

**PFORZHEIMER
WERKSTOFFTAG**

Pforzheimer Werkstofftag 2018

TAGUNGSBAND

27. September 2018
CongressCentrum Pforzheim

www.pforzheimer-werkstofftag.de
www.hochform-pforzheim.de

Unterstützt durch:



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: Oktober 2018

ISSN-Nr.: 0946-3755

Pforzheimer
Werkstofftag
2018

**TAGUNGSBAND ZUM PFORZHEIMER
WERKSTOFFTAG 2018**
Norbert Jost, Simon Kött (Hrsg.)

Band 168

der Publikationsserie „Focus Werkstoffe“

Der Werkstofftag wird unterstützt durch:



Die CRONIMET Holding Gruppe ist weltweiter Spezialist für Edelstahlschrott, Ferrolegierungen und Primärmetalle. Seit fast vier Jahrzehnten liefert das Unternehmen Rohstoffe für die Edelstahl produzierende Industrie. Der Fokus liegt dabei auf Handel & Vertrieb, Recycling und Produktion & Services. Die CRONIMET Holding Gruppe wurde 1980 gegründet und ist heute weltweit mit mehr als 1500 Mitarbeitern an über 60 Standorten präsent.

Die CRONIMET Holding Gruppe mit Sitz in Karlsruhe ist gemeinsam mit den Unternehmen der Schwestergesellschaft CRONIMET Mining AG Teil der zu 100 % in Familienbesitz befindlichen CRONIMET Gruppe. Die gesamte CRONIMET Gruppe beschäftigt derzeit weltweit über 5600 Mitarbeiter.



Im Jahr 1950 als Josef Weick Schrottgroßhandlung gegründet, verfügt die heutige WEICK Recycling GmbH über jahrzehntelange Erfahrung im Schrott- und NE-Metallhandel. Als Familienunternehmen sind wir regional in Pforzheim und im Enzkreis tätig, aber beim Handel international vernetzt. Unsere flachen Hierarchien gewährleisten kurze Entscheidungswege, direkte Kommunikation, motivierte Mitarbeiter und unser Hauptanliegen – zufriedene Kunden. Unser Schrottportfolio ist sehr umfangreich und vielseitig und erstreckt sich vom „normalen Schrott“ und Metallspänen, über zahlreiche Buntmetalllegierungen, legierte Schrotte sowie Superalloys, bis hin zu Formgedächtnislegierungen und Seltenmetallen.

Wir arbeiten nach den neuesten Umwelt- und Qualitätsstandards und sind als Entsorgungsfachbetrieb gemäß § 56 KrWG sowie nach DIN EN ISO 9001 und DIN EN ISO 14001 zertifiziert.

Inhaltsverzeichnis

Natürliche Ressourcen – Wie knapp ist was?

**Prof. Dr. rer. nat. Mario Schmidt, Leiter des Instituts für Industrial Ecology,
Hochschule Pforzheim** **5**

Recycling und Handel von legierten Metallschrotten

Dipl.-Wirt.-Ing. Martin Geisler, CRONIMET Ferroleg. GmbH **17**

Untersuchung zwischenbetrieblicher Schnittstellen am Beispiel von
Sekundärmetallen

**Paul Roodakker, Dipl.-Ing. Roman Schweitzer, Wirtschaftsingenieurwesen,
General Management, Hochschule Pforzheim, WEICK Recycling GmbH** **27**

Leichtbau durch höchstfeste Stähle der "3. Generation": Minimierung der
Legierungsgehalte durch innovative Wärmebehandlungskonzepte

**M.Sc. Jan Frömert, Dr.-Ing. Alexander Martin Matz,
Prof. Dr. Ing. Norbert Jost, Institut für Werkstoffe und
Werkstofftechnologien, Hochschule Pforzheim** **35**

Innovationen bei der Identifikation von Werkstoffen

**Prof. Dr.-Ing. Jörn Woidasky, Prof. Dr.-Ing. Kai Oßwald,
Prof. Dr.-Ing. Claus Lang-Koetz, Institut für Werkstoffe und
Werkstofftechnologien, Institut für Industrial Ecology,
Hochschule Pforzheim** **48**

Stand der Technik und industrielle Anwendungen in der Ultraschallprüfung

Roger Marhöfer, GE Sensing & Inspection Technologies GmbH **61**

Energieeffiziente Variothermie im Kunststoffspritzguss

**Dipl.-Ing. Michael Däbritz, B. Eng. Daniel Koch, F&E, Varioplast Konrad
Däbritz GmbH** **73**

Neue Materialkonzepte und Funktionalisierung im Dialog für intelligente Strukturen
und Ressourceneffizienz

**Prof. Dr.-Ing. Ingolf Müller, Philipp Bauer M.Sc., Hochschule Pforzheim,
LCT – Lightweight & Composite Technologies, Eriskirch** **78**

Modern times need energy efficient modern materials

**Dr.-Ing. Aron Kneer, M. Wirtz, S. Yurtsever-Kneer, S. Barbe, A. August,
TinniT Technologies GmbH, Faculty of Applied Natural Sciences,
Institute of Applied Materials, Institut für Digitale Marktforschung,
Hochschule Karlsruhe** **90**

Effizientes Trennen mit High Speed Wire EDM

**Prof. Dr. Kai Oßwald, Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien,
Hochschule Pforzheim** **104**

Einsatz der Röntgenfluoreszenzanalyse im modernen Werkstoffrecycling

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Zilly, B.Eng. Ruben Krampulz, M.Sc. Tom Kurdewan,
Duale Hochschule Baden-Württemberg, Stuttgart** **116**

Zelluläre Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe – Stand der Technik und Recycling
von zellulären partikulär verstärkten Al-Basis Legierungen für den effizienten
Leichtbau

**M. Eng. Pierre Kubelka, Dr.-Ing. Alexander Martin Matz,
Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost, Institut für Werkstoffe und
Werkstofftechnologien, Hochschule Pforzheim** **127**

Pforzheimer
Werkstofftag
2018

Natürliche Ressourcen – Wie knapp ist was?

Mario Schmidt

Institut für Industrial Ecology (INEC), Hochschule Pforzheim

Abstract

Der schonende Umgang mit natürlichen Ressourcen gehört zu den zentralen Themen der Nachhaltigkeitsdebatte. Immer wieder wird die Knappheit von Rohstoffen, insbesondere auch mineralischen Rohstoffen und Metallen, diskutiert, zuletzt im Zusammenhang mit dem starken Preisanstieg von Rohstoffen und der Verknappung der Seltenen-Erden-Metalle vor ca. 10 Jahren.

In einem historischen Abriss wird auf die Entwicklung in den vergangenen 100 Jahren eingegangen, denn schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts sorgte man sich um eine ausreichende Versorgung der Wirtschaft mit Rohstoffen. Die Club-of-Rome-Studie „Die Grenzen des Wachstums“ stellte in den 70er Jahren dann den Höhepunkt der Diskussion dar. Sie bezifferte auch Reichweiten für verschiedene Rohstoffe, die seitdem als Hinweis auf nicht nachhaltiges Wirtschaften angesehen werden.

Obwohl weltweit die Produktion und der Bedarf an mineralischen Rohstoffen dramatisch angestiegen sind, hat sich bis heute keine geologische Verknappung eingestellt. Die Probleme liegen vielmehr in monopolistischen Handelsstrukturen, sozial und ökologisch kritischen Produktionsbedingungen und einer komplexen und nicht elastischen Kuppelproduktion. Als Indikator dient heute die Kritikalität von Rohstoffen, die das Versorgungsrisiko und die wirtschaftliche Bedeutung qualitativ beschreibt. Für die Berücksichtigung ökologischer Aspekte fehlen dagegen noch geeignete Bewertungssysteme.

Es war der Fortschrittsoptimismus des 20. Jahrhunderts, der viele glauben ließ, Ressourcen seien unbegrenzt verfügbar. Unermessliche Erdöl- und Kohlevorkommen, aber auch Eisenerz-, Aluminium- und andere Metallagerstätten wurden erschlossen. Die Technik führte zu einer ungeahnten Effizienzsteigerung bei der Förderung von Rohstoffen, die man 100 Jahre zuvor noch mühsam, gefährlich und aufwendig der Erde abringen musste. 1820 wurden weltweit 1,65 Mio. t Roheisen produziert, 1900 waren es bereits 41 Mio. t, 1960 waren es 250 Mio. t und heute sind es 1,2 Mrd. t (Riegraf 1931, S. 282; World Steel Association 2017), die auf der ganzen Erde zum Aufbau von Städten und Infrastrukturen und zum Konsum von Gütern beitragen. Der Bedarf an Kohle zur Herstellung einer Tonne Roheisen hat sich zwischen dem 17. Jahrhundert und Mitte des 20. Jahrhunderts um einen Faktor 10 reduziert (Schmidt et al. 2017, S. 3). Technische Effizienzsteigerung und wirtschaftliches Wachstum waren in den vergangenen 100 Jahren vorherrschend.

Doch in der Menschheitsgeschichte war eher der Mangel an Rohstoffen die Regel. Lange Zeit war Holz die bestimmende Ressource. Der Brite John Evelyn mahnte schon im 17. Jahrhundert in seiner Schrift *Sylva* vor einem entwaldeten England infolge der „holzverschlingenden“ Eisenhütten. Dem folgte im 18. Jahrhundert Hans Carl von Carlowitz, der die deutsche Forstwirtschaft begründete und den Nachhaltigkeitsbegriff prägte. Demgegenüber glaubte der italienische Metallurge Vannoccio Biringuccio bereits 1540, dass wohl eher die Schätze der Erde als die Wälder zur Neige gehen. Entsprechende Verknappungen traten z. B. lokal in England auf und führten bereits vor 300 Jahren zu einem überregionalen Erzhandel (Selmeier 1984, S. 87). Der berühmte Brite Stanley Jevons warf dann 1865 die „Kohlefrage“ auf: Er sah begrenzte Kohlevorräte dem ungezügelteren Wirtschaftswachstum entgegenstehen und trat für ein gemäßigteres Wachstum ein (Jevons 1965).

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts entstand in den USA eine breite Naturschutzbewegung, die vor allem die Begrenztheit und den Schutz natürlicher Ressourcen – darunter Mineralien, Wälder, Boden und Fischerei – im Blick hatte, vor allem angesichts der rapide wachsenden U.S.-Wirtschaft (Pinchot 1911, White House 1908). Viele der heute modernen Positionen der Umweltbewegung haben dort ihren Ursprung, auch was die Knappheit von Ressourcen angeht. Obwohl die Vereinigten Staaten kaum einen kritischen Mangel an Material erlebt hatten, wuchs die Sorge mit dem Ersten Weltkrieg. Im Jahre 1917 wurde eine Studie über strategische Materialien erstellt, der 1921 die so genannte Harbord-Liste mit 42 strategischen und kritischen Materialien folgte (Spicer 1950). Unter strategischen und kritischen Materialien verstand man solche, die für die Landesverteidigung unerlässlich waren. In den 30er Jahren folgten verschiedene Berichte des US-Senatsausschusses zu natürlichen Ressourcen und einiger anderer Autoren, die

das Anlegen von strategischen Beständen sogenannter Mangelmineralien empfohlen. Eine solche staatliche Bevorratung wurde in den USA dann 1939 begonnen, u. a. mit Stoffen wie Zinn, Mangan, Wolfram, Chromit, optisches Glas und Manilafasern. Der Begriff der kritischen Materialien war damit eingeführt, aber auch die wissenschaftliche Aufmerksamkeit um die Knappheit von industrie- oder rüstungspolitisch wichtigen Rohstoffen. Dabei drehte es sich stets darum, welche Rohstoffe für die Wirtschaft (oder Rüstung) der USA verfügbar sind, weniger, wie viele Rohstoffe weltweit vorhanden sind.

Die Knappheit und Verfügbarkeit von Ressourcen wurde dann immer wieder adressiert, z. B. mit der „Road of Depletion“, die James Boyd, der Leiter des U.S.-Bergbauamtes, in einem Hearing des US Senats 1949 vorstellte. Man war sich damals sehr bewusst – anders als heute – dass nur 7 % der Weltbevölkerung, nämlich in den USA, 50 % der Welt-Mineralien und 70 % des Welt-Erdöls nutzen. Der US-amerikanische Präsident setzte eine Materials Policy Commission ein, die 1952 einen großen Report „Resources for Freedom“ vorlegten. Der kalte Krieg war auch ein Wettstreit um wirtschaftliche Macht und Zugriff auf Rohstoffquellen. Eine große systematische empirische Untersuchung historischer Trends durch Barnett und Morse 1963 zu verschiedenen natürlichen Ressourcen zwischen 1870 und 1958 stützte schließlich eher die Hypothese einer abnehmenden als einer zunehmenden Knappheit. Barnett und Morse vertraten in ihrem Werk „Scarcity and Growth“ ein zwar kritisches, aber doch optimistisches Bild von der Ressourcen-Frage: Sie glaubten an den technischen Fortschritt und Effizienzsteigerungen.

Dieses optimistische Bild wandelte sich in den 60er Jahren grundlegend, u. a. durch Weckrufe wie Ehrlichs Buch „Die Bevölkerungsbombe“ (1968), vor allem aber mit der Club-of-Rome-Studie von Meadows (1972) „Die Grenzen des Wachstums“: Begrenzte natürliche Ressourcen stünden einem nahezu ungezügelter Wachstum von Weltbevölkerung und globaler Wirtschaftsleistung gegenüber. Nun ging es verstärkt um die *weltweite* Entwicklung, und der sorglose Umgang mit den Ressourcen wurde kritisiert. Eine Studie der U.S.-National Academy of Sciences forderte 1969 beispielsweise ein verstärktes Recycling: „The automobile is a prime target for improvement. The copper content of the average car should be reduced from about 1.4 percent to 0.4 percent or less of the total carcass and problems of metal recovery simplified.“ (NAS 1969). Recycling wurde zu einem Leitmotiv der Umweltpolitik in den folgenden Jahrzehnten.

Doch selbst die beiden Updates der Barnett & Morse-Studie, „Scarcity and Growth Reconsidered“ (Smith 1979) und Menzie, Singer und DeYoung, Jr. in „Scarcity and Growth Revisited“ (Simson, Toman & Ayres 2005) bestätigen im Wesentlichen die alten Ergebnisse, dass es keine geologische Knappheit gibt. Menzie et al. stellten

erneut fest, dass die physische Verfügbarkeit von Ressourcen an sich keine Wachstumsgrenze darstellt. Allerdings werde der erforderliche Aufwand zu ihrer Gewinnung immer größer, obwohl viele Ressourcen im Überfluss vorhanden seien. Es sei naheliegend, dass die Vorräte an mineralischen Ressourcen zuerst in den Gebieten, die am nächsten zu ihrer Nutzung liegen, am intensivsten genutzt wurden. Mit steigendem Bedarf erfolge die Exploration und schließlich die Förderung über Ozeane, in unwirtlichen Klimazonen und immer tiefer unter Land und Wasser. Kosten, Energieaufwand und die mit dem Abbau einhergehende Umweltzerstörung nähmen dabei zu. Menzie et al. lenkten den Blick darauf, dass nicht die begrenzten Rohstoffmengen, sondern die Begleitumstände ihrer Förderung das eigentliche Problem sind.

Trotzdem wird immer wieder das Bild des Versiegens der Rohstoffquellen gezeichnet. Wesentlich dazu beigetragen hat die Studie von Meadows, die den sehr anschaulichen Begriff der Rohstoffreichweite populär gemacht hat (Meadows & Meadows 1974). Das Meadows-Team führte den „static reserve life index“ ein, der besagt, für wie viele Jahre die bekannten Reserven eines bestimmten Rohstoffes beim gegenwärtigen jährlichen Verbrauch noch vorhalten. Beim exponentiellen Index wird ein kontinuierlich ansteigender Verbrauch unterstellt, was die Reichweite noch einmal deutlich verringert. Zwar wies das Meadows-Team darauf hin, dass der statische Index einer Rohstoffreserve ein sehr schlechtes Maß für seine Verfügbarkeit sei und viele erforderlichen Kenntnisse für eine verlässliche Voraussage noch fehlen. Die Studie untersuchte vielmehr das dynamische und wechselseitige Verhalten verschiedener Einflussfaktoren. Aber sie traf einen Nerv in der Öffentlichkeit und wurde fortan verkürzt zitiert. Quecksilber hatte demnach beispielsweise eine statische Reichweite von 13 Jahren, Zinn von 25 Jahren, Kupfer von 40 Jahren und Kobalt von 155 Jahren. Bei einem weltweiten Wachstum von 3 % jährlich würde z. B. die Reichweite von Kupfer auf 26 Jahre und von Kobalt auf 58 Jahre schrumpfen. Im Rückblick kann man allerdings feststellen, dass die Reichweiten über die Jahrzehnte hinweg nicht abnahmen, sondern meistens gleichblieben, teilweise sogar zunahmen (Gerling & Wellmer 2005).

Ein Beispiel für die Missinterpretation solcher Reichweiten ist der Fall Phosphor. Phosphate sind ein wichtiger Rohstoff für Düngemittel, die unerlässlich für die Welternährung sind und nicht substituiert werden können. Gilbert (2009) befürchtete 2009 eine Reichweite der Phosphorreserven von etwa 125 Jahre. Dies führte zu einer weltweiten Diskussion über eine bevorstehende Phosphorkrise. Wenige Jahre später wurden die Zahlen über die bekannten Reserven korrigiert und die Reichweite, der heute wirtschaftlich abbaubaren Reserven, betrug plötzlich 300 Jahre; dazu kommen noch die heute unwirtschaftlichen Vorkommen und jene, die bislang unbekannt sind (BGR 2013).

Wellmer (2014, 2016) wies wiederholt auf die Missinterpretation der Rohstoffreichweiten hin, denn diese beziehen sich in der Regel auf die bekannten und wirtschaftlich abbaubaren Rohstoffvorkommen. Vereinfacht ausgedrückt: Tritt eine Verknappung eines Rohstoffs auf, so steigt der Preis, was eine Exploration und einen Abbau bislang unwirtschaftlicher Vorkommen rentabel macht. Die Reichweite ist somit eine dynamische Größe, die entscheidend vom Marktgeschehen abhängt. Sie erlaubt aber kaum, auf die geologisch grundsätzlich verfügbaren Vorkommen zu schließen. „Dies ergibt sich als Konsequenz aus der Tatsache, dass es keine Institution auf der Welt gibt, die die Mittel hat, die gesamten Rohstoffvorkommen der Erde zu erkunden. Die publizierten Reserven sind immer nur die Summe aller einzelnen Lagerstätten, die von den Bergwerksgesellschaften und manchmal staatlicher Behörden festgestellt wurden.“ (Acatech 2016) Rohstoffreichweiten sind quasi wie die Scheinwerfer bei einer nächtlichen Autofahrt: Sie zeigen stets die nächsten 50 Meter an, den „Planungshorizont“, sagen aber nicht, dass nach 50 Metern die Straße zu Ende ist.

Ähnlich falsch wurde das so genannte Peak-Konzept interpretiert, das von King Hubbert in den 40er Jahren mit den Förderverlaufskurven für Erdölvorkommen in den USA entwickelt wurde (Hubbert 1949). Er schloss aus dem Fördermaximum eines Vorkommens, wann die Quelle erschöpft sei und lieferte damit passable Ergebnisse im US-amerikanischen Erdölbereich. Die Verallgemeinerung dieses Ansatzes auf globale Rohstoffvorkommen lässt aber wieder ökonomische Aspekte außer Acht. So verschiebt sich die Kurve, wenn eine Verknappung zu Preissteigerungen führt, die wiederum auch den Abbau weniger ertragreicher Vorkommen nahelegen. Wellmer (2014) unterscheidet hier insbesondere zwischen angebots- und nachfragegetriebenen Hubbertkurven.

Betrachtet man die jüngere Diskussion über die Ressourcenproblematik, so stehen besonders die Seltenen-Erden-Elemente wie Neodym, Dysprosium usw. hervor. Hier kam es zu Verknappungen und zu Preisanstiegen, die in der Öffentlichkeit aber häufig fehlinterpretiert wurden. Mengenmäßig sind die Seltenen Erden keinesfalls selten, einige Elemente dieser Stoffgruppe kommen sogar verhältnismäßig häufig in der Erdkruste vor. Es handelte sich hier schlicht um wirtschaftliche Konzentrationseffekte beim Abbau und Handel. China hat über Jahre ein wirksames Monopol aufgebaut und schließlich gegenüber den westlichen Industrieländern ausgenutzt.

Deshalb ist an dieser Stelle ein Blick auf die Häufigkeit der verschiedenen Elemente auf der Erde sinnvoll. Betrachtet man nur den Bereich der festen Erdkruste bis in eine Tiefe von 3.000 m, der also für den Menschen im Prinzip zugänglich ist, so finden sich dort 17 Billionen t Kupfer, 31 Billionen t Neodym, knapp 2 Billionen t

Tantal, über 800 Billionen t Phosphor und 74 Milliarden t Indium (Werte nach Wedepohl 1995). Diese Mengen sind enorm, aber die Werte sagen freilich nichts über die Abbauwürdigkeit aus. Dazu müssen Erzanreicherungen vorliegen, die weit über den durchschnittlichen Konzentrationen in der Erdkruste liegen.

Die Konzentrationsverteilung der Rohstoffe in der Erdkruste wird seit den Arbeiten von Skinner (1976) intensiv diskutiert. Er vermutete eine bimodale Verteilung mit einem kleinen Neben-Maximum bei hohen abbauwürdigen Konzentrationen. Die größten Rohstoffmengen, so befürchtete er, lägen aber isomorph in Silikatgesteinen und bei niedrigen Konzentrationen vor, die einen Abbau unmöglich machen. Normalerweise werden die ertragreichen Lagerstätten mit hohem Erzgehalt zuerst ausgebeutet, so dass mit der Zeit nur noch Vorkommen mit immer geringerer Konzentration verfügbar sind. Es ist unklar, wo man sich beim Abbau derzeit weltweit befindet und welche abbauwürdigen Mengen sich noch dahinter verbergen.

Als Indiz für diese Vermutung wird eine seit Jahren sinkende Konzentration der Erzgehalte in Bergwerken angeführt (Mudd 2009). So sank der Kupfergehalt in Kupferminen von einigen Prozent zu Beginn des 19. Jahrhunderts auf inzwischen ca. 0,5 % in den heutigen Minen. Ähnliches zeigt sich auch für andere Metalle. Ungeachtet der Frage, ob die Metallvorkommen zur Neige gehen, ist damit verbunden, dass ein immer größerer Aufwand zur Gewinnung einer bestimmten Metallmenge erforderlich ist.

Doch auch diese Analysen lassen wirtschaftliche Aspekte außer Acht. So wird heute mehr Kupfer denn je gefördert – wahrscheinlich liegt darin sogar ein Grund für den Trend zu Minen mit niedrigem Erzgehalt. Denn große Vorkommen – z. B. in porphyrischen Lagerstätten – sind häufiger mit niedrigerem Erzgehalt verbunden (Rötzer & Schmidt 2018). Minenbetreiber wollen aber lieber in große Vorkommen investieren. Zudem ermöglichen technische Innovationen, insbesondere im Tagebau, den wirtschaftlichen Abbau von geringeren Erzgehalten.

So bleibt die Frage, wie viel Rohstoffe weltweit noch zur Verfügung stehen, weitgehend unbeantwortet. In Zukunft werden vermutlich verstärkt tieferliegende Vorkommen erkundet und ausgebeutet (Acatech 2016). Der Kosten- und Energieaufwand für solche Minen wird mit Sicherheit zunehmen. Andererseits sind Skaleneffekte und technische Innovationen nur schwer vorherzusagen. In der Ressourcen- und Rohstoffpolitik konzentriert man sich deshalb auf die naheliegende Frage, für welche Rohstoffe in absehbarer Zeit eine kritische Versorgungslage vorliegt. Diese „Kritikalität“ wird inzwischen auf nationaler und internationaler Ebene kontinuierlich verfolgt. Sie wird aber hauptsächlich durch politische und wirtschaftliche Faktoren bestimmt, weniger von geologischen. Einen gewissen Einfluss

hat der verstärkte Abbau vergesellschafteter Metalle, da hier eine Kuppelproduktion vorliegt, die wenig flexibel auf unterschiedliche Nachfrage-Signale reagieren kann.

Der US-National Science and Technology Council (NSTC) veröffentlichte 2016 einen Bericht, der eine systematische Methodik zum Screening potenziell kritischer Mineralien lieferte. Die "potenzielle Kritikalität" basiert auf drei grundlegenden Indikatoren: Angebotsrisiko, Produktionswachstum und Marktdynamik. Das Screening wurde für jedes Jahr von 1996 bis 2013 auf 78 Mineralien oder mineralische Rohstoffe angewandt. Diese Studie definiert kritische Mineralien als "solche, die eine Lieferkette haben, die für Störungen anfällig ist und die eine wesentliche Funktion bei der Herstellung eines Produkts erfüllen, deren Fehlen erhebliche wirtschaftliche oder sicherheitstechnische Folgen hätte" (NSTC 2016). In absteigender Reihenfolge der potentiellen Kritikalität wurden identifiziert: Ferromolybdän (FeMo), Yttrium (Y) und die Seltenen Erden (La-Lu), Rhodium (Rh), Ruthenium (Ru), Quecksilber (Hg), Monazit, Wolfram (W), Siliciummangan (SiMn), Glimmer, Iridium (Ir), Magnetit, Germanium (Ge), Vanadium (V), Wismut (Bi), Antimon (Sb) und Kobalt (Co). Ein weiterer ausführlicher Report wurde vom US-amerikanischen Geologischen Dienst 2017 herausgegeben (USGS 2017).

In Europa wird eine entsprechende Liste von der Europäischen Kommission herausgegeben. Die erste Liste von „Critical Raw Materials“ wurde 2010 erstellt; Aktualisierungen erfolgten 2014 und 2017 (EU 2010, EU 2014, EU 2017). Zuletzt umfasste die Bewertung 2017 insgesamt 78 Einzelmaterialien. Die Methodik basiert zweidimensional auf dem Supply Risk (SR) und der Economic Importance (EI). Dabei werden u. a. berücksichtigt:

- systematisches Screening der kritischsten Punkte der Rohstoffproduktionsstufen in der Lieferkette (Bergbau/Extraktion und Verarbeitung/Raffination)
- die Einbeziehung der Substitution in die Berechnungen der wirtschaftlichen Bedeutung
- Einbeziehung des Parameters Import Reliance (IR)
- Berücksichtigung der Anteile der globalen Versorgung und der tatsächlichen Beschaffung des Materials in die EU (Inlandsproduktion plus Importe)
- Einbeziehung handelsbezogener Parameter auf der Grundlage von Ausfuhrbeschränkungen und EU-Handelsabkommen
- Leitlinien zur Verbesserung der End-of-Life Recycling Input Rate (EOL-RIR) Ergebnisse unter Verwendung hochwertiger EU-basierter Daten.

Als Ergebnis wurden 26 Rohstoffe und Rohstoffgruppen als kritisch identifiziert: darunter Antimon, Kobalt, Gallium, Germanium, Indium, Seltene Erden, Magnesi-

um, Niob, Phosphor, Tantal und Wolfram. Das heißt nicht, dass diese Stoffe knapp sind, nur, dass die Versorgungslage kritisch sein oder werden könnte.

Nachteil dieser Darstellungen ist, dass sie nur kurz- bis mittelfristig ausgerichtet sind, also nicht die langfristige Versorgungslage berücksichtigen – aus den naheliegenden und o.g. Gründen. Weiterhin ist sie rein ökonomisch ausgerichtet, ökologische Aspekte fehlen weitgehend. Graedel et al. (2015) haben eine dreidimensionale Kritikalität unter Einbeziehung der Umweltauswirkungen verwendet. Auch UBA (2017) hat eine Methodik zur Klassifizierung der Umweltbelastungen durch die Rohstoffbereitstellung entwickeln lassen. Sie wird derzeit auf eine Vielzahl von chemischen Elementen angewendet. Ergebnisse können für nächstes Jahr erwartet werden. Jedoch zeigt sich schon jetzt, dass die Umweltbelastungen, die mit der Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen verbunden sind, kaum mit kardinalen Skalen beschrieben werden können, wie man es etwa aus dem Life Cycle Assessment kennt. Hierzu sind zu viele standortspezifische qualitative Aspekte, etwa an den Bergbaustandorten, zu berücksichtigen. Das macht eine spätere Anwendung, Vergleiche und Produktbewertungen schwierig.

Es bietet sich eine Alternative an, um die Knappheit, aber auch den ökologischen Aufwand der Rohstoffbereitstellung zu beschreiben: der Energieaufwand (genauer eigentlich der Exergie, also die arbeitsfähige Energie), der erforderlich ist, um eine bestimmte Menge eines Rohstoffes zur Verfügung zu stellen. Viele Umweltbelastungen (z. B. Emissionen) korrelieren sehr stark mit dem Energieeinsatz. Vor allem ist der Energieeinsatz aber auch ein Indikator dafür, wie hoch oder niedrig der Erzgehalt ist. Bei niedrigem Erzgehalt müssen sehr viel größere Mengen Erz bewegt werden. Der Trend zu niedrigerem Erzgehalt (x) schlägt sich also in einem starken Anstieg des Energiebedarfs nieder, und zwar mit einer $1/x$ -Kurve. Gleichzeitig führt ein steigender Energiebedarf auch zu einem Kostenanstieg.

Vor allem erlaubt die Energiebilanz auch einen Vergleich zwischen Primär- und Sekundärgewinnung von Rohstoffen. Denn das Recycling vieler Stoffe scheitert an den stark dissipativen Prozessen bei Konsum und Entsorgung. Auch hier ist meistens die Energie (und die Kosten) die relevante Größe, um eine Aufkonzentration der gewünschten Sekundärstoffe zu erzielen, damit sie dann Recyclingprozessen zugeführt werden können. Dieser Bewertungsansatz ist derzeit Gegenstand des Forschungsprojektes NEXUS an der Hochschule Pforzheim, dessen Ergebnisse im Dezember 2018 präsentiert werden.

Literatur

- [1] Acatech (2016): Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft. Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften.
- [2] Barnett, H., Morse, C. (1963): Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resource Availability. Baltimore: Johns Hopkins University Press for Resources for the Future.
- [3] Ehrlich, P. R. (1968): The Population Bomb. New York: Sierra Club–Ballantine Books.
- [4] EU Commission (2010): Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. June 2010
- [5] EU Commission (2014): Report on Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials. Luxembourg. May 2014
- [6] EU Commission (2017): Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Criticality Assessments. Luxembourg. June 2017
- [7] Gerling, J. P., Wellmer, F.-W. (2005): Reserven, Ressourcen und Reichweiten Wie lange gibt es noch Erdöl und Erdgas? Chem. Unserer Zeit, 2005, 39, 236 – 245
- [8] Gilbert, N. (2009): The disappearing nutrient. Nature Vol. 461, 8. Oct. 2009, 716-718
- [9] Graedel, T.E. et al. (2015): Criticality of metals and metalloids. PNAS, Vol. 112, No. 14, 4257–4262
- [10] House of Representatives (1952): Resources for Freedom. Foundations for Growth and Security. A Report to the President by the President's Materials Policy Commission. Washington D.C.
- [11] Hubbert, M. K. (1949): Energy from Fossil Fuels. Science 109, 2823 (February 4): 103–109.

- [12] Jevons, S. W. (1965): The Coal Question. 3rd Edition, Reprints of Economic Classics, New York.
- [13] Meadows, D. H., Meadows, D. L. (1974): Das globale Gleichgewicht. Modellstudien zur Wachstumskrise. Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart.
- [14] Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., Behrens, W. W. (1972): Limits to Growth. New York: Potomac Associates.
- [15] Mudd (2009): The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future. Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute.
- [16] NAS (1969): Resources and Man: A Study and Recommendations, edited by the Committee on Resources and Man, National Academy of Sciences, National Research Council. San Francisco: W.H. Freeman and Company.
- [17] NSTC (2016): Assessment of critical minerals—Screening methodology and initial application: Washington, D.C., Subcommittee on Critical and Strategic Mineral Supply Chains of the Committee on Environment, Natural Resources, and Sustainability of the National Science and Technology Council.
- [18] Pinchot, G. (1911): The Fight for Conservation. New York.
- [19] Riegraf, H. (1961): Ausgewählte Kapitel aus der Geographie der Rohstoffwirtschaft der Erde. Dt. Verlag d. Wissenschaften Berlin.
- [20] Rötzer, N., Schmidt, M. (2018): Sind Erzgehalte ein geeigneter Indikator für die Rohstoffverfügbarkeit? unveröffentlicht.
- [21] Selmeier, F. (1984): Eisen, Kohle und Dampf. Die Schrittmacher der industriellen Revolution. Deutsches Museum München.
- [22] Smith, V.K. (1979): Scarcity and Growth Reconsidered. Baltimore: Johns Hopkins University Press for Resources for the Future.
- [23] Spicer, L. G. (1950): Stock piling of strategic materials. Boston University
- [24] UBA (2017): Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I). Umweltbundesamt Texte 87/2017. Dessau.

- [25] U.S. GS (2017): Critical Mineral Resources of the United States Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. Professional Paper 1802
- [26] U.S. Senate (1949): Mineral Resources Development, Washington D.C.
- [27] Wedepohl, K.-H. (1995): The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 59, No. 7, pp. 1217-1232
- [28] Wellmer, F.-W. (2016): Nachhaltigkeit und Rohstoffgewinnung – ein Widerspruch? *ERDÖL ERDGAS KOHLE* 132. Jg. 2016, Heft 2, S. 46 ff.
- [29] White House (1908): Proceedings of a Conference of Governors in the White House. No. 48489. Washington D.C.

Der Beitrag entstand im Rahmen des Projektes NEXUS (L75 16001), gefördert vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg.

Pforzheimer
Werkstofftag
2018

Recycling und Handel von legierten Metallschrotten

Martin Geisler

CRONIMET Ferroleg. GmbH

Abstract

Der Handel mit legierten Metallschrotten ist ein globales Geschäft. Die Warenströme umspannen die ganze Welt, um Industrie- und Schwellenländer mit kritischen Rohstoffen zu versorgen. Der Schrott ist dabei ein knappes Gut und das Recycling durch die Wertigkeit der Materialien selbsttragend. Der vorliegende Beitrag zeigt die Besonderheiten im Handel und Recycling legierter Schrotte auf. Die Preisbildung der gehandelten Ware steht unter dem Einfluss immer volatilerer Rohstoffmärkte an die sich die Recyclingunternehmen anpassen müssen. Um die geforderten Qualitäten einhalten zu können, kommen modernste Technologien zur Erkennung und Sortierung von Legierungen zum Einsatz.

Legierter Metallschrott

Rohstoffe sind ein entscheidender Faktor zur Wohlstandssicherung im Industrieland Deutschland. Seit Jahrzehnten sind insbesondere Energierohstoffe wie Öl und Gas Themen der öffentlichen Debatte. Die Energiewende, der Ausstieg aus Kernenergie und fossilen Energieträgern, hat die Diskussionen in den letzten Jahren immer wieder befeuert. Daneben spielt die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Industriemetallen eine untergeordnete Rolle in der Öffentlichkeit. Es schien als handele es sich um Märkte, die sich über Angebot und Nachfrage sehr ausgewogen selbst regulieren. Erst als die Preise begannen sich extrem volatil zu verhalten, setzte ein Umdenken ein. Abbildung 1 zeigt hier beispielhaft die Preisentwicklung von Nickel aus dem Jahre 2007. Zahlreiche Initiativen wurden von der Politik ins Leben gerufen und die Beschaffung kritischer nichtenergetischer mineralischer Rohstoffe rückte bei Unternehmen in den Fokus [Pilarsky 2014].

LME NICKEL HISTORICAL PRICE GRAPH

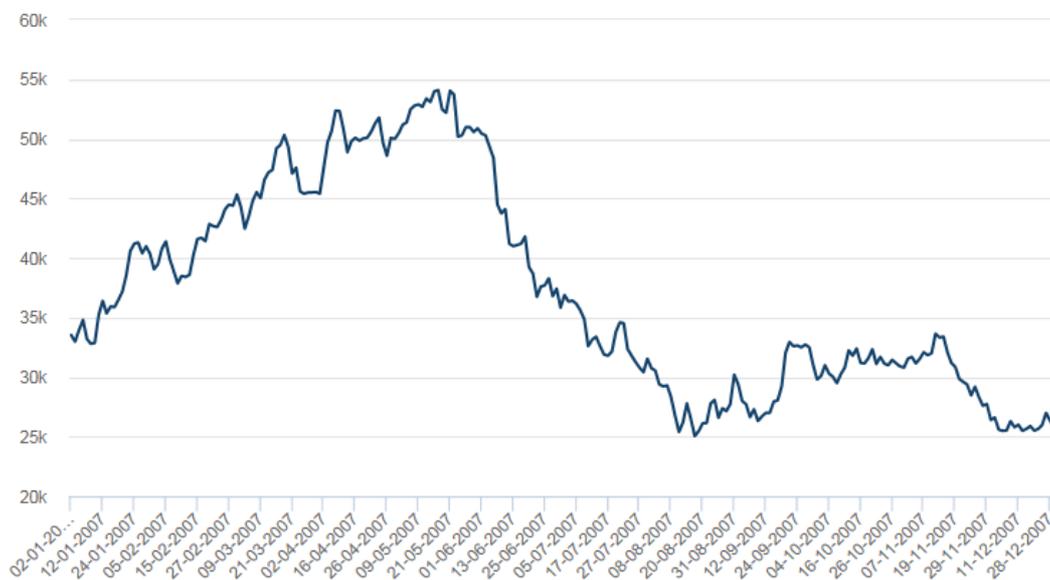


Abbildung 1: Nickelpreisentwicklung 2007 in \$ pro Tonne [LME 2018]

Für die Versorgungssicherheit mit Metallen ist das Recycling ein bedeutender Faktor, da Metalle ohne Qualitätsverlust immer wieder eingeschmolzen und wiederverwendet werden können. Die deutsche Industrie ist auch deshalb auf das Recycling angewiesen, da Deutschland dahingehend selbst keine bedeutenden Bodenschätze besitzt und somit die Förderung von Primärmetall in Deutschland keine Rolle spielt. Selten liegen dabei die Metalle für das Recycling in ihrer reinen Form vor. In der Regel werden Metalle in Gemischen verwendet, den sogenannten Legierungen. Eine Legierung in der Metallurgie ist ein Gemenge mit metallischem Charakter aus zwei oder mehr Elementen, von denen mindestens eines ein Metall ist. Aus der Vielfalt an Elementen und deren Kombination zu verschiedenen Legierungen hat sich im Laufe der Jahrzehnte eine enorme Materialkomplexität ergeben. Diese lässt sich im Bereich der technisch genutzten Metalle wie folgt kategorisieren [Martens 2016]:

- Eisen (Fe) und Eisenlegierungselemente (Mn, Si, Cr, Ni, etc.)
- Nichteisenmetalle (NE-Metalle) (Cu, Pb, Sn, etc.)
- Leichtmetalle (Al, Mg, Ti)
- Edelmetalle (Au, Ag, Pt, etc.)
- Refraktärmetalle (W, Mo, Ta)
- Hochtechnologiemetalle (Li, Ga, In, etc.)
- Seltenerdmetalle (Sc, Y, Ce, etc.)

Den größten Anteil am Recyclingstrom haben dabei die Eisen-Kohlenstoff-Legierungen. Nach DIN EN 10020 gelten Eisenwerkstoffe mit einem Kohlenstoffanteil über zwei Prozent als Gusswerkstoffe, darunter spricht man von Stahl. Stähle wiederum werden in drei Klassen eingeteilt: die unlegierten Stähle, die nichtrostenden Stähle und andere legierte Stähle. Sowohl unlegierte als auch legierte Stähle lassen sich in Qualitäts- und Edelmetalle einteilen. Die Edelmetalle zeichnen sich durch eine höhere Reinheit und höhere Festigkeitswerte aus. Schwefel- und Phosphorgehalt dürfen maximal 0,025 Prozent betragen. Die Gleichsetzung von Edelmetall und rostfreiem Stahl aus der Umgangssprache ist damit nach dieser Definition nicht richtig.

Die Verfügbarkeit legierter Metallschrotte ist begrenzt. Die zur Verfügung stehende Menge hängt von verschiedenen Faktoren ab. Die Lebensdauer der Produkte, in denen die Legierungen eingesetzt werden, bestimmen die Zeitspanne bis zum Rücklauf. Anschließend bestimmen die Sammelquote, Verluste im Prozess und die technische Recyclingfähigkeit die erzielbaren Recyclingquoten [Pilarsky 2014]. Wie die zur Verfügung stehenden Schrotte nach der Wiedergewinnung gehandelt werden, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Handel von legierten Metallschrotten

Die Wirtschaftlichkeit des Recyclings legierter Schrotte hängt zum einen von der Legierung, den enthaltenden Elementkonzentrationen und ihrer Wertigkeit, zum anderen von den eingesetzten Recyclingverfahren und deren Kosten ab. Liegen die Kosten der Wiedergewinnung der Sekundärrohstoffe unter den Kosten des Einsatzes von Primärrohstoffen, ist das Recycling wirtschaftlich sinnvoll, sofern auch die Qualitätsanforderungen eingehalten werden [Martens 2016]. Primär- und Sekundärmarkt beeinflussen sich dabei gegenseitig. Bei höheren Preisen für Primärmetall steigt die Verfügbarkeit der entsprechenden Schrotte. In Phasen fallender oder niedriger Preise werden Schrotte in Erwartung steigender Preise zurückgehalten [Pilarsky 2014].

Schrotte werden am Markt wie Produkte gehandelt. Sie werden in unterschiedliche Qualitäten unterschieden wie z. B. im Bereich Kupfer in Kupferkabel, Kupferblech oder Kupfer-Raff, der schlechtesten Qualitätsstufe für Reinkupfer. Legierte Schrotte werden hinsichtlich ihrer Legierungselemente und deren Konzentration kategorisiert. Für einen rostfreien CrNi-Stahl, wie den in Deutschland unter dem Handelsnamen bekannten V2A, ist der Gehalt an Chrom und Nickel entscheidend. Zusammen mit dem Basiselement Eisen werden die beiden Elemente entsprechend ihrer Konzentration in der Legierung mit ihrem jeweiligen Preis multipliziert und dann summiert. Auf die Summe wird dann der Schrottabschlag gebildet, welcher ebenfalls Schwankungen unterworfen ist.

Der Preis des Sekundärmetalls orientiert sich an den Preisen der jeweiligen Primärmetalle, welche auf unterschiedliche Weise festgesetzt werden können. Ausschlaggebend für den Chrompreis sind die quartalsweise ausgehandelten Lieferverträge zwischen den größten Produzenten und Abnehmern, während Nickelmetall an der Börse, der London Metal Exchange, gehandelt wird. Durch Wirtschaftskrisen, Handelsbeschränkungen oder aber auch Spekulationen sind extreme Preisschwankungen möglich. Ein aktuelles Beispiel zeigt die Entwicklung des Kobaltpreises in Abbildung 2. Innerhalb von fünfzehn Monaten hat sich der Preis ausgehend von 32.500 US Dollar pro Tonne verdreifacht, um im Anschluss innerhalb weniger Monate wieder unter 60.000 Dollar pro Tonne zu fallen. Zuletzt verlor Kobaltmetall innerhalb weniger Tage zwanzig Prozent an Wert.

HISTORICAL PRICES GRAPH



Abbildung 2: Kobaltpreisentwicklung 2017/18 in \$ pro Tonne [LME 2018]

Diese Volatilität birgt Risiken für die betroffenen Handelsunternehmen. Geringe Margen im Handel mit Sekundärrohstoffen sowie eine schwierige Marktsituation verschärfen die Risiken.

Eine Möglichkeit zur Beschränkung des Risikos durch Preisvolatilität sind Sicherungsgeschäfte, das sogenannte Hedging. Zur Absicherung von Kursentwicklungen, nicht nur von Rohstoffen, sondern auch von Währungen, werden durch Kauf oder Verkauf entsprechender Derivate Gegenpositionen zum physisch getätigten Geschäft gebildet. Während man somit gegen fallende Kurse abgesichert ist, kann man von steigenden Kursen nicht profitieren.

Um die entsprechenden Preise für die gekauften Legierungen festsetzen und abrechnen zu können, muss die Legierungszusammensetzung bekannt sein. Da die Nachvollziehbarkeit durch die Mischprozesse innerhalb des Schrotthandels nicht gegeben ist, muss eine entsprechend aufwendige Wareneingangsprüfung stattfinden. Diese wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Identifikation von Legierungen

Kern der Wareneingangsprüfung im Handel mit legierten Schrotten ist die Identifikation der gelieferten Legierung, die Anteilsbestimmung der enthaltenen Elemente sowie, falls nötig, die Sortierung. Wie aufwendig dieser Prozess gestaltet wird hängt vom gehandelten Material und den entsprechenden Qualitätsanforderungen ab. So existieren im Bereich der legierten Schrotte Massenmärkte, wie beispielsweise der Markt der rostfreien Stähle. Hinsichtlich Tonnage und Anforderungen an den Recyclingprozess unterscheiden sie sich von Märkten mit kleineren Volumen, wie den Nickelbasis-Superlegierungen oder dem Titanmarkt.

Gängige Hilfsmittel bei der Identifizierung von Legierungen sind portable Spektrometer. Abbildung 3 zeigt einen mobilen Röntgenfluoreszenz-Analysator. Im linken Teil ist zu erkennen wie das Messgerät auf die Oberfläche des zu identifizierenden Stücks aufgesetzt wird. Dabei ist auf eine saubere, öl- und rostfreie Oberfläche zu achten. Nach wenigen Sekunden, abhängig von den Elementen, die bestimmt werden sollen, erscheint im Display die ermittelte Zusammensetzung. Der rechte Teil der Abbildung zeigt das Messergebnis eines V4A-Stahls.



Abbildung 3: Messung mittels Röntgenfluoreszenz-Spektrometer

Neben der Röntgenfluoreszenz werden weitere Technologien zur Identifikation eingesetzt, wie zum Beispiel die optische Emissionsspektrometrie. Neu im Markt der mobilen Analysatoren ist die LIBS-Technologie (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy).

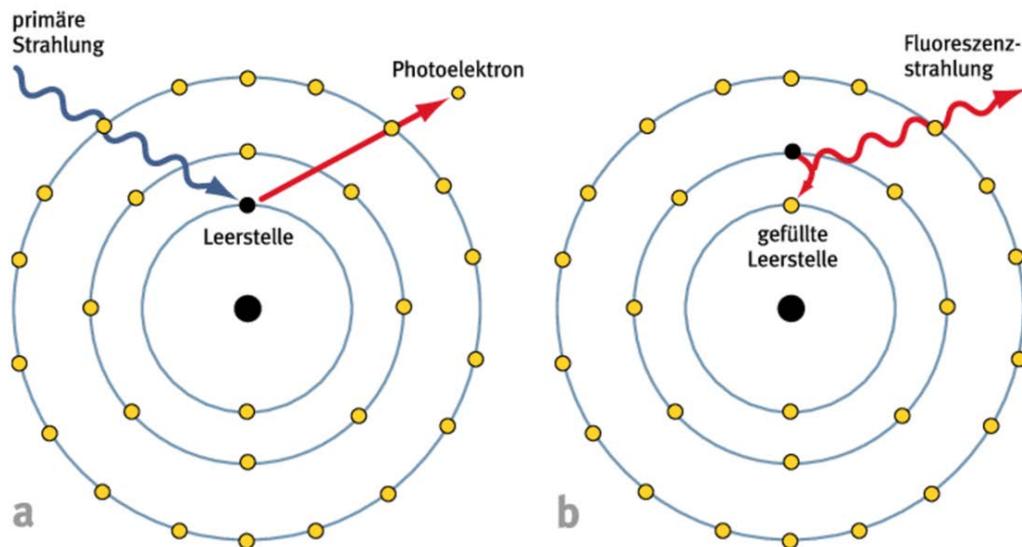


Abbildung 4: Prinzip der Röntgenfluoreszenz [DPG 2018]

Das Prinzip der Technologien ist ähnlich. Abbildung 4 zeigt das Funktionsprinzip der Röntgenfluoreszenzanalyse in schematischer Darstellung. Zu erkennen ist jeweils ein Atomkern umgeben von seiner Elektronenhülle. Im ersten Schritt wird dem System nun Energie durch primäre Röntgenstrahlung zugeführt, um kernnahe Elektronen aus dem Atom zu entfernen. Das sich nun in einem angeregten Zustand befindliche Atom stabilisiert sich, indem ein Elektron aus einer kernferneren Schale die Leerstelle füllt. Die dabei frei werdende Energie wird als Röntgenfluoreszenzstrahlung abgegeben. Das Energieniveau dieser Strahlung ist dabei charakteristisch für die Elemente und deren Schalen. Somit kann aus dem gemessenen Spektrum abgeleitet werden, welche Elemente in welcher Intensität vorhanden sind. Optische Emissionsspektrometrie und LIBS funktionieren nach ähnlichem Prinzip, nutzen aber für die Anregung der Atome andere Quellen und analysieren andere Wellenlängenbereiche.

Trotz des Einsatzes modernster Technik sind bei der Wareneingangsprüfung Sorgfalt und Erfahrung unabdingbar. In den Massenmärkten findet keine vollständige, sondern eine repräsentative Überprüfung der Wareneingänge statt. Nach dem ökonomischen Prinzip ist so viel wie nötig aber so wenig wie möglich zu prüfen.

Einen hohen Anteil am Massenstrom legierter Schrotte haben neben den Stückschrotten auch Dreh-, Fräs- und Schleifspäne sowie Pulver verschiedener Korngrößen. Diese können mittels mobiler Analysatoren keiner repräsentativen Prüfung unterzogen werden, da mit jeder einzelnen Messung nur ein sehr kleiner Anteil am gesamten Wareneingang gemessen werden kann. Daher werden diese Materialien zunächst nach dem Eingang homogenisiert. Falls nötig werden sie zunächst gebrochen oder gemahlen um sie auf eine einheitliche Korngröße zu bringen.

Nach der Homogenisierung wird eine repräsentative Probe entnommen und geschmolzen. Anhand dieser geschmolzenen Proben werden dann mittels stationärer Laborgeräte die Elementkonzentrationen bestimmt.

Die Trennung, Identifikation und Sortierung von legierten Schrotten muss, wie beschrieben, wirtschaftlich bleiben, indem die Kosten des Recyclings unter den Beschaffungskosten von Primärmetallen liegen. Die Bedingungen für das wirtschaftliche Recycling werden schwieriger. Die Vielfalt, der in der Produktion eingesetzten Materialien, steigt stetig. Neue Legierungen werden eingesetzt oder Legierungselemente werden substituiert. Diese Veränderungen erschweren es sämtliche Elemente technisch wiederzugewinnen, also ein Downcycling zu verhindern. Da bei steigender Materialvielfalt die Produkte in der Regel nicht „mitwachsen“, kommt es zu kleineren Metallkonzentrationen pro Tonne eingesammelten Schrott. Auch dies steht einer wirtschaftlichen Rückgewinnung, teilweise auch sehr hochpreisiger Metalle, im Weg. Um die Industrie dennoch auch in Zukunft mit kritischen Rohstoffen versorgen zu können, ist es unabdingbar bei der Produktgestaltung die Recyclingfähigkeit nach Ende des Lebenszyklus sicherzustellen.

Quellenangaben

- [LME 2018] The London Metal Exchange (Hrsg.): LME Nickel Price graph.
<https://www.lme.com/en-gb/metals/non-ferrous/nickel/#tabIndex=2>; aufgerufen am 30.7.2018
- [LME 2018] The London Metal Exchange (Hrsg.): LME Cobalt Price graph.
<https://www.lme.com/Metals/Minor-metals/Cobalt#tabIndex=2>; aufgerufen am 07.08.2018
- [Martens 2016] Martens, H.; Goldmann, D.: Recyclingtechnik. 2. Auflage. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2016
- [Pilarsky 2014] Pilarsky, G.: Wirtschaft am Rohstofftropf: Der Kampf um die wichtigsten mineralischen Ressourcen. Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2014
- [DPG 2018] Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (Hrsg.): Was verrät die Röntgenfluoreszenzanalyse?
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/licht/synchrotronstrahlung/roentgenfluoreszenzanalyse/roentgenfluoreszenzanalyse/>; aufgerufen am 30.07.2018

Pforzheimer
Werkstofftag
2018

Untersuchung zwischenbetrieblicher Schnittstellen am Beispiel von Sekundärmetallen

Paul Roodakker

Wirtschaftsingenieurwesen / General Management
HOCHSCHULE PFORZHEIM - Fakultät für Technik

Dipl.-Ing. Roman Schweitzer
WEICK Recycling GmbH

Abstract

Der nachhaltige Umgang und die Sicherung von Rohstoffressourcen und deren Qualität, sind eine Grundvoraussetzung für den Bestand und Erfolg eines Industrielandes wie Deutschland. Die Abhängigkeit von Drittstaaten, die immer knapper werdenden primären Ressourcen sowie die erhebliche Einsparung von CO₂-Emissionen, sprechen deutlich für das Recycling von Sekundärressourcen.

Bei metallverarbeitenden Betrieben fallen gewaltige Mengen an Sekundärressourcen in Form von Eisen- und Nichteisenschrotten an. Auch wenn Schrotte unendlich oft in Stahlwerken, Gießereien und Metallhütten einsetzbar sind, sollte bereits bei der Entstehung der Schrotte auf eine nachhaltige Sortierung und Handhabung geachtet werden, um diese weitgehend ohne Qualitätsverluste wieder in den Stoffkreislauf zurückführen zu können und um die innerbetrieblichen Abläufe sowie Erlöse zu optimieren.

In diesem Beitrag wird eine Möglichkeit der Zusammenarbeit zwischen Produktionsbetrieben und Recyclingbetrieben aufgezeigt, um eine optimale inner-, zwischen- und überbetriebliche Lenkung von Schrotten zu erreichen. Der Beitrag schließt mit einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und gibt weitere Handlungsempfehlungen.

Einleitung

Die Zukunft der Industrie baut auf die Optimierung der Prozessabläufe, von der Beschaffung über die Produktion, bis hin zur Entsorgung. Im Zuge des Zukunftsprojekts Industrie 4.0, liegt der Fokus auch auf der Erfassung und Auswertung von Daten zu betrieblichen Ressourcenverbräuchen, um die damit verbundenen nachgelagerten Aktionen im vornherein zu steuern und zu optimieren. Für einen hochwertigen Wiedereinsatz von Schrotten ist eine abgestimmte Erfassungslogistik bei den Produktionsbetrieben als Entfallstelle, in Verbindung mit den nachgelagerten Schritten der Schrottsortierung und -verwertung, unabdingbar.

Die Recyclingbetriebe fungieren hier als Schnittstelle zwischen den Produktionsbetrieben und den Stahlwerken, Gießereien und Metallhütten. Sie entsorgen einerseits die Produktionsbetriebe und versorgen andererseits die Stahl- und Metallhersteller mit Sekundärrohstoffen. Die Schrott- und Metallhändler stellen dabei durch die Sortierung, Aufbereitung und Qualifizierung der Schrotte sicher, dass die Stahlwerke, Gießereien und Metallhütten mit Sekundärrohstoffen versorgt werden, die deren Anforderungen entsprechen.

Oftmals sind die innerbetrieblichen Abläufe in Bezug auf die Erfassung und Sortierung von Schrotten bei den Produktionsbetrieben in die „Jahre“ gekommen oder es wird diesen zu wenig Bedeutung beigemessen. Auch ist es mit nicht unerheblichem Aufwand verbunden, neue Prozesse einzuführen und das Bewusstsein bei den Mitarbeitern hierfür zu entwickeln. Darüber hinaus sollten die zwischenbetrieblichen Schnittstellen zwischen den Produktions- und Recyclingbetrieben untersucht und aufeinander abgestimmt werden, um einerseits ein optimales innerbetriebliches Prozessergebnis in Bezug auf die Entsorgungslogistik, die Erlössituation und den Abwicklungsaufwand und einen optimalen überbetrieblichen Recyclingprozess andererseits, zu erreichen.

Im Zuge der Einführung des Industrie 4.0 Standards soll durch die Nutzung von ERP-Systemen (Enterprise-Resource-Planning) eine Verbesserung der inner- sowie zwischenbetrieblichen Prozesse von der Stoffstromlenkung, bis hin zur Abrechnung erreicht werden.

Kreislaufprozess

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Kreislaufprozess vom Schrottanfall, über den Schrotthandel bis hin zum Endverwerter (Stahlwerk, Gießerei, Metallhütte). Die Qualität der Schrotte/ Sekundärrohstoffe im Kreislaufprozess ist durch die unterschiedlichen Pfeilstärken dargestellt.

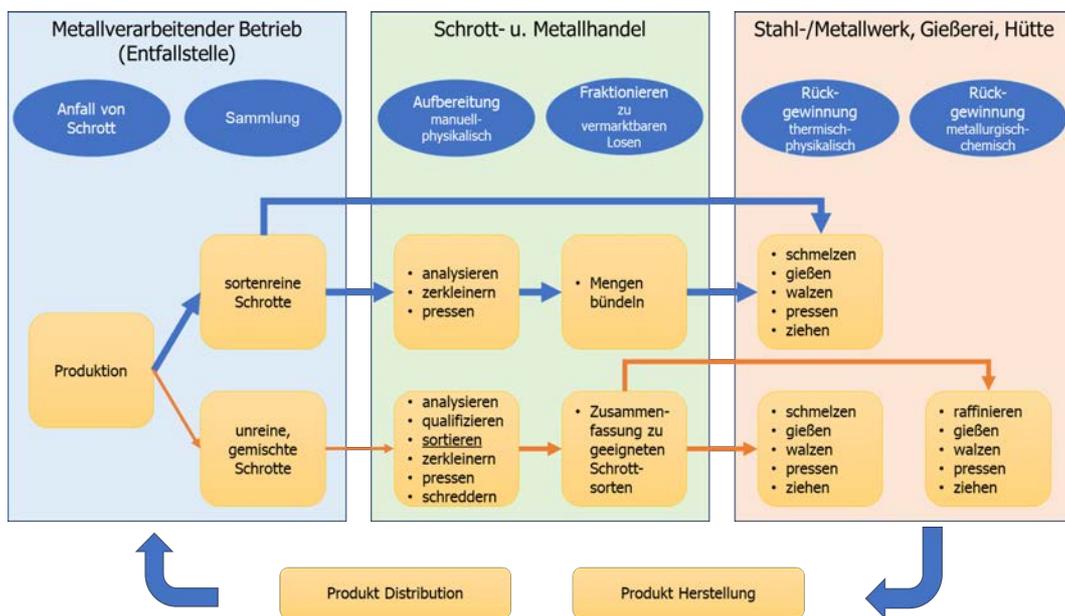


Abbildung 1: Kreislaufprozess

Nahezu alle metallverarbeitenden Betriebe sammeln sortenreine Schrotte und Legierungen separat und verbringen diese direkt in die Umarbeitung zu ihren Materiallieferanten, da bei dieser Vorgehensweise die größte wirtschaftliche Wertschöpfung gegeben ist. Gleichzeitig bleibt die Qualität dieser Sekundärrohstoffe im gesamten Kreislaufprozess auf dem gleichen hohen Qualitätsniveau.

In der Praxis treten jedoch gelegentlich Prozessstörungen in Form von Vermischungen auf. Neben Fehlwürfen können selbst automatisierte Prozesse zu Qualitätsverlusten bei den Schrotten führen. Häufige Ursachen für Vermischungen sind nicht gereinigte Behältnisse, fehlende Kennzeichnungen und nicht ausreichend geschultes Personal. Ferner können bei automatisierten Schrottausbringungssystemen, z. B. durch die falsche Anordnung von Behältern, Vermischungen durch herabfallende Teile entstehen.

Vermischte Schrotte können aus technischen und/oder wirtschaftlichen Gründen oftmals nicht mehr ausreichend separiert werden, wodurch ein dauerhafter Qualitätsverlust in der Rohstoffkette entstehen kann.

Bei vielen Produktionsprozessen kommen jedoch unterschiedliche, kombinierte Werkstoffe oder Halbzeuge mit Oberflächen zum Einsatz. Die einzelnen Schrotte fallen zudem in unterschiedlichen Mengen an. Hier zeigt sich in der Praxis oftmals, dass die innerbetrieblichen Erfassungs-, Sammlungs- und Logistikprozesse der Schrotte oftmals nicht oder auf Grund von neuen Produktionsabläufen nicht mehr optimal auf den Recyclingprozess abgestimmt sind. Dies führt nicht nur zu einer unzureichenden Ausschöpfung der Erlössituation für die Schrotte, sondern zu einer dauerhaften Qualitätsminderung der Sekundärrohstoffkette.

Zwischenbetriebliche Schnittstelle Produktionsbetrieb – Recyclingpartner

Um die innerbetrieblichen Erfassungs-, Sammlungs- und Logistikprozesse der Schrotte zu optimieren und zudem auf die überbetrieblichen Anforderungen der Recyclingwirtschaft abzustimmen, hat sich aus unserer Erfahrung die Etablierung einer zwischenbetrieblichen Schnittstelle zwischen dem Produktionsbetrieb und seinem Recyclingpartner bewährt.

Hierbei wird gemeinsam die aktuelle Prozesslandschaft des Produktionsbetriebes in Bezug auf den Schrottanfall untersucht. Dies erfolgt durch die Auswertung der vorhandenen Informationen, beispielsweise anhand von Arbeitsanweisungen und Schrottplisten sowie durch Betriebsbegehungen und Gespräche mit der Betriebs-/Produktionsleitung, dem Einkauf und gegebenenfalls mit der Geschäftsleitung.

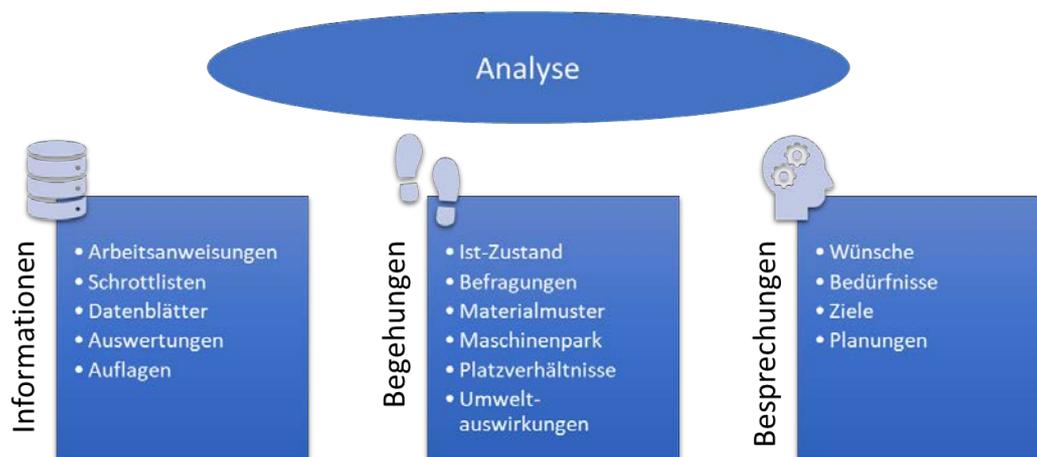


Abbildung 2: Analyse des internen Entsorgungsprozesses

Als Recyclingpartner sind wir dann in der Lage, die aktuelle Entsorgungssituation des Betriebes zu verstehen und diesem Optimierungspotentiale aufzuzeigen.

Auf Basis der Analyse des internen Entsorgungsprozesses werden die Schrotte in Bezug auf die jeweiligen Mengen und den optimalen Recyclingweg gruppiert und Betriebsanweisungen für die einzelnen Standorte oder Abteilungen erstellt. Nach der Freigabe der Betriebsanweisungen durch die Verantwortlichen, werden die Füllhinweise für die einzelnen Sammelbehälter erstellt und die Mitarbeiter geschult.



Abbildung 3: Betriebsanweisung und Füllhinweis

Unsere Vorschläge greifen bereits in einer sehr frühen Phase, so dass die Nachfolgeprozesse, bis hin zur Abrechnung optimal gelenkt werden können. Die Gruppierungen der Schrotte sind auf die innerbetrieblichen Gegebenheiten des Produktionsbetriebs, als auch auf die überbetrieblichen Anforderungen der Recyclingwirtschaft abgestimmt. Die Schrotte haben bereits nach der direkten Entstehung ein hohes Qualitätsniveau und der Qualitätsverlust in der Rohstoffkette wird deutlich reduziert.

Die Erfassungs- und Logistikprozesse sind eindeutig definiert und für jedermann übersichtlich veranschaulicht. Die Gefahr von ungewollten Vermischungen wird deutlich reduziert und der interne Handhabungsaufwand sowie der Platzbedarf deutlich minimiert. Für die einzelnen Gruppen können zudem transparente Preisvereinbarungen, in Abhängigkeit von der Entwicklung der Rohstoffpreise, getroffen werden, wodurch der Abrechnungsaufwand deutlich vereinfacht wird.

Ausblick und Handlungsempfehlung

Durch nachhaltiges Schrott- und Metallrecycling werden nicht nur natürliche Ressourcen geschont, sondern auch die Umwelt erheblich von schädlichen Rückständen bei der Gewinnung von Primärmetallen, wie z. B. giftigen Rotschlammern, entlastet und immense Kohlendioxid-Emissionen vermieden. Alleine durch das Recycling von NE-Metallen werden die jährlichen CO₂-Emissionen in Deutschland um rund 8,4 Millionen Tonnen reduziert.¹ Durch den Einsatz von Stahlschrott werden in Deutschland nahezu weitere 24 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Emissionen pro Jahr vermieden.²

Es ist daher wichtig, dass bestehende Recyclingprozesse fortlaufend optimiert und angewendet werden. Die Wirtschaftlichkeit von Sekundärressourcen sowie die Auswirkungen auf die Umwelt stehen in Abhängigkeit mit der Sorgfalt bei der Sammlung sowie Verwertung. Es ist daher wichtig, eine kommunikative Schnittstelle zwischen den Produktionsbetrieben als Entfallstelle und dem Recyclingpartner einzurichten. Diese Schnittstelle ermöglicht den regen Austausch über sämtliche Prozessänderungen, die auch Änderungen im Recyclingablauf mit sich ziehen können. Nur dann ist ein nachhaltiger Recyclingprozess möglich, welcher sich letztendlich auch finanziell bemerkbar macht.

¹ Quelle: VDM Verband Deutscher Metallhändler e.V.

² Quelle: BDSV - Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V.

**Leichtbau durch höchstfeste Stähle der
“3.Generation“: Minimierung der Legierungsgehalte
durch innovative Wärmebehandlungskonzepte**

M.Sc. Jan Frömert

Dr.-Ing. Alexander Martin Matz

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost

Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien (IWWT),
Hochschule Pforzheim

Abstract

Die erhöhte Nachfrage nach hochfesten Stählen hat zur Entwicklung von Legierungen mit „transformation induced plasticity“ (TRIP) und „twinning induced plasticity“ (TWIP) geführt. Die in diesem Zusammenhang entwickelten Werkstoffe mit erhöhter Festigkeit werden unter dem Namen „advanced high strength steels“ (AHSS) in drei Generationen zusammengefasst. Das wichtigste Legierungselement der ersten beiden Generationen ist Mangan, welches effektiv die oben genannten Effekte begünstigt. Derzeit ist der Abbau von Manganerzen und die Herstellung von Mangan im benötigten Reinheitsgrad noch nicht ökologisch und ökonomisch möglich. Um Ressourcen zu schonen und Legierungskosten zu sparen, wird aktuell an Stählen mit niedrigeren Legierungsgehalten geforscht. Diese stellen aussichtsreiche Kandidaten für die „dritte Generation“ der AHSS dar. Hierbei werden die gewünschten mechanischen Eigenschaften nicht nur durch Anpassung der Legierungselemente und -gehalte realisiert, sondern der Stahl als komplexes System aus Werkstoff und Wärmebehandlung betrachtet. Durch die „Quenching and Partitioning“-Wärmebehandlung (Q&P) wird Austenit bis auf Raumtemperatur stabilisiert, welcher bei mechanischer Belastung martensitisch umwandelt (TRIP). Angewendet auf korrosionsbeständige martensitische Stähle, können die hohen Festigkeiten durch eine gute Duktilität ergänzt werden.

Einleitung

Das moderne Automobildesign stellt hohe Anforderungen an die für die Karosserie und das Chassis verwendeten Werkstoffe. Die Optimierung der Konstruktion hinsichtlich Gewichtsersparnis, Steifheit und Crash-Sicherheit erfordert die Entwicklung von Werkstoffen mit hoher Festigkeit in Kombination mit guter Umformbarkeit, Zähigkeit und Dauerfestigkeit. Die in diesem Zusammenhang entwickelten Werkstoffe mit erhöhter Festigkeit für den Automobilbau werden unter dem Namen „advanced high strength steels“ (AHSS) zusammengefasst. In der Entwicklung moderner Stähle spielt das Legierungselement Mangan die wichtigste Rolle, da es effektiv Austenit stabilisiert und die Stapelfehlerenergie herabsetzt, wodurch festigkeitssteigernde Effekte wie TRIP und TWIP (transformation induced plasticity, bzw. twinning induced plasticity) unterstützt werden [1]. Die hohen Kosten der Herstellung von Ferromangan oder reinem Mangan standen bislang dem Erfolg der hochmanganhaltigen Stähle im Wege. Dies liegt zum einen an der geringen Verfügbarkeit hochmanganhaltiger Erze, welche unter nachhaltigen Bedingungen abgebaut werden können, und zum anderen an ihrer komplizierten und teuren Aufarbeitung [2]. Aus diesem Grund geschieht derzeit ein Wandel zu Stahlsorten mit niedrigeren Mangangehalten.

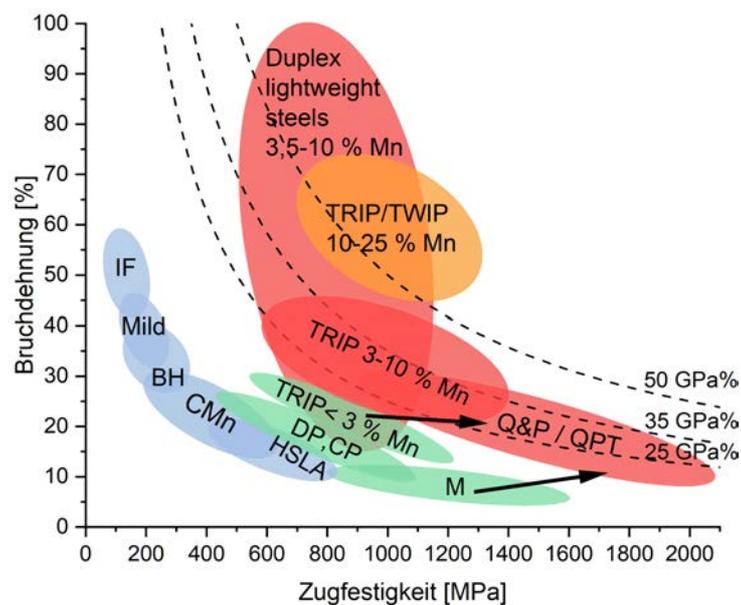


Abbildung 1: Bereiche von Zugfestigkeit und Bruchdehnung verschiedener Stahl-Legierungen. interstitial free (IF), bake hardening (BH), high strength low alloy (HSLA), Dual- und Komplexphasen (DP, CP), transformation induced plasticity (TRIP), martensitisch (M), Quenching & Partitioning + Tempering (Q&P, QPT) und twinning induced plasticity (TWIP).

In Abbildung 1 sind konventionelle Stahlsorten (blau dargestellt) und AHSS mit ihren Festigkeiten und Bruchdehnungen dargestellt. Die erste Generation der AHSS umfasst Stähle mit Mangangehalten $< 3\%$ und einem Produkt aus Bruchdehnung und Zugfestigkeit $< 25\text{ GPa}\%$ (grün). Zu diesen zählen Dualphasen-(DP) und TRIP-Stähle, sowie martensitische Stähle (M). In der zweiten Generation wurden durch den Einsatz hoher Legierungsgehalte (im Wesentlichen Mangangehalte von $10\text{--}25\%$) austenitische Stähle mit TRIP- bzw. TWIP und $> 50\text{ GPa}\%$ entwickelt (orange). In der dritten Generation der AHSS wird aktuell ein Kompromiss aus beiden voran gegangenen Generationen erforscht (rot). Durch die Reduktion der Mangangehalte sollen die Legierungskosten gesenkt und die Herstellung vereinfacht werden sowie zugleich Werte über $25\text{ GPa}\%$ erzielt werden. Neben den Duplex lightweight steels und den TRIP-Stählen mit höherem Mangangehalt wird den Q&P-Stählen (Quenching and Partitioning) ein hohes Potential eingeräumt, den Sprung von der Forschung in die Praxis zu schaffen. Besonders ist hierbei, dass es sich bei Q&P vorrangig um eine Wärmebehandlung handelt, welche auf verschiedenste Stähle angewendet werden kann. Ursprünglich auf CMnSi-Stähle mit TRIP-Effekt angewendet, wird derzeit an der Übertragung auf korrosionsbeständige martensitische Stähle geforscht, wodurch ihre hohe Festigkeit weiter gesteigert und gleichzeitig die Duktilität erhöht werden kann. Die Pfeile in Abbildung 1 zeigen eine solche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bei Anwendung der Q&P-Wärmebehandlung auf TRIP- und M-Stähle. Im Folgenden soll die Q&P-Wärmebehandlung vorgestellt und ihre Anwendbarkeit auf den korrosionsbeständigen martensitischen Stahl 1.4034 untersucht werden. Bisher wurde in der Literatur ausschließlich das Abschrecken auf Raumtemperatur und der Einfluss der Partitionierzeit auf die Austenitgehalte untersucht [3]. Im Rahmen der aktuellen Untersuchungen wird der Einfluss der Abschrecktemperatur auf die Austenitgehalte charakterisiert und im Hinblick auf die Ausbildung des Austenits näher betrachtet.

Prinzipien der Q&P-Wärmebehandlung

Im Zuge der Nachfrage nach hochfesten Stahlblechen aus der Automobilindustrie und der Konkurrenz aus dem Bereich der Leichtmetalle, stellten SPEER et al. mit dem Quenching and Partitioning (Q&P) eine alternative Wärmebehandlung zur Herstellung von Stählen mit kohlenstoffstabilisiertem Restaustenit und Martensit vor [4].

Abbildung 2 zeigt schematisch den Prozess der Q&P-Wärmebehandlung und die dabei auftretenden Gefügeveränderungen. Der Q&P-Prozess beginnt mit teilweisem oder vollständigem Austenitisieren, bei welchem der Kohlenstoff homogen im Gefüge verteilt wird und ggf. Karbide aufgelöst werden. Der Werkstoff wird daraufhin bis unterhalb der Martensit-Start-Temperatur (M_S), jedoch oberhalb der Martensit-Finish-Temperatur (M_F) abgeschreckt. Die Abschrecktemperatur (QT) bestimmt die Unterkühlung unter M_S und somit die Menge an Restaustenit nach dem ersten Abschrecken. Es folgt ein Wärmebehandlungsschritt bei der Partitionierungstemperatur (PT), bei dem Kohlenstoff vom Martensit zum Austenit diffundiert [5]. Durch die Diffusion von zwangsgelöstem Kohlenstoff aus dem übersättigten Martensit wird dieser entspannt. Ein Teil des Austenits wird durch den erhöhten Kohlenstoffgehalt stabilisiert und wandelt sich auch nach Abkühlung auf Raumtemperatur nicht martensitisch um. Das Gefüge nach dem finalen Abschrecken besteht aus stabilisiertem Restaustenit, angelassenem Martensit und ggf. frischem Martensit.

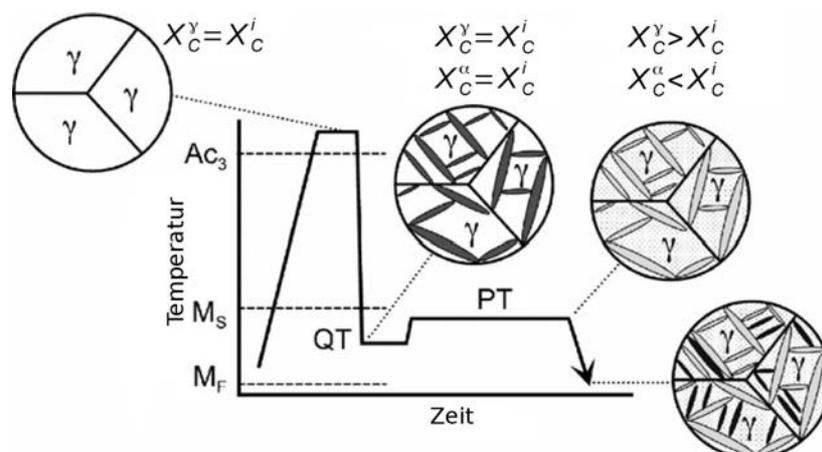


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Q&P-Prozesses für eine vollständig austenitierte Probe, bei welcher die Partitionierungstemperatur (PT) oberhalb der Abschrecktemperatur (QT) liegt. X_C^i , X_C^γ und X_C^α stehen für die Kohlenstoffgehalte im gesamten Gefüge, im Austenit bzw. im Martensit [6].

Material und Methoden

Für die Untersuchungen wurde der martensitische korrosionsbeständige Stahl X46Cr13 (1.4034, AISI 420) verwendet. Die durch Funkenspektroskopie ermittelte chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 1 aufgeführt. Als Ausgangsmaterial dienen weichgeglühte Rundstäbe.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Stahls 1.4034

Legierungselement	C	Cr	Si	Mn	Ni	Fe
Gew.-%	0,43	13,33	0,64	0,44	0,22	Rest

Die angewendete Q&P-Wärmebehandlung besteht aus dem vollständigen Austenitisieren der Proben bei 1175 °C für 3 min und folgendem Abschrecken in Wasser auf Abschrecktemperatur (QT). Diese wird zwischen 25 °C (Raumtemperatur) und 100 °C variiert und die Proben nachfolgend in einem Salzbad für 30 min bei 400 °C angelassen. Das finale Abschrecken erfolgt ebenfalls in Wasser.

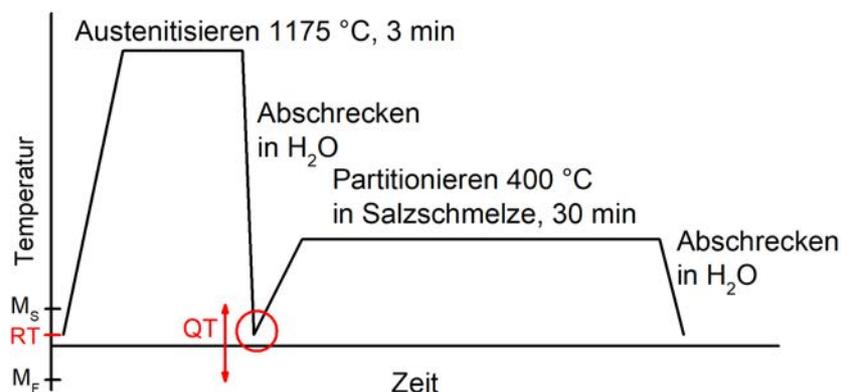


Abbildung 3: Schematische Darstellung der angewendeten Q&P-Wärmebehandlung.

Die Austenitgehalte wurden zum einen anhand von lichtmikroskopischen Aufnahmen mittels der Bildverarbeitungssoftware ImageJ ermittelt. Hierzu wurden die Bilder nachgeschärft und binarisiert. Zum Ausgleich unterschiedlicher Helligkeiten und Kontraste zwischen den Aufnahmen wurde für die Binarisierung eine automatische Anpassung des Schwellenwertes verwendet. Weiterhin wurden Phasengehalte mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) ermittelt. Die Scans wurden an einem XRD 3000 TT (Richard Seifert & Co., Germany) mit $\text{Co K}\alpha$ -Strahlung ($\lambda = 1,78901 \text{ \AA}$) im Winkelbereich $2\theta = 45^\circ\text{--}135^\circ$, einer Schrittweite von $0,05^\circ$ und

einer Haltezeit von 5 s durchgeführt. Zur Ermittlung der Phasengehalte wurden die integrierten Intensitäten der $\{111\}_\gamma$, $\{200\}_\gamma$, $\{220\}_\gamma$, $\{311\}_\gamma$, $\{222\}_\gamma$ Austenit-Peaks und $\{110\}_{\alpha'}$, $\{200\}_{\alpha'}$, $\{211\}_{\alpha'}$, $\{220\}_{\alpha'}$ Martensit-Peaks, wie in [7] beschrieben, direkt miteinander verglichen.

Zur Bestimmung von Art und Temperatur von potentiellen Karbid-Ausscheidungen während des Anlassens wurden Dilatometerproben mit \varnothing 6 mm x 18 mm hergestellt und, wie oben beschrieben, austenitisiert und auf RT abgeschreckt. Das Aufheizen auf Partitioniertemperatur erfolgte im Dilatometer (NETZSCH DIL 402C) in Stickstoff-Atmosphäre mit 5 K/min.

Ergebnisse und Diskussion

Berechnung von Austenitgehalten

Phasenanteile und Kohlenstoffgehalte während der Q&P-Wärmebehandlung lassen sich nach dem constrained carbon equilibrium (CCE) berechnen [8]. Die in Abbildung 4 grau dargestellte Kurve beschreibt die Entwicklung der Austenitgehalte in Abhängigkeit der Abschrecktemperatur unter folgenden Bedingungen:

- Vollständiges Partitionieren von C in Austenit
- Unterdrückung konkurrierender Reaktionen
- Zweiphasiges Gefüge aus Austenit und Ferrit/Martensit

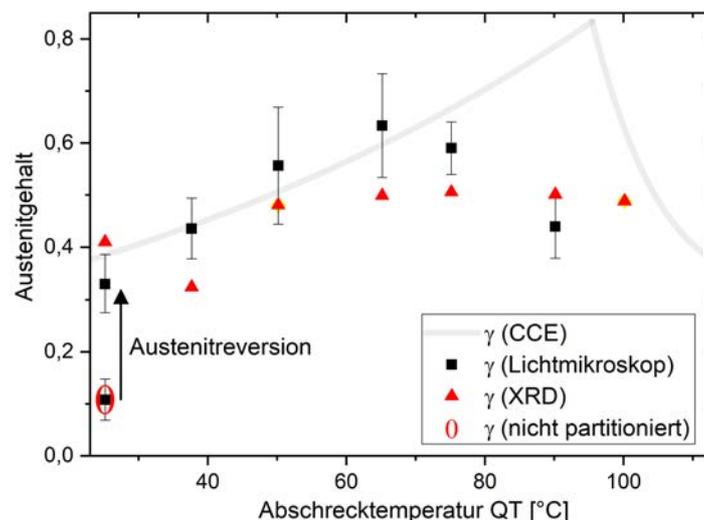


Abbildung 4: Austenitgehalte (Lichtmikroskop – schwarz; XRD – rot) in Abhängigkeit der Abschrecktemperatur und berechnete Austenitgehalte nach CCE (graue Kurve).

Geringe Austenitgehalte bei niedriger QT führen zu hohen Kohlenstoffkonzentrationen im Restaustenit, welche diesen bis auf Raumtemperatur stabilisieren. Höhere Abschrecktemperaturen führen zu größeren Austenitgehalten. Da die absolute Kohlenstoffkonzentration im Werkstoff konstant ist, muss der Kohlenstoffgehalt und demzufolge auch die Stabilisierung mit zunehmender Abschrecktemperatur abnehmen. Die kritische Kohlenstoffkonzentration, bei der M_s im zweiten Abschreckvorgang auf RT abgesenkt wird, bestimmt die Position des Peaks für maximale Restaustenitgehalte. Nach Unterschreiten dieser krit. Kohlenstoffkonzentration im Austenit ist eine vollständige Stabilisierung des Restaustenits nicht mehr möglich. Mit zunehmender Unterkühlung unter M_s während des finalen Abschreckens bildet sich frischer Martensit aus dem nicht ausreichend stabilisierten Auste-

nit. Die Austenitgehalte sinken in der Folge bis auf den Wert für direktes Abschrecken auf RT (38 %).

Grundsätzlich lassen sich zwei Bereiche unterscheiden. Für $QT < 100\text{ °C}$ besteht das Gefüge aus bis zu 85 % Austenit und angelassenem Martensit. Höhere QT bis zu M_s führen zu einem Gefüge aus angelassenem Martensit, stabilisiertem Austenit und frischem Martensit aus dem zweiten Abschrecken.

Austenitgehalte und Morphologie

Im Vergleich zu den berechneten Austenitgehalten, ist der Einfluss der Abschrecktemperatur auf die experimentellen Gehalte marginal. Es werden mit 50 % (XRD) bzw. 60 % (LIMI) deutlich niedrigere maximale Austenitgehalte als berechnet erreicht. Zudem findet eine Verschiebung des Austenitmaximums zu $QT = 65\text{ °C}$ statt. Auch wenn der Einfluss von QT auf die globalen Austenitgehalte nur marginal ist, sind deutliche Veränderungen in der Morphologie der austenitischen Phase festzustellen. Abbildung 5 zeigt Lichtmikroskopie-Aufnahmen von charakteristischen Gefügen bei der Erhöhung von QT. Beim Abschrecken auf Raumtemperatur und nachfolgendem Partitionieren dominiert der feine lamellare Austenit (hell) zwischen den Martensitlanzetteln im Gefüge. Dieser bildet sich nach Yuan et al. [3] während des Partitionierens an Austenit-Martensit- und Martensit-Martensit-Korngrenzen und führt zu einem Ansteigen der Austenitgehalte von 11% auf 41% (XRD), bzw. 33 % (LIMI). Bei dem als „kinetic freezing“ bezeichneten Effekt diffundiert Kohlenstoff schnell aus dem übersättigten Martensit in Richtung Austenit. Da die Diffusionsgeschwindigkeit von Kohlenstoff im Austenit deutlich geringer ist, kann er sich nicht schnell genug in diesem verteilen [8]. Es kommt zu Anreicherungen von Kohlenstoff an den Korngrenzen, wodurch eine Austenit-Reversion stattfindet. Dieser feine, lamellare Austenit kann eine Dicke von wenigen Nanometern erreichen, was einen Nachweis mittels lichtmikroskopischer Methoden verhindert.

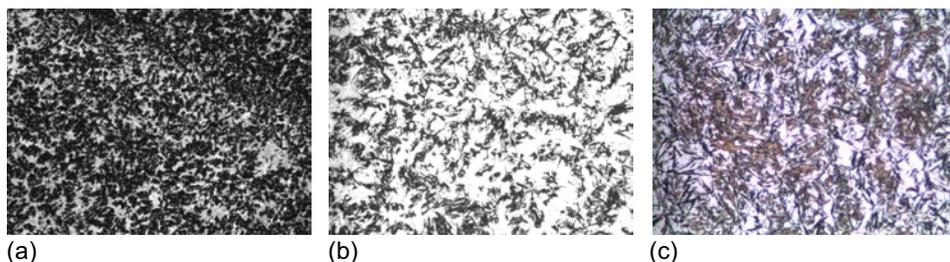


Abbildung 5: Lichtmikroskopieaufnahmen (500x) nach Ätzung Mittels Beraha II: (a) $QT = 25\text{ °C}$, (b) $QT = 65\text{ °C}$ (c) $QT = 90\text{ °C}$. Austenit – weiß, angelassener Martensit – schwarz, frischer Martensit – braun.

Durch das Erhöhen der Abschrecktemperatur bildet sich weniger Martensit im ersten Abschreckvorgang. Als Folge sind auch im finalen Gefüge große, globulare Austenitgebiete die dominierenden Phasenbestandteile. Da weniger Austenit-Martensit- und Martensit-Martensit-Korngrenzen vorhanden sind, nimmt der Einfluss der Austenit-Reversion an den Korngrenzen auf die finalen Austenitgehalte ab und die Stabilisierung von Restaustenit dominiert. Jedoch werden auch die Diffusionswege des Kohlenstoffs bei steigender Austenitkorngröße größer. Dies und der niedriger werdende, zur Verfügung stehende Kohlenstoff erschwert die Stabilisierung von Austenit bei erhöhter QT. Auch die in Abbildung 6 dargestellten Karbidausscheidungen während des Anlassens verringern zusätzlich den globalen Kohlenstoffgehalt im Gefüge. Ein vollständiges Unterdrücken von konkurrierenden Reaktionen ist somit nicht möglich, wodurch die Stabilisierung des Austenits zusätzlich verringert wird.

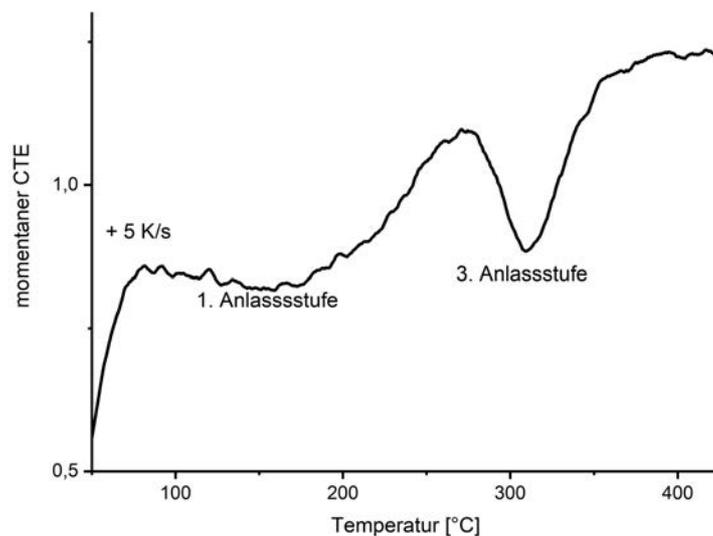


Abbildung 6: Differentielle Längenänderung einer auf Raumtemperatur abgeschreckten Probe: Ausscheidung von Karbiden in der 1. und 3. Anlassstufe beim Aufheizen auf 450 °C.

Zusammenfassung und Ausblick

- Bei der Anwendung der Q&P-Wärmebehandlung auf den martensitischen Stahl 1.4034 hat die Abschrecktemperatur auf die finalen Austenitgehalte einen geringen Einfluss.
- Es findet eine Überlagerung von Austenit-Reversion und Stabilisierung von Restaustenit statt. Bei niedrigeren Abschrecktemperaturen dominieren die Austenit-Reversion und die Bildung von feinem, lamellarem Austenit an den Korngrenzen. Höhere Austenitgehalte führen zu größeren Restaustenitkörnern, weniger Korngrenzen und längeren Diffusionswegen des Kohlenstoffs.
- Der globale Kohlenstoffgehalt wird zusätzlich durch die Ausscheidung von Karbiden während des Partitionierens reduziert.

In zukünftigen Untersuchungen sollen die Auswirkungen von $QT < \text{Raumtemperatur}$ und zusätzlichen Legierungselementen auf die Reversion und Stabilisierung von Austenit untersucht werden.

Danksagung

Die Arbeiten innerhalb des ZAFH InSeL wurden durch die Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg finanziell unterstützt, wofür wir uns an dieser Stelle herzlich bedanken.

Literatur

- [1] T. Hickel, S. Sandlöbes, R.K.W. Marceau, A. Dick, I. Bleskov, J. Neugebauer, D. Raabe, Impact of nanodiffusion on the stacking fault energy in high-strength steels, *Acta Materialia* 75 (2014) 147–155.
- [2] R. Elliott, K. Coley, S. Mostaghel, M. Barati, Review of Manganese Processing for Production of TRIP/TWIP Steels, Part 1: Current Practice and Processing Fundamentals, *JOM* 70 (5) (2018) 680–690.
- [3] L. Yuan, D. Ponge, J. Wittig, P. Choi, J.A. Jiménez, D. Raabe, Nanoscale austenite reversion through partitioning, segregation and kinetic freezing: Example of a ductile 2GPa Fe–Cr–C steel, *Acta Materialia* 60 (6-7) (2012) 2790–2804.
- [4] J. Speer, D.K. Matlock, B.C. de Cooman, J.G. Schroth, Carbon partitioning into austenite after martensite transformation, *Acta Materialia* 51 (9) (2003) 2611–2622.
- [5] D.K. Matlock, J.G. Speer, Third Generation of AHSS: Microstructure Design Concepts, in: A. Haldar (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Microstructure and texture in steels: And other materials*, February 5-7, 2008, Jamshedpur, India, Springer-Verlag London Ltd, Guildford, Surrey, 2009, pp. 185–205.
- [6] D.V. Edmonds, K. He, F.C. Rizzo, B.C. de Cooman, D.K. Matlock, J.G. Speer, Quenching and partitioning martensite—A novel steel heat treatment, *Materials Science and Engineering: A* 438-440 (2006) 25–34.
- [7] C.F. Jaczak, *Retained Austenite and its Measurement by X-ray Diffraction*, SAE Transactions (1980) 1657–1676.
- [8] J.G. Speer, D.V. Edmonds, F.C. Rizzo, D.K. Matlock, Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 8 (3-4) (2004) 219–237.

Innovationen bei der Identifikation von Werkstoffen

Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky^{°*}

Prof. Dr.-Ing. Kai Oßwald[°]

Prof. Dr.-Ing. Claus Lang-Koetz^{*}

[°]Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien

^{*}Institut für Industrial Ecology

Hochschule Pforzheim

Abstract

Die genaue Bestimmung von Werkstoffen ist sowohl für produzierende als auch für Unternehmen der Entsorgungswirtschaft von hoher Relevanz. Der Vortrag stellt neue Ansätze aus den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Hochschule Pforzheim vor: Das für metallische Werkstoffe bewährte Verfahren der Funkenidentifikation wurde mit Hilfe moderner Messtechnik so modifiziert, dass nun ein schnelles, genaues und vergleichsweise preiswertes Verfahren bereitsteht. Dieser Ansatz kann z. B. zur Teilautomatisierung manueller Sortierarbeitsplätze der Schrottwirtschaft dienen. Für Polymerwerkstoffe wird ein Markierungssystem auf Basis anorganischer Additive vorgestellt. Diese in ppm-Konzentrationen zugemischten Additive emittieren nach Anregung im Infraroten sichtbares Licht („Anti-Stokes“-Fluoreszenz) und stellen so neben den konventionellen, produkt- oder werkstoffabhängigen Trennmerkmalen ein werkstoffunabhängiges Trennmerkmal bereit. Erste Erfahrungen mit dieser Technik für Verkaufsverpackungen liegen bereits vor.

Innovationen bei der Identifikation von Werkstoffen

Die Kreislaufführung von Werkstoffen generiert in Deutschland einen relevanten Beitrag zur Volkswirtschaft: Im Jahr 2016 lag der Umsatz der (umsatzsteuerpflichtigen) Entsorgungswirtschaft mit insgesamt 28.000 Beschäftigten bei etwa 31 Mrd. Euro. Davon machte die Recyclingwirtschaft mit 10,9 Mrd. Euro einen Anteil von 35 % aus [Destatis 2017]. Die wichtigsten Stoffströme der Recyclingwirtschaft sind dabei neben den Fe-Metallen (ca. 20 Mio Mg) und NE-Metallen (ca. 1,2 Mio Mg) auch Kunststoffe (ca. 6 Mio Mg), Papier (ca. 15 Mio Mg), Glas (ca. 2 Mio Mg), aber auch Textilien (ca. 1,3 Mio Mg) und Holz (ca. 7,7 Mio Mg) sind relevante Abfallströme. Hinzu kommen ca. 0,8 Mio Mg Elektroaltgeräte und ca. 0,25 Mio Mg Batterien und Akkumulatoren sowie ca. 0,5 Mio Mg Altfahrzeuge und 250 Mio Mg mineralische Abfälle [BDE 2018]. Insgesamt gelangten so in 2015 knapp 400 Mio Mg Abfälle in die Entsorgungswirtschaft, aus denen mit 195 Mio Mg Sekundärrohstoffen und (Ersatz)Brennstoffen knapp die Hälfte im Inland genutzt wurde (Abbildung 1).

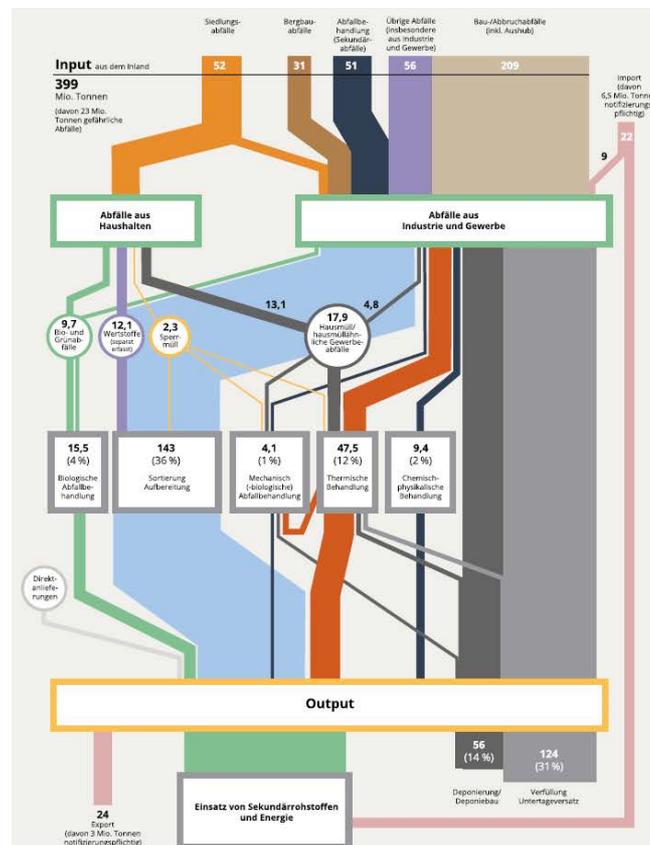


Abbildung 1: Stoffströme in der Abfallwirtschaft in Deutschland 2015 [BDE 2018]

Die Verwertungsquoten der Stoffströme erfüllen derzeit formal sowohl die deutschen als auch die europäischen Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft (Abbildung 2). Allerdings werden die derzeitigen Verfahren zur Bestimmung der (derzeit rein massenbezogenen) Verwertungsquoten als auch deren Höhen diskutiert und hinterfragt. Ein wichtiger Treiber ist die Europäische Union, die mit ihrem „Kreislaufwirtschaftspaket“ (Circular Economy Package) eine Intensivierung kreislaufwirtschaftlicher Ansätze vorantreiben will.

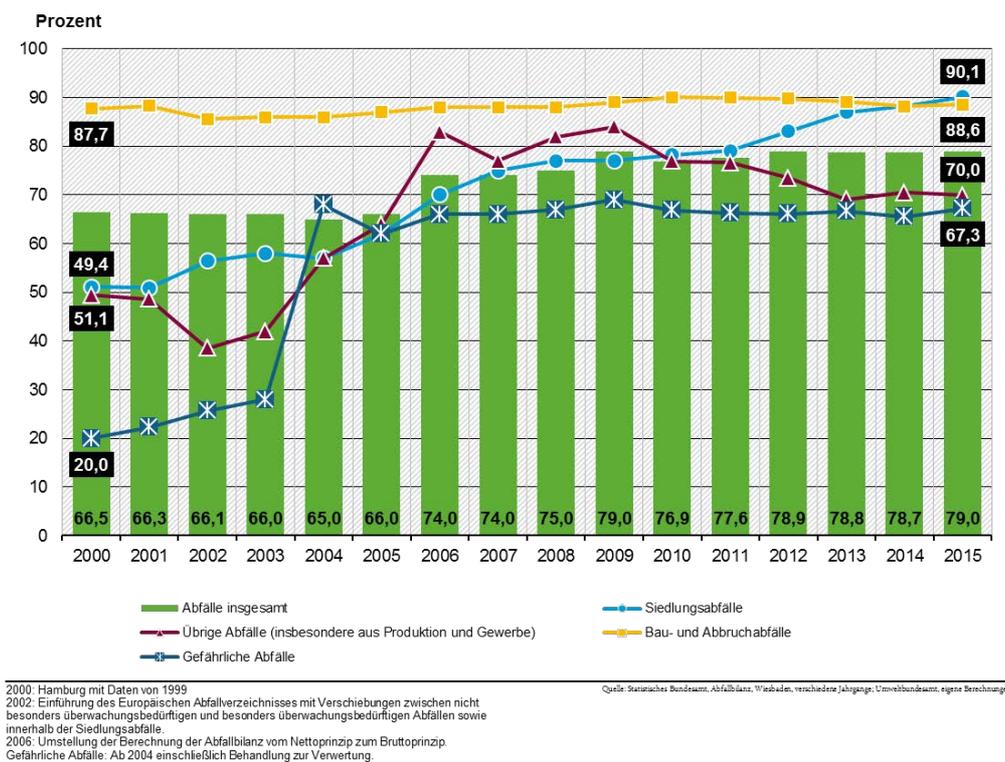


Abbildung 2: Verwertungsquoten der wichtigsten Abfallarten in Deutschland [UBA 2018]

Die Europäische Kommission sieht das Ziel der Kreislaufwirtschaft darin, „[...] den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen innerhalb der Wirtschaft so lange wie möglich zu erhalten und möglichst wenig Abfall zu erzeugen.“ Um dieses Ziel zu erreichen, wird eine Überwachung und Quantifizierung der derzeitigen Stoffströme gefordert, um auf dieser Grundlage neue Prioritäten festlegen zu können. Insgesamt werden zehn Indikatoren für die Kreislaufwirtschaft definiert, von der Selbstversorgung der EU mit Rohstoffen bis hin zur Anzahl kreislaufwirtschaftsrelevanter Patente. Als ein wichtiges Element wird die Materialflussbetrachtung angesehen, die alle Rohstoffe (nach Materialkategorien aggregiert) und ihre Bewegung von ihrer Gewinnung bis zur endgültigen Beseitigung im europäischen Wirtschaftsraum beschreibt (vgl. Abbildung). Vorläufige Zahlen (für EU28 in 2014) liegen bei etwa 8 Mrd. Mg Rohstoffen auf der Input-Seite, die zur Produktion und Energieerzeugung dienen, und 2,2 Mrd. Mg Abfällen in Europa, von de-

nen 0,6 Mrd. Mg als Sekundärrohstoffe erneut Einsatz finden. Die Kommission schließt daraus: *„Diese Aspekte weisen auf ein erhebliches Verbesserungspotenzial hin, das genutzt werden kann, indem insbesondere der Anteil der Materialien, die zu Sekundärrohstoffen recycelt werden, erhöht und das Abfallaufkommen verringert wird.“* [COM 2018]. Auch in anderen Veröffentlichungen wird diese Diskrepanz zwischen Abfallaufkommen und erneut eingesetzten (Sekundär-) Rohstoffen diskutiert, hierfür wird der Begriff „Circularity gap“ verwendet und eine globale Recyclingrate von 9,1 % über alle Werkstoffe abgeschätzt [de Wit et al. 2018].

Die Europäische Union verfolgt derzeit in ihrem „Circular economy package“ einen sehr wirtschafts- und wertschöpfungsorientierten Ansatz und adressiert neben den Themenbereichen Produktion und Konsum vor allem die Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft: Es ist die Erhöhung der Recyclingquoten auf 65 % bei Hausmüll und auf 75 % bei Verpackungsabfällen bis 2030 vorgesehen. Auch sollen Qualitätsstandards für Sekundärrohstoffe geschaffen und Harmonisierungen der rechtlichen Regelungen an der Schnittstelle zwischen Chemikalien-, Abfall- und Produktrecht vorgenommen werden. Als prioritäre Handlungsfelder der Kreislaufwirtschaft werden auf europäischer Ebene die Stoffströme Kunststoffe, Lebensmittelabfälle, Kritische Rohstoffe, Bau- und Abbruchabfälle sowie Biomasse/biobasierte Produkte genannt [COM 2018a]. Die Entsorgungswirtschaft reagiert auf solche Ankündigungen und formuliert in einem Bericht des Bundesverbandes der Deutschen Entsorgungswirtschaft: *„Die Kreislaufwirtschaft stellt sich zunehmend darauf ein, dass sich die Anforderungen und Spezifikationen von Abnehmern der Materialien weiter differenzieren und damit die Trenntiefe und Qualität dieser Materialien erhöht werden müssen. Die Materialvielfalt und neue Materialien auf Produktseite erfordern einen deutlich steigenden Sortier- und Aufbereitungsaufwand. Daraus leitet sich die Notwendigkeit einer noch engeren Verzahnung von Produktions- und Kreislaufwirtschaft ab.“* [BDE 2018, S. 90]

Aus Sicht der Aufbereitungstechnik bestehen für die Bereitstellung von sekundären, wie auch von primären Rohstoffen grundsätzlich die Aufgaben der Anreicherung der Wertkomponente in einem Haufwerk (Änderung der Stoffzusammensetzung) sowie die Einstellung der auf die nachfolgenden Verfahren abgestimmten physikalischen Eigenschaften, insbesondere der Korngröße (Änderung der Stoffeigenschaften). Für die Anreicherung sind insbesondere die Sortierung (nach Dichte, magnetischen, elektrischen, Benetzungs- oder optischen Eigenschaften) und Löse-/Laugprozesse relevant. [Schubert 1989]. Im Folgenden werden Forschungsansätze und -ergebnisse für die Sortierung von Eisenlegierungen und von Kunststoffen vorgestellt

Trenntechniken für Metalle: Funkenidentifikation

In einer Studie für die Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen (BDSV) wird formuliert: *„Hochfeste Stahllegierungen sowie Materialverbunde müssen in Zukunft großtechnisch im Idealfall legierungsspezifisch getrennt werden, hierbei nimmt die Stahlrecyclingbranche eine zentrale Rolle ein und kann in Zukunft das Branchenwissen sowie eine etablierte Infrastruktur nutzen, um Dissipationseffekte von Legierungselementen zu verhindern sowie die Qualität sicherzustellen.“* [Hiebel 2016, S. 28]

Das hochwertige Recycling von Metallen erfordert Einrichtungen, die die Wertmetalle einschließlich der Legierungsbestandteile sicher und schnell bestimmen. Altbewährte Analyseverfahren sind die Schleiffunkenprobe und die rein optische Lichtbogen-Metallspektroskopie, die in Handarbeitsplätzen zum Einsatz kommen. Sie erfordern langjährige Erfahrung der Mitarbeiter. Ziel der Forschungsarbeiten im Rahmen des Vorhabens „Automatisierte Metallidentifikation für die Kreislaufwirtschaft (AMIKA)“ ist es, die Machbarkeit eines Arbeitsplatzes für eine einfache, schnelle und robuste Metallsortierung zu prüfen, der die wichtigsten Vorteile der manuellen Sortierung mit denen spektroskopischer Analysegeräte verbindet. Damit soll die Kreislaufschließung im Bereich metallischer Rohstoffe, insbesondere bei HSS-Legierungen unterstützt und so verhindert werden, dass hochwertige, mittelpreisige Schrotte aufgrund hoher Sortier- und Identifikationsaufwände exportiert und so dem regionalen Wertschöpfungskreislauf entzogen werden. Das Vorhaben wird gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg im Programm „Förderung des Technologietransfers im Themenfeld „technologischer Ressourcenschutz“.

Die Schleiffunkenprobe stellt ein in der Handhabung einfaches Verfahren zur Analyse von Metallen dar. Dabei wird das zu untersuchende Werkstück mit einem schnell bewegten Schleifmittel in Berührung gebracht. Die Betrachtung der dabei entstehenden Funkenbilder ermöglicht geübten Nutzern die Identifikation des Werkstoffs. Die spektrometrische Messung der Schleiffunken der im Rahmen der Arbeit relevanten Werkstücke ergab nahezu identische kontinuierliche Spektren, die durch fehlende charakteristische Spektrallinien nicht zur Werkstoffbestimmung geeignet sind.

Mit einem Lichtbogen-Metallspektroskop lässt sich durch elektrische Entladung mit einem Lichtbogen Material von elektrisch leitenden Werkstücken (Metalle) verdampfen, ionisieren und anschließend mit einem Spektroskop beobachten: Nach Zünden des Lichtbogens durch einen Fußtaster fällt dessen Licht in das Spektro-

skop und gelangt zum Okular, in dem man die Spektrallinien der jeweiligen Werkstoffprobe bestimmen kann. Im Gegensatz zu den gemessenen Spektren der Schleiffunken sind in den Spektren der Lichtbögen charakteristische Spektrallinien zu erkennen. Die Messungen aller Werkstücke wurden in einen Trainingsdatensatz (60 %) und einen Testdatensatz (40 %) aufgeteilt. Obwohl die Spektren sich stark ähneln, war es für fünf der elf Legierungen möglich anhand der Testdatensätze Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Werkstoffe zu identifizieren. Es wurde ein entsprechender Demonstrator-Arbeitsplatz konzipiert und bei dem Projektpartner Cronimet aufgebaut (Abbildung 3).

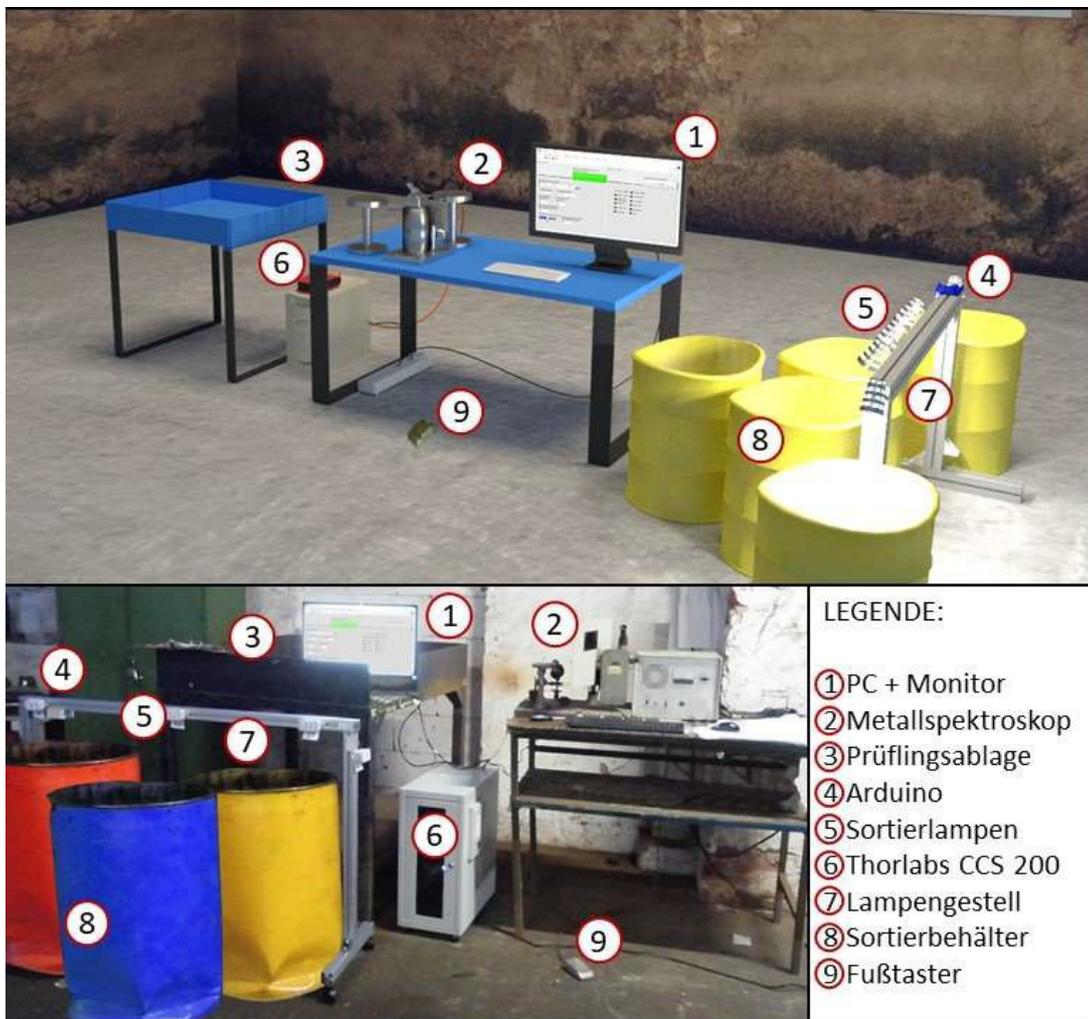


Abbildung 3: 3D-Modell (oben) und Aufbau des Demonstrator-Arbeitsplatz bei Cronimet (unten) [Fritz 2018]

Für das Kooperationsprojekt AMIKA arbeitete die Hochschule Pforzheim eng mit dem Metallrecyclingspezialisten CRONIMET Ferroleq. GmbH in Karlsruhe, sowie dem Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung, Darmstadt (IGD) zusammen.

Trenntechniken für Kunststoffe: Tracer Based Sorting

„Automatisierte Verfahren wurden in der Abfallwirtschaft zunächst im sichtbaren Licht für die Glassortierung (Farbsortierung bzw. das Abtrennen opaker Partikel) eingesetzt [Martens 2016], später auch für die Weiterentwicklung der Verpackungssortierung von einer Artikel- zur Werkstoffsortierung [Habich 2014]. Heute werden über sichtbares Licht hinaus auch weitere Strahlungsbereiche und physikalische Eigenschaften bei der Sortierung angewendet. Die Verbesserung der Sortierung erfolgt zum einen durch die Nutzung mehrerer Wellenlängenbereichen (Hyperspektralanalyse), zum anderen durch die Kombination mehrerer Sensoren (Multisensorik). So kommt z. B. bei der Sortierung von PET-Verpackungen eine Kombination von NIR- und VIS-Sensoren¹ zum Einsatz, um die Kunststoffsorte abzutrennen. Auch bei der Sortierung von Mahlgütern ist bereits eine Trennung nach Flake-Farben möglich. Die sensorgestützte Sortierung kann insgesamt für die Bereiche der Kunststoffarten- und Glassortierung, bei der Kunststoff-Metall-Sortierung sowie für die Sortierung von Metall-Monofraktionen, von Holz, Leiterplatten, und Papier sowie bei Baumischabfällen als Stand der Technik gelten. [Martens 2016] (Tabelle 1).

Die spektrometrischen Systeme der Sortierung im Bereich des nahen Infrarot und des sichtbaren Lichtes sind in der Abfallwirtschaft am weitesten verbreitet. Typische Verpackungs-Sortieranlagen nutzen 15 bis 20 dieser NIR-Systeme für die Trennung von Kunststoffen (PE, PP, PS, PET). Die besondere Herausforderung besteht hier in steigenden Qualitätsanforderungen in Verbindung mit schwankender Inputqualität, die zunehmend den Einsatz mehrstufiger Sortierkombinationen erfordert. Derzeit existieren jedoch praxisrelevante Trenaufgaben, die auch die spektroskopische Sortiertechnik nicht löst. Ein konkretes Anwendungsbeispiel für die Ergänzung bestehender Sortiertechnik wäre die Differenzierung von HDPE-Flaschen aus unterschiedlichen HDPE-Typen. Kunststoffverpackungen können auch kreislaufeinschränkende Ausrüstungsmerkmale aufweisen, die sich negativ auf die Eigenschaften der gewonnenen Rezyklate auswirken und die nicht in der konventionellen Sortierung und Aufbereitung abtrennbar sind. Auch bei Verpackungen, die stofflich identisch sind, kann ein Interesse bestehen zu trennen, z. B. nach Verwendungsart der Verpackung (Food/non-Food).

Tabelle 1: Sortiertechnologien und damit mögliche Sortierungen

Sortier-technologie	Wellenlänge	Material-eigenschaft	Mögliche Sortierungen
NIR-Spektroskopie (Reflexion)	780 – 3.000nm	Absorptionsbanden Moleküle	Kunststoffsorte (z. B. PE, PP, PET)
VIS-Spektroskopie	400 – 780nm	Farbe	Metalle, Papier
CCD-Farbkamera	400 – 1.000nm	Farbe, Form	Metalle, Glas
Elektromagnetischer Sensor		Elektrische Leitfähigkeit	Metalle, Schrott, Elektronik
Röntgen-Fluoreszenz-Spektroskopie (RFA)	0,0001 – 1nm	Chemische Zusammensetzung	Metalle, Erze
Laser & Kamera	200 – 1.000nm	Farbe, Fluoreszenz	Glas, Lebensmittel
Wirbelstromabscheider		Leitfähigkeit (induzierte Spannung)	Nichteisenmetalle
Permanentmagnet (Neodym)		Ferro- und Paramagnetismus	Eisen, Eisenoxide
Schwimm-Sink-Verfahren		Dichte	Kunststoffe

Eine Ausweitung des werkstofflichen Recyclings von Verpackungskunststoffen und die Lösung der vorgenannten Herausforderungen könnte über das „Tracer-Based Sorting“ (TBS) erfolgen. Es basiert auf speziellen Substanzen, die unter bestimmten Bedingungen fluoreszieren und als Marker (in sehr geringen Mengen) zur Kennzeichnung von Kunststoffverpackungen genutzt werden. Ein weiterer Vorteil Ansatzes ist, dass im alltäglichen Gebrauch weder die Sonne noch andere Lichtquellen intensiv genug sind, um die sichtbare Fluoreszenz zu erzeugen. Daher können Verpackungen durch Nutzung eines spezifischen Fluoreszenz-Markers entsprechend ihres wirtschaftlichsten Verwertungspfad gekennzeichnet werden.

Dabei kann die Kennzeichnung grundsätzlich sowohl im Packstoff als auch auf der Verpackungs-Dekoration erfolgen. Die markierte Verpackung wird in einem der derzeitigen Sortiertechnik nachgeschalteten Schritt aus dem angereicherten Gutstrom (z. B. aus Flaschen-Ballenware) abgetrennt. Im abgetrennten Strom kann die Marker enthaltende Verpackungs-Dekoration abgelöst und zur Wiederverwertung bereitgestellt werden. So leistet die TBS-Technologie einen erheblichen Beitrag zur Ausweitung des werkstofflichen Recyclings, indem hochwertige, sortenreine oder sogar typenreine Polymerströme für eine Verwertung aussortiert werden. Tracer Based Sorting (TBS) ist als Ergänzung zu konventionellen Trennkonzepthen einsetzbar. Hier sind verschiedene Positionen in der Wertschöpfungskette vorstellbar, an denen TBS zum Einsatz kommen kann (Abbildung 4). Die Auswahl der geeigneten Position für TBS in der Wertschöpfungskette ist mit der Strategie der

Aufbringung des Tracers eng verknüpft: Auf Flake-Ebene (Position D) wird man nur dann sortieren können, wenn der Tracer in der Kunststoffmatrix eingebunden ist oder schwer trennbar auf der gesamten Oberfläche haftet. Auf den Positionen A bis C ist eine Aufbringung des Tracers auf Teil-Oberflächen sowie auf Etiketten denkbar (Abbildung 5).

Positionierungsoptionen für TBS bei der Verpackungsverwertung

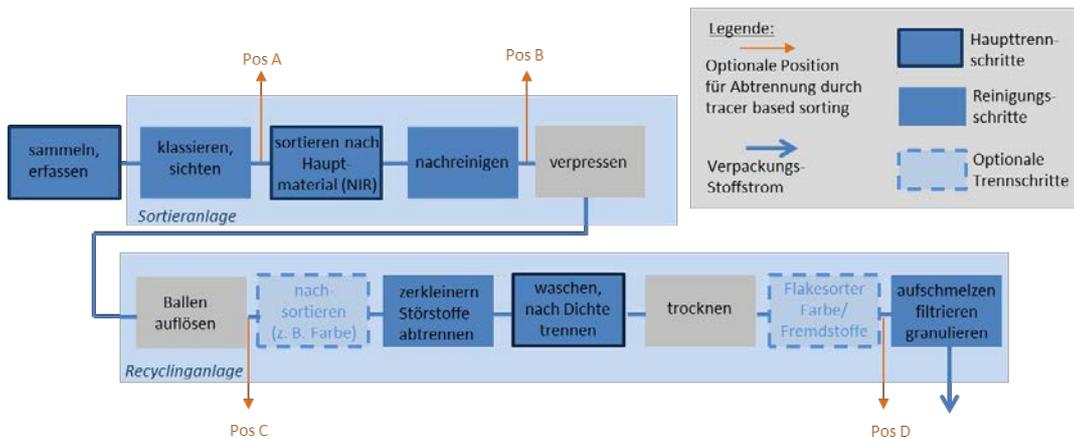


Abbildung 4: Positionierungsoptionen für TBS im Sortier- und Aufbereitungsprozess der Verpackungsverwertung



Abbildung 5: Einsatz von Markermaterialien auf Etiketten und im Packstoff (Bildnachweis: Fa Polysecure)

Für Tracer-Based Sorting (TBS) ist der Bereich der Fluoreszenz relevant, der günstig und schnell mit elektromagnetischer Strahlung (z. B. mit Laserdioden, LEDs) angeregt und mit einfachen Detektoren (z. B. mit Kamerachips) in Millisekunden zerstörungsfrei nachgewiesen werden kann. Die eingesetzten Leuchtstoffe sind Materialien mit einem hohen Wirkungsgrad zwischen Anregung und Emission (Quantenausbeute), so dass bereits Spuren (1-100 ppm) genügen, um eine charakteristische Fluoreszenz nachweisen zu können (Abbildung 4). Neben der „klassischen“ Stokes-Fluoreszenz (Anregungswellenlänge ist kleiner als Emissionswellenlänge) mit Quantenausbeuten im zweistelligen Prozentbereich gibt es auch die sogenannte Anti-Stokes-Fluoreszenz (Upconversion-Fluoreszenz). Hierbei werden zwei und mehrere Photonen gesammelt, bevor ein höher energetisches Photon emittiert wird. Dadurch kann z. B. im IR-Bereich angeregt und im sichtbaren Bereich emittiert und detektiert werden. Es werden zwar nur Quantenausbeuten im einstelligen Prozentbereich erreicht, das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ist jedoch i. A. deutlich besser als bei der Stokes-Fluoreszenz.

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Förderkennzeichen 033R195A geförderten Verbundvorhaben „Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen (MaReK)“ arbeiten unter Leitung der Hochschule Pforzheim die Firmen Polysecure GmbH (Freiburg), Werner & Mertz GmbH (Mainz), das Unternehmen Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH (Köln), das Institut für Mikrostrukturtechnik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Unterauftragnehmer CMO-SYS GmbH und Nägele Mechanik GmbH sowie als assoziierter Partner Umwelttechnik BW GmbH (Landesagentur für Umwelttechnik und Ressourceneffizienz Baden-Württemberg) zusammen. Gefördert wird es mit etwa 2 Millionen Euro Fördergeldern des BMBF im Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA3) in der Fördermaßnahme „Plastik in der Umwelt“. Technischer Kern des vorgeschlagenen Vorhabens ist die Entwicklung und Erprobung einer Kombination aus Verpackungskennzeichnung und darauf abgestimmtem Sortierverfahren zur Gewinnung sortenreiner Kunststoffe. Dieser Ansatz wird ergänzt durch die verwertungsorientierte Qualifikation der gewonnenen Rezyklate. Die technische Fragestellung ist eingebettet in einen Entwicklungsprozess, der die relevanten Stakeholder des Verpackungs-Stoffstroms einbezieht, neben den technischen auch wirtschaftliche und Umweltaspekte untersucht (Nachhaltigkeitsorientierung) und auf eine Verbesserung der Governance-Ansätze für den Umgang mit Verpackungen in Deutschland abzielt. [Woidasky 2017]

Danksagung und Quellenangaben

Die Autoren danken den Fördermittelgebern Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (Vorhaben „AMIKA“) und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung mit der Projektträgerschaft PTJ („MaReK“). Dank gilt auch den Projektpartnern Cronimet Ferroleg., v. a. Martin Geisler, Neyir Sevilimis vom Fraunhofer IGD und den Mitarbeitenden der Hochschule an diesen Vorhaben, darunter Christian Klinke, Alexander Becker, Ingo Lochmahr, Benjamin Fritz, Markus Schleicher und Christian Schober. Die Verantwortung für diese Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

[BDE 2018] Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V. (BDE, Hrsg.): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2018 – Einblicke und Aussichten. Berlin, 2018

[COM 2018] Europäische Kommission (Hrsg.): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über einen Überwachungsrahmen für die Kreislaufwirtschaft. COM (2018) 29 final, Straßburg, 16.1.2018

[COM 2018a] Europäische Kommission (Hrsg.): Circular Economy – Implementation of the Circular Economy Action Plan – 2018 Circular Economy Package. http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm, aufgerufen 30.7.2018

[de Wit et al. 2018] de Wit, M.; Hoogzaad, J., Ramkumar, S., Friedl, H.; Douma, A.: The circularity gap report. Januar 2018, <https://www.circularity-gap.world/report>, aufgerufen am 30.7.2018

[Destatis 2017] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Umsätze in der Energie-, Wasser- und Entsorgungswirtschaft 2016 um 9,8% niedriger als 2015. Pressemitteilung Nr. 472 vom 21.12.2017. https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/12/PD17_472_432.html, aufgerufen am 30.7.2018

- [Fritz 2018] Fritz, Benjamin (2018): Entwicklung eines Arbeitsplatzes zur Identifikation von Metallen im Recyclingprozess. Masterthesis vorlegt an der Hochschule Pforzheim, April 2018.
- [Habich 2014] Habich, U., Beel, H.: Modifizierung von Recyclingverfahren durch sensorbasierte Sortierung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe. Band 7. TK-Verlag, Neuruppin, 2014, S. 471–482
- [Hiebel 2016] Hiebel, M.; Nühlen, J.: Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott (Zukunft Stahlschrott), Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Onlinefassung der Kurzstudie im Auftrag der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V.
- [Martens 2016] Martens, H.; Goldmann, D.: Recyclingtechnik. 2. Auflage. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2016, S. 57f.
- [Schubert 1989] Schubert, H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Band I. 4. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1989
- [UBA 2018] Umweltbundesamt (Hrsg.): Verwertungsquoten der wichtigsten Abfallarten in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertungsquoten-der-wichtigsten-abfallarten>; aufgerufen am 30.7.2018
- [Woidasky 2017] Woidasky, Jörg; Heyde, Michael; Sander, Immo; Moesslein, Jochen; Fahr, Martin; Richards, Bryce; Turshatov, Andrey; Lang-Koetz, Claus: Hochwertiges Recycling durch Tracer-Nutzung. Mit dem „Tracer-Based-Sorting“-Ansatz sollen Verkaufsverpackungen zielgerichtet aus dem Abfallstrom abgetrennt werden. In: ReSource, 30. Jahrgang 2017, Heft 4, 2017, S. 24–28. Rhombos-Verlag, Berlin, ISSN: 1868-9531.

Pforzheimer
Werkstofftag
2018

Stand der Technik und industrielle Anwendungen in der Ultraschallprüfung

Roger Marhöfer

GE Sensing & Inspection Technologies GmbH

Das Unternehmen

Die Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH mit ihrem deutschen Hauptsitz in Hürth bei Köln stellt Ultraschallanlagen und Tragbare Ultraschallgeräte her. Das Angebot umfasst ca. 5000 Standard-Ultraschallprüfköpfe, aber natürlich auch Prüfköpfe, die nach Kundenwunsch gefertigt werden.

Weiterhin umfasst der Standort Hürth ein Servicecenter für Ultraschallgeräte und Endoskope.

Weiterhin gibt es in Deutschland Standorte in Hannover und in Ahrensburg werden Röntgen-CT-Anlagen für die Industrie entwickelt und gefertigt. In Ahrensburg werden sowohl Durchleuchtungsanlagen als auch tragbare Röntgenanlagen für die Industrie gefertigt.

Die konventionelle Ultraschallprüfung

Mittlerweile ist die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit Ultraschall mehr als 60 Jahre alt. Aus den ersten Versuchen, mit Hilfe von Ultraschall-Schwingungen in den verschiedensten Materialien Fehler aufzuspüren, ist ein klassisches Prüfverfahren geworden, das auf Messungen beruht, die unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflussgrößen durchgeführt werden. Heute verlangt man von der Ultraschallprüfung, unterstützt durch die enormen Fortschritte in der Gerätetechnik, reproduzierbare Prüfergebnisse innerhalb enger Grenzen.

Das setzt die genaue Kenntnis der Einflussgrößen voraus und die Fähigkeit, sie exakt in die Prüftechnik einfließen zu lassen. Nicht immer sind alle Einflüsse so gravierend, dass der Prüfer sie berücksichtigen muss. In vielen Fällen kann der eine oder andere Einfluss vernachlässigt werden, ohne dass die Messtoleranzen die erlaubten Grenzen überschreiten. Dadurch vereinfacht sich der Prüfablauf und die Prüfzeit wird reduziert.

Trotzdem gehört die Zukunft dem qualifizierten Ultraschallprüfer, der seine Aufgaben verantwortungsbewusst durchführt und ständig bemüht ist, sein Wissen auf den neuesten Stand der Technik zu bringen.

Warum „Ultraschall“ zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung?

Neben den Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Werkstückoberflächen, dem Farbeindring- und Magnetstreufverfahren, kannte der Praktiker bis zum Anfang der fünfziger Jahre nur die Durchstrahlungsprüfung (mit Röntgengerät oder radioaktiven Isotopen) als Verfahren zum Nachweis von inneren Fehlern.

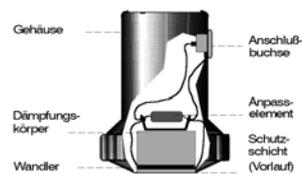
Nach dem zweiten Weltkrieg wurde das von Sokolov 1935 erstmals beschriebene und von Firestone 1940 angewandte Ultraschallverfahren weiterentwickelt, so dass schon bald brauchbare Geräte für die Werkstoffprüfung mit Ultraschall zur Verfügung standen. Das Prinzip der Ultraschallprüfung beruht auf der Tatsache, dass insbesondere feste Stoffe Schallwellen gut weiterleiten.

Dabei wird die Welle nicht nur an den Begrenzungsflächen eines Werkstückes reflektiert, sondern auch an inneren Fehlstellen (Materialtrennungen, Einschlüssen, usw.). Die Wechselwirkung der Schallwelle mit dem Material ist umso stärker, je kleiner die Wellenlänge, also je höher die Frequenz der Welle ist.

Funktionsweise

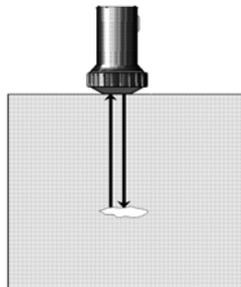
Auffinden von Ungängen

Das eigentliche „Werkzeug“ des Ultraschallprüfers ist der Prüfkopf



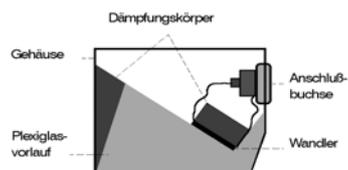
Senkrechtprüfkopf (Schnitt)

Quelle: Grundlagen der Ultraschallprüfung Sonderdruck KK 218



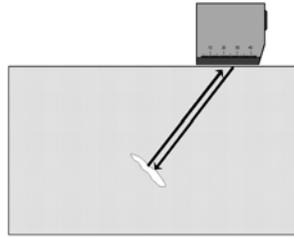
Flächiger Fehler – Senkrechtprüfkopf

Quelle: Grundlagen der Ultraschallprüfung Sonderdruck KK 218



Winkelprüfkopf (Schnitt)

Quelle: Grundlagen der Ultraschallprüfung Sonderdruck KK 218



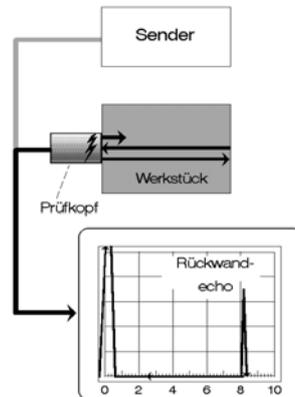
Flächiger Fehler – Winkelprüfkopf

Quelle: Grundlagen der Ultraschallprüfung Sonderdruck KK 218

Der piezoelektrische Wandler, angeregt durch eine extrem kurze, elektrische Entladung, sendet einen Ultraschallimpuls aus. Der gleiche Wandler erzeugt andererseits wieder ein elektrisches Signal, wenn er durch ein ankommendes Schallsignal zu schwingen beginnt. Der Prüfkopf wird mit einer Flüssigkeit oder einer Koppelpaste an die Werkstückoberfläche angekoppelt, damit die Schallwellen vom Prüfkopf in das Werkstück übertragen werden können.

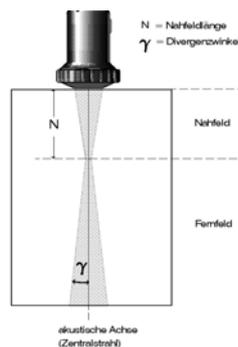
Dann tastet der Prüfer das Werkstück ab, d.h. er bewegt den Prüfkopf gleichmäßig auf der Oberfläche hin und her. Dabei achtet er auf Signale, die durch Reflexion von inneren Ungängen oder wie im Bild unten durch eine planparallele Rückwand kommen könnten.

Jeder Prüfkopf hat eine bestimmte Richtwirkung, d. h. die Ultraschallwellen erfassen nur einen bestimmten Ausschnitt des Prüfstücks. Der für die Ultraschallprüfung wirksame Bereich heißt das Schallbündel, das charakteristisch für den benutzten Prüfkopf und den Werkstoff ist, in dem sich die Schallwellen ausbreiten. Ein Schallbündel lässt sich grob in einen konvergenten (fokussierenden) Bereich, dem Nahfeld, und einen divergenten (auseinanderlaufenden) Bereich, dem Fernfeld, unterteilen.



Rückwandecho bei Skt.8

Quelle: Grundlagen der Ultraschallprüfung Sonderdruck KK 218



Schallbündel

Quelle: Grundlagen der Ultraschallprüfung Sonderdruck KK 218

Die Länge N des Nahfeldes (Nahfeldlänge) und der Öffnungs- oder Divergenzwinkel hängen vom Durchmesser des Wandlers, seiner Frequenz und der Schallgeschwindigkeit des Ausbreitungsmediums ab. Den Mittelstrahl bezeichnet man als die akustische Achse. Bei der Auswahl eines Prüfkopfes zur Lösung einer bestimmten Prüfaufgabe, spielt die Form des verwendeten Schallbündels natürlich eine wichtige Rolle. Oft reicht es jedoch aus, nur die akustische Achse zu zeichnen, um zu zeigen, wie die Lösung einer Prüfaufgabe aussieht.

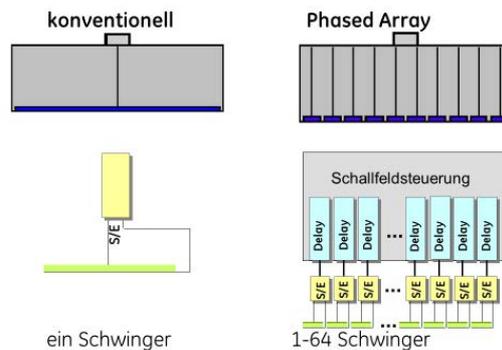
Wellenarten, die für die Ultraschallprüfung interessant sind

Die meisten Standard-Senkrechtprüfköpfe senden und empfangen **Longitudinalwellen (Druckwellen)** Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sich die Schwingungen in Form von Verdichtungen und Verdünnungen in allen Materialien (Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen) ausbreiten. Senkrechtprüfköpfe gibt es in großer Auswahl in den unterschiedlichsten Größen mit Frequenzen von ca. 0,5 MHz bis 25 Mhz. Man kann mit ihnen Reichweiten bis 10 m und mehr erzielen und somit auch die größten Werkstücke prüfen. Die meisten Standard-Winkelprüfköpfe senden und empfangen aus technischen Gründen **Transversalwellen** oder **Scherwellen**. Bei einer Transversalwelle schwingen die Atome (Moleküle) senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle, da die Anregung durch Scherkräfte (quer zur Ausbreitungsrichtung gerichtete Kräfte) erfolgt. Transversalwellen haben außerdem die Eigenschaft, dass sie **nur in festen Stoffen** auftreten können, also niemals in Flüssigkeiten und Gasen, da diese keinen Schermodul besitzen, also hier auch keine Scherkräfte wirken können. Darüber hinaus breiten sie sich wesentlich langsamer aus, als die Longitudinalwellen im gleichen Werkstoff.

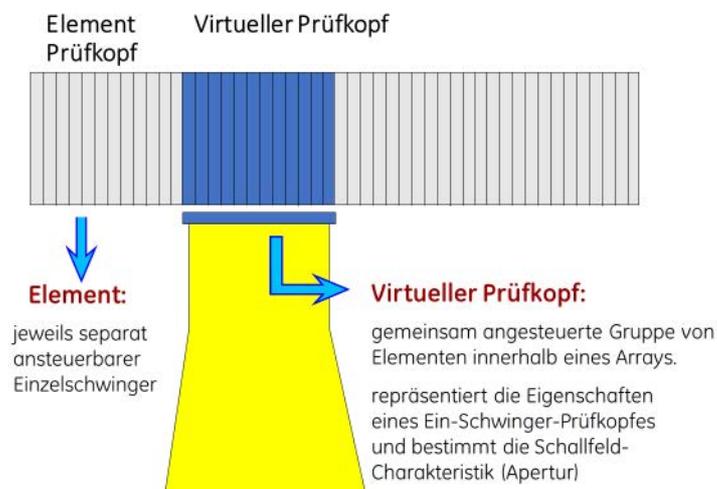
Die Phased Array Technik

Das Prinzip der Phased Array Technik

Wir vergleichen einen konventionellen Schwinger mit einem Array. In diesem Array sind 64 einzelne Elemente vereint. Jedes der einzelnen Elemente stellt einen eigenen Ultraschallschwinger mit seiner definierten Größe dar.

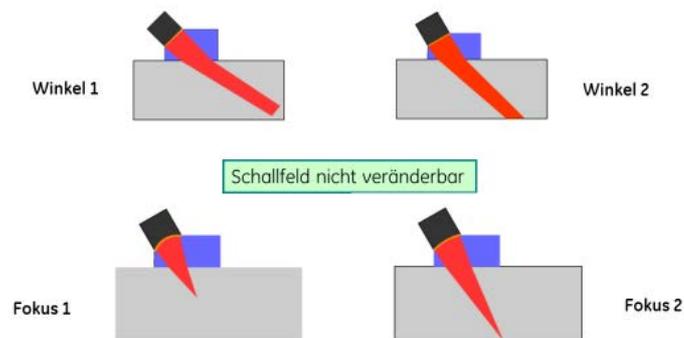


Die einzelnen Elemente des Arrays werden zeitlich versetzt angesteuert. Es ist auch möglich einzelne Gruppen innerhalb eines Arrays nacheinander anzusteuern. Sie bilden mit ihrer Gesamtgröße die Größe des einzelnen Schwingers ab.



Einschwinger-Prüfköpfe mit Festwinkel bzw. Festfokus

für jeden Winkel und für jeden Fokus wird ein separater Prüfkopf benötigt

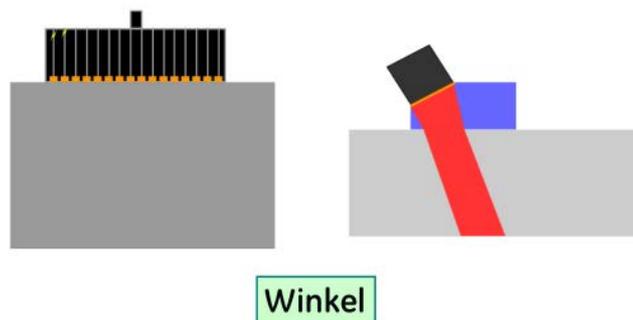


Einschwinger-Prüfköpfe besitzen einen festen Fokus und einen festen Nennwinkel. Werden mehrere Fokustiefen und mehrere Einschallwinkel für eine Prüfung benötigt, müssen verschiedene Prüfköpfe zur Ultraschallprüfung eingesetzt werden.

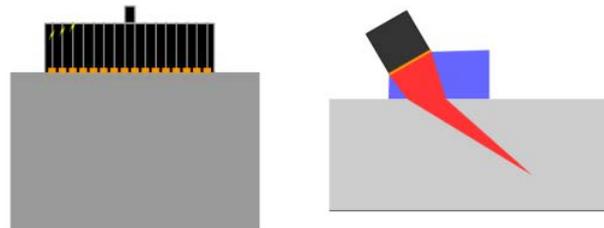
Phased Array Schallfeld-Ausbildung

(Steuerung von Fokus und Winkel)

in diesem Fall: alle Elemente werden für die Apertur genutzt



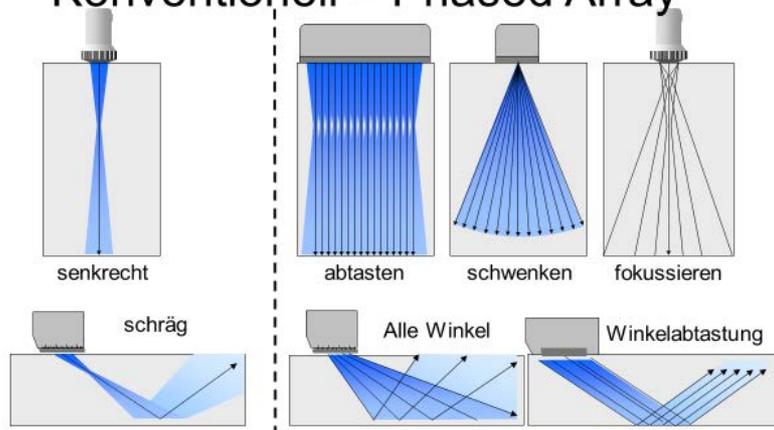
Phased Array Schallfeld-Ausbildung



Winkel und Fokus

Die Phased Array Prüfung erlaubt uns Winkel und Fokus in einem Prüfkopf zu verändern, wie es die Prüfaufgabe abverlangt.

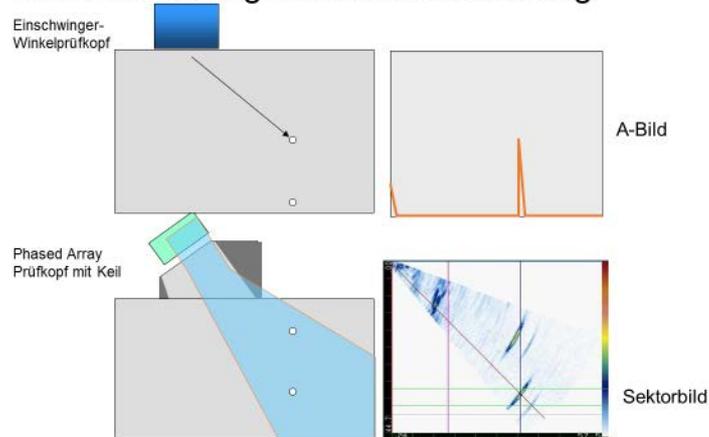
Konventionell – Phased Array



5

Bei einem Phased Array Prüfkopf mit linearer Anordnung der Einzelemente werden in der Regel bis 128 Elemente eingesetzt. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass bestimmte Bereiche nicht durch die Verschiebung des Prüfkopfes überprüft werden können, so wie es bei der konventionellen Prüftechnik erfolgt, sondern durch Verschiebung des Schallfeldes über die Länge des Prüfkopfes. Der Prüfkopf bleibt auf einer Stelle stehen.

Winkelabtastung mit Sektordarstellung



4

Die Grafik zeigt die Darstellung bei konventioneller Prüftechnik (A-Bild) oben mit festem Winkel. Es kann nur ein Reflektor im A-Bild dargestellt werden. Bei der Verschiebung des Prüfkopfes nach hinten kann nur der untere Reflektor im A-Bild dargestellt werden.

Im unteren Bild dargestellt, bei gleicher Prüfkopfposition können beide Bohrungen im Sektorbild dargestellt werden. Der nutzbare Winkelbereich erstreckt sich von ca. 35° bis 75°.

Zusammenfassung

Die Phased Array Technik bietet wesentliche Vorteile gegenüber der konventionellen Ultraschallprüfung.

Entscheidend für den Einsatz der PA Technologie sind die Materialkosten, und die Prüfkosten, gegeben durch den sehr viel höheren Zeitaufwand bei der konventionellen Prüfung.

Die automatisierte Phased Array Technologie bedarf vor jeder Inbetriebnahme eine Validierung durch den Auftraggeber. Somit werden die Forderungen, die durch ein Lastenheft gegeben sind, vor Inbetriebnahme einer Anlage erfüllt.

Bei der manuellen Phased Array Prüfung (PAUT) möchte man sich weitestgehend an europäische Normen und Regelwerke anlehnen.

Diese sind bisher noch nicht alle auf ihren Weg gebracht worden. Somit greifen vielfach die europäischen Produktnormen und Durchführungsnormen für die konventionelle Ultraschallprüfung.

Zurzeit wird vornehmlich die PAUT in Unternehmen angewandt, die die Ultraschallprüfung zur eigenen Qualitätsabsicherung einsetzen. Hier wird die PAUT in den meisten Fällen applikationsbezogen eingesetzt.

Energieeffiziente Variothermie im Kunststoffspritzguss

Dipl.-Ing. Michael Däbritz (CEO)

B. Eng Daniel Koch (Entwicklung)

F&E, Varioplast Konrad Däbritz GmbH (Ötisheim)

Abstract

Spritzgießteile sollen im Zuge der Energie- und Ressourceneinsparung immer leichter und dünner werden, das stellt Hersteller vor große Herausforderungen. Es gilt, ein geringes Gewicht und sehr kleine Wanddicken mit einer hohen mechanischen Stabilität in Einklang zu bringen.

Durch eine geringer werdende Wanddicke erhöht sich das Fließweg-Wanddicken-Verhältnis. Dies ist aber nur in begrenztem Umfang möglich, denn um die geforderten hohen 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 allerdings durch die Maschinenauslegung bestimmt.

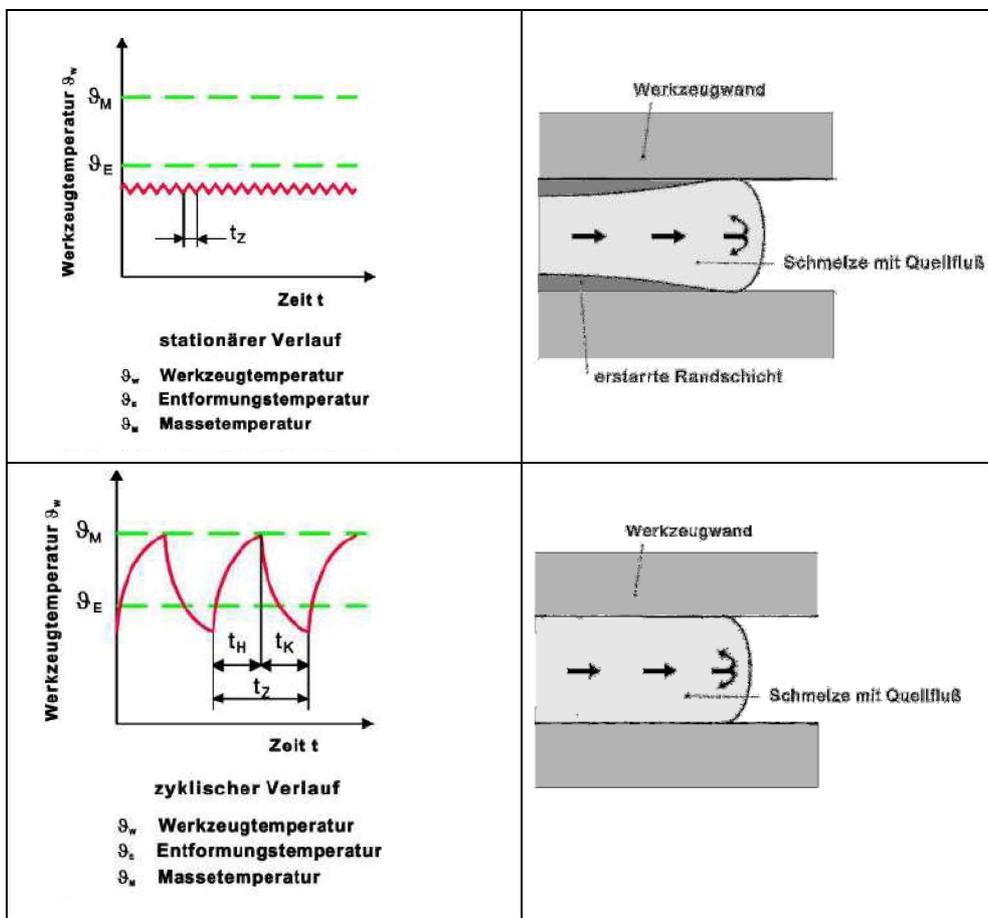
Dazu kommen steigende Anforderungen an die Qualität der Oberflächen, zum einen aus Designgründen, z. B. klavierlackähnliche Oberflächen, zum anderen zur Herstellung von Mikrostrukturen, wie sie z. B. für Blut-Analysegeräte, für feingearbte Oberflächen oder für den Lotuseffekt gebraucht werden. Es besteht also die Forderung nach

1. geringerem Werkstoffeinsatz, verbunden mit Gewichtseinsparung und Volumenreduzierung,
2. Ressourceneinsparung in der Fertigung,
3. Erzielen des endgültigen Finishes in einem Fertigungsverbund Spritzgießen/Weiterbearbeitung,
4. anspruchsvolleren Werkstoffen, die bei kleinen Wanddicken hohen Festigkeiten aufweisen,
5. Erzielung einer hohen Abbildungsgenauigkeit bei feinen Strukturen (Medizintechnik, Nanostrukturen wie Lotuseffekt o.Ä.),
6. Im Hinblick auf Folgeprozesse, wie beispielsweise die Veredelung von Oberflächen am Kunststoffteil durch das PVD-Beschichtungsverfahren, ist die Oberflächengenauigkeit von entscheidender Bedeutung. Kann die Oberfläche in einer Spiegelglanzqualität ohne Fehler dargestellt werden, kann auf eine Lackierung zum Erreichen der erforderlichen Oberflächengüte verzichtet werden.

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

Variothermie 4.0 – Turbotherm®

Verfahren zur dynamischen Werkzeugtemperierung im Spritzzyklus sind schon seit längerer Zeit bekannt und im Einsatz. Die bisher entwickelten Verfahren unterscheiden sich teilweise stark in ihrem jeweiligen Wirkprinzip und ihrer Handhabung.



Das von Varioplast in Zusammenarbeit mit der Hochschule Pforzheim entwickelte neue Verfahren ist in die Gruppe der externen Systeme einzuordnen, d. h. es kann auch nachträglich an jedem bestehenden Werkzeug ohne weiteres eingesetzt werden.

Neu ist hierbei das verwendete Medium zur Wärmeübertragung, nämlich gewöhnliche Luft mit einer Temperatur von bis zu 900°C. Diese wird unter definierten

geometrischen Bedingungen über eine formspezifische Düse, bei größtmöglicher Turbulenz, auf den erforderlichen Bereich der Kavitätsoberfläche aufgebracht. Durch die große Temperaturdifferenz zwischen Luft (bis 900°C) und Stahloberfläche der Kavität (i. d. R. 30-150°C), hoher Strömungsgeschwindigkeit und dadurch hohem Grad an Turbulenz, wird ein optimaler Wärmeübergang erreicht. Dies resultiert in einer kurzen Zeitspanne zum Erreichen der erforderlichen Oberflächentemperatur an der Kavität. Es wird aktuell ein Temperaturanstieg von 5-12 K/sec erreicht. Die erforderliche Heizdauer ist somit anwendungsabhängig und hängt im Wesentlichen von der Ausgangstemperatur der Kavität, der erforderlichen, werkstoffabhängigen Zieltemperatur und der Oberflächenstruktur im Erwämbereich ab. So erhöht sich mit steigender Rauheit auch der übertragbare Wärmestrom.

Eigenschaften des Turbotherm® Verfahrens

Die Vorteile des neuen Verfahrens sind umfangreich. Zum einen wird durch die Kombination unterschiedlicher Maßnahmen ein durchschnittlicher Leistungsbedarf von nur ca. 1,4 kW beim 3,6 kW-650°C-Modul erreicht, welches ideal geeignet ist um in kurzer Zeit den optischen Effekt z. B. einer Bindenaht zu beseitigen. Die Einflusszone beträgt hier \varnothing 50-70 mm. Wird eine kleinere bzw. größere Fläche benötigt, kann die Leistung entsprechend skaliert werden. Verfügbare Leistungen liegen zwischen 400 W und 40 kW, aufgeteilt in fünf Baugrößen. Dabei können Lufttemperaturen von bis zu 900°C erzeugt werden: bei Volumenströmen von 20-3000 L/min am Düsenausgang. Jedoch ist auch hier der durchschnittliche Bedarf aus dem Druckluftnetz aufgrund technischer Maßnahmen um ein Vielfaches geringer (ca. 2 bis 200 L/min bei 6 bar).

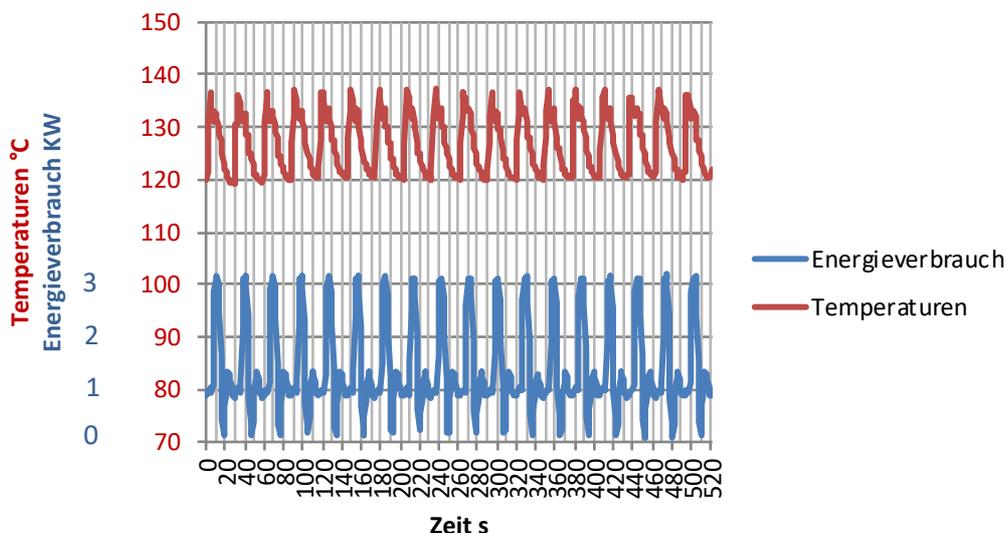


Abbildung 1: Verlauf von Werkzeugtemperatur und elektrischer Leistung

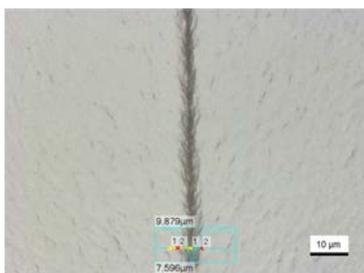


Abbildung 2: Bindenaht aus konventionellem Verfahren



Abbildung 3: Bindenaht optimiert durch Turbotherm®

Neue Materialkonzepte und Funktionalisierung im Dialog für intelligente Strukturen und Ressourceneffizienz

Prof. Dr.-Ing. Ingolf Müller ¹⁾

Philipp Bauer M.Sc. ¹⁾²⁾

¹⁾ Hochschule Pforzheim,
Fakultät für Technik, Bereich Maschinenbau
Professur für Festigkeitslehre und Leichtbau

²⁾ LCT – Lightweight & Composite Technologies,
Eriskirch (Bodensee)

Kurzfassung

Ressourceneffizienz, Reduktion der CO₂-Emissionen und Erhöhung von Nutzlasten bei gleichzeitig hoher Sicherheit, gesteigerter Wirtschaftlichkeit, intelligenter Funktionalität und zunehmendem Komfort – das sind die zentralen Herausforderungen, denen sich der Maschinenbau und insbesondere die Automobilindustrie derzeit gegenüberstellt. Zur Erreichung dieser Ziele, auch mit Blick auf das angestrebte autonome Fahren, haben neue Materialkonzepte eine Schlüsselstellung. Hierbei liegt der Fokus nicht nur auf dem Einsatz neuer oder alternativer Werkstoffsysteme, sondern – im besten Falle – auf der Verknüpfung dieser Materialien mit der Elektrotechnik, der Informatik und der Adaptronik, um leichte, lastoptimierte Bauteile mit neuartigen, intelligenten Funktionen zu ermöglichen. Besonders gut lassen sich solche neuen Materiallösungen auf der Basis von speziell angepassten endlosfaserverstärkten Kunststoffen erschaffen.

Auf der anderen Seite steht eine Reihe von traditionellen und modernen Werkstoffsystemen wie hochfeste Stähle, Leichtmetalle, Kunststoffe und faserverstärkte Kunststoffe im Wettbewerb zueinander. In Abhängigkeit der wesentlichen Konzeptparameter – mechanische/thermische Anforderungen, Kosten, Stückzahl, Bauweise, etc. – muss eine systematische Werkstoffauswahl des am besten geeigneten Materials erfolgen. Die jeweilige konkrete Anwendung und Bauweise gibt das optimale Materialkonzept vor. Dementsprechend sind für zukünftige Konzepte häufig Mischbauweisen zu erwarten, die für spezielle Funktionen die Eigenschaften bestimmter Werkstoffe gezielt zur Funktionsdarstellung nutzen. Hieraus ergeben sich neben den zu erwartenden Vorteilen eine Reihe von Herausforderungen wie Fügetechnik (Auslegung, Automation und Handhabung), physikalische/chemische Unterschiede („Delta Alpha“-Problematik, Korrosion), etc., die detaillierte Betrachtungen und zweifellos weitere Entwicklungen, gerade auch im Bereich der numerischen Simulation und Produktionstechnik, erfordern.

Im Folgenden sollen überblicksartig grundlegende Thesen zur Entwicklung von Materialsystemen für den intelligenten Leichtbau diskutiert werden, die im Rahmen des Vortrages erweitert und mit Beispielen veranschaulicht werden.

Status Quo

Die Bedeutung von Leichtbau hat sowohl im Automobilbau als auch im allgemeinen Maschinenbau in den vergangenen Jahren erheblich gewonnen. Der starke Trend ergibt sich einerseits aus dem Kundenwunsch nach geringerem Energieverbrauch und damit Kostenreduktion, ist aber auch im Automobilbereich verbunden mit den vor der Tür stehenden Strafzahlungen der Hersteller bei Nichteinhaltung der Grenzwerte von CO₂-Emissionen. Dazu kommt das Umdenken der Gesellschaft hinsichtlich eines nachhaltigen Umgangs mit vorhandenen Energieressourcen.

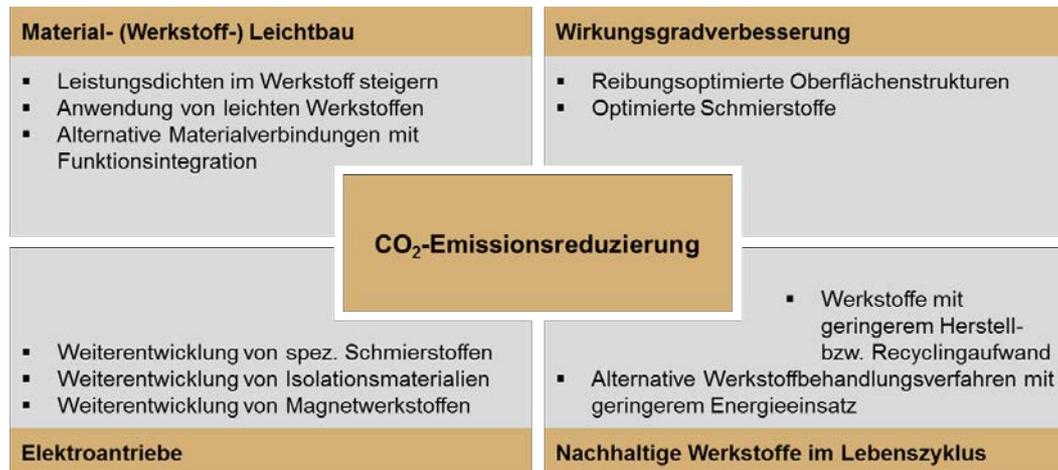


Abbildung 1: Typische werkstofftechnische Herausforderungen zur Reduktion von CO₂-Emissionen im Automobilbau

Bei aktuellen Leichtbaustrukturen werden häufig mit Blick auf die Ressourceneffizienz bislang noch keine optimalen Ergebnisse erzielt. Hier werden zumeist verhältnismäßig teure Leichtbauwerkstoffe eingesetzt, deren Struktur- und Fertigungskonzepte längst nicht komplett entwickelt und optimal umgesetzt sind. Folgende Punkte lassen sich gerade im Automobilbereich beobachten:

- hoher Materialeinsatz/geringe Materialausnutzung
 - durch nicht lastgerechten Einsatz von anisotropen Materialien
 - häufig werden subtraktive Fertigungsprozesse angewendet, bei denen sich eine große Menge der hochwertigen Leichtbauwerkstoffe (beispielsweise hoher Verschnitt bei Faserverbundwerkstoffen) nicht im finalen Produkt wiederfindet, sondern als Abfall entsorgt werden muss

- häufig sind Leichtbaukonzepte für Massenanwendungen noch unwirtschaftlich
 - gerade im Pkw-Segment sind Kunden in der Regel nicht bereit einen Mehrpreis für Leichtbau zu zahlen
 - fehlende Prozesssicherheit und Fertigungseffizienz sind Kostentreiber
- Leichtbauansätze, insbesondere mit Faserverbunden, scheitern teilweise an fehlender Kundenakzeptanz
 - wenig hochbelastete Strukturbauteile aus Faserverbunden
 - Faserverbund als Sicherheitsbauteil im Fahrwerk bislang kaum im Einsatz bei Großserien

Der zukünftig noch zunehmende Kostendruck durch steigende Kundenerwartungen an Einsparungseffekte auf der einen Seite und an die Integration eines Mehrwertes durch Funktionsintegration, Weiterentwicklung, Ressourceneffizienz auf der anderen Seite verlangt zukünftig weitere Entwicklungen hin zu einem intelligenten und systematischen Leichtbau, der bereits grundlegend durch die Werkstoff- und Konzeptauswahl gestaltet wird. Bereits heute lassen sich eine Reihe von Trends für diese Entwicklungen erkennen, die im Folgenden kurz dargestellt werden sollen.

These #1: Leichtbau wird Wettbewerb der Werkstoffe

Eine weitere Verbesserung von Komponenten mit dem Ziel einer Performancesteigerung oder der Massereduktion des Gesamtsystems ist häufig allein mit metallischen Werkstoffen nicht mehr wirtschaftlich darstellbar. Mit Kurz- oder Endlosfasern verstärkte Kunststoffe stehen daher in vielen Bereichen, wie der massebezogenen Steifigkeit oder Festigkeit sowie der Design- und Gestaltungsvielfalt, in verschärftem Wettbewerb zu den metallischen Leichtbauwerkstoffen. Folglich erhält in letzter Zeit der Einsatz von faserbasierten Leichtbauwerkstoffen für automobiler Serienanwendungen mit größeren Stückzahlen zunehmende Aufmerksamkeit, insbesondere für Anwendungen im Bereich der Karosserie.

Für die hochbelasteten Bauteile von Fahrwerksstrukturen sowie die speziellen Anforderungen in Getrieben hingegen haben sich bislang nur vereinzelt Anwendungen von Faserverbundwerkstoffen durchsetzen können. Hierbei gelten vor allem fehlende oder ungenaue Materialkennwerte, aufwendige Auslegungs-, Erprobungs- und Freigabeprozesse, sehr lange Taktzeiten und damit verbundene hohe Fertigungskosten sowie mangelnde Prozesssicherheit für hohe Bauteilqualitäten immer noch als Hemmnis für den substanziellen Einsatz dieser Werkstoffe.

Aber auch im Bereich der Stahlwerkstoffe werden erhebliche Potenziale für Leichtbauanwendungen entwickelt. Beispielsweise lassen sich durch den Einsatz von Presshärten, d. h. Umformen und Härten in einem Schritt, präzise und hochfeste Produkte aus sehr dünnem Stahlblech herstellen. Auch die Anwendung von Sonder-Carbonitrier-Behandlungen zeigt ein deutliches Potential für Festigkeitssteigerungen beim Abwälzen, was eine geringere Baugröße zulassen würde.

Die Werkstoffauswahl spielt eine Schlüsselrolle für die Wirtschaftlichkeit und Funktionalität eines Produkts. Einerseits machen die Aufwendungen für den Werkstoff und dessen Verarbeitung einen wesentlichen Anteil der Produktkosten aus und andererseits muss der Werkstoff die Beanspruchungen sicher abtragen können.

Diese beiden Werkstoffanforderungen reichen in der Regel nicht aus, um heute ein wettbewerbsfähiges Produkt zu entwickeln. Hinzu kommt eine Reihe von Anforderungen, welche sehr stark durch die aktuellen Trends in der Gesellschaft und im Unternehmensumfeld geprägt werden. Dies sind beispielsweise Anforderungen an die Masse, an die Nachhaltigkeit oder an die Individualisierungsmöglichkeit eines Werkstoffs. Hinzu kommen Anforderungen aus der Gesetzgebung, aus der Umweltverantwortung und der fortschreitenden Globalisierung der Märkte.

Insofern ist einer ganzheitlichen Potenzialanalyse sowie einer systematischen Werkstoff- und Konzeptauswahl große Bedeutung für den späteren Produkterfolg beizumessen. Bei der grundlegenden Konzeptentwicklung stellt sich dabei häufig die Frage, welcher Werkstoff oder welches Werkstoffsystem am besten für die jeweilige Anwendung geeignet ist. Dies ist insofern nicht selten eine komplexe Aufgabe, da schätzungsweise 40.000 metallische und noch einmal so viele nicht-metallische Werkstoffe [1] als potentielle Konstruktionswerkstoffe zur Verfügung stehen und kommerziell verfügbar sind. Eine systematische Materialauswahl, beispielsweise anhand der Ashby-Systematik [1], bietet hier ein effektives Werkzeug, um das richtige Materialkonzept für ein Produkt zu finden.

These #2: Leichtbau wird Multi-Material-Design (MMD)

In den meisten Fällen führt die intelligente Kombination unterschiedlicher Werkstoffe im Produkt zu innovativen und zukunftsweisenden Lösungen, welche sowohl bei Leichtbau, Performance, Funktionsintegration und Wirtschaftlichkeit besondere Wirkung erzielen kann. Dieser sogenannte hybride Leichtbau – unter Einbeziehung faserverstärkter Materialien – steht momentan noch in den Anfängen seiner Anwendung und kann derzeit noch nicht sein volles Potenzial ausschöpfen. Eine Hybridisierung kann hierbei in vielerlei Hinsicht erfolgen: werkstoffhybride Strukturen, Material-Mix-Strukturen, fertigungshybride Strukturen etc. Allen diesen Ansätzen ist gemein, dass erhebliche Anforderungen an den Anwender gestellt werden – insbesondere auch bei der Auswahl eines geeigneten Konzeptes.

Es herrscht für jede Komponente bzw. an jeder Stelle eines Produktes der oben beschriebene Wettbewerb der Werkstoffe, um eine wettbewerbsfähige Lösung hinsichtlich Eignung, Performance, Lebensdauer, Kosten, Ökologie etc. zu erzielen. Falls dies gelingt entstehen Strukturen mit dem optimalen Werkstoff an jeder Stelle des Produktes.

Eine Multi-Material-Bauweise wirft neben den genannten Vorteilen auch eine Reihe von Problemen wie Fügetechnologien, unterschiedliche Wärmedehnungen der Werkstoffe („Delta Alpha“-Problematik), Kontaktkorrosion, Automatisierbarkeit, Recycling etc. auf. Ein wesentlicher Aspekt ist außerdem die Entscheidung wie viele unterschiedliche Werkstoffe in einer Struktur vereinigt werden sollen. Dieser Aspekt beschreibt das Spannungsfeld zwischen einem optimalen Materialeinsatz an jedem Ort einerseits und einer wirtschaftlichen Bauweise andererseits. Es hat sich gezeigt, dass in der Regel eine Zwei-Material-Struktur den Viel-Material-Konzepten vorzuziehen ist.

Neben der derzeitigen Problematik von hohen Werkstoff- und Fertigungskosten bei einer Multi-Material-Bauweise, verhindert insbesondere auch die mangelnde Integrationsfähigkeit der Fertigung in bestehende Prozesse aktuell noch einen breiten Einsatz. Dennoch sind derartige Konzepte als Schlüsseltechnologie für die zukünftige Produktentwicklung zu sehen und müssen entsprechend in allen relevanten Aspekten untersucht und beherrscht werden.

These #3: Leichtbau hat favorisierte Anwendungen

Im Bereich des Automobilbaus wurde der Leichtbau über Jahrzehnte vorwiegend für Pkw-Anwendungen betrieben und weiterentwickelt. Aufgrund der Kostenstruktur ist es derzeit allerdings kaum möglich für Pkw-Großserien Mehrkosten für Leichtbau durchzusetzen, so dass viele technische Möglichkeiten für die breite Anwendung derzeit ungenutzt bleiben. Zudem spielt auf Grund der Rekuperation und der zukünftigen Steigerung der Leistungsdichte bei den Energiespeichern der Leichtbau bei der aufkommenden Elektromobilität für Pkw eine geringere Rolle.

Völlig anders sieht das Bild für Anwendungen im Nutzfahrzeug aus. Hier werden in jüngster Zeit verstärkt Anwendungen zur Effizienzsteigerung auf der Basis von Leichtbaukonzepten entwickelt. Dabei erweisen sich Ziele und gesetzliche Vorschriften zur CO₂-Reduktion genauso als Treiber wie Wirtschaftlichkeits-erwägungen. Eine geringere Systemmasse erlaubt – angesichts einer begrenzten zulässigen Fahrzeuggesamtmasse – mehr Zuladung und kann so über Primär- und Sekundäreffekte (zum Beispiel weniger Transporte) die Wirtschaftlichkeit insbesondere für Massetransporte deutlich erhöhen. Der Kraftstoffverbrauch pro transportierte Tonne sinkt. Darüber hinaus sind Fahrzeugstrukturen deutlich weniger optimiert und an vielen Stellen noch stark überdimensioniert, so dass erhebliches Potential besteht. Im Rahmen des Vortrags werden einige herausragende Beispiele für Leichtbau im Nutzfahrzeug gezeigt.

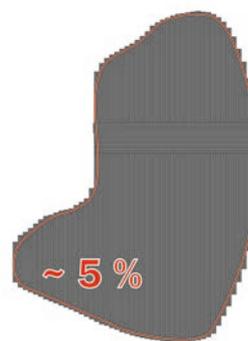
These #4: Leichtbau erfordert last- und materialgerechtes Design

In der öffentlichen Wahrnehmung spielt der Materialleichtbau die wichtigste Rolle. Bei diesem Ansatzpunkt werden konventionelle Werkstoffe (insbesondere Stahl) durch alternative Materialien mit höheren spezifischen Eigenschaften substituiert. Bei vielen Bauteilen wird sich der optimale Leichtbaueffekt aber mit reiner Materialsubstitution nicht erzielen lassen, wenn kein last- und materialgerechtes Design – angepasst auf das jeweilige Bauteil – gefunden wird. Insbesondere bei anisotropen Werkstoffen wie den Faserverbunden gilt es diese Eigenschaften vorteilhaft für das Bauteil zu nutzen und Faserorientierungen gezielt an den Beanspruchungen auszurichten. Damit lässt sich ein minimaler Einsatz der relativ teuren Ausgangsmaterialien erzielen und so akzeptable Produktpreise sichern.

Für die weitere Entwicklung der Faserverbundtechnologie bedeutet dies auch das Ersetzen von subtraktiven Prozessen (basierend auf Gelege- oder Gewebepahnen) durch additive Prozesse mit gezielter und gerichteter Faserablage unter methodischer Verwendung von Automatisierungslösungen.



Subtraktiver Prozess aus Gewebepahnen:
Verschnitt: ~ 50 %



Additiver Prozess aus Rovings / Tapes:
Verschnitt: ~ 5 %
Massereduktion durch lastgerechte Faserablage: ~ 25 %

Abbildung 2: Schematische Darstellung eines klassischen subtraktiven Prozesses gegenüber einem additiven Prozess bei der Herstellung von Faserverbundstrukturen

These #5: Leichtbau ermöglicht intelligente Strukturen für neue Anwendungen

In den letzten Jahren haben sich zahlreiche Verfahren und Systeme etabliert, bei denen Leichtbau-Strukturen – insbesondere aus Verbundwerkstoffen – zu mechatronischen Systemen erweitert werden. Hierbei werden für verschiedene Anwendungen aus den Bereichen Schadenserkennung [3], Restlebensdauerprognose [4], automatisiertes Fahren etc. Leiterbahnen, Sensoren und Aktoren sowie Energiegewinnungs- und Energiespeichersysteme in die Strukturen integriert, um damit neue Funktionalitäten darzustellen. Neben den eigentlichen Strukturkonzepten stehen in diesem Bereich zunehmend Fragestellungen der geeigneten Fertigungstechnik sowie der Betriebsfestigkeit und Dauerhaftigkeit im Fokus.



Abbildung 3: CFK-Struktur mit eingebettetem Sensor-Aktor-Netzwerk zur Schadenerkennung und Restlebensdauerprognose [3]

Ein weiterer Ansatz für intelligente Strukturen erlangt zunehmend an Bedeutung. Bei Faserverbundstrukturen lassen sich lokal biegeeweiche Bereiche insbesondere durch lokal modifizierte Harze und spezielle Faserausrichtungen erzeugen. Diese Techniken können verwendet werden, um gezielt Festkörpergelenke für anpassungsfähige Strukturen (adaptive/morphing structures) zu erzeugen. Derartige Mechanismen eignen sich beispielsweise hervorragend, um auf kleinstem Bau- raum ausfaltbare Strukturelemente zu generieren, die unter anderem als neuartige Crashelemente zur Verfügung stehen.

Die folgende Faltstruktur zeichnet sich beispielsweise dadurch aus, dass sich sehr schnell große Längenänderungen ($> 1000\%$) bei relativ kleiner Verringerung des Querschnitts (um 30%) erzielen lassen. Damit kann die Faltstruktur durch geringe Wege eines Aktors in einen tragfähigen Zustand versetzt werden, der anschließend große Verformungsmöglichkeiten bietet.



Abbildung 4: Konzept einer Faltstruktur mit möglicher Anwendung als neuartiges Crashelement

Ausblick

Im Rahmen des Vortrages sollen neben den grundlegenden Ansätzen und aktuellen Trends für neue, intelligente Werkstoffkonzepte vor allem an ausgewählten Beispielen ein Einblick zu Anforderungen, Funktionalitäten, Auslegung, Fertigung und Erprobung solcher Strukturen gegeben werden.

Wird dieser Weg erfolgreich weitergegangen, so lassen sich neue Materialkonzepte zu intelligenten, multifunktionalen Strukturen formen, die vielfältige Aufgaben vom Abtragen struktureller Lasten über das Leiten von elektrischen Signalen bis hin zur Selbstdiagnose ausführen. Hierdurch kann zweifellos ein vielfältiger Mehrwert und Ressourceneffizienz entstehen.

- [1] M. F. Ashby: Materials Selection in Mechanical Design. 3. Auflage. Elsevier – Butterworth & Heinemann. 2005.
- [2] J. Heimann, I. Müller, F. Langhorst, H. Bublies: Systemkompetenz und Leichtbau – Konzept einer Doppelachse für Lkw. ATZ 117, 05 / 2015.
- [3] I. Mueller, C. Larrosa, S. Roy, A. Mittal, K. Lonkar, F.-K. Chang: An Integrated Health Management and Prognostic Technology for Composites Airframe Structures. Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, San Diego CA. 2009.
- [4] S. Roy, I. Mueller, V. Janapati, S. Das, F.-K. Chang: Real-time Prediction of Impact-induced Damage for Composite Structures based on Failure Analysis and Efficient Database Methods. Proceedings of the SPIE Annual Conference on Smart Structures & NDE 2012, San Diego CA, Vol. 8348, 76501D. 2012.

Modern times need energy efficient modern materials

**Aron Kneer^a, M. Wirtz^a, S. Yurtsever-Kneer^a,
S. Barbe^b, A. August^{c,d}**

^aTinniT Technologies GmbH,
Essenweinstr. 25, 76131 Karlsruhe, Germany

^bTH Köln, Faculty of Applied Natural Sciences,
51368 Leverkusen, Germany

^cInstitute of Applied Materials, Karlsruhe Institute of Technology,
Strasse am Forum 7, 76131 Karlsruhe, Germany

^dInstitut für Digitale Materialforschung, Hochschule Karlsruhe –
Technik und Wirtschaft -
Moltkestr. 30, 76131 Karlsruhe, Germany

Abstract

Als Charlie Chaplin sich in seinem Film "Modern Times" mit der industriellen Produktion und den damit verbundenen Arbeitsbedingungen auseinandersetzte, wurde neben den sozialkritischen Aspekten einer modernen Produktion deutlich, dass Energiefragen für die Automatisierung von Anlagen- und Anlagenkomponenten weit im Hintergrund standen. Im Vordergrund des 1936 entstandenen Films stand der Bezug von Mensch zur Maschine. Inzwischen, nach mehr als einem dreiviertel Jahrhundert, nachdem die Automatisierung längst allgegenwärtig in der industriellen Praxis zu finden ist, werden Energie- und Ressourceneffizienz als wesentliche Merkmale einer nachhaltigen Produktion gesehen. Die Erkenntnis ist, dass nur eine umweltschonende Produktion und damit eine ressourcenschonende Produktion mit innovativen und energieeffizienten Materialien zukünftigen Generationen eine Klimakatastrophe ersparen kann. Die aktuellen Diskussionen um Industrie 4.0 lassen die automatisierte Produktion in einem digitalisierten Umfeld in einem neuen Licht erscheinen. Gleichzeitig wird im Zusammenhang mit diesen Diskussionen deutlich, dass neben den Aufgaben um effiziente Abläufe auch in den Materialien selbst ein wesentliches Potential für die Energieeinsparung gesehen wird. Wir befinden uns im Jahr 2036, "Modern Times" hat seinen hundertsten Geburtstag gefeiert. Materialien werden erdacht und als digitale Materialien produziert, die die Anforderungen an eine zu realisierende Physik, sei es Festigkeit, Wärme- und Stoffübertragung oder auch Elektromechanik zu erfüllen haben. Durch die additive Fertigung wie den 3D-Druck werden diese Materialien bedarfsgerecht hergestellt. Materialkomposite werden durch Algorithmen synthetisch als Druckvorlage hergestellt, so können Materialien direkt an den Bedarf angepasst werden. Wachstums- und Optimierungs-Algorithmen sorgen für eine dynamische Anpassung der Strukturen an geänderte Bedingungen: ein selbstregulierender Prozess für High-Tech-Materialien. Fiktion oder zukünftige Realität?

In dieser Abhandlung wollen wir auf dieses Thema näher eingehen und verschiedene synthetische Materialentwürfe für unterschiedliche Prozesse vorstellen. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie aus unterschiedlichen Geometrien, die aus völlig andersartigen Disziplinen entliehen sind, durch Kombination, Modifikation und Optimierung völlig neuartige Materialien geschaffen werden können. Darüber hinaus werden wir zeigen, wie digitale Modelle für numerische Berechnungen aufbereitet und einer Bewertung für unterschiedliche physikalische Prozesse unterworfen werden können - und dies geschieht lange im Vorfeld von experimentellen Untersuchungen. Welcome to modern times.

gestern - heute - morgen

„Gestern oder früher war die Welt noch in Ordnung“. Dies oder Ähnliches hört man bei diversen Gesprächen mit älteren Leuten, die oftmals im Geschwindigkeitsrausch der technologischen Errungenschaften ihren Platz verloren haben. Sie erinnern sich an eine Welt im wirtschaftlichen Wachstum, die Umwelt weitgehend intakt, das Klima lädt zum Urlaub ein, die soziale Marktwirtschaft schafft ein fragiles Gleichgewicht zwischen Ökonomie, Gesellschaft und Sozialem. Als der Club of Rome im Jahre 1972 durch den Bericht „Grenzen des Wachstums“ [1] ins Scheinwerferlicht der Weltöffentlichkeit geriet und zwar mit der zentralen Aussage, dass schwindende Rohstoffe und massive Verschmutzung bei gleichbleibendem Wachstum zu einem Kollaps der globalen Systeme führen würde, war man schockiert. Inzwischen wird in diesem Zusammenhang vom ökologischen Fußabdruck der Menschheit gesprochen, den diese auf der Erde hinterlässt. Die Autoren des Berichts "Grenzen des Wachstums" vom Massachusetts Institute of Technology beschäftigten sich mit den Themen Bevölkerungswachstum, Rohstoffverbrauch, Rohstoffressourcen und Umweltverschmutzung. Sie legten bereits 1972 Hochrechnungen auf Basis des World3-Modells vor, die insbesondere die Parameter Bevölkerungswachstum, industrielles Wachstum, Nahrungsmittelproduktion und Grenzen des Ökosystems der Erde miteinander kombinieren. Die Ergebnisse dieser Studie sind jetzt nach fast 50 Jahren durchaus plausibel, wenn auch das Computermodell durch statische Parameter die komplexen und dynamischen Zusammenhänge nicht genau genug erfassen konnte.

Charlie Chaplin als Fabrikarbeiter in seinem Film "Modern Times" wirkt in diesem als Verlierer und mehr noch als Opfer technischer Entwicklungen. Durch die Situationskomik im Zusammenhang mit der automatischen „Füttermaschine“ (siehe Abb. 1) werden die technischen Fortschritte zudem in Frage gestellt. Im Zentrum der Kritik steht die seit der industriellen Revolution bedeutende Frage wie die Interaktion von Mensch und Maschine „menschlicher“ gestaltet werden kann. Energie- und Umweltfragen stehen hierbei noch im Hintergrund. Wie konnte er auch wissen, dass 36 Jahre später zusätzliche und zudem globale Probleme als ernstzu-



Abb. 1: Charlie Chaplin in "Modern Times" als Versuchskandidat für einen Essautomaten [2].

nehmende Prognose aufgezeigt werden. Wenn wir nun einen Bogen von "Modern Times" nach heute spannen, dann müssen wir feststellen, dass die Welt von heute an Komplexität derart zugenommen hat, dass die verschiedenen Parameter, die das Weltklima beeinflussen nur schwer erfasst werden können. Neben dem Bevölkerungswachstum, das eine industrialisierte Landwirtschaft nach sich zieht, können wir eine enorme Zunahme an globaler Mobilität auf dem wirtschaftlichen wie auch privaten Sektor beobachten. Weltweit vernetzte Konzerne mit global verteilten Produktionsstätten für die Herstellung von Maschinen, Komponenten, Konsumgütern etc. benötigen Energie- und Materialressourcen (Rohstoffe), Umweltressourcen (Wasser, Luft, Boden) sowie umfängliche Transportressourcen. Die Konsumenten, wir Menschen, zumindest in den reichen Industrienationen, haben uns an einen Energiestandard gewöhnt, der es uns erlaubt nahezu an jedem Ort Energieressourcen zu nutzen und wir sehen dies als selbstverständlich an. Die Finanzmärkte dominieren den weltweiten Handel und stellen ein nicht unerhebliches Risiko im globalen Wirtschaftssystem dar (siehe Finanzkrise 2008). Der Weltenergieverbrauch, sowie der Verbrauch an Ressourcen nimmt weiter zu und damit verbunden ist die Produktion von CO₂ (u. a.) als Treibhausgas. Abb. 2 zeigt den weltweiten Energieverbrauch in Abhängigkeit der Energieträger und eine Prognose für die nächsten Jahrzehnte. Der Anteil der erneuerbaren Energieträger ist weltweit gesehen noch sehr gering.

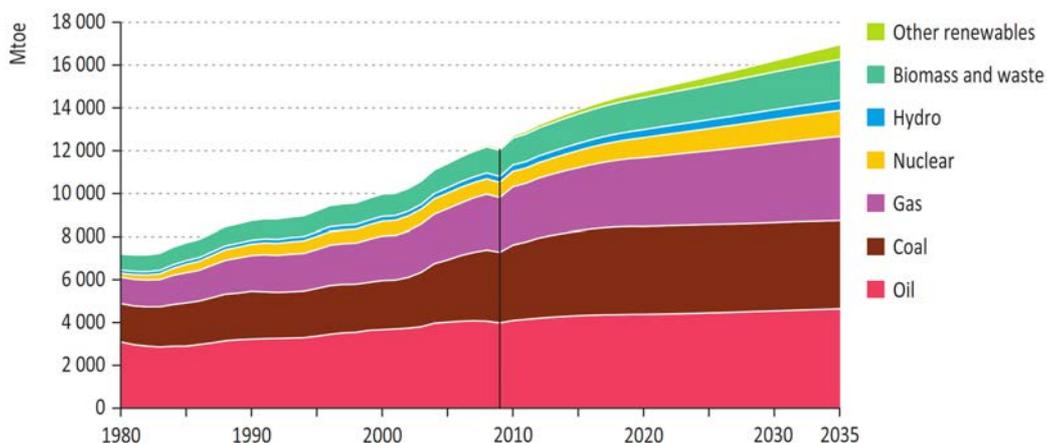


Abbildung 2: Weltenergieverbrauch nach Energieträgern [4]

Im Zusammenhang mit dem *Heute* ist die notwendige Energiewende zu nennen, die inzwischen bei international geführten Klimagesprächen, wie z. B. auf dem Pariser Klima-Gipfel 2015 [3] als Maßnahme zur Eindämmung der Erderwärmung gesehen wird. Gleichwohl können die zugesagten Grenzen für den CO₂-Ausstoß nur dann erreicht werden, wenn CO₂-neutrale Energiequellen eingesetzt werden, erneuerbare Energien einen wesentlichen Anteil an dem Energiemix einnehmen, Energiespeicher zur erhöhten flexiblen Nutzung von Energie, Energieeinsparung

und effizientere Produktionsverfahren und Materialien weltweit zum Einsatz kommen. Eine enorme Herausforderung, da die Energiewende hohe Investitionen benötigt, die von ärmeren Ländern nur schwer aufgebracht werden können. Es bedarf des Aufbaus einer dezentralen Energieerzeugung durch erneuerbare Energien und erfordert Speicherkonzepte, um den Zeitshift zwischen der Energieproduktion und dem Energieverbrauch zu überbrücken. Ein wichtiger Faktor wird oftmals bei den Diskussionen um die Energieerzeugung und den Energieverbrauch vernachlässigt. Ein wesentliches Element, das unabhängig vom CO₂-Ausstoß Klimaveränderungen nach sich ziehen kann, ist die massive Umweltverschmutzung, die die Biodiversität zerstört, Trinkwasser-Reservoirs beschädigt, Böden kontaminiert und somit langfristig die landwirtschaftliche Nahrungsmittelproduktion gefährdet, und dies bei dem aktuell prognostizierten Bevölkerungswachstum.

Durch den Wegfall von natürlichen Grünflächen entfallen wesentliche CO₂-Absorber wie die Pflanzen. Dies betrifft auch die Korallenriffe, die exzellente CO₂-Absorber sind. Der vollständige Ersatz von fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energiequellen ist aktuell undenkbar, da hierfür nicht hinreichend globale Konzepte existieren. Während viele Länder nach dem Vorbild Deutschlands Gesetze zur Einspeisevergütung eingeführt haben, lassen sich insbesondere in China enorme Entwicklungen hin zu den erneuerbaren Energien beobachten.

China hat bereits 2009 ein green-transition-Programm verabschiedet, das dazu verpflichtet die Luft in seinen Städten zu säubern und die CO₂-Intensität bis 2020 um 40 % gegenüber dem Niveau von 2005 zu senken [5]. Dieses Ziel wurde bereits 2017 erreicht [6]. Ein weiteres Beispiel für einen innovativen Energieansatz eines Unternehmens zeigt Tesla. Tesla als ursprünglicher Batteriehersteller bietet neben E-Fahrzeugen auch Solaranlagen und Stromspeicher für die Käufer von Tesla's an [7]. Dies sind innovative Wendungen, die durchaus neben vielen anderen Beispielen aufzeigen, dass Lösungen für die CO₂-Reduktion existieren. Eine Studie der Universitäten Stanford und UC Berkeley [8] behauptet, dass es möglich sei, bis 2050 einen totalen Ausstieg für 139 Länder der Welt aus fossilen Brennstoffen zu erreichen. Die zentrale Frage, die sich uns stellt ist, ob die zur Verfügung stehende Zeit ausreicht, um den Klimawandel hinreichend zu begrenzen. Durch die moderne und umfangreiche globale Erfassung von meteorologischen Daten und detaillierte Analysen dieser Daten lassen sich verfeinerte Modelle entwickeln, um Klimaentwicklungen vorherzusagen. Diese wiederum können allen Staaten der Welt helfen geeignete Strategien zu entwickeln, die systemischen Parameter (Interaktion zwischen Gesellschaft, Wirtschaft und Ökologie) mit zu berücksichtigen.

Bei allen Energiekonzepten werden Materialien eingesetzt, die im Falle von z. B. Li-Ionen-Batterien die Elektroden und das Elektrolyt oder im Falle von Wärmeüberträgern und Wärmespeichern wärmeleitende Strukturen betreffen. Diese grundlegende Erkenntnis, dass Materialien als Grundbaustein von komplexen Systemen eingesetzt werden, ist evident. Welche Rolle spielen nun bei den Energiefragestellungen von heute die Materialien und welche Materialien werden für das Morgen benötigt, um energieeffizient, nachhaltig und ökologisch verträglich die energetische Zukunft zu gestalten? Welche Rolle spielt hierbei der Innovationsgedanke und welche Ansätze für modern times im Jahre 2036 sind denkbar? Im nächsten Abschnitt widmen wir uns der Fragestellung der Innovation und der Materialeffizienz, um dann im darauffolgenden Abschnitt die Ansätze für zellulare, aus der Natur entlehnenen Materialentwürfe der Zukunft vorzustellen.

Innovation von heute und morgen

Innovation allein als Element für das Wirtschaftswachstum zu sehen ist sicherlich in Anbetracht der Komplexität von Energieverbrauch, Umwelt und Entwicklung der Weltbevölkerung zu kurz gedacht. Abb. 3, linke Abbildung, zeigt den klassischen Innovationsansatz, der als Schnittstelle zu Gesellschaft, Industrie und Universität angesiedelt ist, und den Markt, die Bedarfe und die Erfindung vereinigt, um somit neue Produkte, Verfahren etc. etablieren zu können [9]. Es ist sicherlich richtig, dass hierbei die Gesellschaft als wesentliches Element des Innovationsgedankens in Form von Bedarfen integriert ist. Allerdings fehlt die Natur als wesentliche Basis unserer Existenz. Wir müssen den Innovationsgedanken revolutionieren und die Ökologie in den Innovationsansatz integrieren. Inspirationen aus der Natur nutzen, um gleichberechtigt Synergien zwischen den wirtschaftlichen Prozessen, den eingesetzten Materialien, der landwirtschaftlichen Nahrungsproduktion und der Nutzung von Umweltressourcen herzustellen. Der klassische Innovationsbegriff geht davon aus, dass eine Idee durch Wissensinstanzen validiert und durch Ökonomen hinsichtlich der gesellschaftlichen Bedarfe und auf Marktfähigkeit überprüft wird.

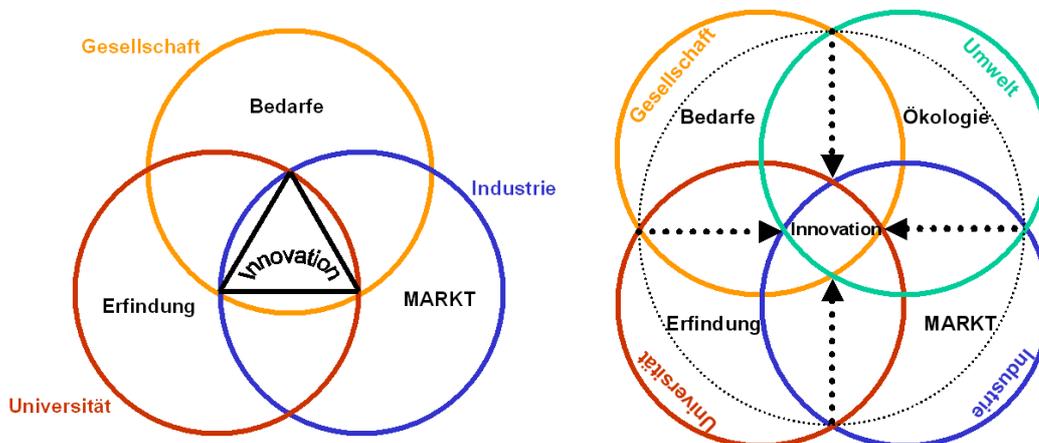


Abbildung 3: Klassischer Innovationsansatz (links), Aufgeklärter Innovationsansatz unter Einbeziehung der Umwelt (rechts) [9, Kneer].

Die neue Innovation – nennen wir diese die „aufgeklärte Innovation“ ("enlightened innovation") – benötigt ein weiteres Standbein. Dieses können wir Umwelt, Ökologie oder Natur nennen. Dieser erweiterte Innovationsbegriff ermöglicht bei der Validierung einer Idee den Einfluss der daraus möglichen Technologie auf die Ökologie. Im Falle von Kernreaktoren z. B. würden durch den Ökonom nicht nur die wirtschaftliche Verwertbarkeit untersucht, sondern auch die Kosten der Gesundheits- und Umweltschäden, die durch einen Kernreaktorunfall entstehen können

bzw. welche Kosten beim Abbau derselben entstehen, in Betracht gezogen. Wir nennen diesen neuen Innovationsgedanken „aufgeklärte Innovation“, da es einer Aufklärung bedarf, um diese neue Innovation in das Heute und Morgen in Lehre, Forschung, Industrie und Gesellschaft zu integrieren. Abb. 3, rechte Abbildung zeigt das erweiterte Innovationssystem durch den Baustein Umwelt.

Die aufgeklärte Innovation als zentrales Bindeglied zwischen den einzelnen Bereichen berücksichtigt die Umweltaspekte einer neuen Technologie. Dadurch werden potentielle Schäden an der Umwelt und somit auch an dem Menschen vorab analysiert und nur derartige Technologien, die alle Bewertungskriterien erfüllen, können weiterentwickelt werden. Im Zusammenhang mit den „energy efficient modern materials“ die im Abschnitt behandelt werden, sind diese Kriterien ebenso umfangreich anhand des aufgeklärten Innovationsprinzips zu untersuchen. Eine detaillierte Analyse der „modern materials“ ist im Rahmen des hier vorgestellten Artikels allerdings nicht vollumfänglich nicht möglich, soll aber zumindest als anregende Inspiration dienen.

Energy efficient materials - virtual material design

Wenn über energieeffiziente Materialien gesprochen wird, ist es oftmals nicht eindeutig was damit gemeint ist. Hilfreich hierbei ist zwischen der Herstellung und der Anwendung von Materialien zu unterscheiden. Eine energieeffiziente Herstellung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Energieaufwand zur Bereitstellung von Rohmaterial wie z. B. Stahl, Kupfer, Aluminium, Benzin etc. gering im Vergleich zu den Vorteilen des erzeugten Materials ist. Im Falle z. B. von Aluminium ist bekannt, dass der Herstellprozess sehr energiereich ist und somit große Mengen an „verstecktem“ CO₂ (durch die Herstellung) entstehen. Allerdings hat Aluminium extrem gute thermische Eigenschaften und ist nahezu ideal als thermischer Leiter geeignet. Gleichzeitig ist die spezifische Dichte und Wärmekapazität gering, wodurch der Energieaufwand zur Aufheizung von Aluminium im Vergleich zu Stahl um einen Faktor von 3-4 geringer ausfällt. Im Bereich des Leichtbaus und der Wärmeübertragung kann Aluminium sicherlich als energieeffizientes Material eingestuft werden, jedoch muss der Herstellprozess bei der Bewertung mit einfließen.

Als weiterer Aspekt für energieeffiziente Materialien ist neben dem Grundmaterial die Formgebung zu nennen. Träger z. B. werden als T-Träger ausgeführt und nicht als quadratischer Vollkörper. Dies bedeutet eine gravierende Materialeinsparung allein durch die Formgebung. Wenn nun durch die Formgebung ein essentieller Vorteil hinsichtlich der Energieeffizienz von Prozessen zu erwarten ist, könnte auch hier von einem energieeffizienten Material gesprochen werden.



Abbildung 4: Beispiel für zelluläre Strukturen aus der Natur

Beispiele aus der Natur (siehe Abb. 4) lehren uns, dass eine Vielzahl an Materialien und biologischen Strukturen grundsätzlich Material einsparen und zellulare Systeme also für den Leichtbau oder den optimierten Wassertransport (Kapillare) wie auch für den thermischen Haushalt optimiert sind. Zellulare Strukturen aus einem Grundmaterial oder auch als Verbundsystem aus verschiedenen Grundmaterialien sind daher für eine Vielzahl an physikalischen Prozessen interessante Kandidaten. Abb. 5 zeigt drei verschiedene Vertreter an zellularen (porösen) Materialien, die künstlich hergestellt sind und eine unterschiedliche Porenskala aufweisen.

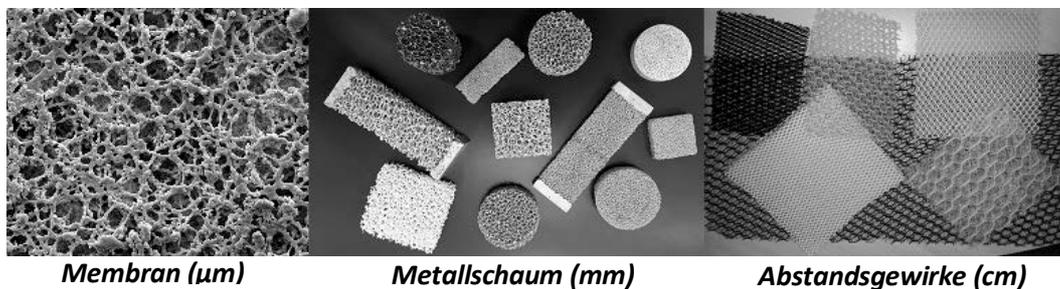


Abbildung 5: Am Markt erhältliche zelluläre Strukturen (Quelle: TinniT Technologies GmbH).

Die Membrane sind essentielle Materialien, die in der Medizin- und Umwelttechnik eingesetzt werden. Diese sind für den kapillaren Flüssigkeitstransport geeignet (Medizindiagnostik) und benötigen daher für den Flüssigkeitstransport keine anliegende äußere Druckdifferenz. Bei der Herstellung lässt sich die Porenverteilung und -größe durch Prozessparameter einigermaßen steuern. Allerdings sind ähnliche Membranstrukturen denkbar, die gegebenenfalls besser für den Flüssigkeitstransport funktionieren. Im Heute können nahezu beliebige zellulare Strukturen durch mathematische Algorithmen die auf den Mathematiker Voronoi zurückgehen virtuell hergestellt werden. Durch experimentelle Charakterisierungsmaßnahmen von zellularen Strukturen lassen sich diese sehr genau nachbilden. Abb. 6 verdeutlicht schematisch den Modellierungsprozess zur Herstellung einer zellularen Struktur anhand des Beispiels einer Membran.

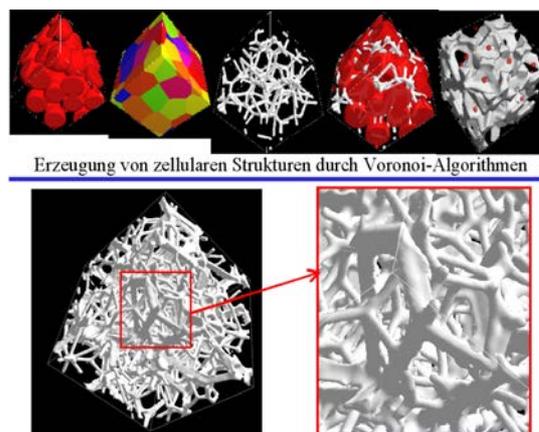


Abbildung 6: Erzeugung einer synthetischen Membranstruktur (Quelle: IDM).

Die Membrane sind essentielle Materialien, die in der Medizin- und Umwelttechnik eingesetzt werden. Diese sind für den kapillaren Flüssigkeitstransport geeignet (Medizindiagnostik) und benötigen daher für den Flüssigkeitstransport keine anliegende äußere Druckdifferenz. Bei der Herstellung lässt sich die Porenverteilung und -größe durch Prozessparameter einigermaßen steuern. Allerdings sind ähnliche Membranstrukturen denkbar, die gegebenenfalls besser für den Flüssigkeitstransport funktionieren. Im Heute können nahezu beliebige zellulare Strukturen durch mathematische Algorithmen die auf den Mathematiker Voronoi zurückgehen virtuell hergestellt werden. Durch experimentelle Charakterisierungsmaßnahmen von zellularen Strukturen lassen sich diese sehr genau nachbilden. Abb. 6 verdeutlicht schematisch den Modellierungsprozess zur Herstellung einer zellularen Struktur anhand des Beispiels einer Membran.

Wenn nun Parameter zur Generierung einer Membran derart geändert werden, dass der Kapillarprozess erheblich besser vonstatten geht, dann würde man ein Membrandesign virtuell entwerfen, durch numerische Berechnungen qualifizieren und für die Herstellung vorschlagen. Allerdings ist im Falle der mikroporösen Membran die Entwurfsmethodik durchaus qualifiziert, leider lassen sich aktuell diese Entwürfe noch nicht herstellen, da 3D-Druckverfahren in der Auflösung und mit Flüssigmaterialien derzeit noch nicht hinreichend erforscht existieren.

Im Falle von Schaumstrukturen, die nach einem ähnlichen Schema synthetisch hergestellt werden können, zeichnet sich die Zukunft virtuell erzeugter Materialien bereits heute ab. Auf Basis von virtuellen Schaumentwürfen, die gradiert sein können oder auch als Komposite verschiedener Schaumentwürfe zusammengesetzt sein können, lassen sich triangulierte Modelle ableiten, die im 3D-Druck (Kunststoff) herstellbar sind. Die Kunststoffschäume lassen sich dann im Platzhalterverfahren (Hochschule Pforzheim) als metallischer Schaum herstellen. Natürlich erst nachdem numerische Analysen den virtuellen Entwurf für die angedachte physikalische Anwendung qualifiziert haben.

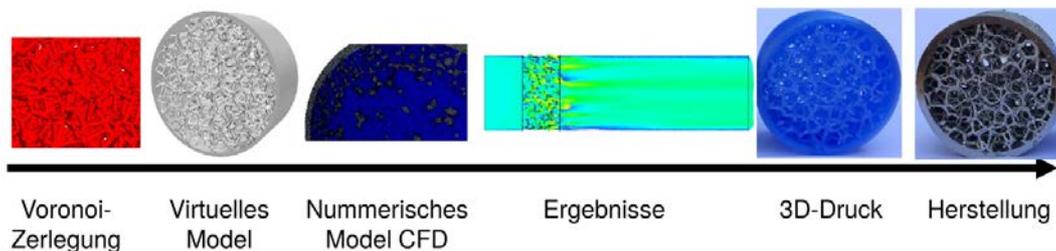


Abbildung 7: Erzeugung einer Schaumstruktur auf Basis eines digitalen Entwurfs (IDM)

Abb. 7 zeigt das Prinzip des virtuellen Materialdesigns. Das digital generierte Schaummodell ist der Ausgangspunkt für den Herstellprozess. Dieses wird durch bool'sche Operationen in ein numerisches Modell transferiert und berechnet. Auf Basis der erzielten Ergebnisse, wird der Entwurf so lange korrigiert/qualifiziert, bis

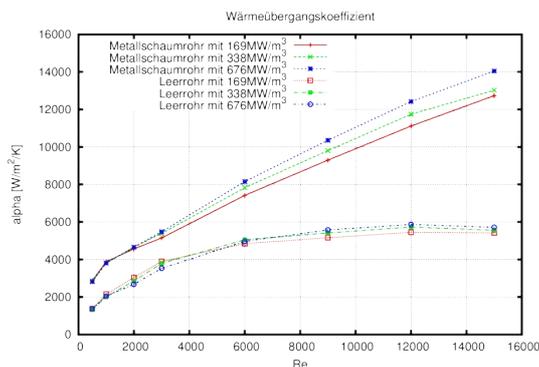


Abbildung 8: Berechneter Wärmeübergangskoeffizient für ein durchströmtes Metallschaum

der gewünschte physikalische Effekt hinreichend genau erfüllt ist. Danach wird das digitale Modell für den 3D-Druck exportiert und für den Abguss aufbereitet. Es entsteht damit ein Bauteil, das die Anforderungen an eine spezifische Physik, wie z. B. den optimierten Wärmeübergang bei möglichst geringem Druckverlust erfüllt³. Der Vorteil eines verbesserten Wärmeübergangs ist in Abb. 8 aufgezeigt. Gegenüber einem Leerrohr kann der Wärmeübergang um einen Faktor von ca. 3 erhöht werden. Ein neues Schaummaterial ist damit real geworden und erfüllt die Anforderungen an einen energieeffizienten Betrieb. Sicherlich sind weitere Faktoren zu berücksichtigen wie z. B. die Energieaufwände für die Computer und die Netzwerkinfrastruktur. Diese Methodik steckt in ihren Anfängen und bedarf der weiteren Optimierung insbesondere auch im Hinblick auf den aufgeklärten Innovationsansatz.

Wenn wir nun diese Methodik auf weitere geometrische Strukturen, die an die Natur angelehnt sind, erweitern, so lassen sich nahezu beliebige Strukturen miteinander kombinieren und völlig neuartige Materialentwürfe erzeugen. Der Kreativität sind hier keine Grenzen gesetzt. Ein Beispiel hierfür zeigt Abb. 9. Hier wurde eine digital erzeugte zelluläre Schaumstruktur mit einer skalierten Membranstruktur kombiniert. Die Membran ist hierin als Absorberstruktur als „Inlet“ in einen Schaum derart eingepasst, dass z. B. aus einem Flüssigkeitsstrom durch Adsorption Stoffe entnommen werden können. Die Membranstruktur ist



Abb. 9: Synthetische Schaumstruktur mit skalierten Membranstruktur als innovativer Adsorber (TinniT)

¹ Wir danken AiF, dem Projektträger des BMWi, für die Finanzierung des Projekts „EmiFoam“, das auch den Aspekt des Virtual Material Designs verfolgt.

hierbei beliebig skalierbar, so dass eine hinreichend große Absorberfläche entsteht. Ein weiteres Beispiel für das Virtual Material Design ist die Kombination von textilen Strukturen (siehe auch Abb. 5) mit einer Schaumstruktur zur Forcierung der Strömung auf den textilen Ringspalt zur Verbesserung des Wärme- und Stoffübergangs (siehe Abb.10).

Die beiden Beispiele zeigen, dass innovative Ansätze zur Erhöhung der Effizienz von Systemen durch zellulare Strukturen durchaus im Morgen eine entsprechende Bedeutung gewinnen können. Wichtig bei allen kreativen Ansätzen ist natürlich, dass die aufgeklärte Innovation zur Bewertung einer neuen Technologie herangezogen wird.



Abb. 10: Metallschauminlet in Abstandsgewirke (TinniT)

enlightened innovation for modern times

Moderne Systeme bedürfen neuer Ansätze unter Berücksichtigung von Inspirationen aus der Natur und gleichzeitig ein Umdenken im Hinblick auf den Einsatz von Ressourcen. Zellulare Systeme haben in diesem Zusammenhang interessante Eigenschaften, um Fertigungsprozesse effizienter gestalten können. So können Kühl- oder Heizsysteme und Adsorptionsprozesse optimiert werden. Darüber hinaus können Materialressourcen eingespart werden. Wenn bei dem Design neuer System der Innovationsprozess zudem Umweltaspekte berücksichtigt, so wie der aufgeklärte Innovationsansatz es vorgibt, dann sind energy efficient modern materials sicherlich ein essentieller Baustein für eine optimistische Zukunft.

- [1] Dennis Meadows, Donella Meadows, Erich Zahn, Peter Milling: Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart, 1972
- [2] Modern Times: The Eating Machine, <https://jackshalom.net/2015/07/16/>, (abgerufen am 30.7.2018)
- [3] Die Klimakonferenz in Paris, Bundesumweltministerium, <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/>, (abgerufen am 30.7.2018)
- [4] OECD / International Energy Agency: World Energy Outlook 2011, p.76
- [5] World Resources Institute, China's State Council Unveils 40-45% Carbon Intensity Target, <https://www.wri.org/blog/2009/11/china%E2%80%99s-state-council-unveils-40-45-carbon-intensity-target>, (abgerufen am 30.7.2018)
- [6] United Nations Climate Change, China Meets 2020 Carbon Target Three Years Ahead of Schedule, <https://unfccc.int/news/china-meets-2020-carbon-target-three-years-ahead-of-schedule>, (abgerufen 30.7.2018)
- [7] Tesla Energie, https://www.tesla.com/de_DE/energy, (abgerufen am 30.7.2018)
- [8] Mark Jacobson, Mark Delucchi, Mary Cameron, Brian Mathiesen: Matching demand with supply at low cost in 139 countries among 20 world regions with 100% intermittent wind, water, and sunlight (WWS) for all purposes, Renewable Energy 123 (August 2018), pp. 236-248
- [9] Yock, Zenios, Makover, Biodesign, the process of innovating medical technologies, second edition, Cambridge university press, US Sheridan Books, Inc., 2015.

Effizientes Trennen mit High Speed Wire EDM

Prof. Dr.-Ing. Kai Oßwald

Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien (IWWT)
Hochschule Pforzheim

Abstract

Obwohl in den westlichen Industrienationen noch nahezu unbekannt, stellt das High Speed Wire Electrical Discharge Manufacturing (HSWEDM) ein wirtschaftlich wie technisch interessantes abtragendes Trennverfahren dar. Es unterscheidet sich durch zahlreiche technische Merkmale vom konventionellen Drahterodieren. Dementsprechende Unterschiede sind auch im Prozess zu beobachten. Der Beitrag gibt einen Einblick in die HSWEDM-Maschinenteknologie, insbesondere was die Drahtführung und den Generator betrifft. In der Folge wird der Prozess beschrieben, wie er von der Arbeitsgruppe Abtragende Fertigungsverfahren am IWWT analysiert werden konnte, und die Besonderheiten dieses hybriden Verfahrens werden dargelegt. Schließlich werden die Vorteile und Anwendungsfelder des HSWEDM in der industriellen Fertigung aufgeführt.

Einführung

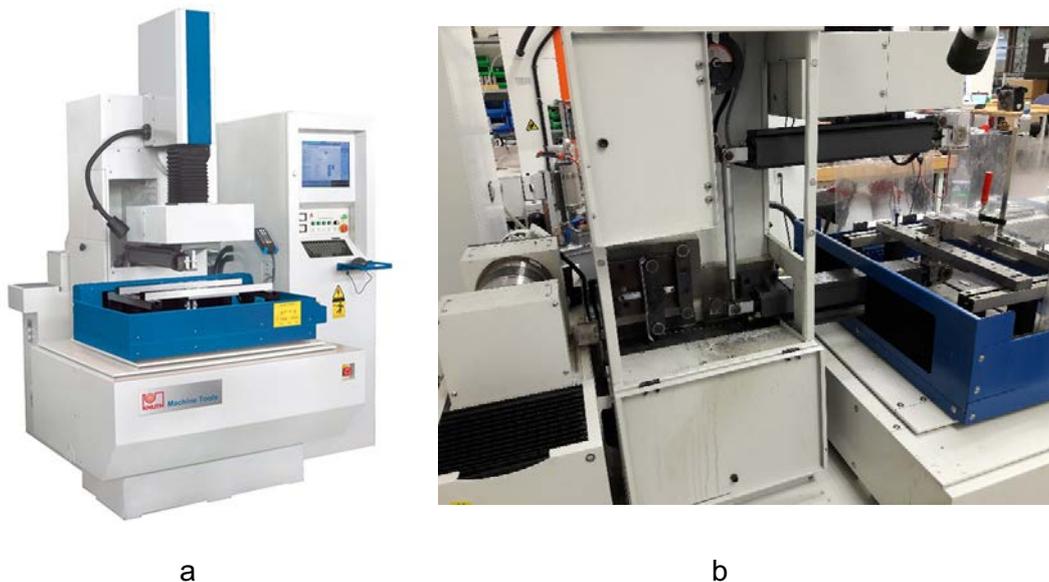
Bei High Speed Wire EDM (HSWEDM) handelt es sich um ein hybrides Elektrotrennverfahren („Electromachining“), das sich in vielen Aspekten von der konventionellen Drahtfunkenerosion unterscheidet. Es wird unter verschiedenen Begriffen (Fastwire-EDM, auf Deutsch missverständlicherweise auch schlicht „Drahterodieren“) und Abkürzungen (WEDM-HS, WEDM-MS) gehandelt. Es ist in den sogenannten westlichen Industrienationen weitgehend unbekannt, hat aber in Ostasien (insbesondere in der VR China) seit Jahrzehnten eine große Verbreitung. Modelle dieser Technik werden von diversen Herstellern – häufig mit nur geringen Unterschieden – produziert.

Einschlägige Veröffentlichungen in englischer Sprache wurden bisher fast ausschließlich von ostasiatischen Autoren verfasst und beschäftigten sich häufig mit Parameteroptimierungen (z. B. [1, 8]) und anderen speziellen Aspekten des Verfahrens (z. B. [4, 7]). Eine generelle Beschreibung des HSWEDM-Prozesses in einer europäischen Sprache war lange Zeit nicht verfügbar. Ein Überblick zum Verfahren in deutscher Sprache wurde daher von Oßwald et al. [2] versucht.

Maschinentechnologie

Ein wesentlicher Unterschied der HSWEDM-Technologie zur konventionellen Drahtfunkenerosion besteht in der Bewegung der Drahtelektrode. Der Draht wird nicht nur einmalig durch den Arbeitsspalt bewegt, sondern kontinuierlich hin- und hergespult. Dabei wird er üblicherweise mit Geschwindigkeiten von ca. 10 m/s (bei Yueqin et al., 2017 [9] werden 8-12 m/s genannt) bewegt und somit etwa eine Größenordnung schneller als beim konventionellen Prozess. Ein Beispiel für eine HSWEDM-Maschine, wie sie in Deutschland erworben werden kann und einen seitlichen Einblick in ihre Drahtführung sind in Abbildung 1 gezeigt.

Als Drahtmaterial kommt nahezu reines Molybdän zum Einsatz, da es sowohl hochschmelzend als auch duktil ist und somit zu Drähten verarbeitet werden kann.



**Abbildung 1: a) Typische HSWEDM-Maschine, hier ein importiertes Exemplar
b) Seitlicher Blick auf Arbeitsraum, Drahtspannvorrichtung und Drahttrommel (vrnl)**

Das Drahtspann- und spulsystem, wie es für gewöhnlich bei HSWEDM-Maschinen Verwendung findet, ist in Abbildung 2 skizziert. Neben dem rein mechanischen Spannmechanismus ist die Drahttrommel die zentrale Komponente auf die der Draht zunächst aufgespult und dann in einer Schleife herausgeführt wird, während die rotierende Trommel in axialer Richtung bewegt wird, um den Draht in einer konstanten Flucht zu halten.

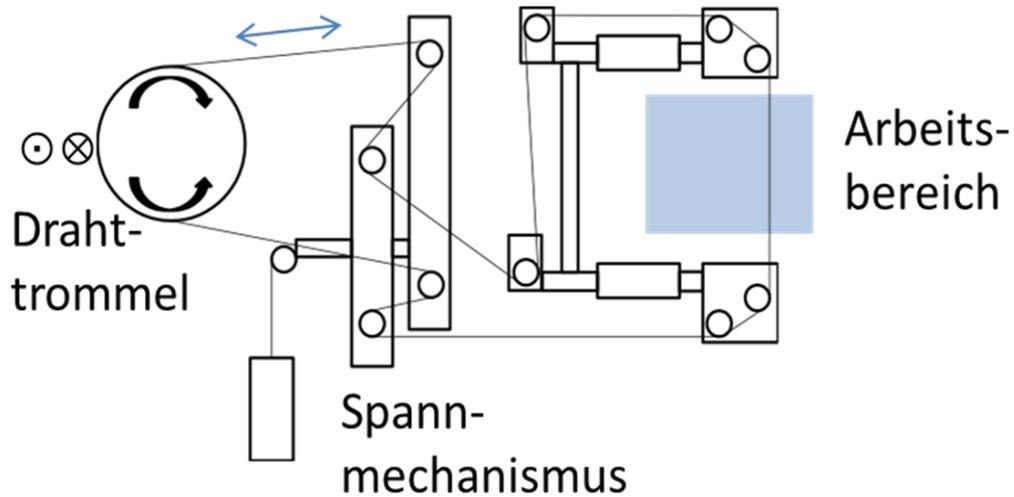


Abbildung 2: HSWEDM-Drahtspann- und Spulsystem

Zur Pulserzeugung kommt ein einfach aufgebauter statischer Impulsgenerator auf MOSFET-Basis zum Einsatz. Bei dem Modell, das in der HS PF eingesetzt wird, arbeitet er bei einer unveränderlichen Leerlaufspannung von 75 V. Weitere wesentliche Einstellgrößen sind der Pulsstrom, die Puls- sowie die Pausendauer. Über die Prozessregelung sind nur wenige Informationen verfügbar. Sie scheint auf der Mittelspannung als Messgröße zu basieren und lässt sich lediglich über ein Potentiometer (das vermutlich die Regelverstärkung beeinflusst) parametrisieren. Es sind andere Modelle von HSWEDM-Maschinen bekannt, deren Regelung auf Fuzzy Logic beruhen soll.

Merkmale des HS-WEDM-Prozesses

Das für HS-WEDM-Prozess eingesetzte Medium unterscheidet sich deutlich von den in der konventionellen Funkenerosion üblichen Dielektrika. Es weist üblicherweise einen Leitwert von 3-5 mS/cm auf und enthält in wässriger Lösung Bestandteile zur Verdickung, Tenside, „Schmiermittel“ und Salz, offensichtlich zur Einstellung des Leitwerts [2]. Die Entwicklung leistungsfähiger Prozessmedien nach europäischen Standards wird sicherlich Gegenstand zukünftiger Forschung sein. Wie der in Abbildung 3 skizzierte Vergleich mit den Leitwerten konventioneller funkenerosiver und elektrochemischer Bearbeitungen auf einer logarithmischen Skala zeigt, wird das HS-WEDM zwischen diesen beiden „Extremen“ betrieben, was bereits ein Hinweis auf den hybriden Charakter dieses Prozesses ist.

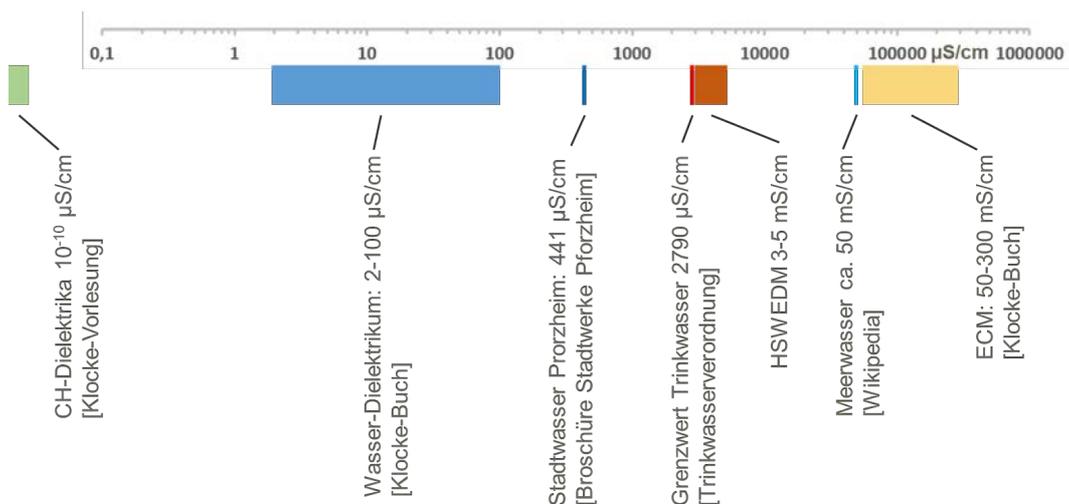


Abbildung 3: Leitwerte unterschiedlicher Medien abtragender Prozesse im Vergleich zu alltäglichen Flüssigkeiten.

Untersuchungen der Verläufe von Strom und Spannung im HS-WEDM wurde im Rahmen eines öffentlich geförderten Projekts in der Arbeitsgruppe Abtragende Fertigungsverfahren am IWWT der HS PF vorgenommen. Hierbei konnten fünf unterschiedliche Pulstypen unterschieden werden, wie sie in Abbildung 4 dargestellt sind.

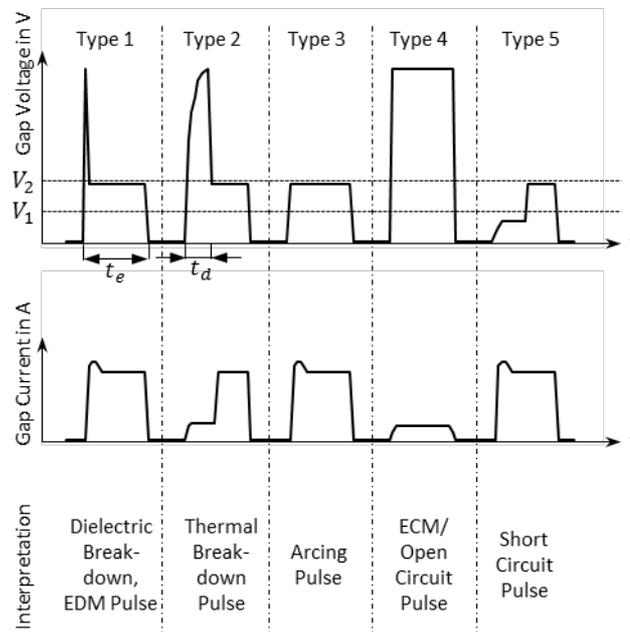


Abbildung 4: Spannungs- und Stromverläufe von Pulstypen, die typischerweise bei HS-WEDM auftreten und ihre Interpretation [3].

Typ 1-Pulse entsprechen hierbei einem Felddurchschlag mit Zündverzögerungszeit (t_d), wie er typisch für die funkenerosive Bearbeitung ist. Eine Besonderheit des HS-WEDM-Prozesses stellt der Pulstyp 2 dar, in dem bereits während t_d ein nennenswerter Strom zu beobachten ist. Ähnliche Verläufe von Spannung und Strom sind zuvor bei anderen hybriden Prozessen beobachtet und als „electrochemical discharge“ bezeichnet worden [5]. Dies ist insofern zutreffend, als während der Zündverzögerungszeit ein elektrochemischer Abtrag stattfinden dürfte und in der Folge eine Entladung entsteht. In [3] wird dieser Pulstyp als thermischer Durchschlag interpretiert. Ein Modell der Vorgänge beim thermischen Durchschlag zeigt Abbildung 5: bereits während der Zündverzögerungszeit findet ein Stromfluss durch das Prozessmedium statt (und somit auch in einem unbekanntem Ausmaß elektrochemischer Abtrag). An Rauigkeitsspitzen oder Stellen lokal erhöhten Leitwerts treten erhöhte Stromdichten auf, die zu einer Erwärmung des Prozessmediums und schließlich zum Durchschlag führen.

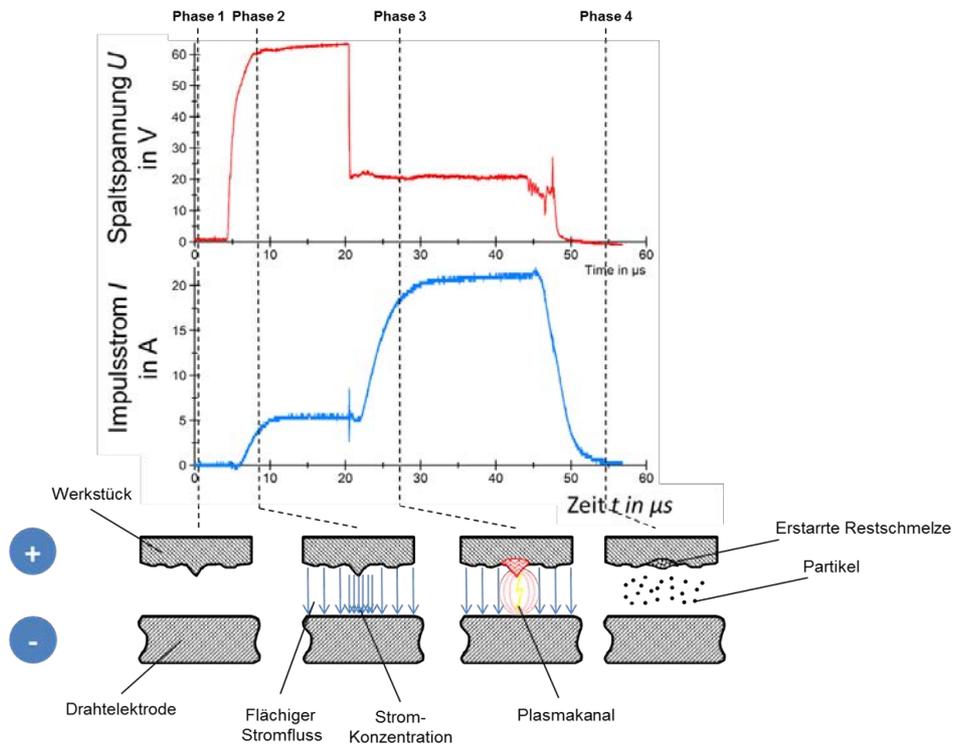
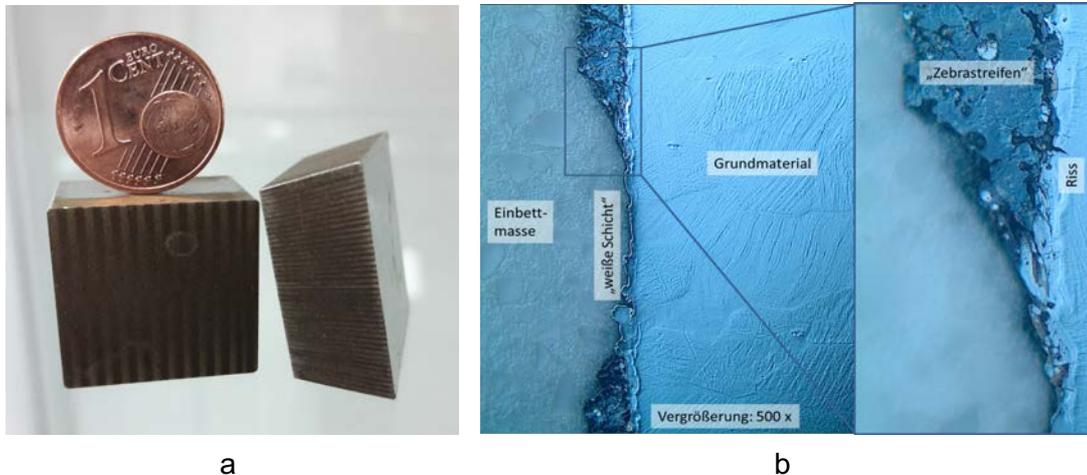


Abbildung 5: Modell des thermischen Durchschlags

Pulstyp 3 entspricht klassischen Lichtbögen mit hohen Strömen und geringen Spannungen, während Pulstyp 4 – je nach auftretendem Entladungsstrom – einen fließenden Übergang von Leerlaufpulsen (mit vernachlässigbarer Abtragwirkung) zu Pulsen mit elektrochemischem Abtrag darstellt. Typ 5 entspricht klassischen Kurzschlusspulsen mit maximalem Strom und kollabierender Spannung. Die Puls-typen treten je nach Prozessbedingungen und -parametrierung in sehr unterschiedlichen Anteilen auf. Diese Zusammenhänge wurden von der Arbeitsgruppe untersucht und in [3] veröffentlicht.



**Abbildung 6: a) „Zebraeffekt“ auf HSWEDM-getrennten Bauteilen
b) Querschliff einer Randzone eines HSWEDM-getrennten Bauteils mit „Zebrastreifen“ und weißer Schicht**

Ein weiteres Merkmal des HSWEDM-Prozesses stellt in vielen Prozessfenstern eine dunkle Verfärbung der Werkstückoberfläche [6] dar, die sich stets in Bewegungsrichtung der Drahtelektrode verstärkt. Durch die alternierende Drahtbewegung kommt der Eindruck eines „Zebromusters“ zustande (vgl. Abbildung 6). Wie im Querschliff zu erkennen, handelt es sich um Material, das sich auf der Oberfläche aufbaut, bestehend aus Zersetzungsprodukten des Prozessmediums. Die Beläge lassen sich problemlos mit üblichen (chemisch/mechanischen) Maßnahmen reinigen. Dennoch wäre die Verhinderung der Entstehung dieser Ablagerungen eine Anforderung an zukünftig zu entwickelnde Prozessmedien.

Vorteile und Anwendungsfelder

Die potenziellen Anwendungsfelder ergeben sich aus den spezifischen Vorteilen der HSWEDM-Technologie. Neben den vergleichsweise geringen Investitionskosten sind dies insbesondere:

- nahezu kräftefreie Bearbeitung „filigraner“ Bauteile und Materialien (metallische Schäume, Filter etc.),
- Trennen schwer zerspanbarer Werkstücke und Halbzeuge,
- Bearbeitung hoher Werkstücke mit komplexen ($2\frac{1}{2}$ D) Geometrien jenseits der Prozessfenster von Laserschneiden und Wasserabrasivstrahlschneiden,
- gratfreie Bearbeitung mit kleinen Schnittspalten (Drahtdicke plus ca. 20-40 μm Bearbeitungsspalt).

Zwei konkrete Beispielanwendungen von HSWEDM sind in Abbildung 7 gezeigt.

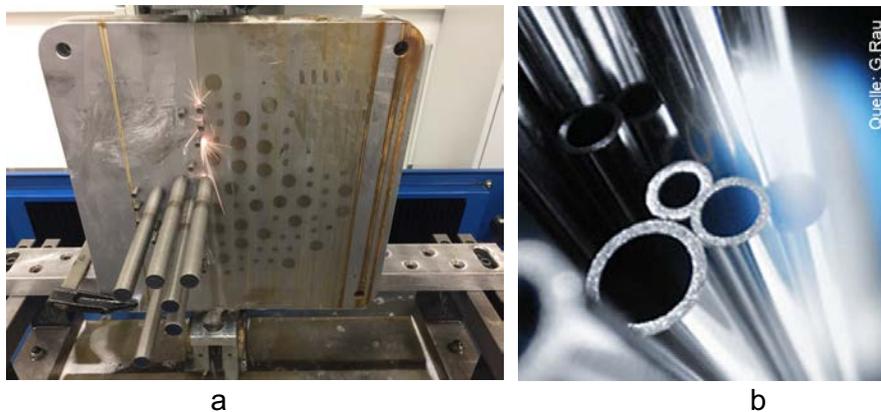


Abbildung 7: Aktuelle HSWEDM-Anwendungen:
a) Abtrennen lasergesinterter Bauteile von der Grundplatte
b) Ablängen von Nitinol-Röhrchen für die Medizintechnik

Das Abtrennen von metallischen Bauteilen, die mit dem additiven Verfahren „Selective Laser Melting“ (SLM) gefertigt wurden, stellt noch in vielen Fällen eine Herausforderung dar. Während der Einsatz von Sägen oder gar Hammer und Meißel wegen der auftretenden Kräfte für viele Bauteile unangebracht ist, ist die konventionelle Drahtfunkenerosion mit hohen Investitionskosten verbunden. Die HSWEDM-Technologie stellt hier eine interessante Alternative dar. Bereits seit Jahren im industriellen Einsatz ist das Ablängen von dünnwandigen Röhrchen aus der Formgedächtnislegierung Nitinol. Hier sind die Vorteile einer kräfte- und gratfreien Bearbeitung die entscheidenden Vorteile des HSWEDM-Trennens.

Fazit

Trotz zahlreicher Gemeinsamkeiten stellt das High Speed Wire EDM ein eigenes Fertigungsverfahren dar, das sich in Hardware, Prozess und Prozessregelung substantiell vom konventionellen Drahterodieren unterscheidet. Das Verständnis des Abtrags beim HSWEDM-Prozess konnte in jüngster Vergangenheit vertieft werden. Aktuelle Erkenntnisse über die auftretenden Pulstypen werden in der Zukunft eine effizientere und produktivere Prozessregelung ermöglichen. Dies und die möglichen Weiterentwicklungen im Bereich des Prozessmediums wird die Potenziale der Technologie noch erweitern, die diese fraglos auch in den sogenannten westlichen Industrienationen hat. Neben zahlreichen anderen denkbaren Anwendungen eines günstigen, kräfte- und gratfreien Abtragsverfahrens ist hier vor allem das Abtrennen lasergeschmolzener Werkstücke von ihrer Grundplatte zu nennen.

Literatur

1. Mingqi L, Minghui L, Guangyao X (2005) Study on the Variations of Form and Position of the Wire Electrode in WEDM-HS. *Int J Adv Manuf Technol* 25(9-10):929–934. doi:10.1007/s00170-003-1915-4
2. Oßwald K, Murnberger D, Kappler T, Sedlmayr G (2016) High Speed Wire Electrical Discharge Machining. Explorative Untersuchung eines hybriden elektrischen Abtragsprozesses. *Werkstattstechnik* 106(6):430–438
3. Oßwald K, Lochmahr I, Schulze H-P, Kröning O (2018) Automated Analysis of Pulse Types in High Speed Wire EDM. *Procedia CIRP* 68:796–801. doi:10.1016/j.procir.2017.12.157
4. Pan H, Liu Z, Li C, Zhang Y, Qiu M (2017) Enhanced debris expelling in high-speed wire electrical discharge machining. *Int J Adv Manuf Technol* 76:329. doi:10.1007/s00170-017-0716-0
5. Schöpf M (2001) Electro Chemical Discharge Machining (ECDM): Neue Möglichkeit zum Abrichten metallgebundener Diamantschleifscheiben. PhD Thesis, DISS. ETH Nr. 14120
6. Wei W, Zhidong L, Wentai S, Yueqin Z, Zongjun T (2016) Surface burning of high-speed reciprocating wire electrical discharge machining under large cutting energy. *Int J Adv Manuf Technol*. doi:10.1007/s00170-016-8604-6
7. Wentai S, Zhidong L, Mingbong Q, Zongjun T (2016) Wire tension in high-speed wire electrical discharge machining. *Int J Adv Manuf Technol* 82(1-4):379–389. doi:10.1007/s00170-015-7352-3
8. Yuan J, Wang K, Yu T, Fang M (2008) Reliable multi-objective optimization of high-speed WEDM process based on Gaussian process regression. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48(1):47–60. doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.07.011
9. Yueqin Z, Zhidong L, Hongwei P, Mingbo Q (2017) Dielectric fluid lifespan detection based on pulse discharge probability in wire electrical discharge machining. *Int J Adv Manuf Technol* 92(1-4):1481–1491. doi:10.1007/s00170-017-0211-7

Einsatz der Röntgenfluoreszenzanalyse im moder- nen Werkstoffrecycling

Prof. Dr.-Ing. Andreas Zilly

B.Eng. Ruben Krampulz

M.Sc. Tom Kurdewan

Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen

Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW), Stuttgart

Abstract

Durch das Recycling von Werkstoffen, insbesondere Metallen, lassen sich wertvolle Ressourcen und Energie einsparen. Viele Bauteile und Baugruppen, wie beispielsweise Karosserien von modernen Fahrzeugen, enthalten eine Vielzahl verschiedener Werkstoffgattungen und -sorten. Entfällt ein sortenreines Recycling aufgrund fehlender Analysemöglichkeiten, so gehen häufig teure und hochwertige Legierungselemente im allgemeinen Schrott verloren.

Eine effektive und verhältnismäßig einfache Methode zur schnellen und zerstörungsfreien Materialbestimmung ist die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). Mit diesem Verfahren kann die Zusammensetzung eines Bauteils hinsichtlich der Arten der Elemente und deren Mengenanteil bestimmt werden. Daher hat es neben dem Materialrecycling und der Qualitätskontrolle auch einen festen Platz in der Werkstoffentwicklung.

In diesem Beitrag wird zunächst auf das physikalische Messprinzip eingegangen und die Funktionsweise der RFA anhand eines mobilen Analysators erklärt. Mittels konkreter Beispiele aus dem Edelstahlrecycling werden zudem die Einsatzmöglichkeiten und auch die Anwendungsgrenzen aufgezeigt. Abschließend wird noch kurz auf weitere Verfahren eingegangen, die diese Einschränkungen teilweise kompensieren können.

1. Physikalische Grundlagen

Die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ist seit den 1960er Jahren als Routinemethode zur Elementanalyse im Einsatz. Ihr Ursprung geht auf Versuche der beiden Wissenschaftler Richard Glocker und Georg Karl von Hevesy in den 1920er Jahren zurück. Besonders in den letzten 15-20 Jahren gewann die RFA durch geräte-technische Fortschritte auf dem Gebiet der Elektronik und der Erschließung weiterer Anwendungsmöglichkeiten wie der Schichtanalytik zunehmend an Bedeutung. Auch die Entwicklung von handgehaltenen Analysatoren für den mobilen Einsatz eröffnete neue Einsatzgebiete.

Mittlerweile ist sie die am häufigsten eingesetzte Methode zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der elementaren Zusammensetzung und wird vor allem in der metallverarbeitenden Industrie, aber auch bei der Prüfung organischer und anorganischer Substanzen verwendet. /1/, /2/

Bei der Röntgenfluoreszenzanalyse macht man sich die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Atomaufbaus zunutze. Jedes Element ist durch den Atomkern mit einer entsprechenden Anzahl von Protonen und einer identischen Anzahl Elektronen auf denen ihn umgebenden Schalen gekennzeichnet. Die Elektronenhülle ist in verschiedene Schalen bzw. Energieniveaus gegliedert. Diese werden von innen nach außen mit K, L, M, usw. fortlaufend bezeichnet, wobei K als kernnächste Schale die niedrigste Energie und die jeweils äußerste Schale die höchste Energie aufweist /3/.

Wird die Prüfung durchgeführt, so treffen von einer Röntgenröhre erzeugte primäre Röntgenstrahlen auf die zu analysierende Probe. Dadurch werden kernnahe Elektronen von den inneren Schalen des Atoms herausgelöst. Die entstehenden Lücken werden durch nachrückende Elektronen von weiter außenliegenden Atomschalen aufgefüllt. Fällt ein Elektron von einem höheren Energieniveau auf ein tieferliegendes, so wird die Energiedifferenz als, für das Element charakteristische, Röntgenstrahlung emittiert. Diese atomspezifische charakteristische Strahlung wird als Röntgenfluoreszenz bezeichnet. Diese Fluoreszenzstrahlung wird von einem im Analysator befindlichen Detektor ausgewertet. Durch die qualitative Bestimmung dieser elementspezifischen Wellenlängen lässt sich feststellen, welche Elemente in der Probe vorliegen. Durch die quantitative Bestimmung der Intensität der auftretenden Wellenlängen kann ermittelt werden, in welchen Konzentrationen die jeweiligen Elemente in der Probe vorhanden sind. Aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten nimmt die detektierbare Fluoreszenz bei Elementen niedriger Ordnungszahlen stark ab. Dies ist der Grund warum die leichten Elemente wie Mg,

Al, Si, P und S schwieriger zu messen sind. Die untere Nachweisgrenze liegt im anwendungsnahen Messeinsatz bei dem Element Fluor mit der Ordnungszahl 9.

Die Entstehung der Röntgenfluoreszenzstrahlung ist vereinfacht in der Abbildung 1 dargestellt. Durch die primäre Röntgenstrahlung wird ein Elektron aus der L-Schale herausgelöst und die entstandene Lücke mit einem Elektron aus der M-Schale aufgefüllt. Dabei entsteht die für das Element charakteristische Strahlung.

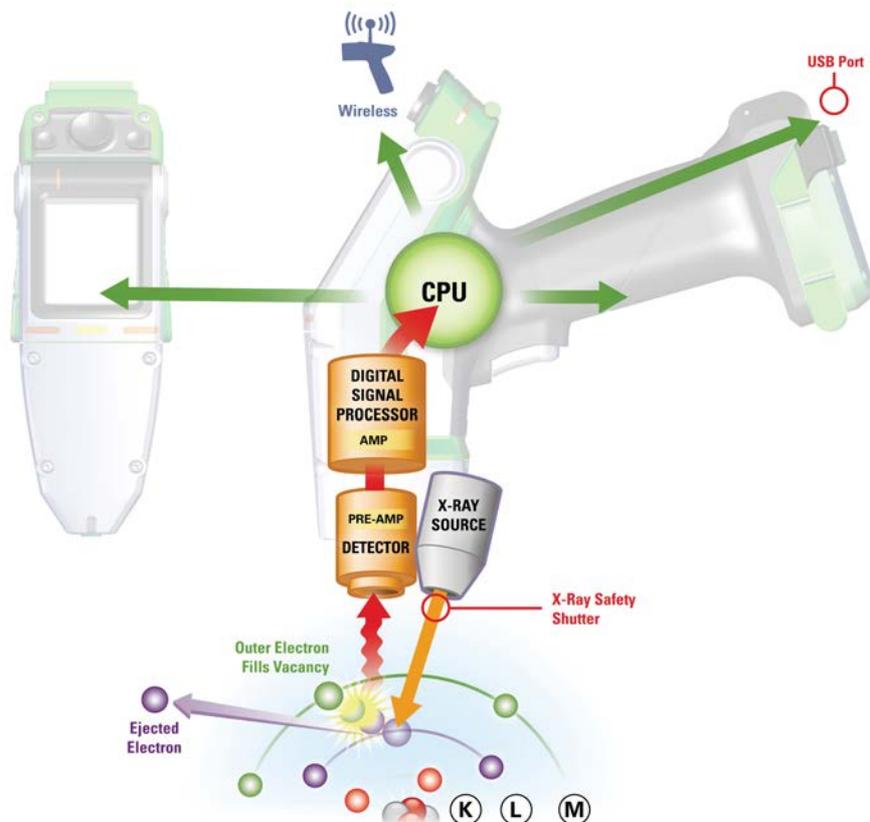


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Funktionsweise der RFA /analyticon GmbH/

In der folgenden Abbildung 2 ist am vereinfachten Beispiel des Spektrums eines hochlegierten Eisenbasiswerkstoffs die jeweilige Intensität als Zählrate (counts per second) über den charakteristischen Energien der Elemente Eisen, Nickel und Chrom aufgetragen. Hierbei stammen die $K\alpha$ -Peaks von den Elektronenübergängen zwischen der K- und L-Schale und die darunterliegenden $K\beta$ -Anzeigen analog dazu aus den Übergängen zwischen den Schalen K und M.

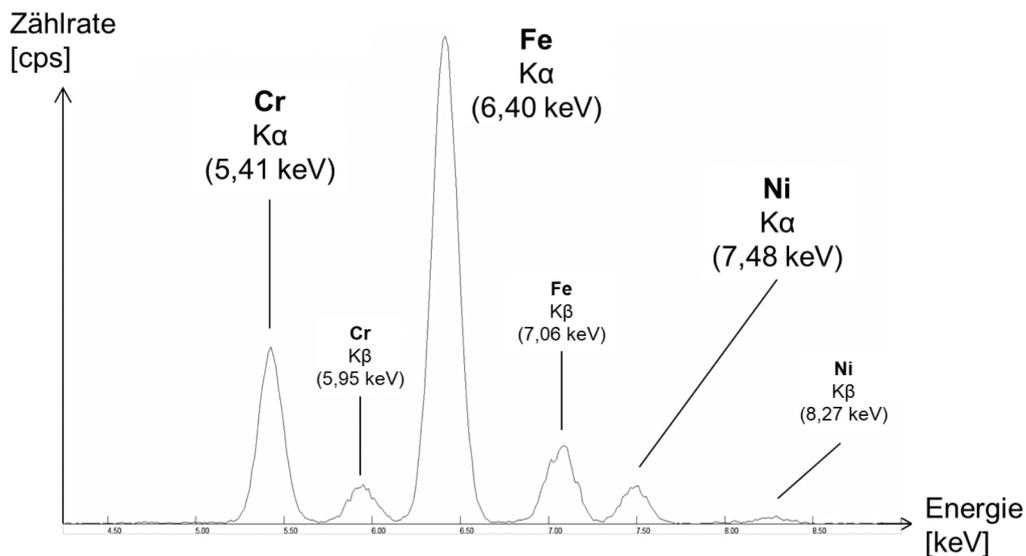


Abbildung 2: Vereinfachtes Spektrum einer hochlegierten Eisenbasislegierung /analyticon GmbH/

Wie tief die Röntgenstrahlung in den Werkstoff eindringen kann und aus welcher Tiefe die Messinformationen stammen, wird von der Energie der Strahlung und von deren Absorption in der Probenmatrix bestimmt. Je höher die Dichte eines Werkstoffs umso geringer ist die Informationstiefe, welche auch als Ausdringtiefe bezeichnet wird. So lassen sich mit einer Röntgenröhre mit einer maximalen Röhrenspannung von 50 kV, wie sie häufig in handgehaltenen Analysatoren zum Einsatz kommen, bei Kupferbasiswerkstoffen Messtiefen von bis zu 3 mm erzielen. Hingegen beträgt diese bei Gold aufgrund der mehr als doppelten Dichte und einer nichtlinearen physikalischen Gesetzmäßigkeit bei der Schwächung der Röntgenstrahlung in Abhängigkeit der Tiefe nur lediglich 0,6 mm. Diesen Sachverhalt gilt es bei Messungen zu beachten, mit denen beispielweise geprüft werden soll, wie das Bauteil hinsichtlich der Zusammensetzung auch in kernnäheren Schichten beschaffen ist. Hingegen kann der Effekt der dichteabhängigen Ausdringtiefe zur Schichtdickenanalyse bei dünnen Beschichtungen, wie sie in der Galvanik oder beim Plattieren aufgebracht werden, genutzt werden. Die Schichtwerkstoffe und somit die Dichten müssen vorab bekannt sein, damit bei der Messung über die jeweilige Absorption in einer Schicht deren Dicke bestimmt werden kann. Dabei muss bei sehr dünnen Schichten die jeweilige Nachweisgrenze des verwendeten Elements beachtet werden. Aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und der kurzen Messzeiten von nur wenigen Sekunden hat dieses Verfahren in der zerstörungsfreien Beschichtungsanalyse einen festen Platz eingenommen.

2. Einsatz der mobile RFA im Werkstoffrecycling

Durch den Einsatz mobiler Handspektrometer erschloss sich für die Röntgenfluoreszenzanalyse ein weites Feld von Anwendungsmöglichkeiten. Die typischen Einsatzgebiete der sogenannten Handheld-Geräte liegen in der Qualitätssicherung und Verwechslungsprüfung, im Recycling von Metallschrott und Elektronikkomponenten, im Ankauf von Edelmetallen, im RoHS-Screening, bei der Bestimmung von Schwermetallen und Halogenen in Kunststoffen, in der Boden- und Erzanalytik sowie in der Archäometrie.

Da es sich hierbei gemäß §18 Abs. 1 Nr. 1 der Röntgenverordnung (RöV) um eine Röntgeneinrichtung handelt, müssen vor dem Betrieb die gesetzlichen Vorschriften beachtet und ein Mitarbeiter als Strahlenschutzbeauftragter ausgebildet und eingesetzt werden. In Kombination mit einer speziellen Probenkammer lässt sich ein mobiler Analysator sehr schnell in eine stationäre Anlage umrüsten, welche sich für die sichere Messung von kleineren Proben im Laborbetrieb beispielsweise bei der Werkstoffentwicklung und auch in der Lehre einsetzen lässt.

In vielen Fällen ist es ausreichend, Materialien zu klassifizieren, ohne eine qualifizierte Quantifizierung vorzunehmen. Das kann beispielsweise der Fall sein, wenn zu prüfen gilt, ob das eingesetzte Material dem geplanten Einsatzfall gerecht wird, also z. B. ob ein Stahl seewasserbeständig oder schweißgeeignet ist. Eine weitere Anwendung könnte die Bestimmung des Gehalts von Legierungselementen in Schrott sein, um über dessen Wert und weitere Verwendung zu entscheiden. /2/

Je nach Art und Güte werden mit der Schrottsorte auch der Geldwert und das Recyclingpotenzial des Altmetalls bestimmt. Grundsätzlich werden die eintreffenden Schrotte beim Recyclingunternehmen zuerst auf Radioaktivität getestet. Danach erfolgen eine Selektierung anhand der Messergebnisse sowie eine sortenreine Lagerung. /4/

Auch wenn der erfahrene Produzent und Anwender ein Endprodukt aufgrund seines erkennbaren Eigenschaften durchaus einer in Frage kommenden Stahlsorte zuordnen kann, gelingt dies bei einem Halbzeug in der Wareneingangskontrolle oder einem Schrottteil oft nicht mehr. Die Vorbereitung des Prüflings gestaltet sich bei der Schrottsortierung im Gegensatz zur stationären Analyse verhältnismäßig einfach. Es ist zweckmäßig Beschichtungen oder Verunreinigungen zu beseitigen, um deren Einfluss auf die Bestimmung von vor allem leichten Elementen zu reduzieren. Prüft man beispielsweise eine Getränkedose aus gewöhnlichem Weiß-

blech, so suggeriert die Zusammensetzung der Lackierung einen Titananteil im Stahl von fast 5 Gew.-%.

Obwohl die unterschiedlichen Messbedingungen und Verunreinigungsgrade beim Einsatz in einem Recyclingbetrieb die erreichbaren Analysegenauigkeiten einschränken, lassen sich prinzipiell bei der quantitativen Analyse mit mobilen Geräten Analysegenauigkeiten erreichen, welche mit stationären Laborgeräten vergleichbar sind. Die Nachweisgrenzen sind sehr stark geräte-, element-, begleitelement- und matrixabhängig, so dass eine pauschale Aussage über die Messgenauigkeit nicht gegeben werden kann. Viel aussagekräftiger sind hingegen die LOD-Werte (Limit of Detection – Nachweisgrenzen) welche elementabhängig bei 10 bis 5.000 ppm liegen. So beträgt beispielsweise in einer Eisenmatrix der LOD-Wert für Cr 0,003 Gew.-%, für Ni 0,020 Gew.-% und für Al 0,500 Gew.-%. /5/

Anwendungsbeispiele Edelstahlrecycling

Am Beispiel des Recyclings von Edelstählen und rostfreien Stählen soll der Einsatz der mobilen RFA demonstriert werden. Hier ist eine genaue Quantifizierung in der Regel nicht erforderlich. In der Abbildung 3 ist ein Handheld-Gerät dargestellt, welches bei einem Recyclingbetrieb im Einsatz ist.



Abbildung 3: Schrottsortierung mit mobiler RFA bei der RPS Siegen GmbH /4/

Edelstahl ist nach der DIN EN 10020 eine Bezeichnung für legierte oder unlegierte Stähle, deren Schwefel- und Phosphorgehalt 0,035 Gew.-% nicht übersteigen darf. /4/ Die Bezeichnung „Edelstahl Rostfrei“ ist ein Sammelbegriff für die nichtrostenden korrosionsbeständigen Stähle. Sie enthalten mindestens 10,5 % Chrom (Cr) und weisen gegenüber unlegierten Stählen eine deutlich verbesserte Korrosionsbeständigkeit auf. /6/

Ein konkretes Beispiel für den Einsatz rostfreier Edelstähle sind Tafelbesteckteile. Hierzu wurden exemplarisch zwei Teile unterschiedlicher Hersteller geprüft. Bei dem einem handelte es sich um das Produkt eines schwäbischen Traditionsunternehmens und bei dem anderen um Importware des untersten Preissegments. In der Tabelle 1 ist die Zusammensetzung der relevanten Elemente dargestellt.

Tabelle 1: Messdaten einer RFA-Messung von hochlegierten Stählen

Type	General Metals	General Metals
Units	%	%
Alloy1	1.2080	1.4301
Spalte1	Konz. 1	Konz. 2
Fe	86,661	70,662
Cr	12,057	18,195
Si	0,635	0,588
Mn	0,264	1,151
Ni	0,186	8,538
V	0,074	0,105
Cu	0,000	0,316
Mo	0,000	0,171
Ti	0,000	0,053
Sn	0,000	0,027

Wie sehr gut zu erkennen ist, unterscheiden sich die Stähle in Bezug auf Ihre Legierungselemente deutlich. Der 1.4301 (X5CrNi18-10), welcher als typischer nichtrostender, austenitischer Stahl bekannt ist und wie durch die Besteckprägung 18/10 auch zu erwarten war, weist einen Ni-Gehalt von knapp oberhalb 8,5 Gew.-% auf. Dieser Wert liegt zwar noch innerhalb des nach DIN EN 10088-3 zulässigen Bereichs von 8,0-10,5 Gew.-%, zeigt aber auch wie die Stahlhersteller vor allem teure Legierungselemente gezielt an den unteren Rand der Skala drängen.

Hingegen überrascht der Materialvorschlag mit der Bezeichnung 1.2080 (X210Cr12) für das günstige Besteckteil. Dieser Stahl mit einem relativ hohen Kohlenstoffanteil kommt normalerweise bei hochbeanspruchten Schnitt- und Stanzwerkzeugen zum Einsatz. Eine Vergleichsmessung mit einem, hinsichtlich der Messbarkeit von leichteren Elementen, genaueren Funkenspektroskop (Optische Emissionsspektrometrie – OES), auf dessen Funktionsweise im folgenden Abschnitt kurz eingegangen werden soll, liefert bezüglich der Zusammensetzung zwar ein ähnliches Ergebnis, schlägt als Werkstoff aber einen 1.4000 (X6Cr13) vor. Dieser ferritische nichtrostende Stahl mit seiner Beständigkeit in mäßig aggressivem Umfeld erscheint in diesem Kontext wesentlich plausibler.

4. Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurden die Wirkungsweise sowie konkrete Anwendungsbeispiele der mobilen Röntgenfluoreszenzanalyse beschrieben. Dabei wurde sowohl die Vielseitigkeit dieses Verfahrens, aber auch dessen Grenzen aufgezeigt. Bei der Analyse der Besteckteile hat in dem einen Fall offensichtlich der verhältnismäßig geringe Mn- und Si-Anteil in Kombination mit der fehlenden Möglichkeit einer Kohlenstoffanalyse (aufgrund der zu niedrigen Ordnungszahl 6), welcher mit der OES im Gegensatz zur RFA bestimmt werden kann, zu einem falschen Werkstoffvorschlag geführt. Dies ist auch der Grund warum in der Stahlmetallurgie die Funken-spektrometrie zur genauen Analyse überwiegt. Die Funktionsweise ist ähnlich wie die der RFA. Hierbei werden, vereinfacht erklärt, Atome durch Zuführen von Energie angeregt Lichtstrahlen abzugeben. Die Lichtspektren werden ausgewertet und bei bekannten Wellenlängen der Lichtteilchen (Photonen) kann die jeweilige Atomart bestimmt werden. Da die Lichtmenge näherungsweise proportional zum Gehalt des zugehörigen Elements ist, kann somit aus der Strahlungsintensität der Gehalt eines Elements im Prüfling bestimmt werden. Ihren Ursprung hat die Funken-spektrometrie in der Schleiffunkenprüfung. Da die Anregung der Atome über einen Lichtbogen geschieht, weist die Probe nach der Prüfung einen Brennfleck auf, der das Bauteil hinsichtlich seiner technischen Eigenschaften in der Regel nur wenig beeinflusst, sich aber optisch durchaus nachteilig auswirken kann. Aufgrund der hohen Temperatur des Lichtbogens muss der Prüfbereich mit Schutzgas abgeschirmt werden. Zudem sind nur leitende Matrixwerkstoffe prüfbar und es ist eine aufwendigere Oberflächenvorbereitung erforderlich.

Dieses einfache Beispiel hat gezeigt, dass mit dem Verfahren der RFA sehr schnell ermittelt werden kann, wie ein Werkstoff zusammengesetzt ist, ob sich die Zusammensetzung gegebenenfalls chargenübergreifend verändert hat und inwieweit diese Modifikation noch innerhalb der zulässigen Grenzen liegt. Diese Aussagen sind in vielen Fällen in der Praxis vollkommen ausreichend. Darin liegt die anfangs erwähnte Häufigkeit dieser Prüfmethode vor allem in der Qualitätssicherung und im Recycling begründet. Ein neues mobiles Messverfahren alternativ zur RFA zur besseren Bestimmung leichterer Elemente soll abschließend noch erwähnt werden. Dabei handelt es sich um die laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS – laser-induced breakdown spectroscopy) welche derzeit noch einige Nachteile hinsichtlich der Kalibration und Messgenauigkeit aufweist. Dem Anwender in den genannten Bereichen wird empfohlen, die Entwicklung dieses Verfahrens in den nächsten Jahren im Auge zu behalten.

Literatur

/1/ Bauch, J.; Rosenkranz, R.: Physikalische Werkstoffdiagnostik. Springer Vieweg Verlag, 2017.

/2/ Haschke, M.; Flock, J.: Röntgenfluoreszenzanalyse in der Laborpraxis. Wiley-VCH Verlag, 2017.

/3/ <https://www.analyticon.eu/de/rfa.html>

/4/ Schlegel, J.: Kleine Stahlkunde – Einblicke in der Welt der Edelstähle. Rommert Verlag, 2015.

/5/ Thermo Scientific Niton XL3t GOLDD Alloy Analyzers – Elemental Limits of Detection in Titanium/Iron/Copper-based Alloys. Produktdatenblatt, 2008.

/6/ https://www.edelstahl-rostoffrei.de/downloads/iser/MB_821.pdf

**Nachfolgender Beitrag war/ist als „Ersatzbeitrag“
vorgesehen, für den Fall, dass ein anderer Beitrag
kurzfristig ausfällt.**

**Die Herausgeber des Tagungsbandes haben sich
nun dafür entschieden, auch diesen Beitrag in den
Tagungsband aufzunehmen.**

Zelluläre Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe
-
Stand der Technik und Recycling von zellulären partikulär verstärkten Al-Basis Legierungen für den effizienten Leichtbau

M. Eng. Pierre Kubelka

Dr.-Ing. Alexander Martin Matz

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost

Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien (IWWT),
Hochschule Pforzheim

Abstract

Unter den Aspekten der ansteigenden Rohstoffknappheit in Verbindung mit hohen Rohstoff- und Energiepreisen, wird die Forderung nach effizienteren Leichtbaulösungen in metallverarbeitenden Industriezweigen immer deutlicher. So werden unter anderem immer mehr Leichtbaumaterialien im Kraftfahrzeugbereich eingesetzt, um den Energieverbrauch weiter zu senken. Dies nimmt bspw. bei der Elektromobilität eine wichtige und auch übergeordnete Rolle ein. Durch die Verminderung der Fahrzeugmasse und durch eine effizientere Nutzung der Materialien, kann mit einem stetigen Anstieg der Reichweite von E-Fahrzeugen gerechnet werden.

Neben den klassischen Leichtbaumaterialien aus Al-Legierungen, Mg-Legierungen und den Kohlefaserverstärkten Kunststoffen, können unter anderem Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe mit einer diskontinuierlich partikulären Verstärkung eingesetzt werden. Es können so Festigkeiten erreicht werden, die das Drei- bis Fünffache von konventionellen Al-Legierungen betragen. Um dieses Leichtbaupotenzial noch weiter erhöhen zu können, kann die Applikation auf eine zelluläre Struktur von Nutzen sein. Dadurch kann die für den Leichtbau wichtige Eigenschaft der spezifischen Festigkeit noch weiter gesteigert werden.

Mit dem vorliegenden Beitrag wird ein Überblick über den Stand der Technik/Forschung von Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen, deren Potentiale für die Anwendung als zelluläre Struktur und die Möglichkeiten zum Recycling gegeben. Es wird aufgezeigt, dass der Einsatz von diskontinuierlich verstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen als offenporiger Schaum eine Lücke und ein somit kaum Beachtung gefundenes Forschungsfeld darstellt. Damit diese dennoch nutzbar gemacht werden können, muss insbesondere Forschung in den Bereichen der Herstellung und Charakterisierung betrieben werden.

Einleitung

Verbundwerkstoffe spielen im modernen Leichtbau eine wichtige Rolle. Sie kombinieren unterschiedliche mechanische Materialeigenschaften, um aus materieller Sicht die Anforderungen der Gewichtsreduzierung erfüllen zu können. Speziell Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe (engl.: **Aluminum Matrix Composites, AMCs**) mit einer diskontinuierlichen Verstärkung haben hier einen wichtigen Stellenwert. AMCs beschreiben, durch die Kombination einer duktilen und zähen Aluminium-Basis-Legierung mit einer hochfesten Verstärkung (in Form von Keramik, Kohlefaser, etc.), eine Materialklasse, die äußerst hohen mechanischen Belastungen standhält.

Nebst diesen positiven Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften, sind auch auf der ökologischen und ökonomischen Ebene Vorteile zu finden. Die hohe Verfügbarkeit der infrage kommenden Materialien sowie die Wiedergewinnung und -verwendung ohne sonderlich großen (Energie-)Aufwand schonen die Umwelt und zugleich den Kostenhaushalt.

AMCs werden in der Industrie in den meisten Fällen bereits als pulvermetallurgische Erzeugnisse für abrasive Anwendungen genutzt. Die schmelzmetallurgische Herstellung von Produkten aus AMCs wird teils zwar angeboten, jedoch kommerziell, aufgrund der höheren Kosten und schwierigeren Handhabung der Prozesse, deutlich weniger genutzt. Um diesen Bereich zugänglich zu machen, soll die Applikation der AMCs auf eine zelluläre Schaumstruktur helfen. Diese bringt eine verbesserte spezifische Festigkeit ggü. einem Vollkörper mit sich, da das eingesetzte Material weitaus effizienter und gezielter genutzt werden kann.

Stand der Technik

Eine geringe Dichte und eine gleichzeitig hohe Festigkeit sind wichtige Eigenschaften für den Leichtbau. Sie werden maßgeblich durch die Auswahl des Werkstoffes selbst, sowie durch dessen Behandlung zur Veränderung der Gefügestruktur festgelegt. Die Dichte kann insoweit nur dadurch verändert werden, dass z. B. durch die Einbringung von Hohlräumen eine geringere spezifische Dichte pro eingenommenen Volumen vorliegt. Hierfür können im Allgemeinen zelluläre Materialstrukturen angewandt werden. Über die Festigkeit des Materials kann in erster Linie keine direkte Aussage getroffen werden. Diese hängt stark vom Behandlungszustand sowie der Zusammensetzung des Materials ab. Um die Festigkeit wesentlich zu beeinflussen, gibt es mehrere Maßnahmen, welche nachfolgend aufgeführt sind:

- Behinderung der elasto-plastischen Verformung durch die Erhöhung der Anzahl der Korngrenzen mittels Minimierung der kristallographischen Korngröße bzw. Ausscheidung von Teilchen im Werkstoff selbst (Wärmebehandlung zur Feinkorn- und Teilchenhärtung)
- Verzerrung des kristallographischen Gitters und daraus resultierende Steigerung der Eigenspannungen durch Zugabe von Fremdatomen (Veränderung der Werkstoffzusammensetzung, Mischkristallverfestigung)
- Steigerung der Eigenspannungen durch plastische Verformung, um die Versetzungsdichte zu erhöhen (Plastisches Verformen des Werkstoffs, Kaltverfestigung)

Bei zellulären Strukturen sind diese Maßnahmen allerdings weitestgehend nicht anwendbar. Ein feinkörniges Gefüge lässt sich durch Wärmebehandlungen nur unter speziellen Voraussetzungen erreichen. Das Zulegieren von Fremdatomen und die somit hervorgerufene Mischkristallverfestigung führen nur zu einer geringen Festigkeitssteigerung und sind eher als unterstützende Maßnahme anzusehen. Maßgeblich an der Festigkeitssteigerung sind die Erhöhung der Versetzungsdichte und die Anzahl an Gitterstörungen im Gefüge beteiligt. Als Maßnahme kann hier die externe Einbringung einer Zweitphase in das Gefüge genannt werden. Diese erzeugt, aufgrund der unmittelbaren Erhöhung der Anzahl an Korngrenzen im Zusammenspiel mit einer Verzerrung des Kristallgitters der Ursprungsphase durch divergente Eigenschaften, eine Festigkeitssteigerung. An dieser Stelle treten

insbesondere AMCs in Erscheinung, da deren außerordentlichen Festigkeiten genau auf diesen Mechanismen basieren.

Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe

AMCs zählen seit den letzten Jahrzehnten zu den aussichtsreichsten Strukturwerkstoffen im Bereich des Leichtbaus. Im Grunde sind AMCs ein Phasengemisch aus zwei verschiedenen Materialien. Die erste Phase beschreibt die Al-Basis-Matrix, während die zweite Phase durch eine Verstärkungsmatrix beschrieben wird. Der Werkstoff der Verstärkungsphase besitzt differenzierbare physikalische Eigenschaften gegenüber der Basis-Matrix. Dazu zählen abweichende metallische Legierungen/Elemente, Kunststoffe, Kohlenstoffverbindungen oder Keramiken [1,2]. Diese interagieren so miteinander, dass makroskopisch ein neuer Werkstoff mit angepassten physikalischen Eigenschaften entsteht [3–5]. Durch die Kombination der unterschiedlichen Materialklassen kann z. B. ein Werkstoff erzeugt werden, der duktil und zugleich hochfest ist. Aus diesem Grund lassen sich für AMCs Festigkeiten erreichen, die drei- bis fünfmal so hoch im Vergleich zu reinen Al-Legierungen sind [6]. Auch die Form der verstärkenden Phase ist von Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften. Diese kann als Partikel, Kurzfaser, Endlosfaser oder als Platte vorliegen. Im Falle des Einsatzes in zellulären Strukturen, werden primär diskontinuierliche Verstärkungen in Form von Partikeln betrachtet, da diese für den makroskopischen Werkstoff isotrope Eigenschaften bereitstellen. In Abbildung 1 ist beispielhaft eine diskontinuierliche partikuläre Verstärkung dargestellt.

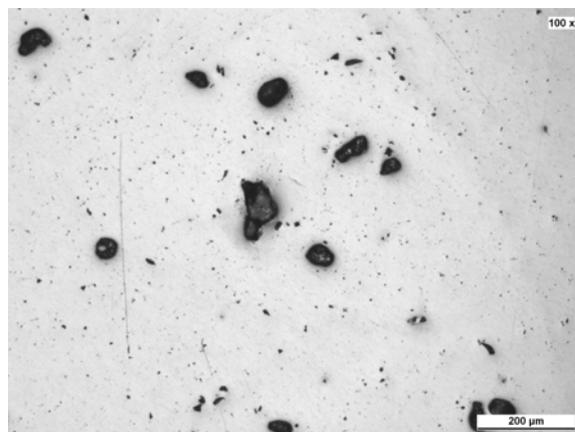


Abbildung 1: Gefügestruktur eines Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffes aus reinem Al (helle Bereiche) mit einer diskontinuierlich partikulären Verstärkung aus WC (dunkle Bereiche)

Hinsichtlich der Forschung und Entwicklung von diskontinuierlichen AMCs bestehen aktuell mehrere Trends. Zum einen werden mehrere unterschiedliche Verstärkungsmatrizen eingesetzt um sog. hybride AMCs herzustellen. Dadurch können weitere physikalische Eigenschaften kombiniert werden [7]. Zum anderen kommen immer öfter Verstärkungsmatrizen auf nanoskaliger Basis zum Einsatz [8]. Diese spezielle Variante der AMCs werden Aluminiummatrix-Nanokomposite (engl.: **Aluminum Matrix Nanocomposites, AMNCs**) genannt.

Zelluläre Metallische Strukturen

Metallische Schäume zählen noch zu einer relativ jungen Generation der zellulären metallischen Strukturen. Ihre außerordentlichen spezifischen physikalischen Eigenschaften eröffnen neue Möglichkeiten für eine große Vielzahl an technischen Anwendungen. Die geringe spezifische Dichte und die große Oberfläche können speziell für mechanische und thermische Anwendungen wesentliche Vorteile mit sich bringen. Diese sind stark vom morphologischen Aufbau und deren Struktur geprägt.

Generell lassen sich die metallischen Schaumstrukturen in die Gruppen der offen- und geschlossenenporigen Schäume einteilen (vgl. Abbildung 2). Bei beiden Formen sind die Zellen durch bestimmte Polyederstrukturen definiert, die physikalischen und geometrischen Grundsätzen folgen [9]. Die offenporigen Schäume besitzen keine Zellwände und bestehen lediglich aus den stabilisierenden Stegen der Zellen. Dies macht sie ggü. den geschlossenenporigen Schäumen für eine größere Vielzahl an technischen Anwendungen interessanter, da die vergleichsweise große spezifische Oberfläche funktionale Aufgaben übernehmen kann und die Struktur selbst durchströmbar ist.



Abbildung 2: Morphologie der beiden unterschiedlichen Gruppen von metallischen Schäumen, links: geschlossenerporiger Schaum (aus [10]), rechts: offenerporiger Schaum (aus [11])

Zelluläre Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe

Bei den AMC-Schäumen gibt es bis dato nur sehr wenige Forschungsaktivitäten. Es ist nur eine überschaubare Anzahl an Veröffentlichungen vorhanden, die sich ausschließlich mit der Herstellung bzw. Charakterisierung von AMCs als geschlossensorige Schäume beschäftigen (vgl. Abbildung 3). Im Falle von offenporigen AMC-Schäumen kann somit ein noch sehr unerforschtes wissenschaftliches/technologisches Feld erschlossen werden. Insbesondere liegt bei der offenporigen Struktur– neben der Steigerung der spezifischen Festigkeit des Grundmaterials durch die Einbringung von z. B. keramischen oder kohlenstoffbasierten Verstärkungsphasen – ein beachtenswertes Potential für einen gezielten und dynamischen Wärmetransport vor, was diese Werkstoffgruppe für thermische Anwendungen äußerst attraktiv macht.

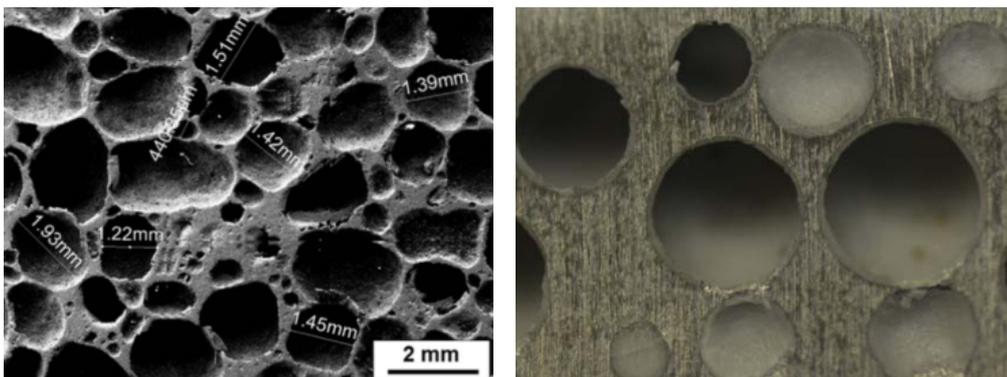


Abbildung 3: Morphologie von geschlossensorigen AMC-Schäumen, links: schmelzmetallurgisch hergestellter Al-Schaum mit CNTs verstärkt (aus [12]), rechts: schmelzmetallurgisch hergestellter syntaktischer AlSi-Schaum mit hohlen Al_2O_3 -Sphären (aus [13])

Damit die erforderliche mechanische Stabilität eines offenporigen Schaumes gewährleistet werden kann, ist die Herstellung über die schmelzmetallurgische Route meistens unumgänglich. Es können zum einen der Feinguss und zum anderen das Platzhalterverfahren angewandt werden [14]. Um die schmelzmetallurgischen Verfahren zur Herstellung von offenporigen AMC-Schäumen nutzbar zu machen, müssen allerdings noch einige Problem- und Fragestellungen geklärt werden.

Grundsätzlich ist die schmelzmetallurgische Herstellung von AMC-Schäumen nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich. In diesem Zusammenhang sind insbesondere zwei grundlegende Problemstellungen im Zusammenspiel der beiden Phasen zu erwähnen. Hierzu zählt zum einen das Benetzungsverhalten der festen

Verstärkungsmatrix durch die flüssige Schmelze der Al-Basis-Matrix und zum anderen die Veränderung der dynamischen Schmelzviskosität des Gesamtsystems.

Durch die generell unterschiedliche thermodynamische Natur der beiden Komponenten liegt in einem unbehandelten Zustand ein generell schlechtes Benetzungsverhalten vor. Dies bedeutet, dass kein bzw. nur ein unzureichender Kontakt zwischen den beiden Materialien besteht und somit ein Stoffschluss schwer zu erzielen ist. Bedingt wird dies durch die Grenzflächenenergien zwischen den beiden Systemen. Im Falle der dynamischen Schmelzviskosität liegt, durch die Einbringung der Partikel in die Al-Schmelze, eine Verschlechterung hinsichtlich der Gießbarkeit vor. Die relativ kleinen Partikel scheren die flüssige Schmelze, wodurch eine Bewegung behindert wird und zusätzliche Wärme entsteht. Um diesen Problemen zu entgegen, gibt es die Möglichkeit des Zusatzes von Materialien und Elementen zur Al-Basis-Schmelze [15,16] oder der Veränderung der Oberfläche der Verstärkungsphase [17].

Recycling

Der Einsatz von Verbundwerkstoffen bringt immer wieder die Frage auf, ob und wie gut eine Wiederverwendung bzw. -gewinnung möglich ist. Dabei wird nicht nur der Verbund selbst, sondern auch dessen einzelne elementare Bestandteile betrachtet. Es soll der Werkstoffkreislauf geschlossen werden, um so ökonomisch und ökologisch, im Sinne von sekundärer Rohstoffnutzung, zu agieren. Speziell bei der Betrachtung von AMC's spielen die ökologischen Vorteile eine wichtige Rolle, da deren primäre Herstellkosten im Vergleich zu den Kosten der einzelnen Bestandteile sehr hoch ausfallen [18].

Die Wiederverwendung von diskontinuierlich verstärkten AMC's stellt eine relativ unkritische Hürde dar. Das Material kann durch Wiederaufschmelzen direkt als neues Gussprodukt verwendet werden. Dabei sind durch etwaige Verunreinigungen geringe Änderungen in der Reinheit des Materials sowie den mechanischen Kennwerten zu erwarten. Dem kann durch den Zusatz von primärem Material entgegen gewirkt werden [19].

Die Wiedergewinnung der einzelnen Komponenten der diskontinuierlich verstärkten AMC's kann auf unterschiedliche Wege erfolgen. Diese entscheiden dabei, wie getrennt wird und welche Reinheiten die Materialien im Anschluss besitzen. Generell lassen sich die Verfahren der Wiedergewinnung in zwei Klassen einteilen: **Mechanische Trennung** und **Chemische Trennung** [5]. Diese werden im Folgenden kurz dargestellt.

- **Mechanische Trennung**

Bei der mechanischen Trennung wird das Auslösen der festen Verstärkung aus der flüssigen Aluminiummatrix genutzt. Hierbei wird das AMC-Material über die Schmelztemperatur des Al-Basis-Werkstoffes erhitzt, so dass die Extraktion der partikulären Verstärkung erfolgen kann. Dies geschieht durch Filtern, Abschöpfen oder Ausquetschen. Hierbei ist zu beachten, dass Verunreinigungen durch Reaktionsprodukte bzw. Rückstände in den extrahierten Bestandteilen zurückbleiben können [5,20].

- **Chemische Trennung**

Bei der chemischen Trennung wird der Zusatz von Salzen in der flüssigen Al-Schmelze genutzt um die partikulären Verstärkungen auszufällen. Die Salze reichern sich durch die niedere Grenzflächenenergie an der Oberfläche der Partikel an und fällen diese durch eine sehr geringe Löslichkeit in der Schmelze aus [5,18]. Der Einsatz von Salzen zur Extrahierung der Partikel bringt wiederum Verunreinigungen mit sich, die sie für Folgeanwendungen eventuell unbrauchbar machen.

Zusammenfassung und Ausblick

AMCs als offenporige Schäume bringen einzigartige Eigenschaften mit sich. Insbesondere die Kombination aus hochfestem AMC-Material mit einer offenporigen Struktur führt zu einer hohen spezifischen Festigkeit mit einer zugleich ausgeprägten Funktionalisierbarkeit. Damit die eigenschaftsinduzierten Zusammenhänge zwischen der offenporigen Struktur und des Gefüges der AMC-Matrix begreifbar werden, bedarf es noch einiger Forschungsarbeit in den Bereichen der Herstellung, Charakterisierung und des Recyclings.

Danksagung

Ermöglicht wurde dieser Beitrag im Rahmen des Teilprojekts *„Festigkeitsoptimierte Al-Basis-Schäume durch gezielte Partikelverstärkung für Leichtbau in Mobilität und Fertigung“* des ZAFH *„Innovative Schaumstrukturen für effizienten Leichtbau (In-SeL)“*. Die Autoren möchten hierfür der *Europäischen Union Europäische Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)* und dem *Land Baden-Württemberg* für die finanzielle Unterstützung danken.

Literatur

- [1] R.S. Rana, R. Purohit, S. Das, Review of recent Studies in Al matrix composites, *International Journal of Scientific & Engineering Research* 3 (2012) 1–16.
- [2] M.K. Surappa, Aluminium matrix composites, *Sadhana* 28 (2003) 319–334.
- [3] A. Evans, C. San Marchi, A. Mortensen, *Metal Matrix Composites in Industry: An Introduction and a Survey*, 2003.
- [4] N. Chawla, K.K. Chawla, *Metal Matrix Composites*, 2nd ed., Springer New York, New York NY, 2013.
- [5] Y. Nishida, *Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling*, Springer, Tokyo, 2013.
- [6] O. Beffort, *Metallmatrix-Verbundwerkstoffe: Eigenschaften, Anwendungen und Bearbeitung, Feinstbearbeitung technischer Oberflächen - 6. Internationales IWF-Kolloquium* (2002).
- [7] E. Ghasali, R. Yazdani-rad, K. Asadian, T. Ebadzadeh, Production of Al-SiC-TiC hybrid composites using pure and 1056 aluminum powders prepared through microwave and conventional heating methods, *Journal of Alloys and Compounds* 690 (2017) 512–518.
- [8] R. Casati, M. Vedani, Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles—A Review, *Metals* 4 (2014) 65–83.
- [9] D. Weaire, R. Phelan, Cellular Structures in Three Dimensions, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 354 (1996) 1989–1997.
- [10] AlCarbon Technologie UG, ALUSION Metallschaumplatten. www.alcarbon.de/images/ALUSION/web_ALUSION-B.Cell%20Golden.JPG.
- [11] A.M. Matz, D. Kammerer, N. Jost, K. Oßwald, Machining of Metal Foams with Varying Mesostructure Using Wire EDM, *Procedia CIRP* 42 (2016) 263–267.
- [12] A. Aldoshan, S. Khanna, Effect of relative density on the dynamic compressive behavior of carbon nanotube reinforced aluminum foam, *Materials Science and Engineering: A* 689 (2017) 17–24.

- [13] L. Licitra, D.D. Luong, O.M. Strbik, N. Gupta, Dynamic properties of alumina hollow particle filled aluminum alloy A356 matrix syntactic foams, *Materials & Design* 66 (2015) 504–515.
- [14] G.J. Davies, S. Zhen, Metallic foams, *Journal of Materials Science* 18 (1983) 1899–1911.
- [15] R. Taherzadeh Mousavian, R. Azari Khosroshahi, S. Yazdani, D. Brabazon, A.F. Boostani, Fabrication of aluminum matrix composites reinforced with nano- to micrometer-sized SiC particles, *Materials & Design* 89 (2016) 58–70.
- [16] S. Gangolu, A.G. Rao, N. Prabhu, V.P. Deshmukh, B.P. Kashyap, Hot Workability and Flow Characteristics of Aluminum-5 wt.% B4C Composite, *Journal of Materials Engineering and Performance* 23 (2014) 1366–1373.
- [17] P. Shen, H. Fujii, T. Matsumoto, K. Nogi, The influence of surface structure on wetting of α -Al₂O₃ by aluminum in a reduced atmosphere, *Acta Materialia* 51 (2003) 4897–4906.
- [18] Y. Yang, R. Boom, B. Irion, D.-J. van Heerden, P. Kuiper, H. de Wit, Recycling of composite materials, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 51 (2012) 53–68.
- [19] D.B. Miracle, *Composites*, 2nd ed., ASM International, Materials Park, Ohio, 2002.
- [20] D.J. Nestler, *Verbundwerkstoffe - Werkstoffverbunde: Status quo und Forschungsansätze*. Habilitationsschrift, 2012.

VERZEICHNIS DER BISHER ERSCHIENENEN BEITRÄGE DER HOCHSCHULE PFORZHEIM

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

Pforzheimer
Werkstofftag
2018

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
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 Generationen
80. **Björn Engholm** Okt. 1997
Ökonomie und Ästhetik. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1996/97
2. Geänderte Auflage. Jan. 1998
81. **Lutz Goertz** Sept. 1998
Multimedia quo vadis? – Wirkungen, Chancen, Gefahren. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Fachhochschule Pforzheim, Wintersemester 1996/97
82. **Eckhard Keßler** 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 Politik und Wirtschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Fachhochschule Pforzheim, Wintersemester 1997/98
84. **Helmut Wienert** Juli 1998
50 Jahre Soziale Marktwirtschaft – Auslaufmodell oder Zukunftskonzept? Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 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 Beiträgen von Hartmut Löffler und Bernd Noll
89. **Ansgar Häfner u. a. (Hrsg.)** Jan. 2000
Konsequenzen der Globalisierung für das internationale Marketing. Mit Beiträgen von Dieter Pflaum und Klaus-Peter Reuthal
90. **Ulrich Wagner** Febr. 2000
Reform des Tarifvertragsrechts und Änderung der Verhaltensweisen der Tarifpartner als Voraussetzungen für eine wirksame Bekämpfung 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 Konzeption und Durchführung eines „Studium Generale“ an Fachhochschulen
93. **Helmut Wienert** Dez. 2000
Konjunktur in Deutschland – Zur Einschätzung der Lage durch den Sachverständigenrat im Jahresgutachten 2000/2001
94. **Jürgen Wertheimer** Febr. 2001
Geklonte Dummheit: Der infantile Menschenpark. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, 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 Risikomanagementsystems nach KontraG am Beispiel einer mittelständischen Versicherung
97. **Bernd Noll** Mai 2001
Die EU-Kommission als Hüterin des Wettbewerbs und Kontrolleur von sektoralen und regionalen Beihilfen
- Peter Frankenfeld**
EU Regionalpolitik und Konsequenzen der Osterweiterung
98. **Hans Joachim Grupp** Juni 2001
Prozessurale Probleme bei Beschlussmängelstreitigkeiten 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

Pforzheimer
Werkstofftag
2018

100. **Urban Bacher, Mikolaj Specht** Dez. 2001
Optionen – Grundlagen, Funktionsweisen und deren professioneller Einsatz im Bankgeschäft
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 Geschäftsbereichen der deutschen Automobilindustrie
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 Leibinger
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

Pforzheimer
Werkstofftag
2018

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
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. MAT-LAB, 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 (Hrsg.)** Sept. 2012
Tagungsband zum 1. Pforzheimer Werkstofftag (12.09.2012), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N. Jost
145. **Norbert Jost, Roman Klink (Hrsg.)** Sept. 2013
Tagungsband zum 2. Pforzheimer Werkstofftag (26.09.2013), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N. Jost
146. **Helmut Wienert** Feb. 2014
Zur Entwicklung der Hochschulen für Angewandte Wissenschaften (Fachhochschulen) in Deutschland
147. **Jürgen Antony** April 2014
Technical Change and the Elasticity of Factor Substitution, Hrsg.: N. Jost, K-H. Rau, R. Scherr, C. Wehner, H. Beck
148. **Stephanie Görlach** April 2014
Ressourceneffizienz in Deutschland, Hrsg.: N. Jost, K-H. Rau, R. Scherr, C. Wehner, H. Beck
149. **Norbert Jost, Roman Klink (Hrsg.)** Sept. 2014
Tagungsband zum Pforzheimer Werkstofftag 2014 (25.09.2014), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N. Jost

Pforzheimer
Werkstofftag
2018

150. **Bernd Noll** August 2014
Unternehmenskulturen – entscheidender Ansatzpunkt für wirtschaftsethisches Handeln?
151. **Human Resources
Competence Center** April 2015
50 Jahre Personalmanagement an der Hochschule – Jubiläumsband
152. **Rainer Maurer** Mai 2015
Auf dem Weg zur weltanschaulichen Bekenntnisschule: Das wirtschaftspolitische Leitbild der Hochschule Pforzheim
153. **Norbert Jost** Okt. 2015
Tagungsband zum Pforzheimer Werkstofftag 2015 (01.10.2015), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N. Jost
154. **Jessica Elena Balzer** Nov. 2015
Spielen mit guten Gewissen: Ein Vorschlag zur Zertifizierung der deutschen Spielwarenindustrie und ein Schritt näher zum Schachmatt des Greenwashing
155. **Jaqueline Paasche** Jan. 2016
Kopieren, transformieren, kombinieren – Ideenklau und Plagiarismus in der Werbung
156. **Vanessa Zeiler** Jan. 2016
Mobile User Experience – Der Einfluss von kognitivem Entertainment auf die Nutzung mobiler Anwendungen
157. **Mario Kotzab, Maximilian Pflug** Jan. 2016
Das bedingungslose Grundeinkommen
158. **Marco C. Melle** Jan 2016
Harmonisierung der heterogenen Unternehmensteuern in Europa? Plädoyer für einen Mittelweg
159. **Klaus Möller,
Julian Gabel,
Frank Bertagnolli** Aug. 2016
fischer Befestigungssysteme: Change Management in der Distributionslogistik – eine Fallstudie
160. **Rainer Gildeggen;
Andreas Willburger** Sept. 2016
What constitutes a compensation free regulation of foreign-owned property in international law?
161. **Wolfgang Heinz** Okt. 2016
Die Ethik des Strafens
162. **Norbert Jost,
Simon Kött (Hrsg.)** Okt. 2016
Tagungsband zum Pforzheimer Werkstofftag 2016 (29.09.2016), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N.Jost.
163. **Bettina C.K. Binder** März 2017
Kennzahlenmanagement und –controlling Prozessorientiertes Performance Management in internationalen Unternehmen
164. **Stefan Walz,
Jonas Tritschler,
Reinhard Rupp** Mai 2017
Erweitertes Management Reporting mit SAP S/4HANA auf Basis des Universal Journals
165. **Simone Harriehausen** Aug. 2017
Wenn ich zwanzig Ziegen will und Du mir keine geben magst – Ein Überblick über die Möglichkeiten und Methoden der Streitbeilegung
166. **Norbert Jost,
Simon Kött (Hrsg.)** Sept. 2017
Tagungsband zum Pforzheimer Werkstofftag 2017 (28.09.2017), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N.Jost.
167. **Helmut Wienert** Dez. 2017
Pforzheim: Alles Schuckstadt – oder was?
168. **Norbert Jost,
Simon Kött (Hrsg.)** Sept. 2018
Tagungsband zum Pforzheimer Werkstofftag 2018 (27.09.2018), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N.Jost.

Veranstalter



Hochschule Pforzheim

Fakultät für Technik

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/iwwt

www.pforzheimer-werkstofftag.de

Wirtschaft und Stadtmarketing Pforzheim (WSP)

Geschäftsbereich Wirtschaftsförderung

Reiner Müller
Leiter Wirtschaftsförderung

Telefon +49 (0)7231 39-1857
reiner.mueller@ws-pforzheim.de
www.ws-pforzheim.de

www.hochform-pforzheim.de

PFORZHEIMER WERKSTOFFTAG

Kooperationspartner:

