Bindenaht, Zusammenfluss der Fließfront, in kritischen Bereichen vermeiden
- Möglichst gleichmäßige Formfüllung und Glasfaserorientierung, damit geringer Verzug und gleichmäßige Schwindung



Aufbau Spritzgussform Gehäuserahmen

1-fach Spritzgussform

- Heißkanal mit Nadelverschluss
- Segmentierte Kavitäteneinsätze
- Segmentierte Steckerschieber



Herausforderungen Beispiel 1: „technische Sauberkeit“

Ausgangslage

Kleinste Fügespalte bei der weiteren Montage beim Kunden und/oder die Integration von elektronischen Baugruppen erfordern eine eindeutig spezifizierte Sauberkeit an die Hybridbauteile.

Definition nach VDA Band 19 Beispiel

Zulässige Partikelmengen/Allowed amount of particles

| Größenklasse [μm] /Size class [μm] | Anzahl P./Teil Amount P./Part |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Elektrisch leitfähige Partikel/Electrical conducting particles | |
| 25 \leq x < 50 | n/a |
| 50 \leq x < 100 | n/a |
| 100 \leq x < 150 | 5 |
| 150 \leq x < 200 | 3 |
| 200 \leq x < 250 | 1 |
| Nicht leitfähige Partikel/Not electrical conducting particles | |
| 0 \leq x < 400 | n/a |
| 400 \leq x < 1000 | 2 |

Ziel

Restschmutzvermeidung durch Prävention

Präsentation:

Vorstellung Beispiele

Option

Reinigung

Präsentation:

Vorstellung Restschmutzanalyse vor und nach einer Reinigung

Herausforderungen Beispiel 2: „Dichtheit“

Ausgangslage

Zwischen Metallinsert und Kunststoff gibt es keine Adhäsion. Durch das Eindringen von Feuchtigkeit, Ölen oder anderen Medien im Fahrzeugbereich kann es zu Ausfällen der Bauteilfunktion kommen.

Hauptursachen für Leckage:

- Temperaturwechsel
- unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten Insert/Kunststoff
- Unterdruck im Sensorinnenraum
- Kapillarität

Definition

Dicht = gemessene Leckrate < zulässige Leckrate

Beispiel ESP Sensorgehäuse

Innenraum, Gehäuse sowie Stecker müssen dicht sein (max. zul. Leckrate kalt: $1,3 \text{ cm}^3/\text{min}$. Prüfdruck (Überdruck) $500^{+50}/_{-2} \text{ mbar}$ bei RT. 24 h nach Fertigung)

Ziel

Einhaltung der Dichtheitsanforderungen ohne Zusatzprozesse
Vorstellung Beispiele

Übersicht und Beispiele „Automatisierungslösungen“

Bei der automatisierten Fertigung von Hybridbauteilen kann in vier grundsätzliche Anlagenvarianten unterschieden werden.

Grundlage hierzu bilden die drei Kernprozesse:

- A) Zuführung der Einlegeteile
- B) Bestückung der Einlegeteile in die Spritzgussform
- C) Ausgabe der Fertigteile

| Zuführung Insert | Bestückung Spritzgussform | Ausgabe Fertigteil | Beispiele |
|---------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Band | Band | Band | Vorumspritzling |
| Band | Band | Einzelteile | Spulenkörper |
| Band | Einzelteile | Einzelteile | Drucksensorgehäuse |
| Einzelteile | Einzelteile | Einzelteile | Nicht betrachtet, manuelle Fertigung, Muster, Drehteile etc. |

Präsentation:

Vorstellung von Fertigungslinien zu den aufgeführten Varianten

Ressourcenschonende Leichtbau-Verpackung in Kunststoff-Hybrid-Bauweise

Michael Däbritz,
Varioplast Konrad Däbritz GmbH

Einleitung

Als Zulieferunternehmen im Bereich der Kunststofftechnik produziert Varioplast in großer Anzahl verschiedenste und zum beträchtlichen Teil dekorative und empfindliche Teile und Baugruppen mit vielfach hohem Anspruch an die Oberflächenbeschaffenheit. Auch überwiegend inline durchgeführte Oberflächenveredelungen wie Lackieren, Lasern, Bedrucken und Metallisieren bedingen einen äußerst vorsichtigen Umgang mit den gefertigten Produkten.

Im Hause als auch im Versand zu den Kunden ist eine flexible, transparente und raumsparende Teilelogistik, die die Unversehrtheit der Produkte von der Produktion bis zur Weiterverarbeitung beim Kunden garantiert, daher von großer Bedeutung. Die diversen, teilweise äußerst komplexen Produkte mit qualitativ hochwertigen Oberflächen erfordern häufig spezifische Verpackungen, die den jeweiligen Produktgeometrien angepasst werden müssen. In aller Regel erwartet der Kunde, dass Gestaltung, Entwicklung und Beschaffung der Verpackung durch den Zulieferer erfolgt, der ihn dadurch als Full Service-Anbieter noch weiter von dessen externen Aufgaben entlastet. Ebenso wird häufig erwartet, dass diese nicht direkt der Produktherstellung zuzuordnenden Kosten vom Zulieferer vorfinanziert bzw. auf den Produktteilpreis umgelegt werden. Bis SOP (Start of Production) können hier durchaus zwei Jahre Vorfinanzierungszeit auflaufen.

Dieser Umstand war Anlass für Überlegungen bei Varioplast, auch dieses Glied der Wertschöpfungskette ins Haus zu holen und zu optimieren, mit dem Ziel auch dort die eigene Kompetenz zum Nutzen des Kunden anbieten zu können. Weiterer Anlass war die Erkenntnis, dass am Markt kein Verpackungssystem existierte, das die Wünsche und Vorstellungen von Varioplast vollständig erfüllen konnte.

Am Anfang stand daher zunächst die zentrale Frage im Vordergrund wie ein Verpackungssystem idealerweise gestaltet sein muss um Funktion, Ökonomie, Ökologie und Robustheit bestmöglich miteinander zu verknüpfen.

Ziel war ebenso, die im Hause Varioplast zur Verfügung stehenden Produktionsmöglichkeiten zu nutzen sowie von der Konzeption spezifischer Produktverpackungen bis zur vollständigen Fertigung derselben in Serie alles komplett im eigenen Hause abzubilden. Dies steigert die eigene Wertschöpfung, stärkt Know-how und Kundenbindung und gestattet höchstmögliche Flexibilität in Bezug auf spezifische Anpassungen und Lieferzeiten. Gleichzeitig wird die Wirtschaftlichkeit und damit Wettbewerbsfähigkeit erhöht.

Diese Gedanken mündeten dann schließlich in der Entwicklung der mittlerweile patentierten VARIOBOXX®, die von Varioplast nun auch als Eigenprodukt vertrieben wird.

Auslegung

Da Varioplast sowohl im Thermoplastspritzguss als auch im Thermoformen von Kunststofffolien zuhause ist, entwickelte sich die Idee beide Technologien in der Auslegung einer Mehrwegverpackung miteinander zu verheiraten. Daraus entstand eine hybride Struktur der Verpackung mit einer spritzgegossenen Standard-Trägerbox (Frame) und einer darin eingepassten, produktabhängig folien-thermogeformten Inlaybox mit Cover.

Dies führte zu dem für die Variobox typischen Box-in-Box-System. Dabei übernimmt der Frame die Stapelfunktion und Inlay sowie Cover Produktfixierungs- und Staubschutzfunktion.

In der Spritzgießerei werden überwiegend Maschinen von Arburg mit Schließkräften bis zu 5500 kN und einem maximalen Schussgewicht von ca. 1,5 kg eingesetzt. Diese Größen waren Basis für die konstruktive Auslegung der Trägerbox. Beim Thermoforming von Folien wird seit 2012 die neueste Thermoforming-Technologie von Illig eingesetzt.

Sehr vorteilhaft und ökologisch sinnvoll ist die Wiederverwendung von Kunststoffabfällen, die im Betrieb anfallen. Als Recyclat aufbereitet, werden sie bei der Herstellung der Box erneut verarbeitet.

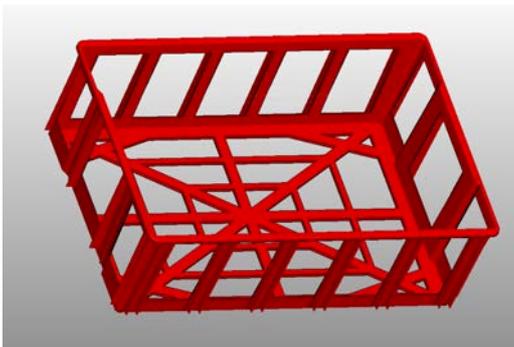


Bild 1: Variobox-Frame als spritzgegossenes Formteil

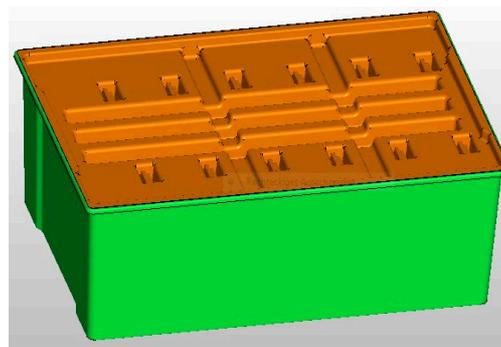


Bild 2: Variobox Inlay und Cover vakuumtiefgezogen im Thermoformingverfahren

Der Markt bei Mehrwegverpackungen ist vielfältig. Speziell Industrieverpackungen müssen Anforderungen an ein großes Produktspektrum erfüllen. Sehr wichtig ist beispielsweise das manuelle oder auch automatische (Zwischen-) Handling der Verpackung in der Logistikkette. So wurde ganz besonderes Augenmerk auf ein geringes Traggewicht gelegt. Dies ermöglicht entweder eine deutliche Entlastung beim Handling oder lässt ein höheres Nutzgewicht zu. Ein weiterer Aspekt war der Wunsch, den Inhalt der Verpackung bereits von außen

zu identifizieren, ohne die Box vorher öffnen zu müssen. Und natürlich Robustheit beim Stapeln im Blocklager und im manuellen Handling. Die Staubdichtheit über das eingepasste Cover schützt die verpackten Materialien und vermeidet spätere Reinigung. Ein wesentlicher Aspekt zur Auslegung war die notwendige Fähigkeit, Teile fixiert und formschlüssig sicher in der Verpackung zu positionieren, um einen beschädigungsfreien Transport zu gewährleisten.

Schlussendlich wurden aufgrund der sehr unterschiedlichen Teilegrößen und des sowohl für Schüttgut als auch für zu fixierende Teile einzusetzenden Systems mehrere, derzeit vier Baureihen aufgesetzt.

Eine Neuerung in der Handhabung der Cover wurde in 2013 eingeführt – die Unverlierbarkeit. Dies wurde gelöst durch ein am jeweiligen Inlay angeformten und mittels Filmscharnier verbundenes Cover. Damit ist ein schnelles und sicheres Verschließen gewährleistet. Auch diese Funktion stellt bisher ein Alleinstellungsmerkmal für die Variobox dar.

Ganz besonders hervorzuheben ist, dass es mit dieser sehr leichten und dennoch robusten Verpackung durch die Kombination der Verfahrenstechniken Spritzguss und Thermoforming unter geschickter Nutzung der jeweiligen Prozess- und Produktvorteile möglich ist, die CO₂-Bilanz eines Produktes unter Betrachtung der gesamten Lieferkette mit der Variobox signifikant zu verbessern. Bereits bei der Herstellung der Variobox werden Ressourcen geschont und später bei der Nutzung über ihren gesamten Einsatzzeitraum durch spürbar reduziertes Transportgewicht.

Konstruktion

Zur Formteil- und Werkzeugoptimierung werden bei Varioplast u. a. CAE-Berechnungen durchgeführt. Speziell um die fertigungstechnischen Restriktionen und Prämissen für den spritzgegossenen Frame einhalten zu können und gleichzeitig einen stabilen Fertigungsprozess und damit optimale Produktqualität zu erreichen, wurde die Formteilgeometrie mittels rheologischer Simulationen in mehreren Schritten im Detail immer weiter optimiert.

Prämissen:

- Keine Hinterschnitte (Vermeidung von Schiebern)
- Formteilgewicht mind. 15 % geringer als max. Schussgewicht
- Projizierte Spritzfläche begrenzt durch max. verfügbare Zuhaltung
- Füllung der Form nur über einen Anschnitt (Fließhilfen)
- Hohe Steifigkeit und Stabilität des Frames erwünscht

Die Simulation ergab, dass bei einem zentralen Anspritzpunkt in der Mitte des Teiles nur über Fließhilfen in alle Richtungen der Materialfluss und die vollständige Formfüllung gewährleistet ist. Die rheologisch im Querschnitt optimierten und massiven Fließhilfen erhöhen gleichzeitig die Steifigkeit der Trägerbox erheblich.

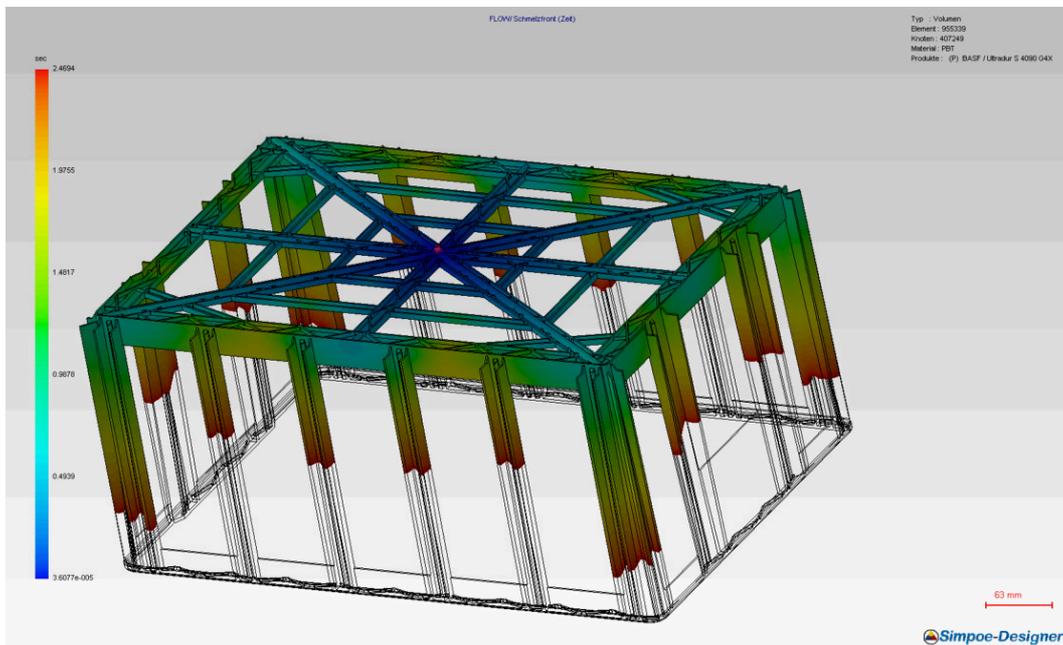


Bild 3: Vor Beginn der Werkzeugkonstruktion wird eine CAE-Berechnung durchgeführt.

Dies zeigte sich auch bei später durchgeführten Belastungstests.

Die Ausprägung der Kontur speziell in den Bereichen, die als Auf- und Anlage für die thermogeformten Inlays und den Deckel dienen, ist bei Radien und Rippen funktionell optimiert. Beim Frame musste konstruktiv die Aufgabe der idealen Übernahme der in den Inlays zu transportierenden Lasten gelöst werden.

Die Baureihen, momentan vier Größen, wurden konstruktiv aufeinander abgestimmt und größtmäßig auf Belange des bei Varioplast existierenden Produktspektrums hin ausgelegt in Anlehnung an Europalettenmaße und im Markt seit Jahren eingeführte KLTs (Kleinladungsträger).

Bei Konstruktion von (Thermoform-) Inlay-, Cover- und Traywerkzeugen sind besonders die eingesetzten Folien mit den teileabhängigen Ziehtiefen, den Radi-

enkonturen und Maßtoleranzen in Abstimmung zu bringen. Dabei wurde aus Wirtschaftlichkeitsgründen angestrebt, die Folienwandstärken so gering als möglich zu halten und dennoch die Produktfixierungsfunktion zu gewährleisten.

Werkzeugbau

Die Spritzgießformen wurden bei einem asiatischen Partnerbetrieb gefertigt. Die Herstellung der Thermoformwerkzeuge erfolgte in Deutschland.

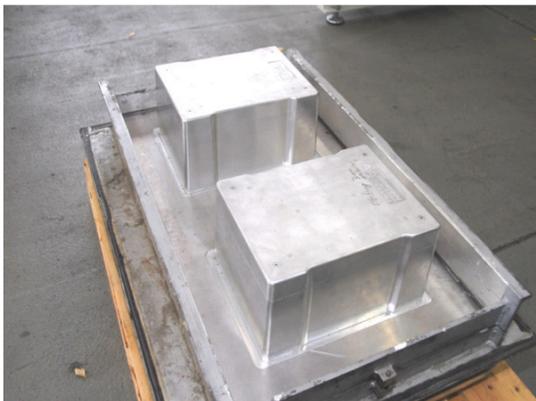


Bild 4: Thermoforming-Werkzeug für die Inlay-Herstellung



Bild 5: Spritzgießwerkzeuge für die Herstellung der Baureihen des Varioboxx-Frame

Produktion

Die Trägerboxen werden auf Spritzgießmaschinen neuester Bauart im Schließkraftbereich von 2500 kN bis 5500 kN gefertigt. Werkzeuge und Maschinen werden geothermisch gekühlt und dadurch wird bereits bei der Produktion Ökologie und Ökonomie in Einklang miteinander gebracht. Ebenso wird ein hoher Recyclatanteil bereits im zentralen Materialfördersystem vorgetrocknet und automatisch zudosiert, ohne dabei Einbußen an die Produktqualität in Kauf nehmen zu müssen. Die Reproduzierbarkeit des Einspritzprozesses wird durch eine lagege-regelte Schnecke weiter optimiert. Das Teilehandling an der Maschine übernimmt ein Knickarm-Roboter wobei das Einsetzen von Inlay und Cover direkt nach dem Spritzgießen des Frames erfolgt.

Die Inlays, Cover und Trays werden auf einer Thermoforming-Maschine (Vakuumformautomat) ebenso neuester Bauart mit vollelektrischen Fahrachsen, Vorwärmstation und umfangreicher Prozessregelung hergestellt.

Mit der Technik der Vakuumformung in Verbindung mit einfach aufgebauten Werkzeugen lassen sich Formteile ökonomisch und rationell auch in kleinen Serien herstellen. Bei der Verarbeitung erlaubt die Vorblasautomatik durch Vorstrecken der Folie eine gleichmäßige Wanddicke auch bei hohen Ziehteilen.



Bild 6: Vollautomatische Spritzgießmaschine mit einer Schließkraft von 5.500 kN und Schussgewichten bis 1,8 kg.



Bild 7: Vakuumformautomat mit vollautomatischer Abarbeitung vom Coil und automatischer Vorwärmung der Folien.

Vorteile der Varioboxx

Die Varioboxx, eine Standard-Trägerbox mit einer darin eingepassten, produktabhängig geformten Inlaybox, ist die ideale Mehrwegverpackung für ein großes Produktspektrum. Damit lassen sich Teile passgenau und leicht handhabbar platzieren, staubdicht verpacken, sicher, kostengünstig und umweltfreundlich transportieren. Die Ökobilanz bei Herstellung und Einsatz der Varioboxx kann sich sehen lassen.

Der Clou der „Box-in-Box“-Lösung ist das Inlay. Es passt sich konturgetreu der Trägerform an und ist als tiefgezogene Folie mit einer Wandstärke zwischen 0.2 und einem Millimeter in seiner Formgebung frei gestaltbar. So können die zu transportierenden Teile in ihrer Kontur sicher platziert, gehalten und transportiert werden. Die Trägerbox selbst ist auch ohne das „Forminlay“ verwendbar, beispielsweise als Träger für horizontal geschichtete Trays zum Aufnehmen kleiner flachbauender Teile. Eine Variante, die es erlaubt, Wandstärken von Stapelthermoformtrays deutlich zu reduzieren.

Die Vorteile im Detail:

- **Leicht:** Die Variante 600 x 400 x 200 mit Frame, Inlay und Cover wiegt beispielsweise nur 1,3 kg. Der Wettbewerb liegt hier bei mehr als dem doppelten Gewicht. Das erleichtert das Handling und schont den Rücken.



Bild 8: Gewichtsvorteile für die Variobox gegenüber dem Wettbewerb (KTL-Box)



Bild 9: Beliebige Farben möglich

- **Maßgefertigt:** Die Inlays und das Cover können nutzungsabhängig geformt werden, und damit individuell auf die Anforderungen des zu verpackenden Produktes hin abgestimmt werden.
- **Teilefixierung:** Die Fixierung wird durch eingeformte Konturen im Inlay und gegebenenfalls auch im Deckel gewährleistet. Eine andere Variante ist die Verpackung formschlüssig in Trays, diese dann wiederum in einem glatt ausgeformten Inlay in mehreren Lagen in die Box eingebracht werden.



Bild 10: Diverse Einsatzmöglichkeiten der Variobox mit Trays, mit Schüttgut, mit kratzgeschützten fixierten Produkten.

- **Robust:** Das Frame ist auf hohe Steifigkeit ausgelegt, dokumentiert durch Belastungstests durch das VDZ Dortmund. Im Maximum kann eine Boxenlage 600 x 400 x 200 je 5 Boxen eine Berstkraft von 8.000 daN aufnehmen, was einer Gewichtslast von 8 Tonnen entspricht. Hieraus ergibt sich auch die aus-

gezeichnete Eignung für eine Blocklagerung, d. h. mehrere Paletten direkt übereinander zur Einsparung von Lagervolumen.

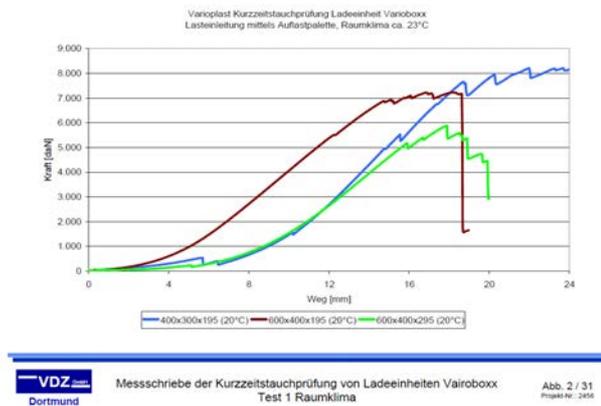


Bild 11: Belastungstests der Varioboxx im VDZ-Dortmund ergaben eine maximale Berstkraft von 8.000 daN auf die Palette.

- **Kostengünstig:** Die Einsparungen ergeben sich im Handling durch das geringe Gewicht, sowie bereits in der Herstellung der Varioboxx durch geringstmöglichen Materialeinsatz und energiereduzierte Fertigung.
- **Farbauswahl:** Der Frame kann in beliebigen Farben gefertigt werden.
- **ESD-fähig:** Als Option können alle Teile der Box auch ESD fähig, d. h. mit antistatischer Ausrüstung produziert werden.
- **Umweltfreundlich:** Die Ökobilanz zur Varioboxx sieht wie folgt aus:
 - **Reduzierung von ca. 2 kg CO₂ je Box bei der Herstellung**
 - **Verbrauchsreduzierung um ca. 2 Liter Diesel je 100 km und damit eine CO₂ Emissionsreduzierung von ca. 5 kg je 100 km;**
(hochgerechnet auf eine LKW-Ladung mit 1430 Varioboxxen gegenüber Standard KLTs)
 - **Anders ausgedrückt:** Jede einzelne Box reduziert den CO₂-Ausstoß um ca. 3,5 kg je 100.000 gefahrener Straßenkilometer.
- **Stapelbar:** Die Standard-Box mit 600 x 400 x 200 ist auf ¼-Fläche einer Europalette ausgelegt und stapelbar in den geforderten Stapelhöhen auf dem LKW, im Container oder im Lagerbereich. Die drei weiteren Boxgrößen lassen sich in dieses Raster einfügen.

- **Staubdicht:** Eingeklappt verschließt das Cover die Box staubdicht. Reinigung des Transportguts ist nicht nötig.
- **Transparent:** Ein wichtiger Faktor ist die Möglichkeit der visuellen Steuerung und Kontrolle im Logistikbereich. Beim Gang durch das Lager kann man den Verpackungsinhalt bereits von außen identifizieren.
- **Einsatzvariabel:** Die Einsatzmöglichkeiten des vorgestellten Verpackungssystems sind nicht nur auf technische Anwendungen begrenzt. Die Vorteile der Varioboxx könnten selbstverständlich auch in anderen Bereichen (z. B. Arznei- und Lebensmittellager/Transportsystem) sinnvolle Verwendungsmöglichkeiten finden. Der Fantasie sind hier keine Grenzen gesetzt.



Bild 12: Das Cover mit Filmscharnier am Inlay der Varioboxx.

Einsatz der Varioboxx intern und extern

Im Produktionsablauf bei Varioplast ist der Einsatz der Varioboxx zum Standard geworden und aus der betrieblichen Logistik nicht mehr wegzudenken. Zu einer kostenoptimierten Fertigung gehört auch die Abstimmung von Fertigungslosen auf Lieferlosgrößen. Dies bedeutet häufig und insbesondere im Hinblick auf JIT-Lieferungen für den Zulieferer Fertigteilbevorratung. Hier kommt die Varioboxx zum Einsatz mit allen genannten Vorzügen.

Ob als Schüttgut, geschichtet, oder formschlüssig verpackt, alle Varianten finden bei Varioplast Anwendung. Auf Zwischenlagerung halbfertiger Produkte wird weitestgehend verzichtet. Schwerpunkt bildet die Lagerung lieferfertiger Produkte und Baugruppen aus Einzel- oder Inlinefertigung.

Ein aktuelles Beispiel für die Verwendung der Varioboxx ist die Fertigung einer Blendengruppe im Instrumentenbereich eines PKW.

Hier werden ca. 800.000 Baugruppen pro Jahr gefertigt, lackiert und montiert und direkt an der Fertigungslinie verpackt. So gegen Verkratzen und Beschädigung

geschützt, wird gleichzeitig höchstmögliche Ladungsdichte und damit optimale Verpackungsvolumenausnutzung durch die Varioboxx erzielt. Es finden im Rundlauf permanent komplette LKW-Lieferungen zum Montagestandort des Abnehmers über eine Wegstrecke von 1100 km mit anschließendem Rücktransport der Leerverpackungen statt.

Dieser Ablauf ist seit einigen Jahren eingeführt – dabei haben die Varioboxxen bereits jeweils mehrere 100.000 km Wegstrecke zurückgelegt. Damit ist die Praxistauglichkeit längst nachgewiesen und die geschilderten ökologischen und ökonomischen Vorteile konnten ihre Wirkung voll entfalten.



Bild 13: Einlegen und Positionieren der Frontmasken in die Varioboxxen.



Bild 14: Blocklager der versandfertig bestückten Varioboxxen.

Fazit

Der von Varioplast beschrittene Weg zur Entwicklung und Fertigung eines neuartigen Verpackungssystems war zielführend und erfolgreich. Es wurden Kompetenzen erweitert und die eigene Wertschöpfungskette verlängert. Gleichzeitig kann ein eigenes, patentiertes Produkt am Markt angeboten werden, welches gegenüber existierenden Lösungen in vielen Bereichen durch signifikante Vorteile besticht.

Die Vermarktung der Varioboxx steckt noch in den Anfängen. Bislang wurde auf Fachmessen und in Fachpublikationen darüber informiert. Weitere Marketingaktivitäten sind geplant.

Nicht zuletzt die Möglichkeit, von der Beratung über die Entwicklung bis zur Fertigung der Inlays, Trays und Boxen nur einen einzigen Lieferanten und Ansprechpartner zu haben, sollte die Attraktivität des Angebotes weiter erhöhen.

Gewichtsreduzierung durch Leichtbau mit PP-Compounds

Timo Schuler,
RIA-Polymers GmbH

Ökologie und Ökonomie erhalten in allen Branchen einen weiter steigenden Stellenwert.

Betrachtet man unter diesen beiden Aspekten unterschiedlichste Industriezweige fällt unweigerlich immer wieder ein Schlagwort – Gewichtsreduktion.

Nicht nur in dem Bereich Transportwesen (Automobil, Bahn, Bus, LKW, Luft- und Raumfahrt) sind Anforderungen an Gewichtseinsparungen von immer größerer Bedeutung. Auch in der Sport- und Freizeitindustrie, der Elektroindustrie oder auch bei Arbeitsgeräten hat die Eigenschaft „Dichte“ schon längst andere Anforderungen in den Schatten gestellt.



Bild 1: Leichtbau in allen Lebenslagen

Die Zielvorgabe, leichtere Baugruppen herzustellen, stellt die OEMs, Tier 1s und damit vor allem die kunststoffverarbeitende Industrie vor immer neue Herausforderungen und Aufgaben.

Ein geringeres Bauteilgewicht, verbunden mit first-class Oberflächen, angenehmer Haptik, hohem akustischen Dämpfungsvermögen, hervorragenden mechanischen Eigenschaften oder hohen Brandschutzanforderungen bei einfachster Verarbeitbarkeit, sind Wünsche und Bedürfnisse, die mit neuen Werkstoffen umgesetzt werden können.

Um der Anforderung „Leichtbau“ gerecht zu werden, bedarf es jedoch nicht nur werkstofftechnischer, sondern auch konstruktiver oder verfahrenstechnischer Raffinessen.

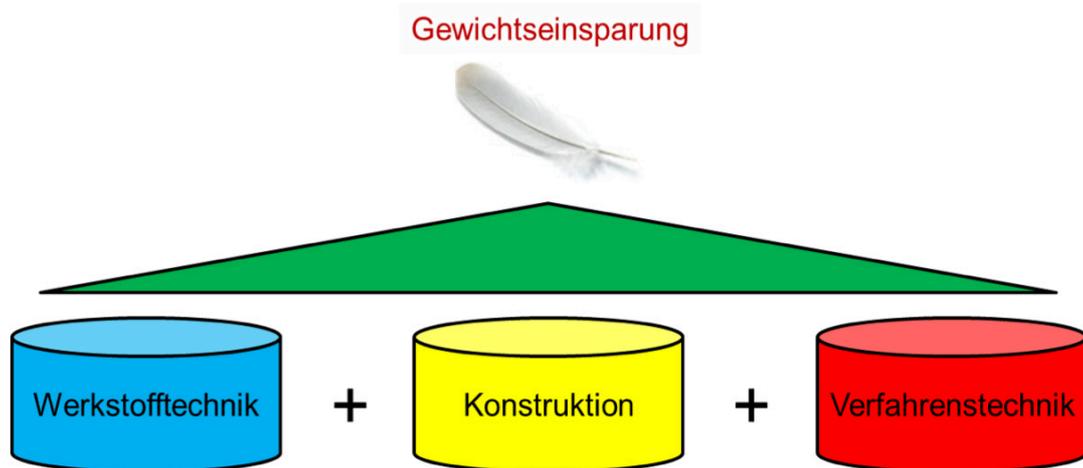


Bild 2: Drei Säulen als Voraussetzung zur Gewichtseinsparung

So erleichtern heutzutage CAD-Programme das Konstruieren mit Kunststoffen enorm und tragen dazu bei, Kosten zu sparen und unnötig dicke Wandstärken zu vermeiden. Egal was man untersuchen möchte, das Anbringen von Verrippungen, die Faserlage im Bauteil oder das Verschieben von Bündenähten in mechanisch weniger belastete Bauteilbereiche, die CAD-Programme ermöglichen eine Simulation vor der Werkzeugfertigung und dies spart Zeit, Material und somit Geld und Gewicht.

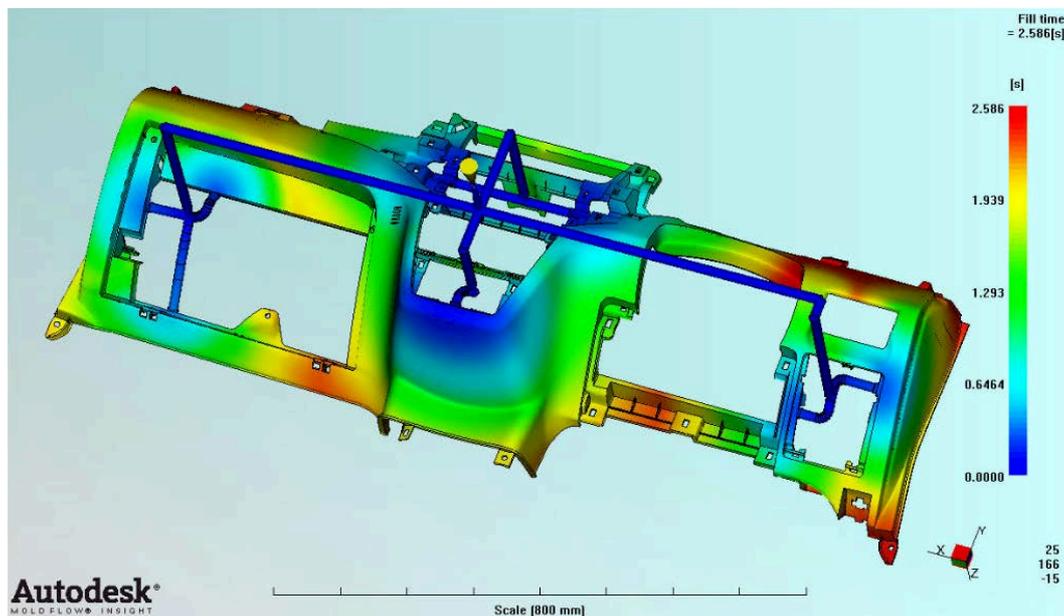


Bild 3: Moldflowsimulation einer Instrumententafel (Quelle: <http://china-jingsen.com>)

Auch die Auswahl einer geeigneten Verfahrenstechnik dient dem Leichtbau. Geschäumte Formteile mit Mikroschaumstruktur im MuCell-Verfahren hergestellt, kommen immer öfter bei Trägerbauteilen zum Einsatz. In diesem Verfahren sind allerdings keine first-class Oberflächen möglich, da es sich nicht vermeiden lässt, dass das physikalische Treibmittel an einigen Stellen an die Oberfläche tritt.

Eine andere Spritzgusstechnologie zur Gewichtsreduktion stellt das sogenannte WIT-Verfahren (**W**asser-**I**nnendruck-**T**echnik) dar. Neben hervorragender Oberflächengüte erreicht man durch den hohlen Bauteilkern einen optimierten Kraftfluss, was zu einer verbesserten Mechanik des Formteils führt.

Wasserinjektionstechnik (WIT) + **RIALENE® P...SGF..**



Bild 4: Schubkarre aus RIALENE® P... SGF.. UV3 [Quelle: PME fluidtec]

Was man alles durch die Kombination von hocheffizientem Werkstoff, ausgeklügelter Konstruktion und passender Verfahrenstechnik erreichen kann, zeigt das Beispiel des mehrfach prämierten Schubkarrens aus **RIALENE® P ...SGF.. UV3**.

- 8 kg Gewichtsvorteil gegenüber Stahl
- Exzellente Steifigkeit bei hervorragendem Bruchdehnungsverhalten
- Sehr gute Schlagzähigkeit
- Keine Korrosion
- Beste Verarbeitbarkeit im Wasserinjektionsverfahren (WIT)
- Konstante Wanddicken über den Rahmen
- Lebensdauer–Lifetime!!

Gewichtsreduktion durch Leichtbau ist daher heute durchaus ein Ziel, was mit hochleistungsfähigem, glasfaserverstärktem Polypropylen, **RIALENE® P**, aus dem Hause RIA-Polymers GmbH realisiert werden kann.

Gezielte Werkzeugtemperierung für optimierte Spritzgießbauteile

Regina Weinland,
Hochschule Pforzheim

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. Einleitung | 73 |
| 2. Problemstellung | 74 |
| 2.1. Hohe Fließweg-Wanddickenverhältnisse | 74 |
| 2.2. Oberflächenqualität | 75 |
| 2.3. Bindenähte | 75 |
| 3. Rheologie | 76 |
| 3.1. Fließsituation während der Formfüllung einer rechteckigen Platte beim Spritzgießen | 76 |
| 3.2. Fließvorgänge bei komplexen Formen | 78 |
| 3.2.1. Kalte Bindenähte | 79 |
| 3.2.2. Heiße Bindenähte oder Fließnähte | 81 |
| 4. Beeinflussung der Problemstellen durch höhere Werkzeugtemperaturen | 82 |
| 4.1. Bindenähte | 82 |
| 4.2. Spannungen, Schrumpf | 87 |
| 4.3. Kristallisation | 88 |
| 5. Berechnung der erforderlichen Werkzeugtemperaturen | 88 |
| 6. Möglichkeiten einer variothermen Temperierung | 90 |
| 6.1. Temperierung mit Wechseltemperiersystem mit Temperiermedium | 91 |
| 6.2. Temperierung mit elektrischen Heizelementen | 92 |
| 6.3. Temperierung mit induktiver Erwärmung | 92 |
| 6.4. Weitere Verfahren | 93 |
| 6.5. Anwendung | 93 |
| LITERATURVERZEICHNIS | 93 |

1. Einleitung

Die beim Spritzgießen wie in jeder Branche gestellte Forderung nach Energie- und Ressourceneinsparung und immer kostengünstigerem Produzieren, führt zu immer dünneren und leichteren Bauteilen und stellt Hersteller vor immer neue Herausforderungen. Es gilt, ein geringes Gewicht und sehr dünne Wandstärken mit einer hohen mechanischen Stabilität in Einklang zu bringen.

Hinzu kommen aus ästhetischen Gründen steigende Anforderungen an die Qualität der Oberflächen, denn viele Kunststoff-Bauteile nehmen dem Anwender gegenüber zunehmend eine Designfunktion ein, die mit perfekten, komplex gestalteten Oberflächen und einer entsprechenden Haptik verbunden ist. Die Bedeutung wird weiterhin zunehmen, da die Anforderungen an das Design die Wertigkeit und die hohen Qualitätsansprüche an das Produkt widerspiegeln.

Die Immer-dünner-und-leichter-Philosophie führt dazu, dass entweder teure Hochleistungs-Kunststoffe oder mit hohem Faseranteil gefüllte Kunststoffe eingesetzt werden müssen. Ein Problem dabei ist z. B., dass die Oberflächenqualität mit steigendem Fasergehalt sinkt. Die Fasern sind an der Oberfläche sichtbar und zeichnen sich auch noch nach dem Lackieren ab.

Durch die dünner werdende Wandstärke erhöht sich das Fließweg-Wanddicken-Verhältnis. Dies ist aber nur begrenzt möglich, denn um hohe Verhältnisse realisieren zu können, muss entweder die Schmelztemperatur zur Erniedrigung der Viskosität erhöht werden, was nur im Rahmen der thermischen Materialgrenzen möglich ist, oder man muss mit hohen Drücken einspritzen. Die Höhe des max. Einspritzdrucks ist durch die Maschinenauslegung bestimmt, d. h. bei höheren Drücken muss man auf leistungsfähigere Maschinen ausweichen, was einen erhöhten Kostenfaktor darstellt.

Die Entwicklung und Anwendung von anspruchsvollen technischen Produktkomponenten ist also zunehmend geprägt von:

- **geringerem Werkstoffeinsatz**, verbunden mit Gewichtseinsparung und Volumenreduzierung
- der **Ressourceneinsparung** in der Fertigung
- dem Erzielen des endgültigen Finishes in einem **Fertigungsverbund Spritzgießen/Weiterbearbeitung**
- **anspruchsvolleren Werkstoffen**, die bei kleiner Wanddicke hohe Festigkeiten aufweisen

- Erzielung einer **hohen Abbildungsgenauigkeit** bei feinen Strukturen (Medizintechnik, Nanostrukturen wie Lotuseffekt o. ä.)
- Im Hinblick auf **Folgeprozesse**, wie beispielsweise die Veredelung von Oberflächen am Kunststoffteil in Form von Galvanisierung oder auch Beschichtungstechniken wie das PVD-Beschichtungsverfahren, ist die Oberflächengenauigkeit von entscheidender Bedeutung. Kann die Oberfläche in einer Spiegelglanzqualität ohne Fehler dargestellt werden, kann auf eine der Beschichtung vorgeschaltete Lackierung zum Erreichen der erforderlichen Oberflächengüte verzichtet werden.

Um die vorgenannten Anforderungen erfüllen zu können, müssen Einschränkungen durch das Fließverhalten des in der Form erkaltenden Kunststoffes beim Füllvorgang überwunden werden. Durch geeignete Temperierungs-Maßnahmen muss der raschen Erhöhung der Viskosität der Schmelze in der Übergangsschicht Werkzeug-Kunststoff beim Spritzgießen entgegengewirkt werden.

Deshalb sind Kenntnisse über Wärmeaustauschvorgänge im Werkzeug und über die Auswirkung der rheologischen Situation der Schmelze während des Formfüllvorganges auf die späteren Struktureigenschaften des Formteils von wachsender Bedeutung.

2. Problemstellung

Beim Formfüllvorgang wird heiße Kunststoffschmelze in ein deutlich kälteres Werkzeug eingespritzt. Durch Wärmeleitung wird die Wärme im Werkzeugstahl vom Formteil weg zu den Kühlkanälen transportiert. Dabei kühlt sich die einströmende Schmelze beim Auftreffen auf die Werkzeugwand stark ab, es bildet sich sofort eine dünne erstarrte Randschicht aus, die während der Abkühlphase immer dicker wird, und das Fließverhalten der Schmelze stark beeinträchtigt.

2.1. Hohe Fließweg-Wanddickenverhältnisse

Je dünner das Bauteil ist, desto schneller kühlt die Schmelze ab. Wird das Fließweg-Wanddickenverhältnis zu groß, braucht man beim konventionellen Spritzguss hohe Materialtemperaturen, hohe Drücke und hohe Einspritzgeschwindigkeiten um die Form komplett zu füllen. Dabei stößt man häufig an die eigenschaftsbedingten Materialgrenzen. Es erhöht sich die Gefahr von Materialschädigungen (z. B. thermische Zersetzung, Dieseleffekt), Schwindung, Einfallstellen, Verzug. Oft kommt man auch an die Leistungsgrenzen der Spritzgießmaschine.

2.2. Oberflächenqualität

Soll eine sehr fein strukturierte Oberflächentopographie abgebildet werden (Narbung, feine Kanäle, Lotuseffektfläche), ist es wichtig, eine niedrige Viskosität der Schmelze in den Randschichten zu gewährleisten. Durch ein mehr oder weniger gerautes Werkzeug vergrößert sich die Oberfläche der Kavität, was einen noch größeren und schnelleren Wärmeabfluss zur Folge hat. Die sich dadurch bildende Spannung in der Randschicht verhindert das Fließen der Schmelze in jede Formvertiefung.

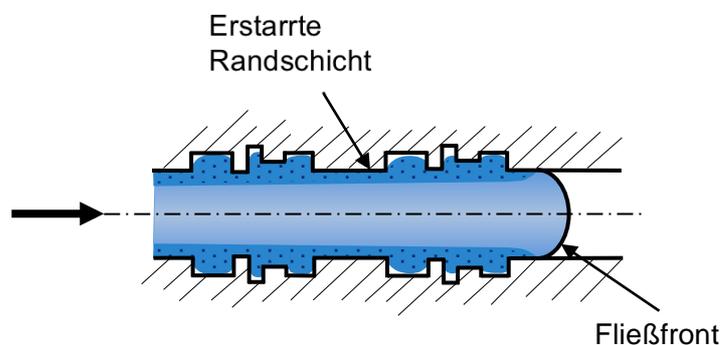


Bild 1: Unvollständige Formfüllung

Um feine und feinste Oberflächenmerkmale darzustellen ist es nötig, das Werkzeug höher zu temperieren, um die Schmelze länger flüssig zu halten.

2.3. Bindenähte

Die bekannte makroskopische Struktur des Phänomens „Bindenähte“ entsteht durch eine Wiedervereinigung von zwei getrennt geleiteten Schmelzfronten im Werkzeughohlraum.

Dies ist zum Beispiel immer der Fall, wenn Durchbrüche am Spritzteil eine Schmelzstromauftrennung im Werkzeughohlraum erzwingen.

Auch wenn mit mehr als einem Anguss gearbeitet wird, was im Falle von technischen Teilen mit langen Fließwegen in der Praxis häufig zum Einsatz kommt, bilden sich Bindenähte.

Bei Wandstärkenunterschieden im Bauteil können sich durch die dann vorherrschenden unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten der Schmelze beim Zusammentreffen der Fließfronten Bindenähte ausbilden. Ebenso können Einlegeteile zu Bindenähten führen, was oft besonders kritisch ist, weil das Einlegeteil später meist eine lasttragende Funktion ausüben soll.

Bindenähte stellen oft eine optische und immer eine mechanische Schwachstelle dar, denn es gibt keine vollständige Vereinigung der beiden Fließfronten nach ihrem Zusammentreffen. Es bildet sich eine V-förmige Kerbe an der Werkstückoberfläche, die zu einer beträchtlichen Festigkeitsminderung führt.

Durch die aus Rationalisierungsgründen angestrebte Verringerung der Kühlzeiten verschärft sich dieses Problem extrem und wirkt durch die Produktion von mehr Ausschussteilen eher kontraproduktiv.

Die Gefahr von Fehlstellen erhöht sich bei komplexer Geometrie des Bauteiles und wird größer, je dünner ein Bauteil ist. Da Bindenähte immer ein Qualitätskriterium sind, sollte man versuchen, sie zu vermeiden oder zumindest abzuschwächen. Dabei ist es wichtig, zu verstehen, wie sich Bindenähte bilden.

3. Rheologie

3.1. Fließsituation während der Formfüllung einer rechteckigen Platte beim Spritzgießen

Bild 2 zeigt die Strömung bei der Formfüllung eines einfachen, rechteckigen Kanals. Wird die Schmelze über einen sog. Angusspunkt eingespritzt, beginnt sie sich von diesem Punkt mit geschlossenen Fließfronten kreisförmig auszubreiten, bis sie die gesamte Breite der Kavität ausfüllt. Einige Zeit danach kann der Bereich zwischen dem Einlauf und der Fließfront als nahezu ausgebildet betrachtet werden. An der Fließfront selbst herrscht eine besondere Strömungssituation, die als „Quellfluss“ bezeichnet wird.

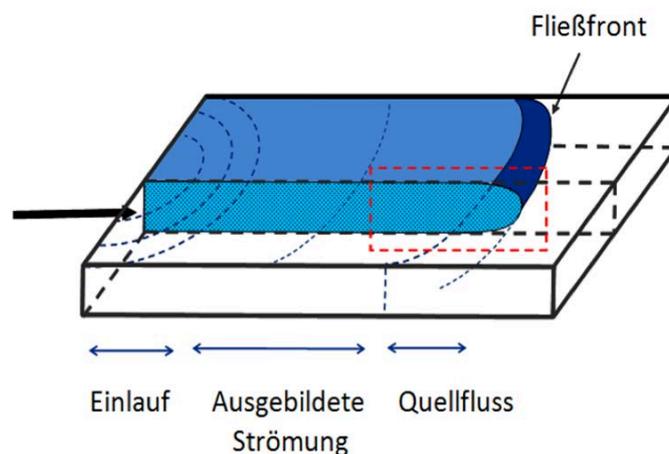


Bild 2: Formfüllung einer rechteckigen Kavität [17]

In **Bild 3** sind die Strömungsverhältnisse in einem Querschnitt der Werkzeugkavität dargestellt. Während die Fließfront mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fortschreitet, unterscheiden sich die Geschwindigkeiten in den verschiedenen Schichten stark: An der kalten Werkzeugwand erstarrt die Masse schlagartig, sie „friert“ ein. In dieser Schicht finden keine Fließvorgänge mehr statt. Durch die

dadurch entstehende Kanalverengung nimmt die Schmelzgeschwindigkeit in der Formmitte zu. Die höchsten Geschwindigkeitsgradienten befinden sich nahe unterhalb der eingefrorenen Schicht. Deshalb wird hier die Schmelze besonders stark geschert und die Moleküle und gegebenenfalls Füllstoffe (z. B. Glasfasern) in Fließrichtung orientiert. Hier ist auch die höchste Temperatur der Schmelze. Durch die Wärmedissipationsvorgänge bei der Scherung kann sich hier eine Temperatur einstellen, die höher ist, als die vorgegebene Schmelztemperatur. Das Geschwindigkeitsmaximum in der Mitte der Fließfront ist durch die Kanalverengung infolge der erstarrten Randschichten erheblich größer als die Geschwindigkeit der Fließfront. Daher holen die von der Fließfront weiter entfernten Schmelzteilchen die Fließfront rasch ein und fließen dort quer zur Hauptströmungsrichtung sowohl in Dicken- wie auch in Breitenrichtung. Hierdurch wird die schon stärker abgekühlte hochviskose Fließfront wie eine Haut quer zur Fließrichtung gedehnt und bei Berührung der gekühlten Werkzeugwand sofort eingefroren.

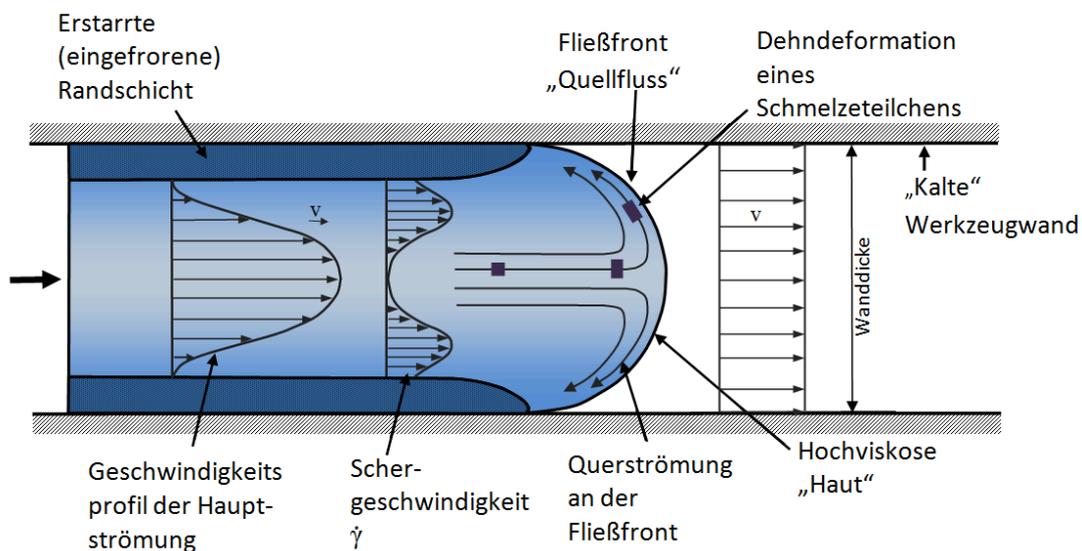


Bild 3: Geschwindigkeitsprofile über dem Fließkanalquerschnitt [20]

Durch die mit fortschreitender Abkühlzeit dicker werdende Randschicht schiebt sich das Schergeschwindigkeitsmaximum und somit auch das Orientierungsmaximum vom Formteilrand zum Formteilinnern und sein Absolut-Betrag erhöht sich. Die Verschiebung ist in erster Linie von der Einspritzgeschwindigkeit und der Werkzeugwandtemperatur, in geringerem Maße auch von der Massetemperatur abhängig [18].

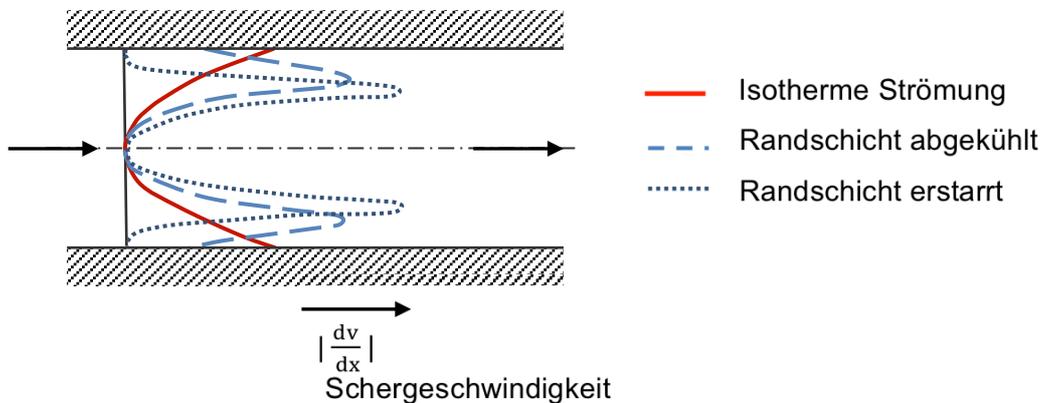


Bild 4: Schergeschwindigkeitsverteilung über dem Kanalquerschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten während der Füllphase [18]

In **Bild 5** sind die dann entstehenden Fließwege und das zeitliche Fortschreiten der Schmelzfront symbolisch für einzelne Masseteilchen dargestellt. Durch die Geschwindigkeitsunterschiede in Strömungsmitte und Randschicht ergeben sich die bekannten V-Profile im Strömungsbild.

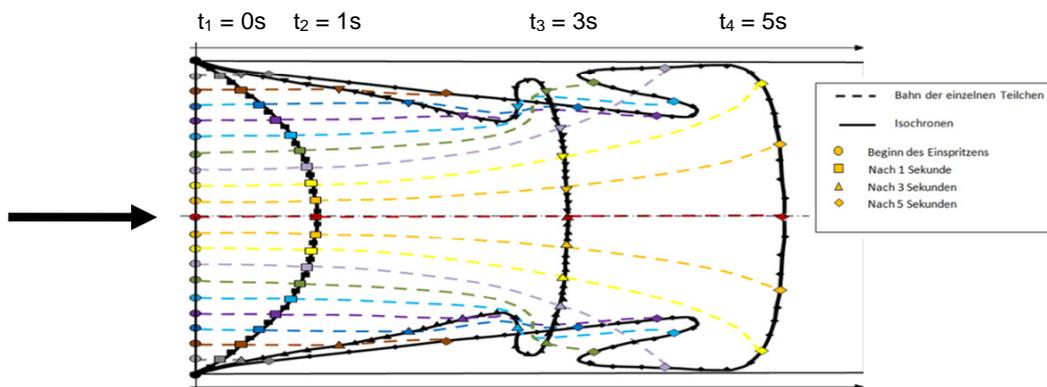


Bild 5: Fließwege und das zeitliche Fortschreiten der Schmelzfront symbolisch für einzelne Masseteilchen [in Anlehnung an 17]

3.2. Fließvorgänge bei komplexen Formen

Bei komplexen Formen sind die Fließvorgänge nicht so einfach darzustellen. Durch unterschiedliche Wandstärken kommen Unterschiede in den Geschwindigkeiten der jeweiligen Fließfronten vor, ein Teil der Schmelze eilt voraus, um anschließend wieder mit der Restschmelze zusammenzutreffen. Bei Durchbrüchen müssen sich die Fließfronten aufteilen um das „Hindernis“ zu umfließen, um sich dann im Füllverlauf wieder zu vereinen und gemeinsam weiterzufließen. Wie oben beschrieben, ist durch die kältere Werkzeugwand der Rand der Schmelzfront abgekühlt und stark quer zur Fließrichtung orientiert. Beim Zusammentref-

fen bilden sich sogenannte Bindenähte, die immer eine Schwächung des Bauteils bewirken und sich auch optisch als feine, kratzerähnliche Linien bemerkbar machen. Besonders bei hochwertigen, z. B. hochglänzenden, sogenannten „Klavierlack“-Oberflächen sind sie ein sehr störender Oberflächenfehler.

Es gibt zwei Arten von Bindenähten, je nach ihrer Entstehung nennt man sie „kalte“ oder „warme“ Bindenähte.

3.2.1. Kalte Bindenähte

Kalte Bindenähte entstehen beim frontalen Aufeinandertreffen von Schmelzströmen mit anschließendem Stillstand. Zum Beispiel beim gleichzeitigen Füllen einer Kavität von zwei Seiten oder wenn sich Schmelzströme aufteilen müssen und beim Zusammentreffen zum Stillstand kommen.

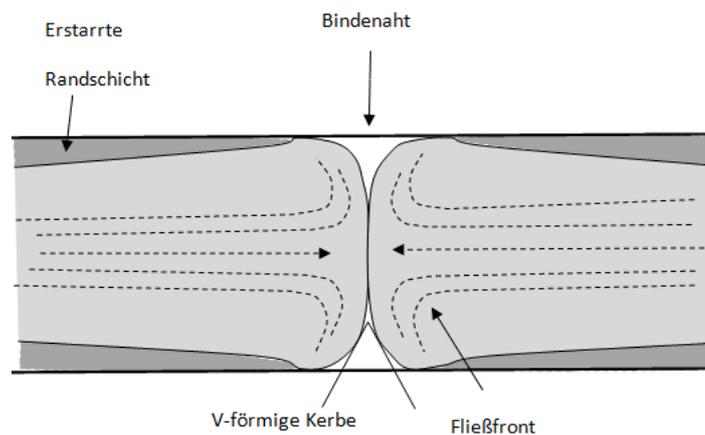


Bild 6: Entstehung einer kalten Bindenaht

Die Bereiche der Vereinigung solcher Schmelzströme sind optische und mechanische Schwachstellen. In der Literatur herrscht Übereinstimmung darüber, dass diese Bauteilchwäche auf drei Teilursachen beruht [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]:

- mangelnde Interdiffusion der Makromoleküle der Schmelzfronten über die neugeschaffene Grenzfläche hinweg
- hohe Orientierung der Makromoleküle parallel zur Bindenaht
- Ausbildung einer an der Oberfläche um das Bauteil umlaufenden sogenannten V-Kerbe.

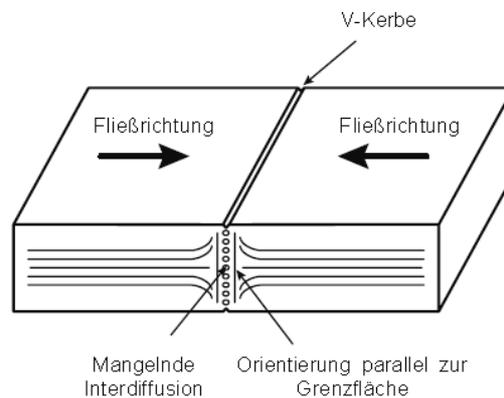


Bild 7: Ursachen für die verminderten Bindenahtfestigkeiten [4]

Sie ist Resultat einer starken Abkühlung, die vor dem Zusammenfluss der beiden getrennten Schmelzströme normalerweise vorherrscht. Durch das Kühlen des Werkzeuges erfolgt ein hoher Wärmeabfluss über die Oberfläche des Formhohlraumes. Dies resultiert in einer schlagartigen Absenkung der Temperatur der Schmelzpartien an und in der Nähe der Formoberfläche, die eine deutliche Viskositätserhöhung bewirkt. Ist die Viskosität aber entsprechend hoch, speziell beim Übergang zum Festkörperbereich, kann es zu keinem vollständigen Zusammenfluss mehr kommen, und das Ergebnis ist die V-förmige umlaufende Kerbe [9]. Eine weitere Erklärung für die V-Kerbe ist, dass zwischen den Schmelzfronten Luft eingeschlossen wird. Wenn die Fronten aufeinander treffen, kann die verdichtete Luft nicht sofort entweichen; sie bleibt als eine umlaufende Kerbe auf der Formteiloberfläche erkennbar [2]. An einer gerade entstandenen Bindenaht fehlen zunächst die polymertypischen Molekül Verschlaufungen. Solange die Temperatur an der Grenzfläche größer als die Glastemperatur der Polymere ist, findet im Laufe der (Nachdruck-)Zeit eine Diffusion der Molekülketten über die Grenzfläche statt. Es bildet sich eine Art „Verschweißung“ der Fließfronten. Es wird angenommen, dass die Festigkeit an der Grenzfläche proportional zur Anzahl der Molekülketten ist, die von der einen zu der anderen Seite der Grenzfläche diffundiert sind [10]. Bekannt ist auch, dass neben dem eigentlichen Diffusionsprozess noch andere Faktoren wie die Beschaffenheit und Topologie der berührenden Flächen, sowie der zeitliche Verlauf des Berührungsprozesses der beiden Oberflächen eine Rolle spielen [11]. Auch der nicht-isotherme Charakter des Spritzgießprozesses, der zu Temperaturunterschieden über dem Querschnitt des Formteils führt, muss ebenso berücksichtigt werden. Bei teilkristallinen Kunststoffen können die Größenordnung und die Verteilung der kristallinen Struktur die Bindenahtfestigkeit ebenfalls beeinflussen.

3.2.2. Heiße Bindenähte oder Fließnähte

Wenn die Schmelze in Angussnähe ein Hindernis (Durchbruch, Einlegeteil) umfließen muss und sich dahinter trifft, um anschließend gemeinsam weiterzufließen, entsteht eine Fließnaht, eine sogenannte heiße Bindennaht.

Die Schmelze staut sich vor dem Hindernis, umfließt es, anschließend fließen die Ströme nebeneinander weiter. Es bilden sich quasi zwei Quellströme, die nebeneinander herlaufen. Es ergibt sich eine starke Molekül- und gegebenenfalls Faser-Orientierung in der Mitte.

Muss bei komplexen Formen die Schmelze in mehreren Kanälen fließen (z. B. bei verrippten Teilen), um sich irgendwo wieder zu treffen, bilden sich ebenfalls Bindenähte.

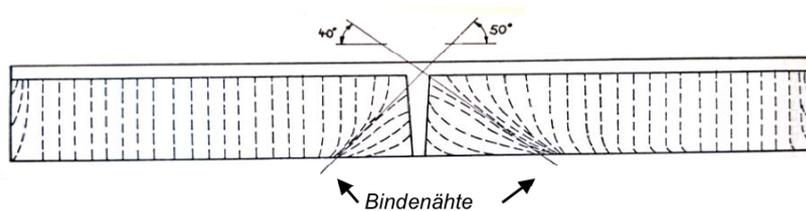


Bild 8: Faserorientierung bei einer Kreuzrippenplatte [21]

Auch bei Mehrfachangüssen bildet sich bei der Vereinigung der Schmelzströme eine warme Bindennaht.

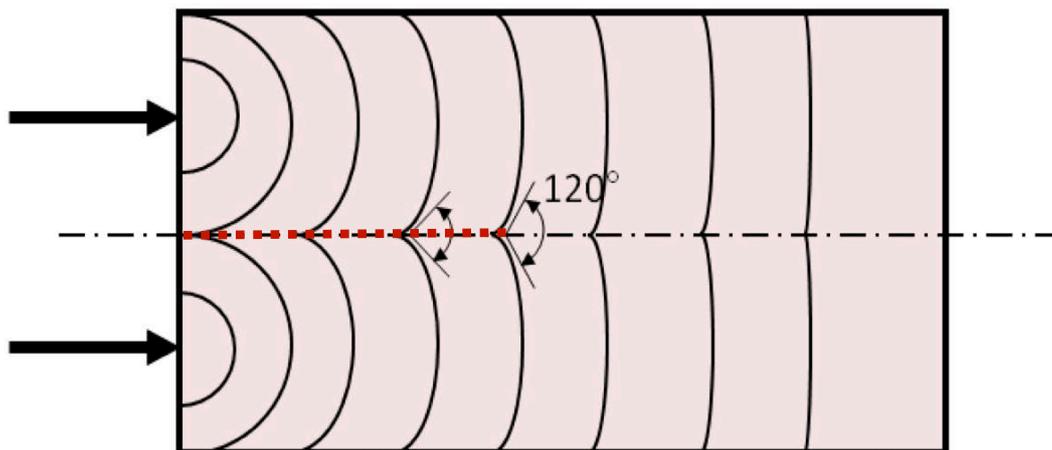


Bild 9: Bindennaht bei Mehrfachanguss [nach 17]

4. Beeinflussung der Problemstellen durch höhere Werkzeugtemperaturen

4.1. Bindenähte

Bei allen Problemen, die bisher besprochen wurden kam zum Vorschein, dass eine zu kalte Werkzeugwand die Qualität der Spritzgießteile negativ beeinflusst. Ein augenscheinliches Beispiel, um Unterschiede darzustellen, sind die erwähnten Bindenähte. Sie sind teilweise mit bloßem Auge zu erkennen und ihre sichtbare Länge dient als schnelles Qualitätsmerkmal. Durch mikroskopische Untersuchungen können auch die Tiefe und Breite der Bindenaht erfasst werden sowie eventuelle Faserorientierungen. Es wurden schon umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, wie sich höhere Werkzeugtemperaturen auf die Festigkeit in der Bindenaht auswirken.

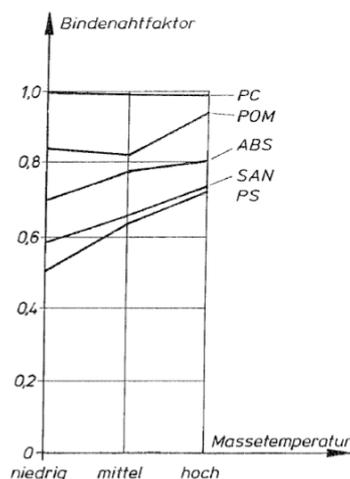


Bild 10: Zusammenhang von Bindenahtfestigkeit und Massetemperatur [14]

U. Delpy [15] fand z. B. schon 1971 heraus, dass sich durch eine Erwärmung der Werkzeuge auf Temperaturen über der Glasübergangstemperatur/Kristallschmelztemperatur die Festigkeit von gespritzten Scheiben je nach Dicke um bis zu 90 % erhöht.

Eigene Untersuchungen zur Beeinflussung der Bindenahtbildung durch geeignete Werkzeugtemperierung finden an der Hochschule Pforzheim im Rahmen eines ZIM-Projektes in Zusammenarbeit mit der Firma Varioplast Konrad Däbritz GmbH statt. Es soll ein Verfahren entwickelt werden, das Spritzgießwerkzeug konturgenau zu erwärmen.

Erste Versuche wurden mit einem von der Firma Varioplast entwickelten Versuchsteil durchgeführt. Es handelt sich um eine visitenkartenähnliche dünne

Platte (80 x 55 x 1 mm) mit einem Durchbruch in Angussnähe (**Bild 11**). Eine Werkzeughälfte ist poliert, um eine hochglänzende Oberfläche zu bekommen, die anschließend verchromt oder PVD-beschichtet werden soll. Die andere Werkzeughälfte ist strukturiert. Als Werkstoff wurde ein Polycarbonat verwendet. Es wurden die Bindenahtausbildung und deren Länge bei verschiedenen Werkzeugtemperaturen untersucht.

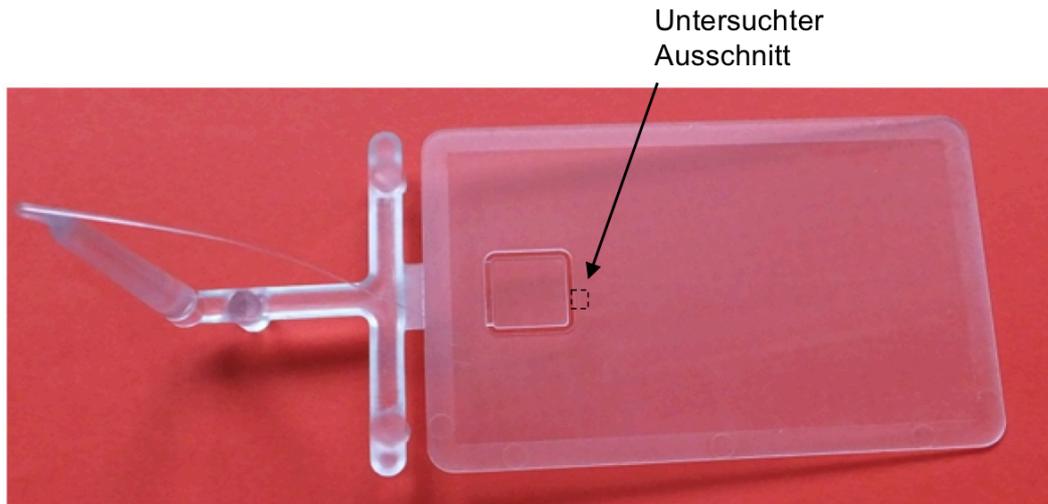


Bild 11: Versuchselement

Wie zu erwarten war, bildete sich bei konventioneller Temperierung des Werkzeugs mit 90 °C eine deutlich sichtbare Bindenaht hinter dem Durchbruch, eine feine Linie, die mit bloßem Auge etwa 6 mm lang gut zu erkennen ist.



Bild 12: Sichtbare Bindenaht

Eine 100-fache Vergrößerung der Bindenaht ist in **Bild 13** und **14** zu sehen.

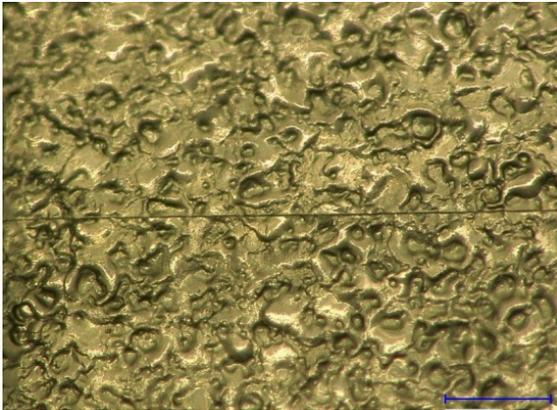


Bild 13: Bindenaht direkt hinter dem Durchbruch, strukturierte Seite

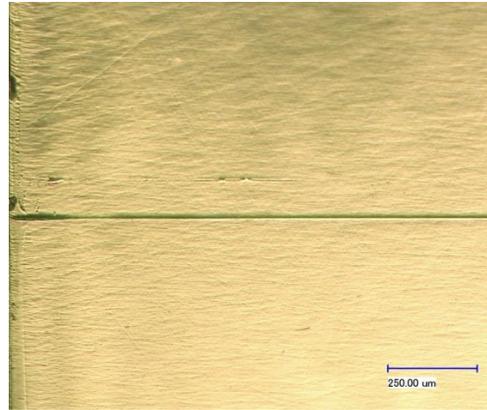


Bild 14: Glänzende Seite

Um zu verstehen, wie sich die Bindenaht bildet, ist das zufällig entstandene Fließlinienbild hilfreich (**Bild 15**). Links das Teil als Fotografie, rechts sind zur besseren Sichtbarmachung einige Fließlinien eingezeichnet. Man sieht deutlich, wie die Schmelzströme das Hindernis umfließen, sich erst in einiger Entfernung vom Hindernis treffen und dann parallel weiterlaufen. Es kommt zu keiner Vereinigung oder Durchmischung. Gegen Ende zu laufen die Fließlinien sogar eher auseinander. Man hat den Eindruck von zwei unabhängigen Quellströmen.



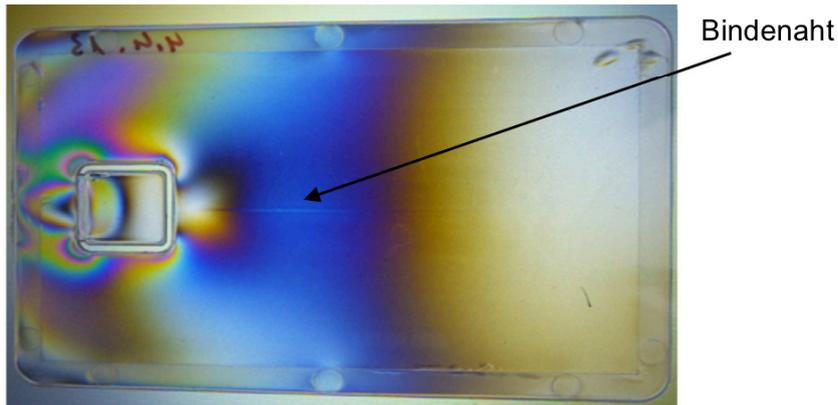
Bild 15: Füllstudie mit Fließlinien



Bild 16: Ausschnitt aus Bild 15

Polarisationsoptik

Auch in der polarisationsoptischen Aufnahme sind die Bindaht sowie die vorherrschenden Spannungen gut zu erkennen (**Bild 17**).



*Bild 17: Polarisationsoptisches Bild der Versuchskarte.
Werkzeugtemperierung auf 120 °C*

Lasermikroskopische Untersuchungen:

1. Gespritzt mit 90 °C Werkzeugtemperatur:

Untersucht wird die Bindaht 2 cm vor dem Ende der Platte: Die Bindaht ist unter dem Lasermikroskop deutlich zu sehen. Erstaunlich ist die Aufwölbung seitlich der Bindaht (**Bild 20**), entstanden wahrscheinlich durch Spannungen, die beim Zusammentreffen der beiden Fließströme entstehen.

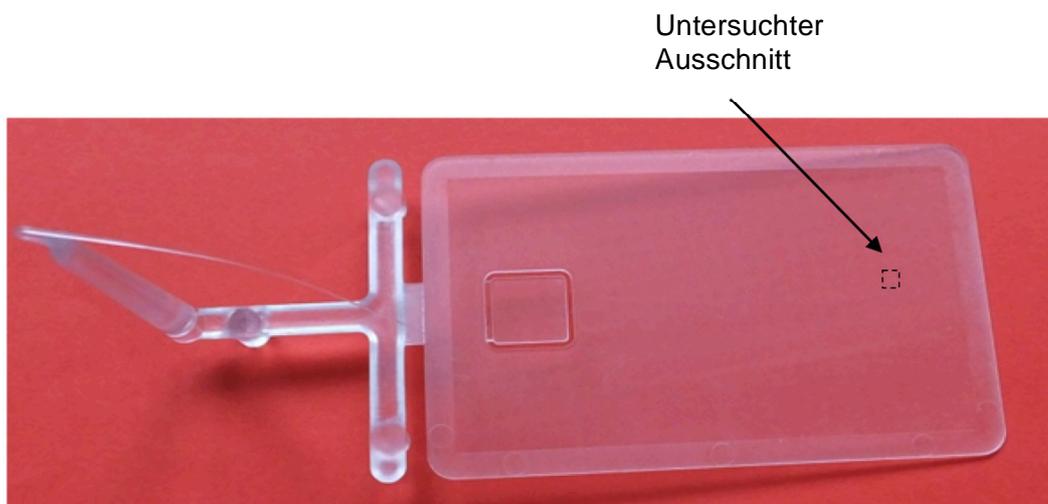


Bild 18: Lage des untersuchten Ausschnitts

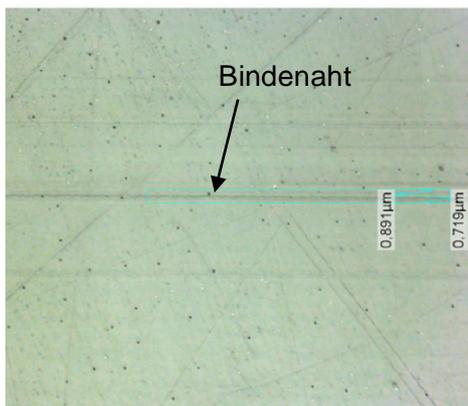


Bild 19: Bindenaht

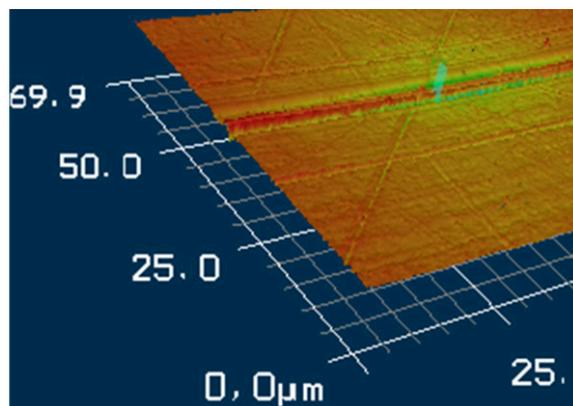


Bild 20: Topographie der Bindenaht

2. Bei der Platte, die mit 120 °C Werkzeugtemperatur gespritzt wurde, war am gleichen Messbereich auch bei 1000-facher Vergrößerung keine Bindenaht mehr zu finden.

Bei weiteren Versuchen soll mit noch höher temperiertem Werkzeug die Bindenahtausbildung untersucht werden.

4.2. Spannungen, Schrumpfung

Kühlt sich die Randschicht der Schmelze schnell ab, kommt es zu starken Schergradienten und infolgedessen auch zu starken Moleküllorientierungen. Dies führt zu Spannungen innerhalb des Spritzgießteils. Durch eine Erwärmung der Werkzeugwand können diese Spannungen reduziert und der Schrumpfung sehr positiv beeinflusst werden. In **Bild 21** ist die Anzahl der Isochromaten in gespritzten Scheiben aufgetragen, in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur. Die Anzahl der Isochromaten ist ein Maß für die Höhe der Spannungen.

Bild 22 zeigt das Schrumpfmaß in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur.

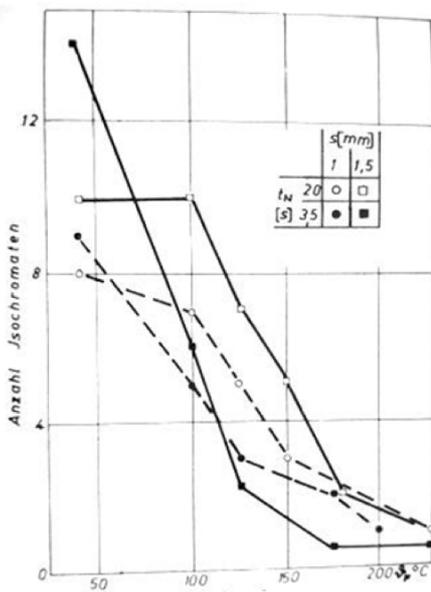


Bild 21: Isochromaten in gespritzten Scheiben aus Polystyrol [15]

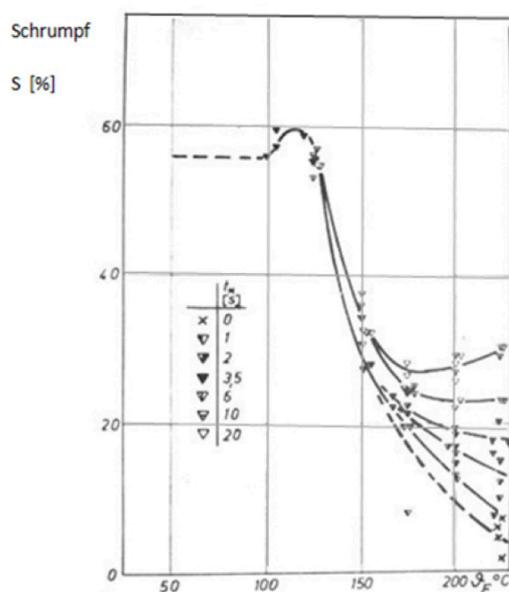


Bild 22: Gesamtschrumpfung 0,5 mm dicker Scheiben. Parameter: Nachdruckzeit [15]

4.3. Kristallisation

Bei teilkristallinen Kunststoffen wird durch die Abkühlung an den Randbereichen die Kristallisation behindert. Das bewirkt eine geringere Härte und einen stärkeren Verzug. Durch Werkzeugtemperaturen um die Kristallschmelztemperatur erreicht man eine Kristallisation bis in die Randbereiche.

Beim linearen Polyäthylen (PE h. D.) steigt die Dichte mit von 20 °C Werkzeugwandtemperatur zunehmend auf 120 °C um gut 1 % an; das entspricht einer Änderung des Kristallisationsgrades um knapp 8 %.

Bei isotaktischem Polypropylen liegen ähnliche Verhältnisse vor. Hier liegt die Dichtesteigerung bei gleicher Erhöhung der Wandtemperatur etwas niedriger bei 0,6 %, die Zunahme des Kristallisationsgrades beträgt aber ebenfalls etwa 8 %.

(Bild 23)

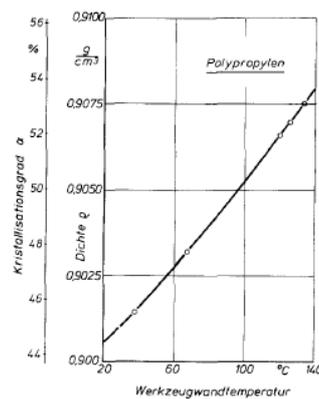


Bild 23: Dichte und Kristallisationsgrad von PP-Spritzgussteilen in Abhängigkeit von der Werkzeugwandtemperatur [16]

5. Berechnung der erforderlichen Werkzeugtemperaturen

Da Diffusionsvorgänge beim Zusammenfließen der Schmelzströme nur bei Temperaturen über dem Glasübergang, bzw. über der Kristallschmelztemperatur stattfinden können, sollte das Werkzeug soweit aufgeheizt werden, dass es mit der zusätzlichen Temperaturerhöhung durch die Schmelze über diesen Temperaturen liegt.

Für PC bedeutet das zum Beispiel: Glasübergangstemperatur 148 °C (bei Atmosphärendruck)

Empfohlene Schmelztemperatur: 280 °C–320 °C

Empfohlene Werkzeugtemperatur (konventionelles Spritzgießverfahren):
80 °C–100 °C

Eine überschlägige Berechnung der Temperatur, die sich an der Werkzeugwand einstellt, soll zeigen, ob diese Werkzeugtemperatur ausreichend ist, um die Bindehaftbildung abzuschwächen:

Die Kontakttemperatur an der Oberfläche der Kavität ist abhängig von der Wärmeeindringfähigkeit b_W des Werkzeugs und der Schmelze b_M und lässt sich nach folgender Beziehung abschätzen:

$$T_{Wmax} = \frac{b_W \cdot T_{Wmin} + b_M \cdot T_M}{b_W + b_M}$$

$$b = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot c}$$

T_{Wmin} = Formnestwandtemperatur direkt vor dem Einspritzen

T_M = Massetemperatur

b_W = Wärmeeindringfähigkeit des Werkzeugstahls

b_M = Wärmeeindringfähigkeit der Formmasse

ρ = Dichte in kg/m^3

λ = Wärmeleitfähigkeit in $\text{W/m} \cdot \text{K}$

c = Spezifische Wärmekapazität in $\text{J/kg} \cdot \text{K}$

Beispiel

unlegierter Werkzeugstahl: $b_W = 13,8 \cdot 10^3 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$

Polycarbonat : $b_M = 0,54 \cdot 10^3 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$

Mit $T_W = 90 \text{ °C}$ und einer Einspritztemperatur T_M von 300 °C ergibt sich eine maximale Wandtemperatur zum Zeitpunkt des Einspritzens von:

$$T_{Wmax} = 98 \text{ °C}$$

Das ist weit unterhalb der Glasübergangstemperatur. Die Glasübergangstemperatur von Kunststoffen ist unter Druck höher als bei Atmosphärendruck. Bei 500 bar Werkzeuginnendruck liegt sie bei ca. 158 °C.

Um eine Kontakttemperatur von 160 °C zu erreichen, bräuchte man zum Zeitpunkt des Einspritzens eine Werkzeugtemperatur von

$$T_{Wmin} = \frac{(b_W + b_M)}{b_W} \cdot T_{Wmax} - \frac{b_M}{b_W} T_M$$

$$T_{Wmin} = 1,039 \cdot T_{Wmax} - 0,039 \cdot T_M$$

$$T_{Wmin} = 1,039 \cdot T_{Wmax} - 0,039 \cdot T_M$$

$$\text{Mit } T_{Wmax} = 160 \text{ °C und } T_M = 300 \text{ °C}$$

ergibt sich eine minimale Werkzeugtemperatur von ca. 154 °C.

Da die Wärmeleitfähigkeit des Werkzeugs um ca. das 200-fache höher ist als die des Kunststoffes, nähert sich die Kontakttemperatur sehr schnell der Werkzeugtemperatur an.

Aus diesen Berechnungen sieht man, dass man das Werkzeug sehr hoch temperieren muss, um optimale Oberflächenqualitäten und Festigkeitswerte zu erreichen.

Eine ständige Temperierung des Werkzeugs auf solch hohe Temperaturen ist aber im Spritzgießprozess nicht durchzuführen, denn so wäre eine Entformung des Spritzteils nicht möglich. Man muss auf eine variotherme Temperierung übergehen. Das heißt, man heizt das Werkzeug vor dem Einspritzen auf die erforderliche Temperatur auf und kühlt es, sobald die Form gefüllt ist. Wichtig dabei ist eine leistungsfähige Kühlung, um die Zykluszeit nicht maßgeblich zu verlängern. Denn durch eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur um 10 °C verlängert sich die Kühlzeit um ca. 17 %.

6. Möglichkeiten einer variothermen Temperierung

Für die Temperierung von Spritzgießwerkzeugen ist es Standard, dass ein Temperiermedium (Wasser, Öl) durch entsprechende Kanäle und Hohlräume die mit der Kunststoffschmelze eingebrachte Wärmeenergie abführt. Die Temperatur des Mediums wird dabei konstant gehalten.

Das Prinzip der variothermen Temperierung ist es, die Werkzeugwand nur kurzzeitig auf eine Temperatur zwischen Glasübergangs- und Kristallitschmelztempe-

ratur (TG, TKS) des verwendeten Werkstoffes zu erwärmen, um direkt nach der Formfüllung eine Kühlung zu ermöglichen. Folgende Verfahren hierfür sind bisher bekannt:

6.1. Temperierung mit einem Wechseltemperiersystem mit Temperiermedium

Dieses System baut auf die klassische Temperierung mit Temperierkanälen auf. Parallel auf unterschiedlichen Temperaturen laufende Temperiergeräte werden für das jeweilige Temperaturniveau auf den Temperierkreislauf des Werkzeuges geschaltet. In der Aufheizphase werden die Kanäle mit heißem Wasser durchströmt. Hat die Werkzeugwand die gewünschte Temperatur erreicht, wird mit kaltem Wasser auf ein unteres Temperaturniveau abgekühlt, bis das Bauteil formstabil ist und entnommen werden kann. Das erreichbare Temperaturniveau und die Temperaturwechseldynamik sind bei der Anwendung dieser Methode stark eingeschränkt.

Vorteil: Keine aufwendige Umgestaltung der Werkzeuge.

Nachteil: Da die ganze Werkzeugmasse (bzw. der Werkzeugeinsatz) aufgeheizt werden muss, dauert die jeweilige Temperaturanpassung relativ lang und ist energieintensiv. Die Werkzeugeinsätze müssen entsprechend isoliert ausgeführt werden (eingeschränkte Komplexität der Bauteile).

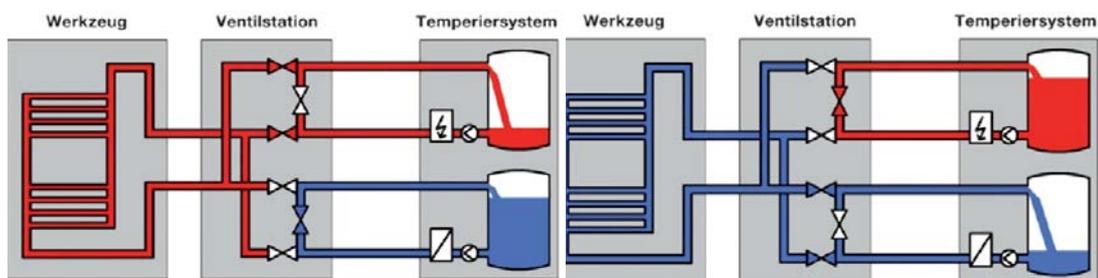


Bild 24: Wechseltemperiersystem: Werkzeug wird wechselweise mit warmem und kaltem Medium durchströmt [22] links: Heizen, rechts: Kühlen

Zur Verbesserung der Temperaturwechseldynamik können konturangepasste Kühlkanäle verwendet werden oder ein durch ein generatives Verfahren entwickeltes Werkzeug, das eine oberflächennahe Temperierung ermöglicht.

6.2. Temperierung mit elektrischen Heizelementen

Mit Widerstandsheizelementen ist es möglich, ein schnelles Aufheizen der Werkzeugoberfläche zu realisieren. Hierbei wird das Heizelement in den Werkzeugeinsatz nahe der Formnestoberfläche integriert. Die elektrische Leistung wird in Wärme umgesetzt und durch Wärmeleitung an die formgebende Werkzeugwand transportiert. Mit Widerstandsheizelementen können vor allem kleine Werkzeugoberflächen beheizt werden.

Problematisch ist beim Einbau in ein Spritzgießwerkzeug das spröde Verhalten der Keramik, die durch den zyklisch wiederkehrenden Werkzeuginnendruck zerstört werden kann.

Ferner ist die konstruktive Integration in ein Spritzgießwerkzeug, sowie die elektrische Isolation und Kontaktierung schwierig.

Keramik-Elemente sind für eine sehr schnelle Aufheizung geeignet, sind jedoch teuer und nur schwierig an bestimmte Konturen anpassbar.

6.3. Temperierung mit induktiver Erwärmung

Bei der induktiven Erwärmung wird ein elektromagnetisches Wechselfeld eingesetzt. Dieses wird durch eine mit hochfrequentem Strom durchflossene Spule erzeugt. Durch die auftretenden Wirbelströme im ferromagnetischen Werkzeug entsteht Verlustwärme, welche die Temperatur im Körper erhöht. Die übertragene Wärmeleistung ist dabei vom Abstand zwischen Induktor und Werkzeugwand, dessen Geometrie und den ferromagnetischen Eigenschaften des eingesetzten Werkzeugstahls abhängig.

Sie führt zu einer sehr schnellen und effektiven Temperaturerhöhung einer oberflächennahen Schicht. Die Spule (Induktor) wird in unterschiedlichen Ausführungen zur Erwärmung eines Spritzgießwerkzeuges eingesetzt. Ein externer Induktor wird in das geöffnete Werkzeug eingefahren und erwärmt die Werkzeugwand oberflächennah. Anschließend wird das Werkzeug geschlossen und die Kavität mit der heißen Formmasse gefüllt. Für die Abkühlung werden Temperierkanäle in den Werkzeugeinsätzen mit kaltem Wasser durchflossen.

Durch die direkte Induktion der Wirbelströme in der Oberfläche entsteht eine inhomogene Temperaturverteilung. Nahe dem Induktor ist die Erwärmung stärker, an den weiter entfernten Punkten an der Formnestoberfläche schwächer.

Eine weitere Variante besteht darin, dass der Induktor im Spritzgießwerkzeug verbaut wird. Dadurch entfällt das Einschwenken in das geöffnete Werkzeug. Die Aufheizzeit gegenüber einem externen Induktor wird verlängert, da die Wärme nicht oberflächennah, sondern im Werkzeug entsteht. Die Werkzeugwand wird somit durch Wärmeleitung erhitzt.

Insgesamt ist dieses Verfahren sehr aufwendig und schwer regelbar.

6.4. Weitere Verfahren

Als weitere Möglichkeiten wurde bisher noch die Erwärmung durch Infrarot und durch Laserstrahlung untersucht. Beide Verfahren haben sich aber nicht durchgesetzt.

6.5. Anwendung

Am weitesten verbreitet und auch am ausgereiftesten ist zum jetzigen Zeitpunkt die variotherme Temperierung durch wechselnde Fluidtemperaturen.

Nachteil ist der große Energieeinsatz der nötig ist, denn es muss das ganze Werkzeug temperiert werden. Durch kleine Kavitätseinsätze, die zum übrigen Werkzeug isoliert sind, kann dieses Problem vermindert werden.

Ideal wäre eine schnelle Erwärmung nur an der Oberfläche des Werkzeuges. Der Energieaufwand für das Aufheizen und die Kühlung wäre vertretbar und die Zykluszeit würde sich kaum verlängern.

Ganz wichtig ist jedoch eine gleichmäßige Erwärmung beider Werkzeughälften. Wird nur eine Hälfte erwärmt, verschiebt sich die plastische Seele der Schmelze aus der Mitte des Formteils, dadurch ergeben sich beim Abkühlen Spannungen, die einen Verzug bewirken.

Auch die Oberfläche selbst muss unbedingt gleichmäßig über die ganze Kontur erwärmt werden.

Sind Temperaturunterschiede vorhanden, kommt es in den verschiedenen Bereichen zu unterschiedlichen Schmelzgeschwindigkeiten. Das genau würde wieder die Bildung von Bindenähten fördern.

LITERATURVERZEICHNIS

1. **Jaroschek, Chr.** *Spritzgießen für Praktiker*. s.l.: Hanser, 2008.
2. **Hagerman, E. M.** Weld-line Fracture in Molded Parts. *Plast. Eng.* 29. 1973, S. 67–69.
3. **Malguarnera, S. C.** Weldlines in Polymer Processing. *Polym. Plast. Technol.* 18. S. 1–45.
4. **Kim, S.-G. und Suh, N. P.** Performance Prediction of Weldline Structure in Amorphous Polymers. *Polym. Eng. Sci.* 26. 1986, S. 1200–1206.
5. **Moslé, H. G., Criens, R. M. und Dirk., H.** On the strength of Knit-Lines in Injection Moulded Parts. *ANTEC*. 1984, S. 772–774.
6. **Bataille, F., Vu-Khanh, T. und Fisa, B.** Weldline Structure of MICA-NYLON. *ANTEC*. 1985, S. 1174–1177.

7. **Sanschagrın, B., Gauvin, R. und Fisa, B., Vu-Khanh, T.** Weldlines in Injection Molded Polypropylene: Effect of Filler Shape. *Journal of Reinforced Plastic*. 1990, S. 194–208.
8. **Mennig, G.** Zum Einfluß des Molekulargewichts auf die makroskopische Grenzfläche Bindenaht. *Angew. Makromol. Chem.* 185/186. 1991, S. 179–188.
9. **Piccarolo, S. und Saiu, M.** Knit-line Structure in the Injection Molding of Polystyrene. *Plast. Rub. Proc. Appl.* 10. 1988, S. 11–16.
10. **de Gennes, P. G.** Reptation of a Polymer Chain in the Presence of Fixed Obstacles. *Chem. Phys.* 55. 1971, S. 572–579.
11. **Wool, R. P., Yuan, B. L. und McGarel, O. J.** Welding of Polymer Interfaces. *Polym. Eng. Sci.* 29. 1989, S. 1340–1367.
12. **Stitz, S., Keller, W.** *Spritzgießtechnik*. s.l.: Hanser, 2001.
13. **BASF.** Technische Information. *MS 00062562*.
14. **Haufe, A., Mennig, G.** Untersuchung zur Vorhersage der Bindenahtfestigkeit in Spritzgegossenen Formteilen. *Die angewandte Makromolekulare Chemie* 265. 1999, S. 75–81.
15. **Delpy, U.** *Diss. Einfluss variabler Formtemperaturen auf die Eigenschaften von Spritzlingen aus amorphen Thermoplasten*. Uni Stuttgart: s.n., 1971.
16. **Menges, G., Wübken, G., Horn, B.** Einfluss der Verarbeitungsbedingungen auf die Kristallinität und Gefügestruktur teilkristalliner Spritzgussteile. *Colloid & Polymer Sci.* 254. 1976, S. 267–278.
17. **Nguyen-Chung, Tham.** *Diss.: Strömungsanalyse der Bindenahtformation beim Spritzgießen von thermoplastischen Kunststoffen*. Chemnitz: s.n. 2001.
18. **Wiegand, H, Vetter, H.** *Kunststoffe* 86.
19. **Menges, G. Wübken, G u. B. Horn.** *Colloid&Polymer Sci* 254. 1976, S.267–278.
20. **Menges, G., Leibfried, D.** *Plastverarbeiter* 21. S. 951/58.
21. **Weinland, Regina.** *Dipl.-Arbeit: Glasfaseranordnung in spritzgegossenen K- und X-Rippenplatten*. Uni Stuttgart: s.n., 1977.
22. **Gruber, K.** Heiß macht schön. *Plastverarbeiter*. 2008, S. 36–38.

Vom Stahl zum Aluminium und von der Knetlegierung zum Guss

Zu Qualitätskriterien von Aluminium-Gusslegierungen
Horst Opielka

Einleitung und Motivation

Sind Temperaturunterschiede vorhanden, kommt es in den verschiedenen Bereichen zu unterschiedlichen Schmelzgeschwindigkeiten. Das genau würde wieder die Bildung von Bindenähten fördern.

Der Konstrukteur ist durch das Studium regelhaft dahingehend ausgebildet, dass gezeichnete Bauteile allen Festigkeitsanforderungen in Bezug auf statische und dynamische Belastungsanforderungen genügen.

Ergänzend ist die aktuell verbesserte Situation, dass auch im mittelständischen Betrieb maßgeblich über den Maschinenbauer werkstoffkundliche und zugehörige fertigungstechnische Kenngrößen bewertet und festgelegt werden. Für den Maschinenbauer im Mittelstand ist dies oft eine besondere Herausforderung und zusätzliche Aufgabe, weil hier eben wirtschaftlich oft nicht die Möglichkeit vorhanden ist, Werkstoffkundler oder Prozesstechniker zusätzlich für einzelne Produkte anzustellen. Diese Aufgabe wird regelhaft in der BRD außergewöhnlich gut erfüllt.

Mit allen Qualitätskriterien, die zum Werkstoff, seinem Zustand und den Fertigungseinflüssen gehören, hat der Konstrukteur heutzutage weitreichende Einflüsse in das formale Qualitätswesen und das Geschehen bei Einkauf und inhaltlichen Audits bei Zulieferern.

All diesen Ansprüchen kann auch sehr gut durch moderne universitäre Ausbildung genügt werden. Diese Ausbildung umfasst aber im Wesentlichen Kenntnisse aus dem Stahlsektor.

Sobald der Werkstoff Aluminium ins Spiel kommt, kommen oft Unsicherheiten auf, weil diesbezüglich die Vorlesungen etwas weniger umfangreich sind.

Und wenn dann noch der Guss mit seinen ganzen Varianten als möglicherweise wirtschaftliche Alternative zum voll zerspannten Bauteil hinzukommt, kann die Unsicherheit noch größer werden.

Der Vortrag soll die Unterschiede zwischen Stahl und Aluminium aufzeigen, desweiteren Besonderheiten einiger Aluminium-Gusslegierungen und die üblichen Qualitätskriterien und Prüfmethode für die Gruppe der AISI-(+)-Legierungen.

1. Vom Stahl zur Al-Knetlegierung

Für Stähle hat der Konstrukteur quasi ab Studium neben der Erprobung der notwendigen Festigkeits- und Korrosionskenngrößen stets ein Bild der Überprüfung derjenigen Werte, die sich aus der speziellen Werkstoffkunde im Zusammenhang mit Wärmebehandlung und Fertigung ergeben.

Für einsatzgehärtete Bauteile ergibt sich z. B. wiederkehrend eine Liste mit Kenngrößen für Liefer- und Abnahmebedingungen mit:

- Härteverlauf mit CHD und Kernhärte
- ehemalige Austenitkorngröße am Rand
- ehemalige Austenitkorngröße im Kern
- Restaustenitgehalt am Rand
- Kerngefügetyp
- zulässige Abweichungen bei Gefügeanteilen
- Stahlreinheit

Bei anderen Bauteilen aus Stahl ergeben sich ähnlich einfache „Rezepte“.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Rezepte ist das Umwandlungsverhalten des Stahles und die sogenannte Stahlreinheit. Wenn man nun anstelle von Stahl Aluminiumlegierungen einsetzt, wird es etwas anders.

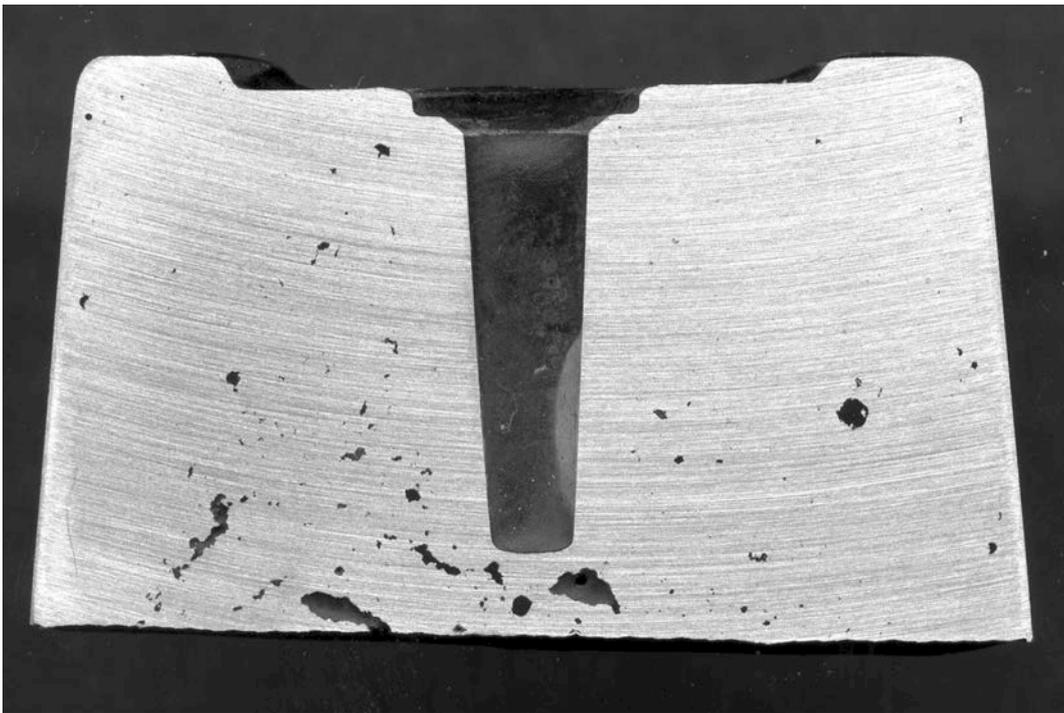
Einige Dinge werden einfacher. Eine kostenintensive Kontrolle des Reinheitsgrades entfällt bei Aluminium komplett. Stähle bringen metallurgisch bedingt Sulfide und Oxide zwangsweise mit. Aluminiumlegierungen haben das regelhaft und statistisch prüfbar nicht. Außerdem haben die Aluminiumlegierungen kein ZTU-Verhalten. Es gibt also keine Notwendigkeit, Martensit oder Bainit zu beurteilen und zu definieren.

Andererseits haben die höher festen Aluminiumlegierungen aber eine Ausscheidungsaushärtung, die sich nicht nur auf die letzte Festigkeit, sondern auch auf die Korrosionsbeständigkeit auswirkt. Insofern ist dann bei diesen Legierungen doch eine zusätzliche Kenntnis von Wärmebehandlungszuständen und resultierenden Eigenschaften sinnvoll.

2. Von der Al-Knetlegierung zum Guss und seinen Fehlern

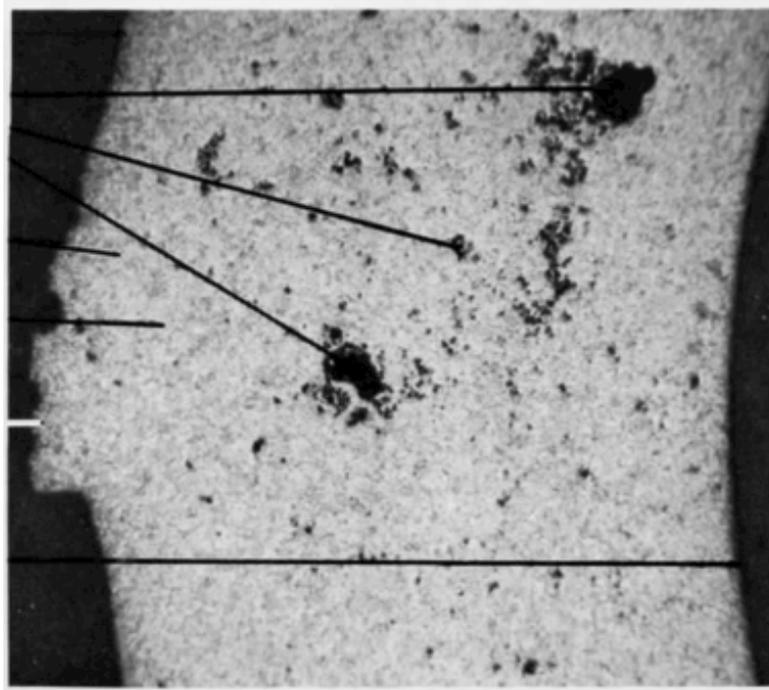
Würde man einen beliebigen Al-Gießer befragen, welche Fehler denn sein Guss haben kann, so würde er stets antworten, dass ein Guss niemals Fehler hat – es gibt keine bugs, nur features!

Damit hat dieser Gießer eigentlich fast recht – auch wenn man sich bei manchem Schweizer Käse, der abgeliefert wird, dann doch als Laie fragen muss, ob das so richtig gegossen wurde und woher noch Festigkeit kommen soll. Betrachtet man die nachfolgende Abbildung des Querschnitts eines Trägers, so sieht man schon einige Ungänzen, die man als Fehler bezeichnen könnte:



Bei den schwarzen Löchern liegen hier kleine Speisefehler, Schwindungslunker und Gasblasen vor. Wichtig während der Entwicklungsphase eines Bauteiles ist nun die Unterscheidung, welche Erscheinungen man eventuell noch aus Sicht der Gießtechnik optimieren möchte oder muss und, was zur normalen Erscheinung eines Gusses gehört.

Betrachtet man eine Porosität, die sich aus der Schrumpfung im Mikrobereich und aus moderaten Gasgehalt durch unvermeidliche Wasserstoffaufnahme, wie im folgenden Bild ergibt,



so ergibt sich hier trotz der Porosität bei einer Wanddicke von ca. 10 mm im Zugversuch trotzdem die Festigkeit, die zur Norm gehört. Eine gewisse Porosität ist also bei den Festigkeitsangaben in den Normen immer schon berücksichtigt. Bei solcher Porosität ist aber aus Festigkeitssicht zu berücksichtigen, welche Form die Poren haben. Für eine Dichtheit gegenüber Gasen und Flüssigkeiten ist weiterhin zu berücksichtigen, ob die Porosität nach Bearbeitung von Oberflächen angeschnitten wird und dann durchgehend werden kann. Wenn dies der Fall ist, muss mit der Gießerei ein sogenannter porenfreier Saum ergänzend definiert werden.

Fehler, die relative Fehler sind, aber zum Versagen führen können, sind die vorerstarrten Bereiche und Oxideinzüge im Druckguss (Bild auf der nächsten Seite). Formbedingt ist hier der obere Teil zuerst erstarrt und wurde durch die nachfließende Schmelze wärmebehandelt, weshalb nur noch der untere Teil im Bild die eigentliche Gefügeausbildung des Gusses hat. Kritisch ist in diesem Fall die Grenzfläche. Diese kann entweder sehr gut verschweißt und damit unkritisch sein, oder mit einer extrem dünnen Oxidschicht nur kaltverschweißt sein. In letzterem Fall würde sie praktisch einen Anriss darstellen. Dieser sehr häufige Fehler bei Druckguss lässt sich mit Anschliffen nicht einfach finden, weshalb es

in Musterphasen sinnvoll ist, die Bauteile mit einer moderaten Druckprüfung mit ca. 200 bar zu testen. Im Zusammenhang mit der stets vorhandenen Porosität reißen Teile mit solchen Fehlern dann auf. Bei schwacher Form aus Kostengründen wird die Druckdichtheitsprüfung oft als 100 %-Sortierprüfung eingesetzt. Diese eventuell notwendige zusätzliche Prüfung muss einem aus kaufmännischer Sicht vorher klar sein, wenn man ein Angebot für Gussteile einholt.



Andere Fehler gibt es durch mangelnde Speisung und Schrumpfungsrisse. Der Vortrag zeigt hierzu ergänzende Bilder.

Betrachtet man die AlSi-Legierungen als Hauptgruppe der eingesetzten Werkstoffe, ergeben sich wesentliche Eigenschaften aber auch noch durch die lokalen Erstarrungsgeschwindigkeiten. Auch hierzu zeigt der Vortrag ergänzende Folien.

Herstellungs- und Anwendungsmöglichkeiten massiver metallischer Gläser auf Edelmetallbasis

Miriam Eisenbart,
Forschungsinstitut für Edelmetalle
und Metallchemie (**fem**)

Massive metallische Gläser – Eine Alternative zu konventionellen Schmucklegierungen?

Was ist ein massives metallisches Glas?

Die drei Werkstoffklassen (Metalle, Keramiken und Polymere) haben zwei mögliche Erstarrungsformen: kristallin, das heißt mit geordneter Kristallstruktur, oder amorph, also einer regellosen Verteilung der Atome. Bei Metallen kann eine amorphe Erstarrung allerdings nur erreicht werden, wenn eine geeignete Legierung vorliegt und die entsprechende Metallschmelze rasch genug abgekühlt wird. Die Abkühlrate R bei der Erstarrung muss dabei größer oder gleich der kritischen Abkühlrate R_c sein, die gerade ausreicht, um die Kristallisationsnase im ZTU-Diagramm (**Bild 1**) zu umgehen. Legierungen, deren R_c besonders niedrig sind, können bis zu kritischen Dicken d_c von mehreren Millimetern oder sogar mehreren Zentimetern amorph gegossen werden. In diesen Fällen wird von massiven metallischen Gläsern gesprochen.

Als 1960 das erste metallische Glas durch einen Zufall entdeckt wurde, waren noch Abkühlraten von 10^6 bis 10^8 K/s notwendig, um eine amorphe Erstarrung zu erreichen [1]. Daher konnten zunächst lediglich dünne Folien mit Dicken von 20–30 μm mittels Schmelzspinnen (Melt Spinning) oder anderer geeigneter Verfahren zum raschen Abschrecken hergestellt werden [2]. Seither wurde eine Vielzahl an komplexen Legierungen entwickelt, deren Kristallisation so weit verlangsamt ist, dass Kühlraten in der Größenordnung von 1 K/s für das Gießen von amorphen Produkten angewendet werden können. Diese niedrigen Kühlraten können zum Beispiel mittels Gießen in massive gekühlte Kupferformen realisiert werden. Das massive metallische Glas mit der bis heute größten bekannten kritischen Dicke ist ein Pd-basiertes Glas, das bis zu 80 mm dick komplett amorph gegossen werden kann [3]. Da nun metallische Gläser in ausreichender Dicke bekannt sind, sind Anwendungen dieser Werkstoffklasse als Konstruktionswerkstoff möglich und, betrachtet man ihre besonderen Eigenschaften, auch sehr erstrebenswert. Zu ihren herausragendsten Eigenschaften zählen ihre außergewöhnlich hohe Festigkeit und Härte, ungewöhnlich gute elastische Dehnbarkeit, besonders gute Federeigenschaften und ihre thermoplastische Formbarkeit.

Die bisher größte Bedeutung für die industrielle Verwendung der massiven metallischen Gläser kommt den Zr-basierten Legierungssystemen zu, die man bereits für Anwendungen als Sportgeräte oder in Uhren aus dem mittleren bis oberen Preissegment vorfindet.

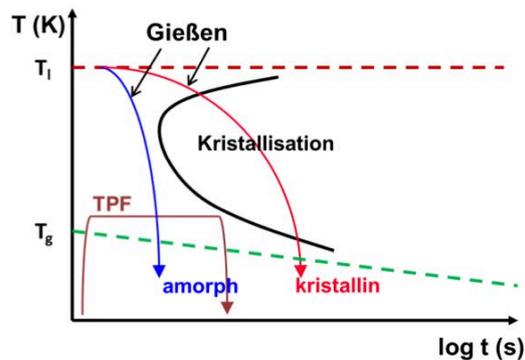


Bild 1: Schematisches ZTU-Diagramm für ein massives metallisches Glas mit typischen Abkühlkurven für eine amorphe bzw. eine kristalline Erstarrung und dem Temperaturprofil für das thermoplastische Formen (TPF)

Eigenschaften massiver metallischer Gläser

Der größte Teil der massiven metallischen Gläser wurde bei eutektischen oder naheutektischen Zusammensetzungen entdeckt [4, 5]. Das trifft zum Beispiel auch auf das erste metallische Glas zu, das überhaupt gefunden wurde ($\text{Au}_{82}\text{Si}_{18}$ at %). Es wurde im Au-Si System nachgewiesen, welches ein sehr tiefes Eutektikum besitzt. Metallschmelzen mit eutektischer Zusammensetzung weisen eine besonders hohe Stabilität gegen Kristallisation auf, was sich in ihrer tiefen Liquidustemperatur T_{liq} widerspiegelt. Die tiefe Liquidustemperatur von eutektischen Zusammensetzungen ist oft vorteilhafter für Gießprozesse als die typischerweise besonders hohen Gießtemperaturen von Zusammensetzungen fernab der eutektischen Zusammensetzung. Hierfür ist das platinbasierte massive metallische Glas $\text{Pt}_{85.24}\text{Cu}_{7.1}\text{Ni}_{2.36}\text{P}_{5.3}$ (Gew %) ein gutes Beispiel, das bei 600–800 °C abgegossen werden kann, während konventionelle Pt-basierte Schmucklegierungen bei Temperaturen von 1800 °C und mehr gegossen werden [6].

Eine eutektische oder naheutektische Zusammensetzung ist nicht das einzige Kriterium, das man für die Suche nach glasbildenden Zusammensetzungen heranziehen kann. Obwohl es bislang noch kein umfassendes Verständnis für die Vorhersage von guten Glasbildnern gibt, haben sich einige empirische Regeln für die Legierungsentwicklung etabliert [7]. Grundsätzlich gilt: Je komplexer die Zusammensetzung ist und je mehr unterschiedliche Atomarten mit möglichst unterschiedlichen Größen in der Schmelze vorliegen, desto dichter sind die Atome gepackt und desto schwieriger wird es für ein einzelnes Atom, sich durch die Schmelze zu bewegen. Dies verlangsamt die Kristallisation, bedeutet aber auch,

dass die Schmelze eines massiven metallischen Glases typischerweise eine höhere Viskosität besitzt als die Schmelzen konventioneller Legierungen [8]. Beispielsweise hat die Schmelze der sehr bekannte Zr-basierten Legierung Vit1, eine Viskosität von ca. 1 Pa s, was 1000 mal höher als bei Reinmetallschmelzen ist [9]. Diese haben Viskositätswerte ähnlich wie Wasser bei Raumtemperatur. Allerdings steht die hohe Viskosität der metallischen Glasschmelzen zusammen mit der erforderlichen hohen Abkühlrate einer guten Formfüllung beim Gießen entgegen, was bei der Auslegung von Gussteilen berücksichtigt werden muss. Beim Abkühlvorgang während des Gießens bleibt die ungeordnete Struktur der Schmelze erhalten, während die Unterkühlung einen signifikanten Anstieg der Viskosität verursacht. Die Temperatur, bei der das Material eine Viskosität von 10^{12} Pa s erreicht, ist als die Glasübergangstemperatur T_g definiert [10]. Unterhalb T_g erreicht die Viskosität Werte in der Größenordnung von 10^{14} Pa s und das Material verhält sich wie ein typischer Festkörper. Wird das metallische Glas wieder erhitzt, sinkt seine Viskosität wieder und es geht oberhalb von T_g in eine so genannte „unterkühlte Schmelze“ über, bis es bei der Kristallisationstemperatur T_x schließlich kristallisiert. Das Temperaturfenster T_x-T_g wird als ΔT bezeichnet. Es ist von praktischer Bedeutung, da innerhalb dieses Fensters thermoplastisches Formen (TPF) durchgeführt werden kann. Ähnlich wie bei Thermoplasten sind plastische Dehnungen von mehreren hundert Prozent erreichbar. Sogar Glasblasen wie bei einem Silikatglas ist möglich [6, 11]. Die Grenzen für das thermoplastische Formen sind durch die Kristallisation gesteckt. Die Zeit, die bis zum Einsetzen der Kristallisation bleibt, ist abhängig von der Prozessstemperatur und kann dem entsprechenden ZTU-Diagramm entnommen werden. Ist das Material kristallisiert, kann es nicht länger thermoplastisch verformt werden. Eine beispielhafte Temperaturkurve für einen TPF-Prozess kann **Bild 1** entnommen werden.

Dass die Kristallisation beim Erstarren umgangen wird, bedeutet nicht nur, dass ein amorpher Festkörper erhalten wird, sondern auch, dass keine Kristallisations-schrumpfung stattfindet (**Bild 2**). Dies führt zu einer drastischen Reduktion der Lunkerbildung beim Erstarren. Es bedeutet darüber hinaus, dass es lediglich minimale dimensionale Abweichungen zwischen der Gießform und dem Gießprodukt gibt, wodurch endformnahes Gießen möglich wird und filigrane Strukturen auf den Oberflächen der Gießprodukte abgebildet werden können.

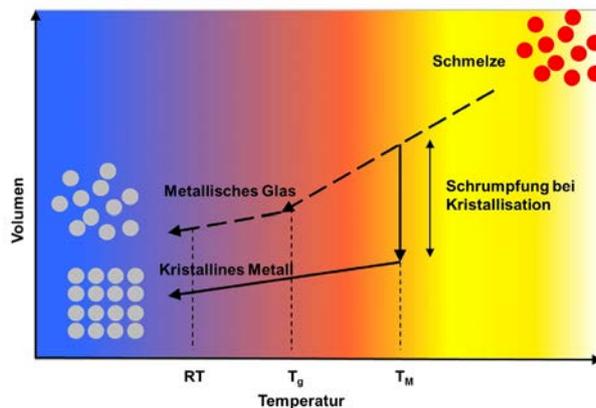


Bild 2: Volumenänderung während des Erstarrens für ein metallisches Glas im Vergleich zu einer konventionellen, kristallin erstarrenden Legierung

Amorphe Metalle können nicht wie gewöhnliche, kristalline Metalle verformt werden. Beispielsweise geben sie einer äußeren Belastung nicht durch die Bewegung von Versetzungen nach und können daher Beanspruchungen standhalten, die nahe ihrer theoretischen Festigkeit liegen und erreichen elastische Dehnungen von bis zu 2 %. In Kombination mit dem typischerweise eher niedrigen E-Modul der MMG ergibt sich dadurch ein besonders hoher Wert für die elastische Energie $E_{el}=0,5\sigma^2/E$, die ein amorphes Metall speichern kann [12], was diese Materialklasse zu besonders guten Federmaterialien macht. Diese Kombination von hoher Festigkeit und hoher Elastizität findet sich in keiner anderen Materialklasse.

Ihre einzigartigen Eigenschaften machen die amorphen Metalle sehr attraktiv für Anwendungen im industriellen Schmuckguss. Allerdings können sie nicht analog zu konventionellen, kristallinen Schmucklegierungen verarbeitet werden. Da ihnen die typischen Umformmechanismen kristalliner Strukturen fehlen, versagen sie meist abrupt bei Erreichen ihrer Festigkeit. Die plastische Verformung begrenzt sich dabei (unterhalb T_g) meist auf die Ausbildung eines oder einiger weniger so genannter Scherbänder, wodurch sie makroskopisch nur sehr geringe plastische Verformungen aufweisen. Kaltverfestigungsmechanismen sind daher ebenfalls nicht vorhanden.

Goldbasierte massive metallische Gläser und ihre Eigenschaften für Schmuckanwendungen

Massive metallische Gläser auf Goldbasis wurden 2005 zum ersten Mal vorgestellt [13]. Da sie 76 Massenanteile Gold aufweisen, können Sie als 18kt Goldlegierungen punziert werden. Alle Au-basierten MMG, die heute bekannt sind, basieren auf dem Au-Si Eutektikum. Ihre kritische Dicke wurde durch das Legieren mit Pd, Ag und Cu so weit erhöht, dass heute Legierungen bekannt sind, die bis 5 mm amorph gegossen werden können. 2007 wurde eine dieser Legierungen, $\text{Au}_{76.26}\text{Ag}_{4.69}\text{Pd}_{1.93}\text{Cu}_{13.5}\text{Si}_{3.62}$ (Au-BMG1 [14]) zusammen mit der Pt-basierten Legierung $\text{Pt}_{85.24}\text{Cu}_{7.1}\text{Ni}_{2.36}\text{P}_{5.3}$ auf dem Santa Fe Symposium für Schmucktechnologie vorgestellt [6]. Diese Legierungen weisen eine Härte von 360 HV bzw. 400 HV direkt nach dem Gießen (also ohne die Notwendigkeit einer aufwändigen thermomechanischen Behandlung) auf, was die erreichbare Härte der bisher bekannten kristallinen Legierungen deutlich übersteigt. Mit dem Glasübergang bei 128 °C und der Kristallisationstemperatur von 186 °C kann Au-BMG1 in einem Temperaturfenster von 58 °C thermoplastisch geformt werden. Seine kritische Dicke liegt bei 5 mm [13]. Es werden Zugfestigkeiten von bis zu 1200 MPa, ein E-Modul von 66.38 GPa und eine elastische Dehnung von bis zu 1.5 % berichtet [15].

Alle diese herausragenden Eigenschaften liegen bereits im gegossenen Zustand vor während bei konventionellen kristallinen Legierungen ein hohes Maß an thermomechanischen Behandlungen notwendig ist, um eine gewisse Härte zu erreichen. Im Au-Cu-Ag System werden beispielsweise Härten von bis zu 300 HV berichtet [16]. Das sind allerdings Härten, wie sie in Laborversuchen erreicht werden, in der industriellen Praxis sind Härten zwischen 160 und 250 HV für 18kt Goldlegierungen eher realistisch.

Vor diesem Hintergrund wurde eine schnelle Umsetzung von Anwendungen im Schmuckbereich erwartet [17], was zur Anmeldung eines Patents für massive metallische Gläser im Au-Pd-Cu-Ag-Si-System führte [18]. Um die Herstellungs- und Anwendungsmöglichkeiten dieser einzigartigen Materialklasse zu ergründen, wurde am **fem** Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie 2011 ein Forschungsprojekt ins Leben gerufen, dessen Ergebnisse hier vorgestellt werden.

Verarbeitung von goldbasierenden massiven metallischen Gläsern

Für eine möglichst unkomplizierte Weiterverarbeitung ist es zweckmäßig, ein geeignetes Halbzeug zu entwickeln. Legierungen für die Schmuckproduktion werden üblicherweise in der Form von Granalien zur Verfügung gestellt, daher wurde der Granulierprozess für die Legierung Au-BMG1 erprobt. **Bild 3a)** zeigt einen Vorversuchsaufbau für die Granulation an Luft. Unterhalb der Düse im Boden des Tiegels sind die Schmelztropfen zu erkennen. Als Abschreckmittel wurde ein Ethanol-Wassergemisch genutzt, das eine ausreichende Abkühlrate gewährleistet. Der Prozess wurde nach erfolgreicher Einstellung der Prozessparameter auf eine Indutherm VC500D Gießanlage übertragen, da sich bei der freien Verdüsung an Luft eine ausgeprägte Siliziumoxidschicht auf der Oberfläche bildete. In der Gießanlage erfolgte zwar kein vollständiger Luftabschluss, allerdings konnte durch Fluten der Fallstrecke zwischen Düse und Abschreckmittel mit Argon die Bildung der Oxidhaut drastisch reduziert werden. **Bild 3b)** und **c)** zeigen eine Makroaufnahme und eine REM-Aufnahme der Granalien, die mit diesem Prozess hergestellt werden konnten.



Bild 3a): Vorversuch mit freier Verdüsung an Luft



Bild 3b): amorphes Au-BMG1 Granulat mit Durchmesser 0,7–2 mm

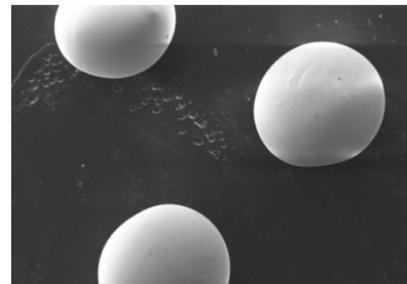


Bild 3c): REM-Aufnahme des Au-BMG1 Granulat

Die Herstellbarkeit von amorphen Gusserzeugnissen wurde zunächst anhand der Herstellung von 2 mm dicken Platten erprobt. Hierfür wurde die Schmelze in massive teilbare Kupferformen gegossen (**Bild 4b)**). Vergleiche von Gusserzeugnissen die direkt von den Legierungselementen erschmolzen wurden (einstufiger Prozess) und solchen, die durch Wiederaufschmelzen der Granalien erhalten wurden (zweistufiger Prozess), zeigten, dass keine qualitativen Unterschiede zwischen ein- und zweistufigem Prozess vorliegen. Gießversuche sowohl im Schleudergussverfahren als auch im Kippgussverfahren waren geeignet, um amorphe Platten im ein- und zweistufigen Prozess herzustellen.

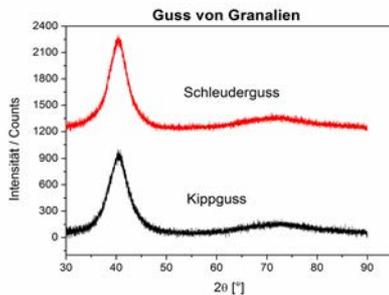


Bild 4a): XRD-Spektren von Platten im zwei-stufigen Kippguss- bzw. Schleudergussverfahren auf Basis der Granalien hergestellt



Bild 4b): massive teilbare Kupferform mit einer Platte von amorphem Au-BMG1

Nachdem der Prozess für einfache Plattengeometrien optimiert war, wurde die Herstellung von Schmuckteilen erprobt (**Bild 5**). Die Ergebnisse dieser Gießversuche lieferten überraschend gute Ergebnisse. So konnte beispielsweise ein Gitterring (**Bild 5, rechts**) mit filigranen Details mit beinahe 100 %-iger Formfüllung erstellt werden, obwohl die Schmelzen metallischer Gläser eine höhere Viskosität als herkömmliche Metallschmelzen haben und eine sehr rasche Abkühlung erfolgen muss.



Bild 5: Beispiele für am **fem** hergestellte Schmuckteile aus Au-BMG1

Untersuchung des Anlaufverhaltens

2010 bereits wurden einige für den Schmuckguss relevanten Eigenschaften am **fem** ermittelt und publiziert [19]. Unter anderem wurde für Au-BMG1 ein Yellowness Index von 25.3 gemessen. Der Yellowness Index (YI) errechnet sich nach der internationalen Norm ASTM D1925 aus Farbmessungen nach DIN 6174. Er gibt an, wie stark ein Farbton von einem perfekten Weißton in Richtung einer gelben Farbe abweicht. Bis zu einem YI von 19 spricht man von Premium-Weiß, zwischen 19 und 24.5 von Standard Weiß, zwischen 24.5 und 32 von einem Eierschalenton (off-white) und ab einem Wert von 32 wird nicht mehr von weiß gesprochen („non-white“).

Neuere Erkenntnisse zeigen, dass die Legierung Au-BMG1 sogar eine premiumweiße Farbe mit einen YI von 17.7 hat, wenn sie frisch poliert ist, was eine besonders attraktive Farbe für Schmucklegierungen ist [14]. Au-BMG1 zählt damit zu den weißesten Weißgoldlegierungen, die bekannt sind [20]. Die erfolgreich am **fem** hergestellten Schmuckstücke zeigen, dass amorphe Legierungen für den Schmuckguss sehr gut geeignet sind. Allerdings gibt ein großes Hindernis für dekorative Anwendungen von Au-BMG1. Die Farbe ändert sich sehr rasant hin zu einem gelblichen Brauntönen, was für Schmuckanwendungen sehr unerwünscht ist.



Bild 6: Ring aus Au-BMG1 a) direkt nach dem Gießen und Polieren



Bild 6: Ring aus Au-BMG1 b) nach 52 Tagen im Trageversuch auf Haut

Um den zugrundeliegenden Mechanismus dieses Anlaufverhaltens zu verstehen, wurde eine systematische Studie durchgeführt, bei der Proben des amorphen Materials verschiedenen Umgebungsbedingungen ausgesetzt wurden. Neben der Auslagerung bei unterschiedlichen Temperaturen (-18 °C Raumtemperatur RT, 37 °C und 75 °C) wurde das Anlaufverhalten unter dem Einfluss simulierter Körperflüssigkeiten (DIN EN ISO 10271 und DIN EN 1811) und im Sulfidtauchtest DIN EN ISO 1562:2004 untersucht.

Der Test in simulierten Körperflüssigkeiten (künstlichem Schweiß und künstlichem Speichel) wird bei 37 °C durchgeführt. Die Proben werden vor dem Test geschliffen, um die Gusshaut zu entfernen. Allerdings blieben einige kleinere Stellen auf der Oberfläche ungeschliffen, da sich hier einige Gießsporen gebildet hatten (**Bild 7**).

Nach dem Test wurden die Prüflüssigkeiten analysiert, um die Abgabe der Legierungselemente an die Testlösung zu bestimmen.

Je zwei Proben der Legierung Au-BMG1 wurden diesem Test unterzogen. Dabei wurde festgestellt, dass die edlen Legierungselemente Au, Pd und Ag nicht in der Testlösung nachweisbar waren. Cu wurde allerdings in vergleichsweise großen Anteilen von 58 bzw. 62 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ in künstlichem Speichel und 17 bzw. 26 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ in künstlichem Schweiß nachgewiesen. Der Siliziumgehalt in der Testlösung rangierte zwischen 1.2 und 2.4 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. Die Korrosion in diesen Testlösungen ging mit einer deutlichen Verfärbung der Proben hin zu einem intensiven Rotton einher.

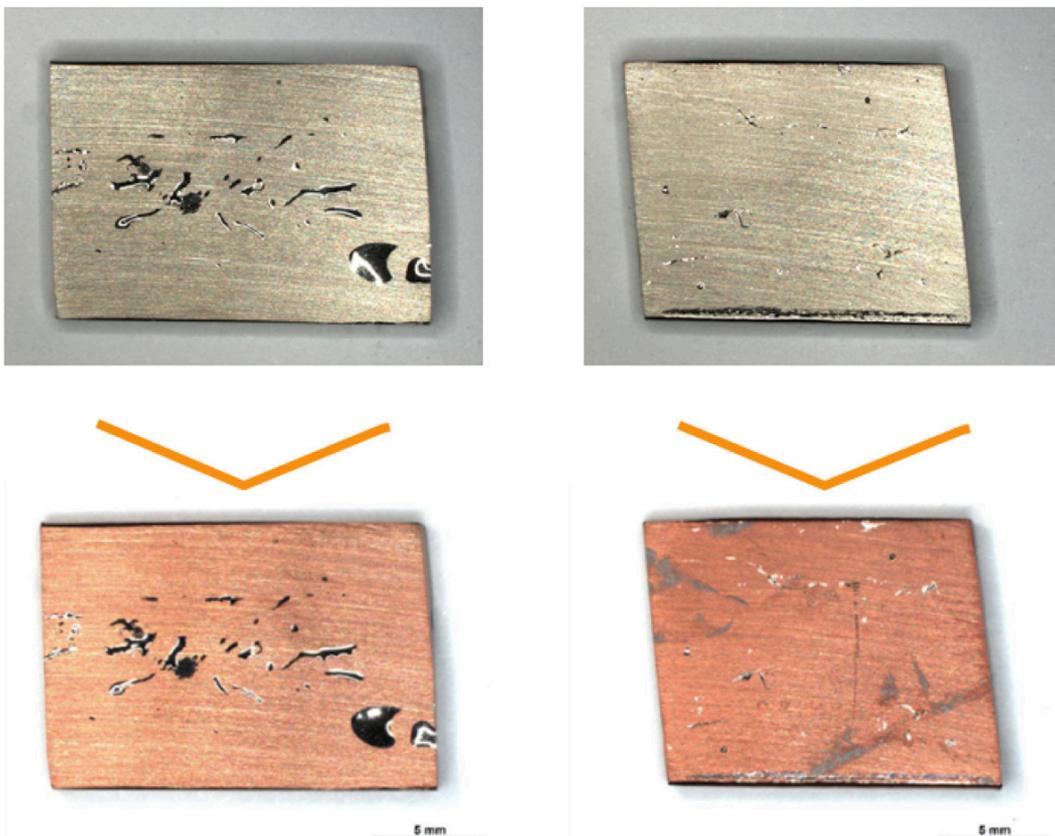


Bild 7: geschliffene Proben vor und nach dem Test bei 37 °C für 7 Tage in künstlichem Schweiß (links) und künstlichem Speichel (rechts)

Allerdings sind die Porenoberflächen von dieser Verfärbung nicht betroffen außer dort, wo sie durch feine Kratzer während des Schleifens beschädigt wurden.

Im Elementverteilungsbild ist deutlich zu sehen, dass die geschliffenen Bereiche und die Kratzer in den Poren, also alle rötlich verfärbten Oberflächenbereiche, an Kupfer verarmt und dafür mit Sauerstoff angereichert sind, während es in der Si-Verteilung keine Auffälligkeiten gibt (**Bild 8**). Offenbar sind die Proben im Bereich der Schleifspuren oxidiert, aber die Porenoberfläche ist vor einem Korrosionsangriff geschützt. Eine Erklärung hierfür ist eine dichte aber dünne SiO_2 -Schicht, die sich bei hohen Temperaturen während des Gießens gebildet hat und hier als Schutzschicht dient [21-23]. Diese Schicht wurde am **fem** an FIB-Lamellen in einer STEM-Untersuchung nachgewiesen.

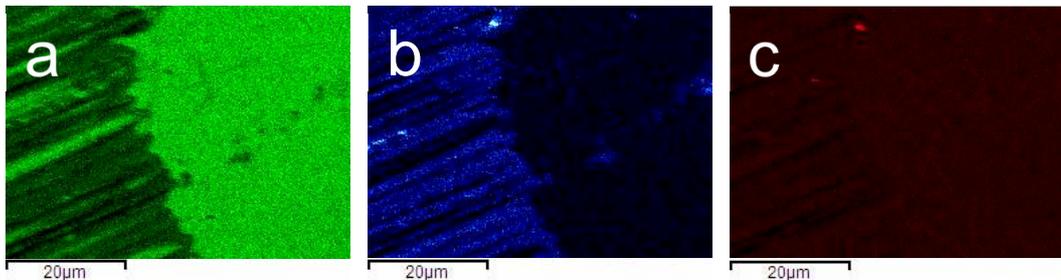


Bild 8: EDX-Mapping im Randbereich einer Pore a) Kupferverteilung, b) Sauerstoffverteilung, c) Siliziumverteilung

Etwas Ähnliches wurde an den Granalien beobachtet. Die Granalien können im Labor über Monate gelagert werden, ohne dass es zu einer Verfärbung kommt, wie sie an polierten plattenförmigen Proben beobachtet wurde. Selbst bei einer Auslagerung der Granalien bei 75 °C und in Luft für 7 Tage, tritt keine merkliche Änderung der Farbe auf, wenn sie unbehandelt bleiben. Im Gegensatz dazu zeigen sie eine deutliche Verfärbung hin zu einem Gelbton, wenn sie zuvor mit Flusssäure (HF) geätzt wurden. REM-Untersuchungen haben gezeigt, dass sich auf den Granalien bereits während der Produktion eine SiO_2 -Schicht bildet, die die Proben vor Korrosion schützt. Allerdings wird diese Schicht durch HF entfernt, wodurch die Proben den Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind und anlaufen.

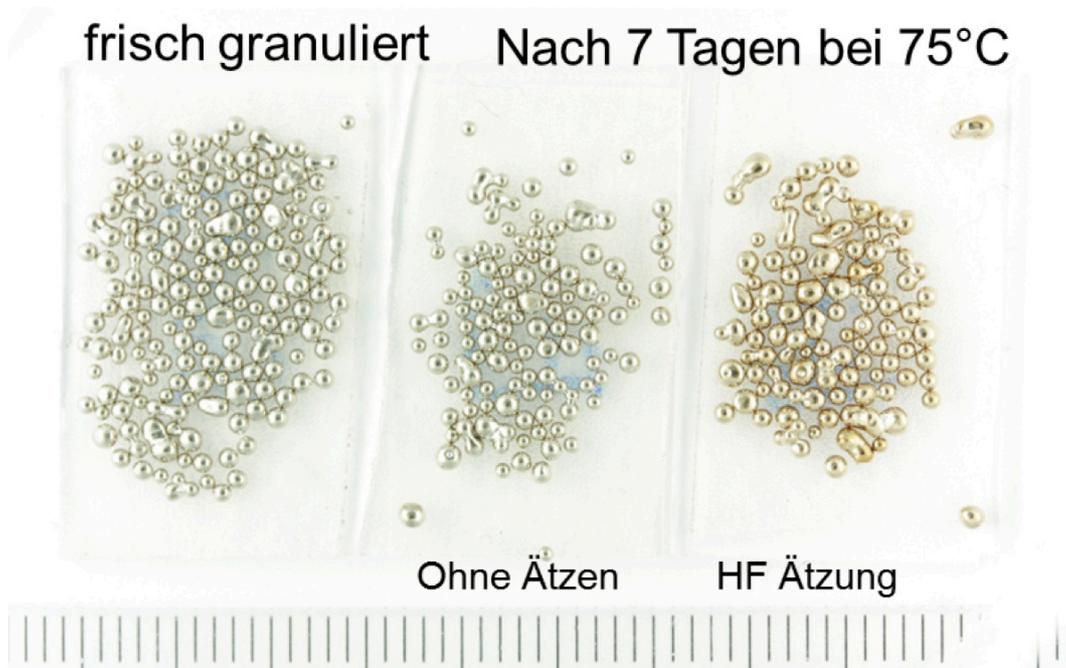


Bild 9: Granalien direkt nach der Herstellung, nach 7 Tagen Auslagerung an Luft bei 75 °C

Zur Quantifizierung der Farbänderung wurde die Entwicklung des Yellowness Index an geschliffenen und polierten Proben aufgezeichnet. Bereits nach ca. zwei Monaten erreicht der Yellowness Index Werte, die nicht mehr einem Standard Weiß zuzuordnen sind, sondern creme-weiß (off-white).

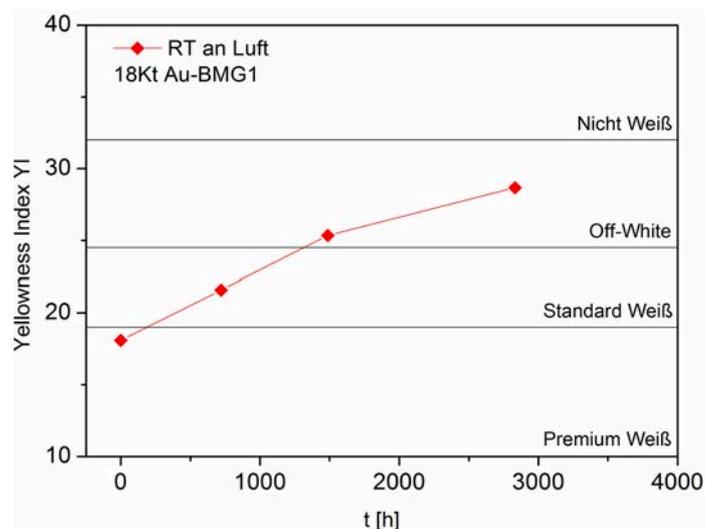


Bild 10: Entwicklung des Yellowness Index an Luft bei Raumtemperatur

Zusammenfassung und Ausblick

Die Herstellbarkeit amorpher Schmuckstücke, insbesondere die erstaunlich hohe Formfüllung bei den erforderlichen hohen Abkühlraten, übertraf alle Erwartungen. Die premium-weiße Farbe der frisch polierten Gussstücke ist eine besonders attraktive Farbe, da Weißgoldlegierungen oft einen Gelbanteil in der Farbe aufweisen [20]. Die hohe Härte und daraus resultierende Kratzbeständigkeit steuern ebenfalls zur Attraktivität dieser Legierungsklasse als Schmuckwerkstoff bei [19]. Allerdings ist die rasche Farbänderung als Folge des Anlaufens für dekorative Anwendungen nicht tolerierbar. Eine transparente Schutzschicht könnte, analog zum SiO_2 das beim Gießen auf der Oberfläche gebildet wird, einen Schutz vor Korrosion bilden. Allerdings reiben sich solche Schutzschichten gewöhnlich im Gebrauch ab, wodurch ein örtlicher Korrosionsangriff stattfinden kann, der wiederum zu einem unattraktiven fleckigen Erscheinungsbild führen würde. Besser wäre es, neue anlaufbeständige amorph erstarrende Weißgoldlegierungen zu entwickeln. Ein Schlüssel hierzu ist die Reduktion des Kupferanteils, da das Kupfer maßgeblich am Korrosionsvorgang beteiligt zu sein scheint [14, 21, 22].

Danksagung

Wir möchten dem BMWi für die Förderung der Projektarbeit unter Projektnummer AiF/IGF 16843N danken sowie dem „World Gold Council“, das uns Gold für die Forschungsarbeit zur Verfügung gestellt hat. Unser Dank gilt auch unseren Projektpartnern aus der Industrie sowie Professor Ralf Busch und Dr. Isabella Gallino für die fruchtbare Zusammenarbeit und Diskussion.

LITERATURVERZEICHNIS

01. Klement, W., R. H. Willens, und P. Duwez, *Non-crystalline Structure in Solidified Gold-Silicon Alloys*. *Nature*, 1960. **187**: p. 869–870.
02. Beck, H., et al., *Glassy Metals I - Iconic Structure, Eletronic Transport, and Crystallization*, ed. H. J. Güntherodt und H. Beck. 1981: Springer-Verlag.
03. Nishiyama, N., et al., *The world's biggest glassy alloy ever made*. *Intermetallics*, 2012. **30**(0): p. 19–24.
04. Suryanarayana, C., Inoue A., *Bulk Metallic Glasses*. 2011: CRC Press.
05. Turnbull, D., *Under What Conditions can a glass be formed*. *Contemp. Phys.*, 1969. 10: p. 473–488.
06. Lohwongwatana, B. *Liquidmetal - Hard 18K and .850 Pt alloys that can be processed like plastics or blown like glass*. in *Proceedings of the twenty-first Santa Fe Symposium in Albuquerque, New Mexico*. 2007.
07. Inoue, A. und A. Takeuchi, *Recent progress in bulk glassy alloys*. *Materials Transactions*, 2002. **43**(8): p. 1892–1906.
08. Busch, R., J. Schroers, und W. H. Wang, *Thermodynamics and kinetics of bulk metallic glass*. *MRS Bulletin*, 2007. **32**(8): p. 620–623.
09. Löffler, J. F., *Bulk metallic glasses*. *Intermetallics*, 2003. 11(6): p. 529–540.
10. Battezzati, L., A. Castellero, und P. Rizzi, *On the glass transition in metallic melts*. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007. **353**(32–40): p. 3318–3326.
11. J. Schroers, N. P., *Amorphous Metal Alloys form like Plastics*. *Advanced Materials & Processes*, 2006. **61**: p. 61–63.
12. Ashby, M. F. und A. L. Greer, *Metallic glasses as structural materials*. *Scripta Materialia*, 2006. **54**(3): p. 321–326.
13. Schroers, J., et al., *Gold based bulk metallic glass*. *Applied Physics Letters*, 2005. **87**(6): p. 061912-1–061912-3.
14. Klotz, U. E. und M. Eisenbart. *Gold-Based Bulk Metallic Glasses: Hard Like Steel, Moldable Like Plastics*. In *Proceedings of the Twenty-Seventh Santa Fe Symposium 2013*. Albuquerque, New Mexico.
15. Schroers, J., et al., *Thermoplastic forming of bulk metallic glass-Applications for MEMS and microstructure fabrication*. *Materials Science and Engineering: A*, 2007. **449–451**: p. 898–902.
16. Raykhtsaum, G. *Age hardenable gold alloys*. in *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*. 2009. Albuquerque, USA: Met-Chem Research, Albuquerque, USA.
17. Schroers, J., et al., *Precious bulk metallic glasses for jewelry applications*. *Materials Science and Engineering: A*, 2007. **449–451**: p. 235–238.
18. *Patent No WO 2006/045106 A1*, 2006.

19. Mozgovoy, S., et al., *Investigation of mechanical, corrosion and optical properties of an 18 carat Au-Cu-Si-Ag-Pd bulk metallic glass*. Intermetallics, 2010. **18**(12): p. 2289–2291.
20. Henderson, S. und D. Manchanda, *White gold alloys*. Gold Bulletin, 2005. **38**(2): p. 55–67.
21. Eisenbart, M., et al., *A colourimetric study of the tarnishing rate of 18 karat gold bulk metallic glasses*, 2013: Submitted to Corrosion Science.
22. Eisenbart, M., et al., *On the Abnormal Room Temperature Tarnishing of an 18kt Gold Bulk Metallic Glass Alloy* in ISMANAM2013, submitted to Journal of Alloys and Compounds: Turin.
23. Shpyrko, O. G., et al., *Surface Crystallization in a Liquid AuSi Alloy*. Science, 2006. **313**(5783): p. 77–80.

**Labor trifft Feld –
wenn die Laborprobe ins Feld geht.
Werkstoffauswahl bei stark streuender
Korrosionslast**

Bernd Seeger,
Witzenmann GmbH

Einleitung

Zusammenfassung

Die Anforderung an die Zuverlässigkeit technischer Bauteile nimmt stetig zu. Speziell bei den hier exemplarisch betrachteten Fahrzeug-Abgaskomponenten sind Gewährleistungsanforderungen von weit über fünf Jahren keine Seltenheit. Dies erfordert eine fundierte Zuverlässigkeitsbewertung in frühen Entwicklungsphasen. Für die Bewertung von mechanischen Lasten gibt es hierzu etablierte Methoden zur Lastermittlung und -bewertung. Weitaus schwieriger ist die Berücksichtigung der Korrosionsbelastung. Auch hier gibt es standardisierte Korrosionstests. Die Korrosionsbeständigkeit hängt jedoch stark von der Witterung, dem lokalen Streusalzeinsatz und der individuellen Fahrweise ab. Dadurch ist die Aussagekraft herkömmlicher Korrosionstests mit großen Unsicherheiten behaftet. Der vorliegende Beitrag zeigt einen praxisnahen Lösungsansatz. Ausgehend von systematischen Feldanalysen werden zunächst die wesentlichen Korrosionsmechanismen an Feldteilen analysiert und unter Laborbedingungen mit speziell entwickelten Korrosionstests reproduziert. Die Labortests liefern zwar kurzfristige relative Aussagen, auch für neuartige Werkstoffe, müssen jedoch aufgrund der Raffung und der Vielzahl der Einflussparameter durch realitätsnahe Tests abgeglichen werden, um sichere Prognosen für die reale Belastbarkeit zu ermöglichen. Hier hilft die Kombination von Feld und Labor weiter. Definierte Laborproben werden ins Feld gebracht und anschließend zur „Kalibrierung“ der Labortests genutzt. So lässt sich die Aussagekraft der Labortests deutlich verbessern.

Herausforderung Werkstoffauswahl

Nach Schätzung der Weltkorrosionsorganisation WCO verursacht Korrosion Kosten in der Größenordnung von 3–4 % des Bruttoinlandproduktes, davon könnte ein Viertel durch geeignete Maßnahmen vermieden werden [1], beispielsweise durch eine fundierte und methodische Werkstoffauswahl. Hierzu ist ein gut aufbereiteter Stand der Technik verfügbar [2]. Dieser erfordert allerdings eine gute Kenntnis der Korrosionsbelastung einerseits und der Korrosionsbeständigkeit der Werkstoffe andererseits. Bei den hier betrachteten Entkoppelementen sind die Korrosionslasten häufig unbekannt und zudem stark streuend. Außerdem gibt es in der Literatur kaum Angaben zur Korrosionsbeständigkeit unter diesen Lasten.

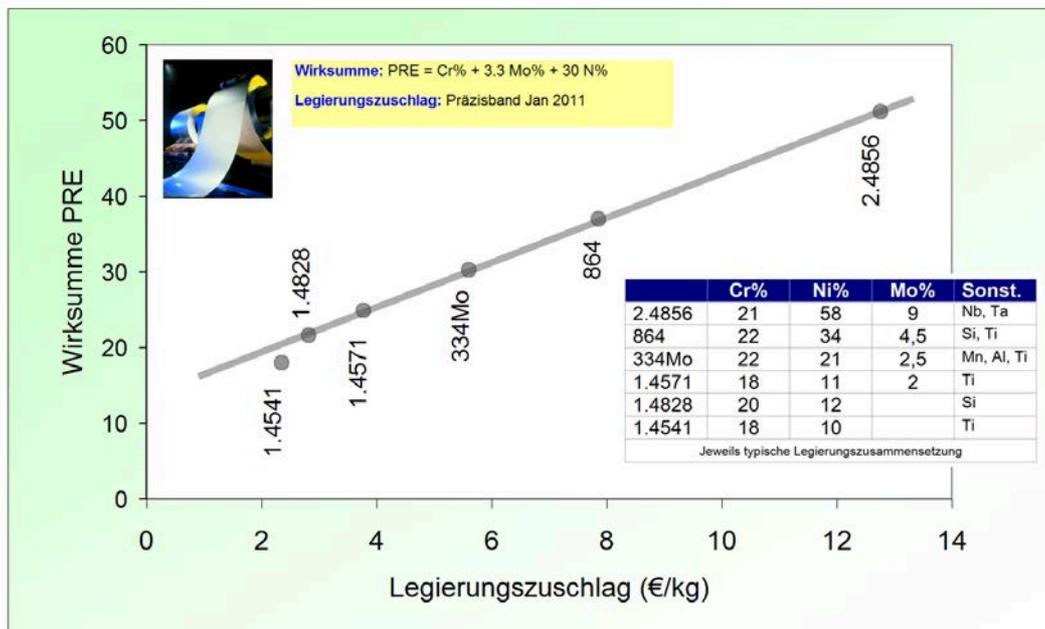


Bild 3: Werkstoffe für Entkoppelelemente – Wirksumme als Maß der Belastbarkeit?

Für eine tragfähige Werkstoffauswahl muss prinzipiell sichergestellt werden, dass die Belastung B kleiner ist als die Belastbarkeit R (**Bild 4**). Dies trifft sowohl auf mechanische als auch auf Korrosionslasten zu. Allerdings kommt bei den hier vorliegenden Korrosionslasten erschwerend hinzu, dass sie stark streuen, aufgrund der Abhängigkeit von Witterung, dem lokalen Streusalzeinsatz und der individuellen Fahrweise.

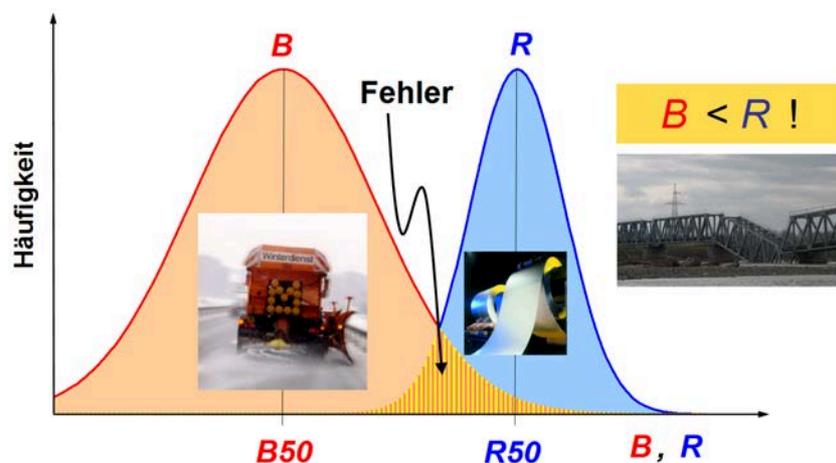


Bild 4: Streuung der Belastung B und Belastbarkeit

Systematische und standardisierte Feldanalyse

Bei unbekanntem oder stark streuenden Korrosionslasten kommt der Auswertung von Schadensteilen eine ganz besondere Bedeutung zu. Feldteile bergen Informationen über die Belastung und lassen Schädigungsmechanismen erkennen. Eine detaillierte Ursachenanalyse kann z. B. in Orientierung an VDI 3822 [4] erfolgen. Zusätzlich ist aber auch eine standardisierte Erfassung der Daten in geeigneten Datenbanken wichtig.



Bild 5: Standardisierte Schadensanalyse

Für Entkoppelelement-Rücksendeteile hat Witzenmann eine Datenbank aufgebaut, die inzwischen über 2000 metallographisch analysierte Bauteile umfasst (**Bild 5**). Zur Identifizierung und Bewertung der wesentlichen Korrosionsformen kommen Entkoppelelemente von Teststrecken- oder aus Prüfstandserprobungen zur Untersuchung. Zur weiteren Systematisierung werden gezielt Entkoppelelemente aus dem Feld entnommen. Pro Entkoppelelement sind 120 Merkmale zur Funktionsfähigkeit, zu Bauteil- und Fahrzeugdaten sowie zum Korrosionsbefund erfasst und zur statistischen Auswertung verfügbar.

Korrosionsformen identifizieren

Durch Auswertung dieser Daten lassen sich die für Entkoppelemente wesentlichen Korrosionsformen ermitteln (**Bild 6**) [5].

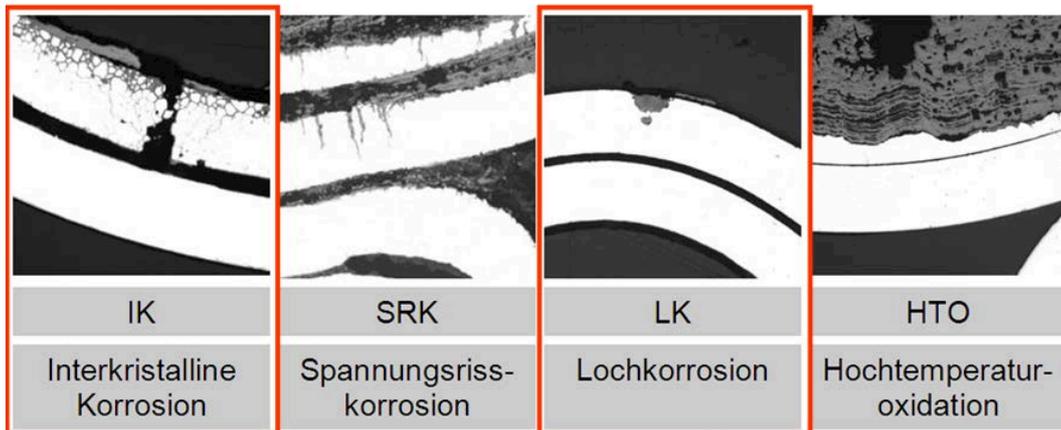


Bild 6: Korrosion bei Entkoppelementen

Besonders kritisch ist die **interkristalline Korrosion (IK)**, die zum totalen Kornzerfall und Bauteilbruch führen kann. Sie tritt oberhalb von ca. 600 °C ein, weil die dann einsetzende Chromkarbidbildung die Korrosionsanfälligkeit im Bereich der Korngrenzen deutlich erhöht. Eine Analyse der Datenbank zeigt zum Beispiel, dass IK auf der Teststrecke doppelt so häufig wie im Feld vorkommt (**Bild 7**). Dies lässt sich mit den höheren Betriebstemperaturen erklären und zeigt aber auch, dass die Fahrzeugprüfung auf der Teststrecke hinsichtlich Korrosion nur bedingt repräsentativ ist.

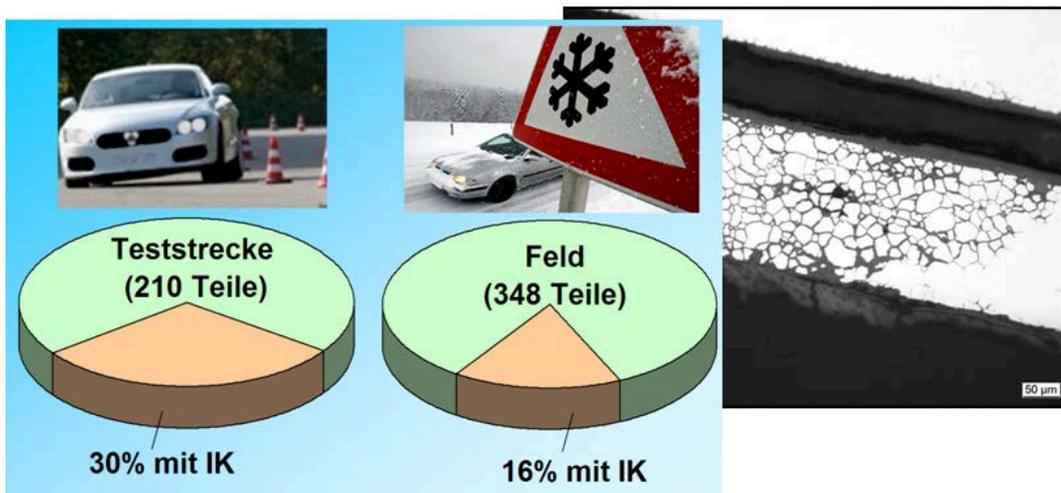


Bild 7: IK im Feld und auf Teststrecke

Ähnlich versagenskritisch wie IK wirkt sich **Spannungsrissskorrosion (SRK)** auf die Bauteillebensdauer aus, denn sie tritt gerade in den funktionsrelevanten und unter äußeren Zugspannungen stehenden Bereichen auf und führt dann zum Bruch der Komponente. Bei Entkoppelementen ist SRK jedoch selten ausschlaggebend für Korrosionsausfälle.

Die **Lochkorrosion (LK)** ist bei Entkoppelementen weniger für die Festigkeit als vielmehr für die Dichtheit kritisch. Bei einer typischen Balgwanddicke von 0,2 mm kann bereits ein kleines Loch zum Bauteilversagen durch Leckage führen. In manchen Fahrzeugtypen hat die LK die höchste Schädigungsrelevanz. Im Gegensatz zu den vorgenannten selektiven Korrosionsformen tritt **Hochtemperaturoxidation (HTO)** oder Verzunderung flächig auf und ist für Entkoppelemente eher selten versagensrelevant. Im Bauteilinnern tritt sie meist in Reinform auf, da hier kaum korrosionskritische Chloride oder Säuren vorliegen.

Alle hier genannten Korrosionsmechanismen treten selten alleine auf. Sie stehen häufig untereinander oder mit äußeren Lasten in Wechselwirkung. Zahlreiche weitere Korrosionsmechanismen finden sich an Entkoppelementen, die im Feld jedoch von untergeordneter Relevanz sind. So konnte Salzsäurekorrosion nachgewiesen werden, die selbst bei Nickelbasislegierungen zum starken Angriff führt [6]. Schadensanalysen an Entkoppelementen nach Teststreckenerprobung ließen auch auf hoch aggressive Hochtemperaturchlorkorrosion schließen [7, 8].

Kritische Einflussfaktoren und Schädigungsmechanismen verstehen

Neben der Analyse der Feldsituation ist eine möglichst genaue Kenntnis der Belastung eine weitere wichtige Voraussetzung für die Lebensdauerprognose und Werkstoffauswahl. Exemplarisch wird hier der Einfluss von Temperatur und Streusalz betrachtet.

Temperaturbelastung

Im Fahrbetrieb sind Entkoppelemente sehr hohen Temperaturen ausgesetzt. Das Ausmaß bzw. Risiko der IK-Sensibilisierung hängt von Höhe und Dauer der am Material wirkenden Temperatur ab. Deshalb sind Bauteiltemperaturmessungen üblich. An mehr als 100 Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller wurde die Temperaturverteilung im Entkoppelement in typischen Betriebssituationen gemessen und in Datenbanken erfasst. Eine typische Temperaturmesskurve zeigt **Bild 8**. Obwohl im Abgasstrom und am innen liegenden Liner bei Autobahnfahrt Temperaturen bis ca. 900 °C erreicht werden, bleiben in diesem Beispiel

alle Komponenten, die der kritischen Außenkorrosion ausgesetzt sind (Balg und Geflecht) unter 600 °C.

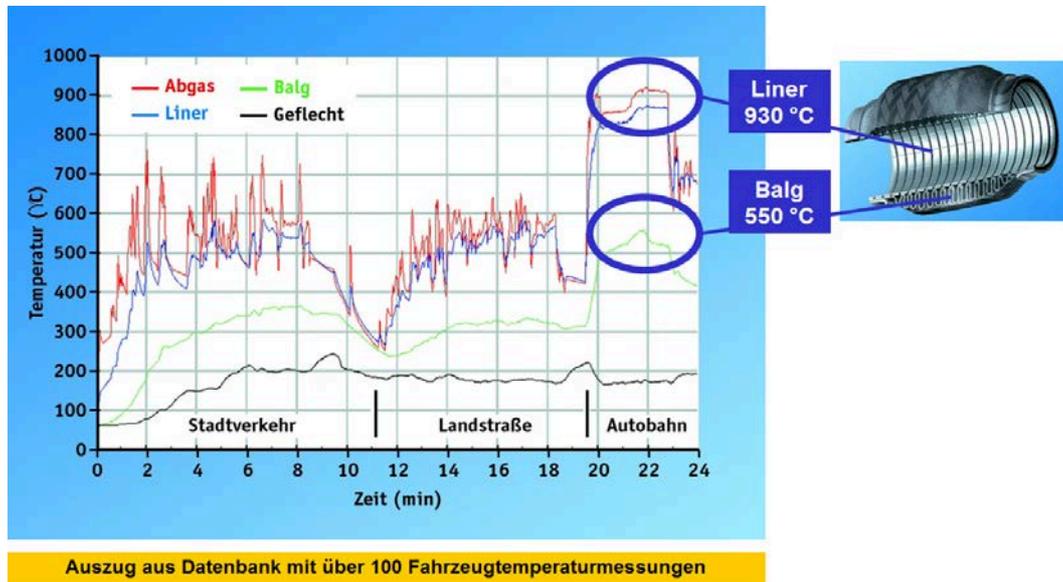


Bild 8: Bauteiltemperatur – stark streuend

Für die im Betrieb tatsächlich auftretenden Bauteiltemperaturen ist allerdings auch die Fahrweise maßgeblich, je nachdem ob eher sportlich oder defensiv gefahren wird bzw. ob das Fahrzeug nur für Kurzstrecken oder häufig für Extremlasten wie z. B. Passfahrten mit Wohnwagen genutzt wird. Dies erschwert die Korrosionssimulation zur Absicherung der Gewährleistung erheblich, weil Fahrzeugtyp, individuelle Fahrstile und die Umweltbelastung starken Einfluss ausüben.

Streusalzbelastung

Die Streusalzbelastung ist saisonal und regional sehr unterschiedlich. Hierfür ist sowohl das Klima als auch die regionale Strategie zur Bekämpfung der Straßenglätte sowie die eingesetzte Streutechnologie und Streusalzart maßgeblich. Trotz verbesserter Streutechnologien und Umweltschutzbemühungen hat sich z. B. die Salzbelastung in den letzten zwölf Jahren auf deutschen Straßen verdoppelt, **Bild 9**.



Bild 9: Einfluss Streusalz – stark steigend

Die Salzarten unterscheiden sich sowohl in der Tauwirkung bzw. Anwendungsgrenztemperatur (Natriumchlorid bis ca. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, Magnesiumchlorid bis ca. $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ und Calciumchlorid bis ca. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) als auch in ihrer korrosiven Wirkung. Häufig kommen Salzmischungen zum Einsatz, die in ihrer Wirkung korrosiver sind als die Einzelsalze.

Labor-Korrosionstest entwickeln und validieren

Die Belastung des Entkoppellementes hängt wesentlich davon ab, ob das Fahrzeug in Betrieb oder im Stillstand ist. Dies ist bei der Entwicklung geeigneter Korrosionstests zu beachten. Den größten Teil seiner Lebensdauer ist das Fahrzeug nicht in Betrieb (ca. 95 %). Da Anlauffarben und vor allem Salzablagerungen stark hygroskopisch sind und zu „Nasskorrosion“ führen, schreitet auch an trockenen Tagen die Korrosion voran. Für den Fahrzeugstillstand gilt es deshalb die Lochkorrosionsbeständigkeit des Werkstoffes (bei Raumtemperatur) zu charakterisieren. Hierzu wird das Lochkorrosionspotential der Stahlproben in einer sogenannten AVESTA-Zelle mit typischer Streusalzlösung untersucht (**Bild 10**). Da die Anlauffarben einen großen Einfluss haben, wird sowohl Stahl im Anlieferzustand als auch Stahl mit Anlauffarben untersucht.

| Ziel |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Simulation der Korrosion im Stillstand (Lochkorrosions-Risiko) |
| Merkmale im Stillstand |
| <ul style="list-style-type: none"> • Abgasanlage kalt • maßgebliche Korrosionsart: LK • Anlauffarben durch Heißbetrieb • Hygroskopische Salzschrift |
| Test |
| <ul style="list-style-type: none"> • Lochkorrosionspotentialmessung (AVESTA-Zelle) • typische Streusalzlösungen • Proben mit/ohne Anlauffarben |

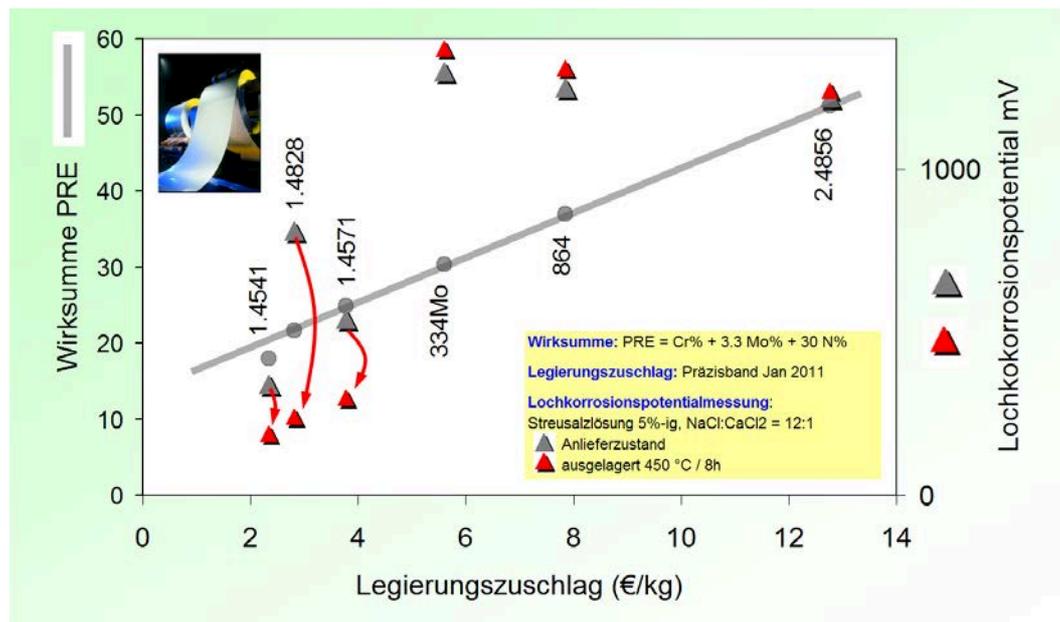
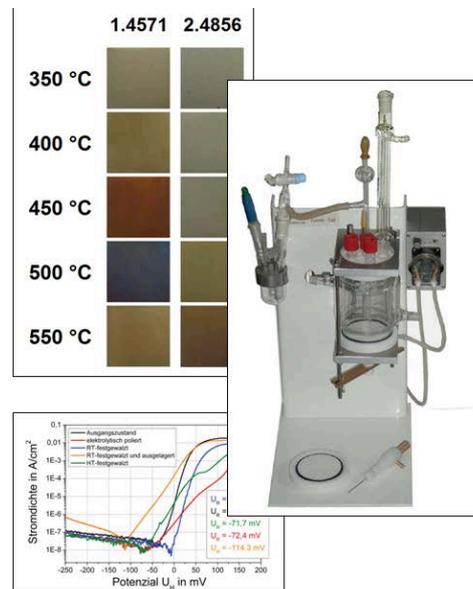
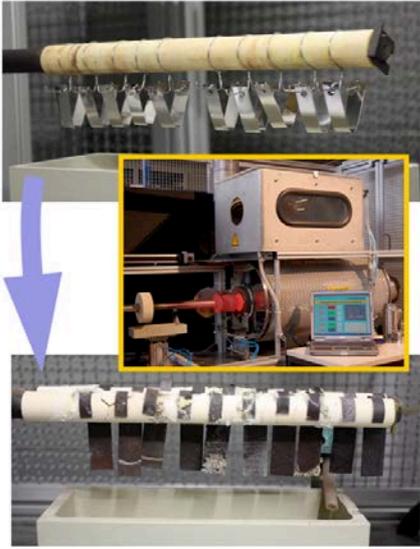


Bild 10: LK-Potentialmessung

Die Messergebnisse (**Bild 10**) zeigen, wie bei den Standardausteniten (1.4541, 1.4828, 1.4571) das Lochkorrosionspotential durch Anlauffarben stark reduziert wird. Dies ist bei den Werkstoffen mit mehr als 30 % Nickel (334Mo, 864 und 2.4856) nicht erkennbar. Diese Stähle zeigen auch in der Praxis eine sehr geringe Lochkorrosionsempfindlichkeit.

Für die Simulation der Korrosion im Fahrbetrieb muss ein besonderes Augenmerk auf die IK gelegt werden. Standardisierte IK-Tests sind jedoch ungeeignet, sie führen nicht zu den im Feld vorgefundenen IK-Schadensbildern. Diese können erst durch eine geeignete zyklische Belastung generiert werden (**Bild 11**). Bereits nach 60 Zyklen (entspricht einer Versuchsdauer von ca. 40 Stunden) liegt beim 1.4571 eine Schädigung vor, wie sie im Feld erst nach 5–10 Jahren zu finden ist (**Bild 11**).

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ziel |  |
| Merkmale im Fahrbetrieb | |
| Test | |
| Simulation der Korrosion im Fahrbetrieb (IK-Risiko) | <ul style="list-style-type: none"> • Zyklische Hochtemperatur (> 600 °C) • Streusalz / Spritzwasser • maßgebliche Korrosionsart: IK |
| <ul style="list-style-type: none"> • 60 x Zyklus: 60-10-1 min (Ofen/Abkühlen/Tauchen) • T > 600 °C, Streusalzlösung • Bandproben aus Serienstahl • Vermessung der Restwanddicke | |

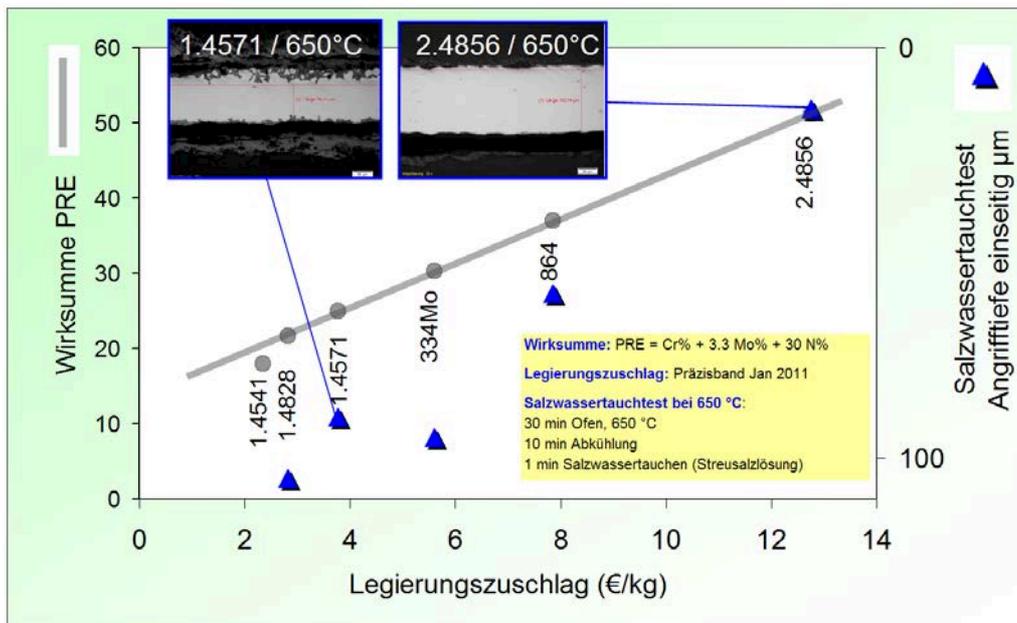


Bild 11: IK-Salzwassertauchtest

Kopplung von Feld und Labor

Feldanalyse und Labortest haben spezifische Vor- und Nachteile. Die Feldanalyse ist sehr realitätsnah, dauert aber oft zu lange und leidet unter unbekanntem Störfaktoren. Der Labortest ist dagegen sehr schnell und alle Einflussfaktoren sind gut kontrollierbar. Allerdings besteht die berechnete Frage, ob die Versuchsbeschleunigung nicht das Ergebnis beeinträchtigt.

Deshalb hat Witzmann ein Konzept entwickelt, um definierte Laborbedingungen und echte Feldbelastungen zu kombinieren und damit den Graben zwischen Feld und Labor zu schließen. Hierzu werden in Firmenfahrzeugen und Fahrzeugen von Mitarbeitern geeignete präparierte Bandproben aus mehreren Stahlsorten mit einer speziell entwickelten Befestigungstechnik am Abgasrohr fixiert (**Bild 12**). Mit diesem Konzept stehen alle Stahlproben unter derselben Belastung durch Temperatur und Salzwasser. Jeweils vor und nach dem Winter erfolgen eine zerstörungsfreie Fotodokumentation und eine quantifizierte Auswertung mittels Bildreihentafel. Nach Abschluss des Fahrzeugtests werden die Bandproben zudem metallografisch analysiert.

| Ziel |
|-------------------------------------------------------------------|
| Definierte Laborbedingungen und echte Feldbelastungen kombinieren |
| Proben |
| • Bandproben (Serienstahl) |
| Test |
| • Befestigungstechnik speziell entwickelt |
| • Fotodokumentation vor und nach jedem Winter |
| • Zerstörungsfreie quantifizierbare Korrosionsbewertung |

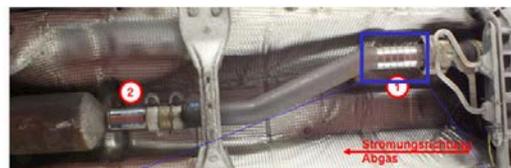


Bild 12: Laborproben-Feldtest

In **Bild 13** ist zum Beispiel erkennbar, wie der Werkstoff 1.4828 nach drei Wintern in Detroit (USA) bereits wesentlich stärker als der Werkstoff 1.4571 angegriffen ist. In diesem Fall bestätigen die Ergebnisse das Werkstofffranking, welches mittels Labortest gefunden wurde. In anderen Fällen kann auch eine Korrektur der Labortestparameter erforderlich sein.

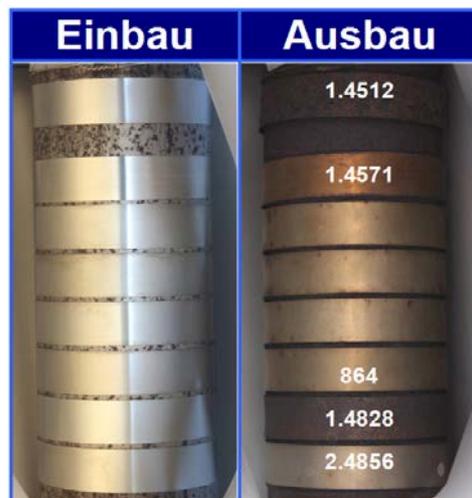


Bild 13: Ausbau nach 30 Monaten (51814 km) bzw. drei Wintern in Detroit (USA)

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Schmitt, G. et al.: Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control. New York, World Corrosion Organization, 2009.
- [2] Reuter, A: Methodik der Werkstoffauswahl: Der systematische Weg zum richtigen Material. Hanser Verlag, 2007.
- [3] Burkhardt, C., Balmer, B.: Entkoppelemente in der Fahrzeugtechnik: flexible Verbindung zwischen Motor und Abgasanlage. Landberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2002.
- [4] VDI 3822: Schadensanalyse-Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse. Berlin: Beuth-Verlag, 2011.
- [5] Burkhardt, C; Rösler, R.; Seeger, B.; Börner, F; Herrmann, G: Feldanalyse und Korrosionssimulation zur Werkstoffauswahl bei Entkoppelementen. In: ATZ 110 (2008), Nr. 1, S. 54–61
- [6] Crum, J. R.; Eisinger, N. C.; Parsons, R. S.: Failure Mechanismus in Automotive Exhaust Decouplers. In: SAE Papers, Document no. 2004-01-0858, (2004).
- [7] Zahs, A.: Chlorinduzierte Hochtemperaturkorrosion in oxidierenden Atmosphären. In: Report Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Band 551. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.
- [8] Antoni, L.; Bousquet, R.; Davidson, J. H.: Simulation of road salt corrosion in austenitic alloys for automotive exhaust systems. In: Materials at high temperatures. Centre de Recherches d'Ugine (2003), Band 20 (4), Seite 561–571.

ANGABEN ZUM AUTOR

Dipl.-Ing. Bernd Seeger hat am KIT Karlsruhe Maschinenbau studiert und arbeitet seit 18 Jahren bei der Witzenmann GmbH. Zunächst war er Gruppenleiter in der Produktentwicklung, dann Abteilungsleiter für Werkstoff- und Schweißtechnik und seit 2012 leitet er die Hauptabteilung für Technologie und Innovation. Seine Aufgabenschwerpunkte liegen in folgenden Bereichen:

- Werkstoffauswahl, Schadensanalyse und Werkstoffprüfung
- Technische Sauberkeit (Arbeitsgruppe VDA 19)
- Schweißtechnik, Schweißaufsicht (International Welding Engineer)
- Vorentwicklung, Produktentwicklung

Fertigungs- und Einsatzmöglichkeiten von gefrästem Stufenband

Corinna Ruess,
Profiltech Stufenbandprofile GmbH

Einleitung

Die Profiltech GmbH Stufenbandprofile ist Erfinder und Marktführer von der Herstellung gefräster Profilbänder. Seit über 40 Jahren steht der Name Profiltech für gefräste Präzisionsstufenbänder. Diese Präzisionsbänder aus Kupfer, Kupferlegierungen und NE-Metall-Speziallegierungen werden in der Stanztechnik zur Herstellung von Steckverbindern, Kontaktteilen, Halbleiterträgern und vielen Anwendungen in den Bereichen Elektrotechnik/Elektronik, Automotive, Informations- und Computertechnik sowie in weiteren modernen Technologiebereichen eingesetzt.

Profiltech hat für das „Reel to Reel“ Profilieren dieser Stufenbänder eine spezielle Frästechnologie (High-speed-cutting) entwickelt. Die Maschinen und Werkzeuge werden im eigenen Maschinen- und Werkzeugbau entwickelt und gebaut. Dadurch ist es möglich, ein Portfolio abzudecken, welches weltweit einzigartig ist. So können Bänder von einer Breite von 2 mm bis zu 190 mm und einer Dicke von 0,15 mm bis zu 3,5 mm bearbeitet werden. Die Geometrie und die Anforderungen der Profilbänder werden individuell – bei Bedarf gemeinsam mit dem Kunden – definiert und nach speziell festgelegten Fertigungsplänen gefräst. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für den gleichbleibend hohen Qualitätsstandard.

Einsatzmöglichkeiten von gefrästem Stufenband

Durch den Einsatz von Stufenbändern – auch gefräste Profilbänder genannt – sollen notwendige Arbeitsgänge in der Stanztechnik, wie beispielsweise das Prägen und Falten ersetzt oder auch technische Lösungen für die Herstellung von Stanzteilen ermöglicht werden.

Zwischenzeitlich hat sich die Anwendung von Stufenbändern auf fast alle Bereiche, in denen Teile aus Bändern durch einen Stanzprozess hergestellt werden, durchgesetzt. So können Baugruppen, deren Elemente bisher aus mehreren Bändern hergestellt und durch einen Schweißprozess zusammengefügt wurden, bei Verwendung von gefrästem Profilband in nur einer Stanzoperation wirtschaftlicher und kostengünstiger gefertigt werden.

Auch andere Baugruppen für die Anwendung im Automotive-Bereich, wie zum Beispiel ABS und Airbag, werden aufgrund der hohen Anforderungen an Funktionssicherheit und Präzision mit gefrästen Stufenbändern realisiert.

In der neuesten Generation von Leistungs-LEDs werden für die bessere Wärmeableitung Stufenbänder mit sehr präzisen und schmalen Kanälen mit kleinsten

Radien (0,05 mm) benötigt. Diese, von den LED Herstellern geforderten Dimensionen, lassen sich ausschließlich in dieser hohen Genauigkeit und anspruchsvollen Geometrie durch gefrästes Stufenband realisieren. Durch eine enge Zusammenarbeit mit den Entwicklungsabteilungen der Anwender in Taiwan und China, werden die Geometrien speziell nach deren Anforderungen entwickelt.



Mehrkanal LED-Band

Die neueste Innovation aus dem Hause Profiltech ist ein dreidimensional gefrästes Band, welches für den Einsatz komplexer Halbleiterbauelemente realisiert wurde. Denkbar ist aber auch der Einsatz für andere Produkte, wie z. B. Mikro-
kühler und weitere Anwendungen. Somit gibt es neben den längsgefrästen Bändern eine Technologie für Bänder, welche in Längsrichtung sowie in Querrichtung profiliert werden – und zwar in sehr hoher Genauigkeit.



3-D Stufenband

Vorteile von gefrästen Stufenbändern

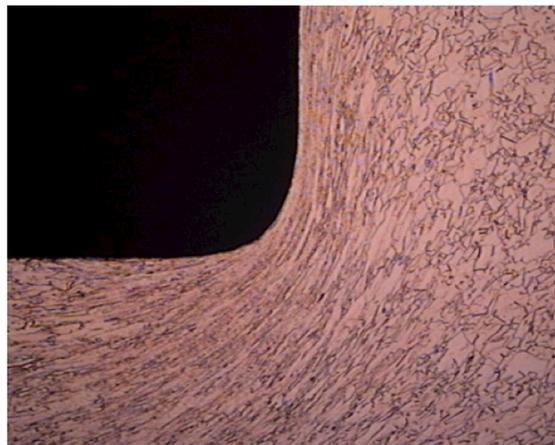
- Alle Kupferwerkstoffe und Aluminium sind in allen Zuständen fräsbar
- Die Werkstoffeigenschaften bleiben über den gesamten Querschnitt erhalten
- Es werden keine zusätzlichen Spannungen in das Halbzeug eingebracht
- Vielseitige Gestaltung der Dickenübergänge (Flankenwinkel, Radien)
- Sehr hohe Reduktionsstufen bis zu 90 % möglich
(Stanztechnisch nicht möglich)
- Gefräste Oberflächen sind gut geeignet für Verbindungstechniken
(Löten, Schweißen, Beschichten)
- Die Gefügestruktur bleibt erhalten (siehe Bilder unten)
- Keine Beeinflussung der Härte, Zugfestigkeit, elektrischen oder thermischen Leitfähigkeit über die Profilbreite

Profilbänder lassen sich auch durch Walzen oder Hämmern erzeugen. Gerade für elektromechanische Anwendungen oder diskrete Halbleiterbauelemente werden aus den oben genannten Gründen profilgefräste Bänder bevorzugt.

Ein wesentlicher Faktor für gefräste Bänder ist auch die Kostenseite, so sind die Fräswerkzeugkosten wesentlich geringer als die Kosten für Walzwerkzeuge. Zudem lässt sich die Bemusterungsphase verkürzen, da die Erstellung eines Fräswerkzeuges bedeutend schneller ist.

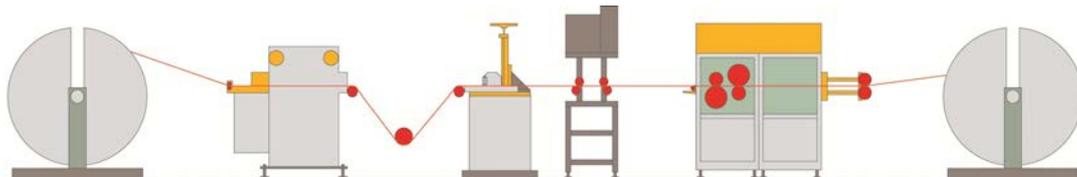


Gefüge: gefrästes Band



Gefüge: gewalztes Band

Durch das auf die Bandqualität abgestimmte Richten (Profiltech-Prozess) wird das Band optimal auf den Stanzprozess eingestellt. Auf Richten (in Endbreite) des Bandes durch das Halbzeugwerk kann in den meisten Fällen verzichtet werden.



Anlagenlayout

Herstellung von gefrästem Stufenband

Durch kontinuierliche Fertigung wird das Band in einer Fräsoperation entweder einseitig oder auch gleichzeitig auf beiden Seiten bearbeitet. Vor dem eigentlichen Fräsen, wird das Band auf qualifizierten Richtanlagen gerichtet, um einen auf den Stanzprozess optimierten Spannungszustand zu erzielen. Durch dieses qualifizierte Richten während der Fräsoperation, kann in den meisten Fällen auf das wesentlich kostenintensivere Richten des Bandes in Einzelbreite im Halbzeugwerk verzichtet werden.

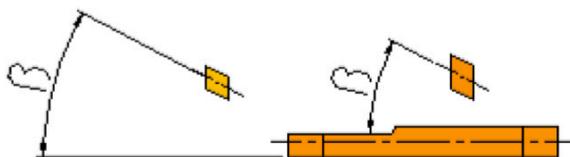
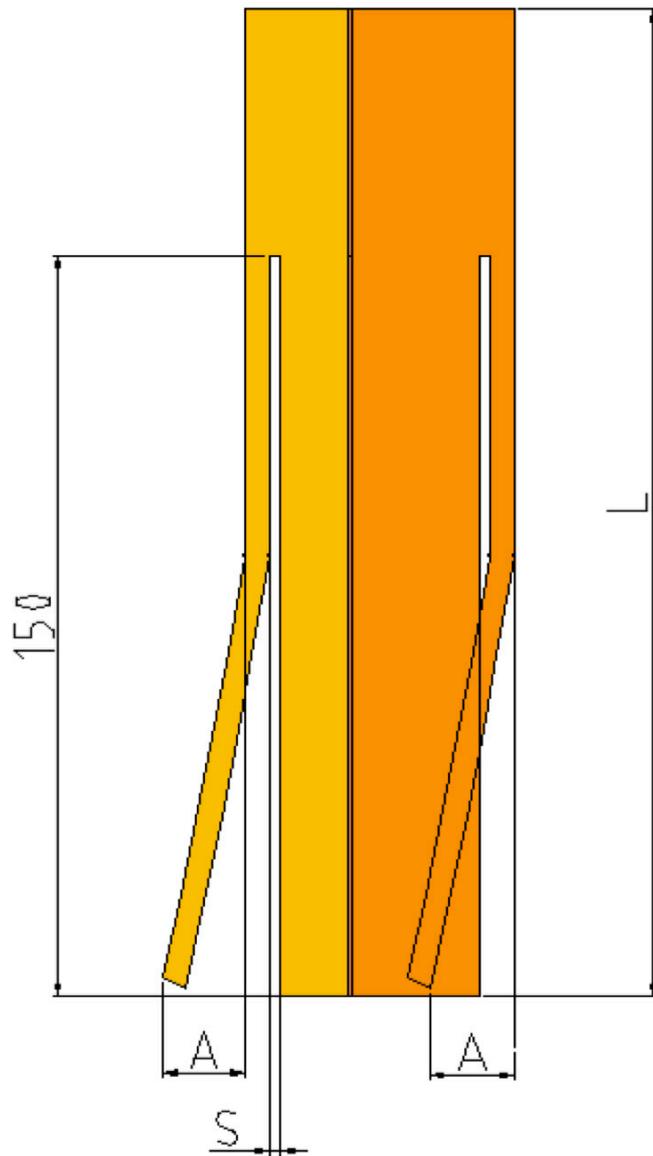
Die Fräsrestdicke wird permanent gemessen, bei Bedarf regelt eine automatische Steuerung die Fräseinheit nach, so dass selbst kleinste Toleranzen von $\pm 4 \mu\text{m}$ prozesssicher hergestellt werden können. Auf Anforderung kann für jeden einzelnen Ring eine statistische Dokumentation über die gesamte Lauflänge gefahren werden, dies ist z. B. bei Sicherheitsbauteilen für den Automotive-Bereich eine notwendige Voraussetzung.

Prozessoptimierung durch Richten

Der Spannungszustand der gefrästen Bänder, lässt sich durch einen einfachen aber effektiven Test bewerten.

Wir verwenden als Grundlage zur Beurteilung der Richtoperation und somit dem Spannungszustand des Bandes den Sägetest nach DIN EN 13147. Die dafür benötigte spezielle Maschine wurde ebenfalls von Profiltech konstruiert und gebaut.

Sägetest nach DIN EN 13147

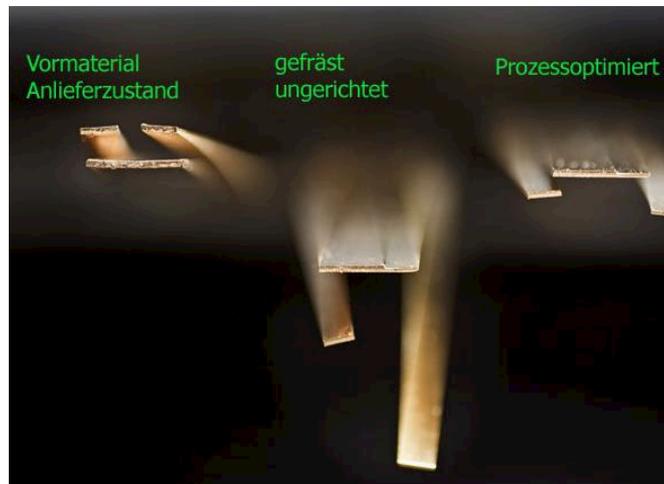


Banddicke ≤ 0.4 mm
Sägespalt = 0.5 mm
Banddicke > 0.4 mm
Sägespalt = 0.8 mm

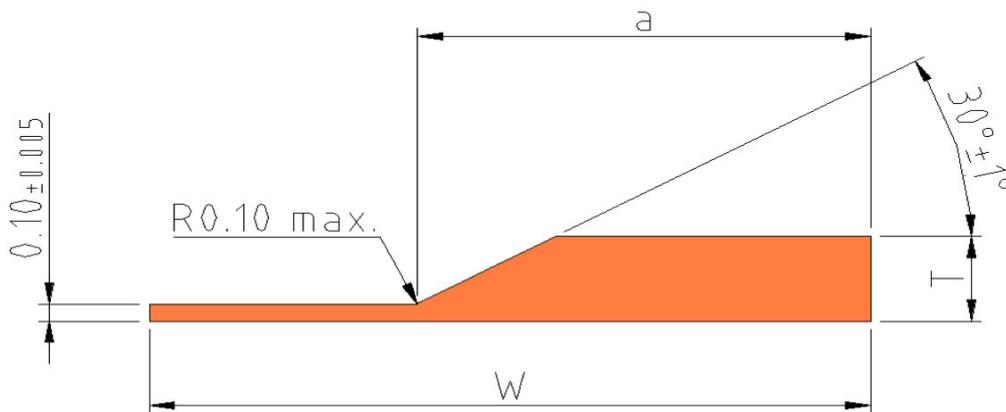
Sägeauslenkung $A = \text{SAEAUS}$
Sägewinkel $\beta = \text{SAEWIN}$



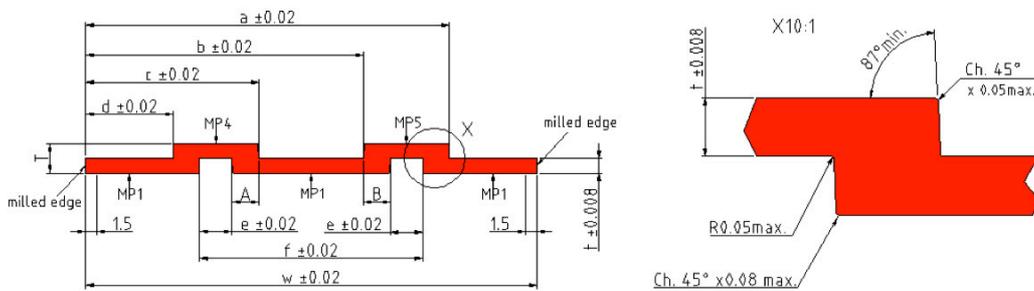
*Draufsicht von gesägten
Musterstreifen*



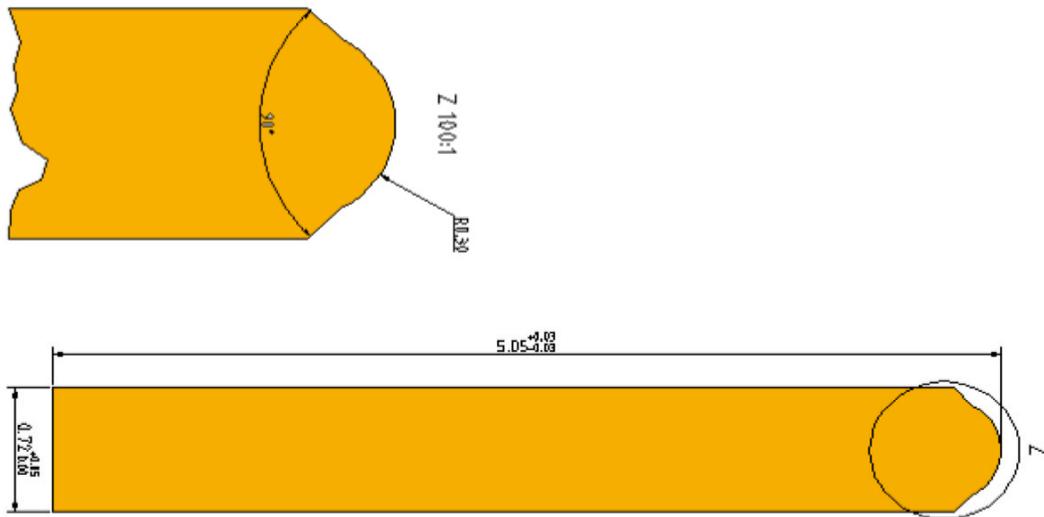
Frontalansicht gesägte Musterstreifen



Restdicke 0,10 mm, bis 0,07 mm möglich



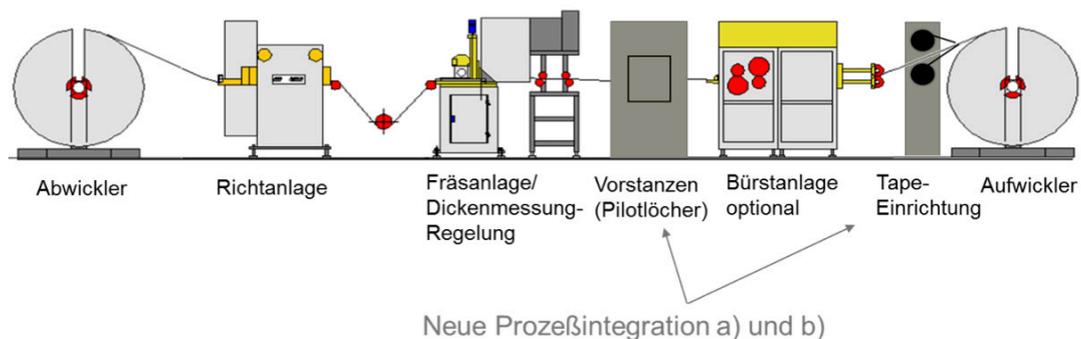
Beidseitig gefräste Bandkanten zur Einhaltung kleinster Bandbreitentoleranzen



Komplett gefräste Kontaktzone – keine Veränderung der Materialeigenschaften

Einsparpotenziale über die Prozesskette

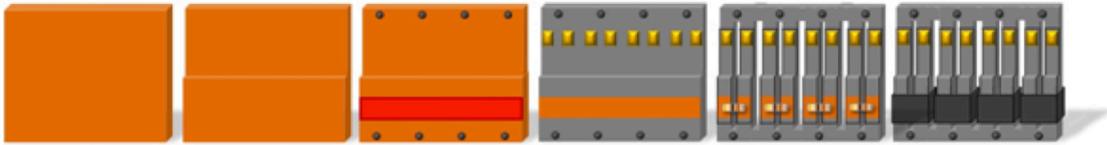
Die klassischen Anlagen wurden durch zusätzliche Module erweitert, um durch die Integration von ergänzenden Fertigungsschritten entweder Pilotlöcher zu stanzen oder diverse Isolier- oder Tapebänder auf das gefräste Band aufzubringen.



Erweitertes Anlagenlayout

Durch diese zusätzlichen Arbeitsschritte bei Profiltech können in den Folgeprozessen Arbeitsschritte eingespart oder erst ermöglicht werden. Wie z. B. das Galvanisieren durch Spottechnik oder gleich galvanisieren mit Tape-Technik. Diese Techniken tragen deutlich zur Edelmetalleinsparung bei.

Die Anfragen des Marktes aus dem Bereich e-Mobility konnten wir aufgreifen, indem sehr präzise Isolierschichten aufgeklebt werden können.



Prozesskette mit neuen Integrationen

Für jeden Kunden das passende Profilband.
Diese Philosophie ist unser Prinzip und bestimmt auch in Zukunft die Innovationen unseres Unternehmens!

Wir sind jederzeit für Sie zu erreichen unter: **www.profiltech.de**

VERZEICHNIS DER BISHER ERSCHIENENEN BEITRÄGE DER HOCHSCHULE PFORZHEIM

52. **Werner Pepels** Aug. 1990
Integrierte Kommunikation
53. **Martin Dettinger-Klemm** Aug. 1990
Grenzen der Wissenschaftsfreiheit. Überlegungen zum Thema: Freiheit und Verantwortung des Wissenschaftlers
54. **Werner Pepels** Sept. 1990
Mediaplanung – Über den Einsatz von Werbegeldern in Medien
55. **Dieter Pflaum** Sept. 1990
Werbeausbildung und Werbemöglichkeiten in der DDR
56. **Rudi Kurz (Hrsg.)** Nov. 1990
Ökologische Unternehmensführung – Herausforderung und Chance
57. **Werner Pepels** Jan. 1991
Verkaufsförderung – Versuch einer Systematisierung
58. **Rupert Huth, Ulrich Wagner (Hrsg.)** Aug. 1991
Volks- und betriebswirtschaftliche Abhandlungen. Prof. Dr. Dr. h. c. Tibor Karpati (Universität Osijek in Kroatien) zum siebzigsten Geburtstag. Mit einem Vorwort von R. Huth und Beiträgen von H.-J. Hof, H. Löffler, D. Pflaum, B. Runzheimer und U. Wagner
59. **Hartmut Eisenmann** Okt. 1991
Dokumentation über die Tätigkeit einer Industrie und Handelskammer – Dargestellt am Beispiel der IHK Nordschwarzwald
60. **Ursula Hoffmann-Lange** Dez. 1991
Eliten und Demokratie: Unvereinbarkeit oder notwendiges Spannungsverhältnis?
61. **Werner Pepels** Dez. 1991
Elemente der Verkaufsgesprächsführung
62. **Wolfgang Berger** Dez. 1991
Qualifikationen und Kompetenzen eines Europamanagers
63. **Günter Staub** Jan. 1992
Der Begriff „Made in Germany“ – Seine Beurteilungskriterien
64. **Martin W. Knöll, Hieronymus M. Lorenz** Mai 1992
Gegenstandsbereich und Instrumente der Organisationsdiagnose im Rahmen von Organisationsentwicklungs (OE)-Maßnahmen
65. **Werner Lachmann** Juni 1992
Ethikversagen – Marktversagen
66. **Paul Banfield** Juni 1993
Observations On The Use Of Science As A Source Of Legitimation In Personnel Management
67. **Bernd Noll** Aug. 1993
Gemeinwohl und Eigennutz. Wirtschaftliches Handeln in Verantwortung für die Zukunft – Anmerkungen zur gleichnamigen Denkschrift der Evangelischen Kirche in Deutschland aus dem Jahre 1991
68. **Siegfried Kreutzer, Regina Moczadlo** Aug. 1993
Die Entdeckung der Wirklichkeit – Integrierte Projektstudien in der Hochschulausbildung
69. **Sybil Gräfin Schönfeldt** Aug. 1993
Von Menschen und Manieren. Über den Wandel des sozialen Verhaltens in unserer Zeit. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1992/93
70. **Hartmut Löffler** Dez. 1993
Geld- und währungspolitische Grundsatzüberlegungen für ein Land auf dem Weg zur Marktwirtschaft. Das Beispiel Kroatien
71. **Hans-Georg Köglmayr, Kurt H. Porkert** Nov. 1994
Festlegen und ausführen von Geschäftsprozessen mit Hilfe von SAP-Software
72. **Alexa Mohl** Febr. 1995
NLP-Methode zwischen Zauberei und Wissenschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1994/95
73. **Bernd Noll** Mai 1995
Marktwirtschaft und Gerechtigkeit: Anmerkungen zu einer langen Debatte
74. **Rudi Kurz, Rolf-Werner Weber** Nov. 1995
Ökobilanz der Hochschule Pforzheim. 2. Geänderte Auflage, Jan. 1996
75. **Hans Lenk** Mai 1996
Fairness in Sport und Wirtschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1995/96
76. **Barbara Burkhardt-Reich, Hans-Joachim Hof, Bernd Noll** Juni 1996
Herausforderungen an die Sozialstaatlichkeit der Bundesrepublik
77. **Helmut Wienert** März 1997
Perspektiven der Weltstahlindustrie und einige Konsequenzen für den Anlagenbau

**2. Pforzheimer
Werkstofftag
2013**

78. **Norbert Jost** Mai 1997
Innovative Ingenieur-Werkstoffe
79. **Rudi Kurz, Christoph Hubig,
Ortwin Renn,
Hans Diefenbacher** Sept. 1997
Ansprüche in der Gegenwart zu
Lasten der Lebenschancen zukünftiger Ge-
nerationen
80. **Björn Engholm** Okt. 1997
Ökonomie und Ästhetik. Vortrag gehalten im
Rahmen des Studium Generale der Hoch-
schule Pforzheim, Wintersemester
1996/97. 2. Geänderte Auflage. Jan. 1998
81. **Lutz Goertz** Sept. 1998
Multimedia quo vadis? – Wirkungen, Chan-
cen, Gefahren. Vortrag gehalten im Rahmen
des Studium Generale der Fachhochschule
Pforzheim, Wintersemester 1996/97
82. **Eckhard Kefler** Nov. 1998
Der Humanismus und die Entstehung der
modernen Wissenschaft. Vortrag gehalten
im Rahmen des Studium Generale der
Hochschule Pforzheim, Wintersemester
1996/97
83. **Heinrich Hornef** Febr. 1998
Aufbau Ost – Eine Herausforderung für Poli-
tik und Wirtschaft. Vortrag gehalten im Rah-
men des Studium Generale der Fachhoch-
schule Pforzheim, Wintersemester 1997/98
84. **Helmut Wienert** Juli 1998
50 Jahre Soziale Marktwirtschaft – Auslauf-
modell oder Zukunftskonzept? Vortrag ge-
halten im Rahmen des Studium Generale
der Hochschule Pforzheim, Sommersemes-
ter 1998
85. **Bernd Noll** Sept. 1998
Die Gesetzliche Rentenversicherung in der
Krise
86. **Hartmut Löffler** Jan. 1999
Geldpolitische Konzeptionen – Alternativen
für die Europäische Zentralbank und für die
Kroatische Nationalbank
87. **Erich Hoppmann** Juni 1999
Globalisierung. Vortrag gehalten im Rahmen
des Studium Generale der Hochschule
Pforzheim, Sommersemester 1999
88. **Helmut Wienert (Hrsg.)** Dez. 1999
Wettbewerbspolitische und strukturpolitische
Konsequenzen der Globalisierung. Mit Bei-
trägen von Hartmut Löffler und Bernd Noll.
89. **Ansgar Häfner u. a. (Hrsg.)** Jan. 2000
Konsequenzen der Globalisierung für das in-
ternationale Marketing. Mit Beiträgen von
Dieter Pflaum und Klaus-Peter Reuthal.
90. **Ulrich Wagner** Febr. 2000
Reform des Tarifvertragsrechts und Ände-
rung der Verhaltensweisen der Tarifpartner
als Voraussetzungen für eine wirksame Be-
kämpfung der Arbeitslosigkeit
91. **Helmut Wienert** April 2000
Probleme des sektoralen und regionalen
Wandels am Beispiel des Ruhrgebiets
92. **Barbara Burkhardt-Reich** Nov. 2000
Der Blick über den Tellerrand – Zur Konzep-
tion und Durchführung eines „Studium Ge-
nerale“ an Fachhochschulen
93. **Helmut Wienert** Dez. 2000
Konjunktur in Deutschland – Zur Einschät-
zung der Lage durch den Sachverständigen-
rat im Jahresgutachten 2000/2001
94. **Jürgen Wertheimer** Febr. 2001
Geklonte Dummheit: Der infantile Men-
schenpark. Vortrag gehalten im Rahmen des
Studium Generale der Hochschule Pforz-
heim, Wintersemester 2000/01
95. **Konrad Zerr** März 2001
Erscheinungsformen des Online-Research –
Klassifikation und kritische Betrachtung
96. **Daniela Kirchner** April 2001
Theorie und praktische Umsetzung eines Ri-
sikomanagementsystems nach KontraG am
Beispiel einer mittelständischen Versiche-
rung
97. **Bernd Noll** Mai 2001
Die EU-Kommission als Hüterin des Wett-
bewerbs und Kontrolleur von sektoralen und
regionalen Beihilfen
Peter Frankenfeld
EU Regionalpolitik und Konsequenzen der
Osterweiterung
98. **Hans Joachim Grupp** Juni 2001
Prozessurale Probleme bei Beschlussmän-
gelstreitigkeiten in Personengesellschaften
99. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juli 2001
Technik Forum 2000: Prozessinnovationen
bei der Herstellung kaltgewalzter Drähte. Mit
Beiträgen von Peter Kern, Wilhelm Bauer,
Rolf Ilg; Heiko Dreyer; Johannes Wößner
und Rainer Menge.
100. **Urban Bacher,
Mikolaj Specht** Dez. 2001
Optionen – Grundlagen, Funktionsweisen
und deren professioneller Einsatz im Bank-
geschäft
101. **Constanze Oberle** Okt. 2001
Chancen, Risiken und Grenzen des
M-Commerce
102. **Ulrich Wagner** Jan. 2002
Beschäftigungshemmende Reformstaus und
wie man sie auflösen könnte

- Jürgen Volkert**
Flexibilisierung durch Kombi-Einkommen?
Die Perspektive der Neuen Politischen Ökonomie
103. **Mario Schmidt, René Keil** März 2002
Stoffstromnetze und ihre Nutzung für mehr Kostentransparenz sowie die Analyse der Umweltwirkung betrieblicher Stoffströme
104. **Kurt Porkert** Mai 2002
Web-Services – mehr als eine neue Illusion?
105. **Helmut Wienert** Juni 2002
Der internationale Warenhandel im Spiegel von Handelsmatrizen
106. **Robert Wessolly, Helmut Wienert** Aug. 2002
Die argentinische Währungskrise
107. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2002
Technik-Forum 2001: Weiterentwicklungen an Umformwerkzeugen und Walzdrähten. Mit Beiträgen von Roland Wahl, Thomas Dolny u. a., Heiko Pinkawa, Rainer Menge und Helmut Wienert.
108. **Thomas Gulden** April 2003
Risikoberichterstattung in den Geschäftsberichten der deutschen Automobil-industrie
109. **Günter Altner** Mai 2003
Lasset uns Menschen machen – Der biotechnische Fortschritt zwischen Manipulation und Therapie. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 2003
110. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juni 2003
Technik-Forum 2002: Innovative Verfahren zur Materialoptimierung. Mit Beiträgen von Norbert Jost, Sascha Kunz, Rainer Menge/Ursula Christian und Berthold Leiblinger.
111. **Christoph Wüterich** Feb. 2004
Professionalisierung und Doping im Sport. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 2003
112. **Sabine Schmidt** Mai 2004
Korruption in Unternehmen – Typologie und Prävention
113. **Helmut Wienert** Aug. 2004
Lohn, Zins, Preise und Beschäftigung – Eine empirische Analyse gesamtwirtschaftlicher Zusammenhänge in Deutschland
114. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2004
Technik-Forum 2003: Materialentwicklung für die Kaltumformtechnik. Mit Beiträgen von Andreas Baum, Ursula Christian, Steffen Nowotny, Norbert Jost, Rainer Menge und Hans-Eberhard Koch.
115. **Dirk Wenzel** Nov. 2004
The European Legislation on the New Media: An Appropriate Framework for the Information Economy?
116. **Frank Morelli, Alexander Mekyska, Stefan Mühlberger** Dez. 2004
Produkt- und prozessorientiertes Controlling als Instrument eines erfolgreichen Informationstechnologie-Managements
117. **Stephan Thesmann, Martin Frick, Dominik Konrad** Dez. 2004
E-Learning an der Hochschule Pforzheim
118. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juni 2005
Technik-Forum 2004: Innovative Werkstoffaspekte und Laserbehandlungstechnologien für Werkzeuge der Umformtechnik
119. **Rainer Gildeggen** Juni 2005
Internationale Produkthaftung
120. **Helmut Wienert** Okt. 2005
Qualifikationsspezifische Einkommensunterschiede in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Universitäts- und Fachhochschulabsolventen
121. **Andreas Beisswenger, Bernd Noll** Nov. 2005
Ethik in der Unternehmensberatung – ein vermintes Gelände?
122. **Helmut Wienert** Juli 2006
Wie lohnend ist Lernen? Ertragsraten und Kapitalendwerte von unterschiedlichen Bildungswegen
123. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2006
Technik-Forum 2005: Umformwerkzeuge – Anforderungen und neue Anwendungen. Mit Beiträgen von Edmund Böhm, Eckhard Meiners, Andreas Baum, Ursula Christian und Jörg Menno Harms.
124. **Mario Schmidt** Dez. 2006
Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement
125. **Norbert Jost (Hrsg.)** Okt. 2007
Technik-Forum 2006: Innovative neue Techniken für Werkzeuge der Kaltverformung. Mit Beiträgen von Franz Wendl, Horst Bürkle, Rainer Menge, Michael Schiller, Andreas Baum, Ursula Christian, Manfred Moik und Erwin Staudt.
126. **Roland Wahl (Hrsg.)** Okt. 2008
Technik-Forum 2007: Fortschrittsberichte und Umfeldbetrachtungen zur Entwicklung verschleißreduzierter Umformwerkzeuge. Mit Beiträgen von Klaus Löffler, Andreas Zilly, Andreas Baum und Paul Kirchhoff.
127. **Julia Tokai, Christa Wehner** Okt. 2008

2. Pforzheimer Werkstofftag 2013

- Konzept und Resultate einer Online Befragung von Marketing-Professoren an deutschen Fachhochschulen zum Bologna-Prozess
128. **Thomas Cleff, Lisa Luppold, Gabriele Naderer, Jürgen Volkert** Dez. 2008
Tätermotivation in der Wirtschaftskriminalität
129. **Frank Thuselt** Juni 2009
Das Arbeiten mit Numerik-Programmen. MATLAB, Scilab und Octave in der Anwendung.
130. **Helmut Wienert** Aug. 2009
Wachstumsmotor Industrie? Zur Bedeutung des verarbeitenden Gewerbes für die Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts
131. **Sebastian Schulz** Sept. 2009
Nutzung thermodynamischer Datensätze zur Simulation von Werkstoffgefügen (aus der Reihe „Focus Werkstoffe“, Hrsg. Norbert Jost).
132. **Hanno Beck; Kirsten Wüst** Sept. 2009
Gescheiterte Diäten, Wucherzinsen und Wartepremien: Die neue ökonomische Theorie der Zeit.
133. **Helmut Wienert** Sept. 2009
Was riet der Rat? Eine kommentierte Zusammenstellung von Aussagen des Sachverständigenrats zur Regulierung der Finanzmärkte und zugleich eine Chronik der Entstehung der Krise
134. **Norbert Jost (Hrsg.)** Nov. 2010
Technik-Forum 2008: Werkstoffe und Technologien zur Kaltverformung
135. **Frank Morelli** Jan. 2010
Geschäftsprozessmodellierung ist tot – lang lebe die Geschäftsprozessmodellierung!
136. **T. Cleff, L. Fischer, C. Sepúlveda, N. Walter** Jan. 2010
How global are global brands? An empirical brand equity analysis
137. **Kim Neuer** Juni 2010
Achieving Lisbon – The EU's R&D Challenge The role of the public sector and implications of US best practice on regional policymaking in Europe
138. **Bernd Noll** Sept. 2010
Zehn Thesen zur Corporate Governance
139. **Pforzheim University** März 2011
Communication on progress. PRME Report 2008
140. **Rainer Maurer** März 2011
Unternehmensverantwortung für soziale und ökologische Nachhaltigkeit – darf man auch anderer Meinung sein? Einige kritische Anmerkungen zum PRME-Report der Hochschule
141. **Barbara Reeb; Malte Krome** Okt. 2011
Arm trotz Arbeit? Zum Für und Wider von Mindestlöhnen
142. **B. Eng. Daniel Wyn Müller** Mai 2012
Titanschäume als Knochenimplantat. Aus der Reihe „Focus Werkstoffe“, Hrsg.: N. Jost
143. **Alexander Martin Matz, Norbert Jost** Mai 2012
Fouling an offenporigen zellulären Werkstoffen auf Al-Basis unter beheizten wässrigen Bedingungen; Aus der Reihe „Focus Werkstoffe“, Hrsg.: N. Jost
144. **Norbert Jost, Roman Klink** Sept. 2012
Tagungsband zum 1. Pforzheimer Werkstofftag. Aus der Reihe „Focus Werkstoffe“, Hrsg.: N. Jost, R. Klink.
145. **Norbert Jost, Roman Klink** Sept. 2013
Tagungsband zum 2. Pforzheimer Werkstofftag (26.09.2013), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N. Jost, R. Klink.

Veranstalter

HOCHSCHULE PFORZHEIM 



 **WSP** Wirtschaft
und Stadtmarketing
Pforzheim
Wirtschaftsförderung

**HOCHFORM**
CLUSTER INITIATIVE
METALL - DENTAL - MEDIZIN
PRÄZISIONSTECHNIK AUS PFORZHEIM

Hochschule Pforzheim

Fakultät für Technik Werkstoffkunde/Kunststofftechnik

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost

Leiter des Instituts für Werkstoffe und Werkstofftechnologien (IWWT)

Telefon +49 (0) 7231 28-6581 oder -6552

norbert.jost@hs-pforzheim.de

www.hs-pforzheim.de

Wirtschaft und Stadtmarketing Pforzheim

Geschäftsbereich Wirtschaftsförderung

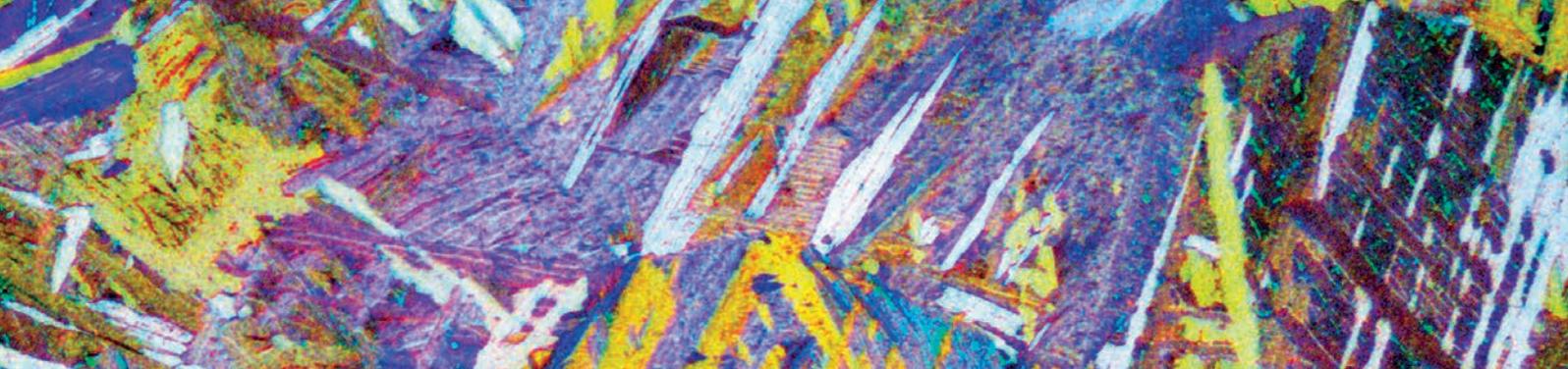
Reiner Müller

Leiter Wirtschaftsförderung

Telefon +49 (0) 7231 39-1698

reiner.mueller@ws-pforzheim.de

www.ws-pforzheim.de



Kooperationspartner:



Europäische Union



Baden-Württemberg

www.rwb-efre.baden-wuerttemberg.de

Verwaltungsbehörde des RWB-EFRE-
Programms. Ministerium für Ländlichen
Raum und Verbraucherschutz

investition in Ihre Zukunft!
Gefördert durch die Europäische Union
Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung
und das Land Baden-Württemberg



Wirtschaft
und Stadtmarketing
Pforzheim

Wirtschaftsförderung