

Jost, Norbert (Ed.)

Proceedings

Technik-Forum 2008: Werkstoffe und Technologien zur Kaltverformung. Tagungsband zum Technik-Forum 2008 der Max- und Erni-Bühler-Stiftung

Beiträge der Hochschule Pforzheim, No. 134

Provided in Cooperation with:

Hochschule Pforzheim

Suggested Citation: Jost, Norbert (Ed.) (2009) : Technik-Forum 2008: Werkstoffe und Technologien zur Kaltverformung. Tagungsband zum Technik-Forum 2008 der Max- und Erni-Bühler-Stiftung, Beiträge der Hochschule Pforzheim, No. 134, Hochschule Pforzheim, Pforzheim, <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:951-opus-512>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/97609>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

BEITRÄGE DER HOCHSCHULE PFORZHEIM

Norbert Jost (Hrsg.)

**Technik-Forum 2008:
Werkstoffe und Technologien zur
Kaltverformung**

Nr. 134

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)

Sekretariat: Frau Alice Dobrinski
Hochschule Pforzheim,
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim
alice.dobrinski@hs-pforzheim.de
Telefon: 07231/28-6201
Telefax: 07231/28-6666

Ausgabe: Oktober 2009

Norbert Jost (Hrsg.)

Technik-Forum 2008:

Werkstoffe und Technologien zur Kaltverformung

Tagungsband zum
Technik-Forum 2008
der Max- und Erni-Bühler-Stiftung.
Das Forum fand im November 2008
an der Hochschule Pforzheim statt.

Prof. Dr. Norbert Jost (Hrsg.)
Hochschule Pforzheim
Fakultät Technik
Studiengang Maschinenbau
norbert.jost@hs-pforzheim.de

Inhalt des Tagungsbandes

Vorwort des Herausgebers	2
Kurzbiografien der Vortragenden beim Technik Forum 2008	5
Britta Nestler, Ali Aksi, Gieta Dewal, Marcus Jainta, Andreas Melcher, Oyunaa Nyamsuren-von Stackelberg, Michael Selzer, Frank Wendler Simulationsmethoden in der Werkstoffkunde	9
Andreas Baum Potenziale des Laserauftragsschweißens im industriellen Einsatz	37
Jörg Vetter, Georg Erkens, Jones Alami, Jürgen Müller, Martin Fromme, Urs Baier Neue Hochleistungs-Hartstoffbeschichtungen	67
Ursula Christian Werkstofftechnische Untersuchungen zur Klärung von Verarbeitungsproblemen und Ausfallursachen	84
Andreas Zilly, Frank Pupke Fortschrittsbericht zu mikrolegierten Kupferbasislegierungen - Neueste Erkenntnisse aus der Ermüdungsprüfung von Hängerseilen.....	108
Hanns Ruder Was auch Einstein sicher gern gesehen hätte - Visualisierung relativistischer Effekte.....	129

Vorwort des Herausgebers

Das im November 2008 veranstaltete Technik-Forum war ein Jubiläum besonderer Art, denn es machte die runde Anzahl von mittlerweile zehn erfolgreichen Technik-Foren an der Hochschule Pforzheim (inkl. einem in Iserlohn) voll. Auch dieses Mal folgten der Einladung nach Pforzheim wieder zahlreiche auf dem Gebiet der Kaltverformung von Metallen tätige Fachleute aus dem In- und Ausland und nutzten die Tagung zu intensiven fachlichen Diskussionen.

Auf den seit dem Jahr 2000 jährlich stattfindenden Technik-Foren werden u.a. die von der Max- und Erni-Bühler-Stiftung geförderten und finanzierten aktuellen Forschungsaktivitäten der Hochschule Pforzheim vorgestellt. Seit dem Beginn der Zusammenarbeit im Jahre 1999 erfolgen sie in enger interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen dem Labor für Werkstoffentwicklung und -prüfung sowie dem Labor für Laser- und Fertigungstechnik.

Auch bei diesem Forum wurde an der bewährten Aufteilung in einen fachlichen Teil (Workshop) sowie einem eingeladenen Festvortrag, der wieder gemeinsam mit dem Studium Generale stattfand, festgehalten.

Für den ersten Vortrag des Technik Forums konnte **Professorin Frau Dr. Britta Nestler, Leiterin des Exzellenzinstuts „Center of Computational Materials Science and Engineering (CCMSE)“ an der Hochschule Karlsruhe** gewonnen werden. Sie referierte über neue Möglichkeiten der Computersimulation in der Werkstoffkunde. So können durch mathematisch-physikalische Modelle z.B. die Mikrostrukturen der eingesetzten Materialien visualisiert werden. Diese Technik kann u.a. zur Ermittlung von Werkstoffeigenschaften unter unterschiedlichen Prozessbedingungen, Verarbeitungsmethoden oder auch in anderen Materialzusammensetzungen eingesetzt werden. Auf diese Weise wird es in Zukunft möglich sein, schon am Rechner die für ein bestimmtes Beanspruchungsprofil am optimalsten geeigneten Werkstoffe zu finden.

Im Anschluss stellte **Dipl.-Ing. (FH) Andreas Baum, wiss. Mitarbeiter und Doktorand im Fertigungstechniklabor der Hochschule Pforzheim** mit seinem Beitrag „Potenziale des Laserauftragsschweißens im industriellen Einsatz - Perspektiven aus dem gemeinsamen Forschungsprojekt der Hochschule

Pforzheim mit der Max- und Erni-Bühler-Stiftung“ alle bisher erarbeiteten Ergebnisse gesamthaft und systematisch strukturiert vor und konnte so mit diesem letzten Beitrag in der langen Reihe der bisher präsentierten Ergebnisse einen höchst erfolgreichen Abschluss dokumentieren.

Ein weiteres Highlight aus dem Bereich innovative Werkstoffe wurde mit dem Vortrag zu neuen Hochleistungs-Hartstoffbeschichtungen von **Dr.-Ing. Jörg Vetter, Geschäftsbereichsleiter, Sulzer Metaplas GmbH**, gelegt. Er stellte Ergebnisse vor, mit denen Anwender schnell und effektiv in der Lage sind, die für ihre Anforderungen besten Hartbeschichtungen auszuwählen. Der Schwerpunkt lag dabei auf Plasmabeschichtungen, die bei der richtigen Auswahl herausragende Kombinationen aus einerseits hoher Härte und Verschleißfestigkeit und auf der anderen Seite so wichtigen Eigenschaften wie Duktilität und Korrosionsfestigkeit ermöglichen.

Frau Ursula Christian, wiss. Mitarbeiterin des Werkstoffentwicklungs- und Prüflabors der Hochschule Pforzheim referierte dieses Jahr über „Werkstofftechnische Untersuchungen zur Klärung von Verarbeitungsproblemen und Ausfallursachen“, eines ihrer Spezialgebiete der Werkstoffprüfung und –analyse. Dieser Beitrag stellte in sehr anschaulicher und anwenderfreundlicher Weise nahezu alle Arten von Fehlern, die bei der Umformung von Metallen entstehen können, deren richtiges Erkennen und letztlich auch geeignete Maßnahmen zur Vermeidung vor.

Den Abschluss des diesjährigen fachlichen Teils bildete ein Vortrag rund um Kupfer-Legierungen, der von Herrn **M. Sc. Andreas Zilly, wiss. Mitarbeiter und Doktorand im Werkstoffentwicklungs- und Prüflabor der Hochschule Pforzheim** präsentiert wurde. Dabei präsentierte er einen sehr ausführlichen „Fortschrittsbericht zu mikrolegierten Kupferbasislegierungen“, in dem er insbesondere auf die neuesten Erkenntnisse aus der Ermüdungsprüfung von bestimmten Bauteilen des Oberleitungssystems von Schnellzugstrecken einging.

Eine ganz besondere Bereicherung des Programms und gleichzeitig den würdigen Abschluss des Technik-Forums 2008 stellte der Festvortrag von **Prof. Dr. Hanns Ruder, Professor für Theoretische Astrophysik an der Universität Tübingen**, dar. In seinen Ausführungen „Was auch Einstein sicher gern gesehen hätte - Visualisierung relativistischer Effekte“ stellte er die doch auf den ersten Blick häufig recht komplexen und für den Nichtphysiker vielleicht auch schwer verständlichen Aspekte der Einstein'schen Relativitätstheorie in anschaulicher und bisher nicht gesehener Form vor. So demonstrierte Prof. Ruder z.B. mit Hilfe spezieller Videosequenzen, wie man sich die Annäherung an ein schwarzes Loch oder gar die Durchquerung eines Wurmlochs vorstellen kann. Mit einem virtuellen Stadtbummel in Lichtgeschwindigkeit fand der Vortrag ein ebenso spektakuläres wie lehrreiches Finale.

Auch wenn sich die Organisatoren einer Tagung wie dem Technik-Forum noch so sehr bemühen; der Erfolg einer solchen Veranstaltung wird letztendlich ganz wesentlich durch die Teilnehmer und die Vortragenden bestimmt. Allen sei hiermit herzlich gedankt. Ein ganz besonderer Dank soll jedoch den Herren Zilly und Kött zuteil werden, die durch ihr organisatorisches Talent ganz wesentlich zu dem guten Gelingen der Tagung beigetragen haben. Ebenso natürlich den vielen Ungenannten hinter den Kulissen, die auch dieses Jahr wieder an der Vorbereitung und Durchführung des Technik-Forums mitgewirkt haben.

Die Veranstalter hoffen, dass dieser hier vorliegende Tagungsband nicht nur als persönliche Erinnerung an das Technik-Forum 2008, sondern auch als wertvoller fachlicher Beitrag zu den in den Vorträgen behandelten Gebieten aufgenommen wird und wie auch die Bände der Vorjahre entsprechende Verbreitung findet.

Kurzbiografien der Vortragenden beim Technik Forum 2008

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Baum

Seit Sommer 2003 arbeitet Herr Baum als Forschungs- und Entwicklungsingenieur für das gemeinsame Forschungsprojekt mit der Max- und Erni-Bühler Stiftung an der Hochschule in Pforzheim.

Nach dem Abitur begann er sein Studium des Maschinenbaus an der Hochschule Pforzheim. Daneben sammelte er in verschiedenen Funktionen bei der Witzenmann GmbH vor allem im Bereich der Entwicklung von Fahrzeugteilen praktische Erfahrungen.

Herr Baum absolvierte sein Maschinenbau-Studium im Jahre 2004. Für seine Diplomarbeit, die er an Themenstellungen des Forschungsprojektes mit der Max- und Erni-Bühler Stiftung durchführte, wurde er von der Hochschule Pforzheim mit dem „Research-Excellence-Award“ ausgezeichnet. Parallel zu seiner Tätigkeit an der Hochschule Pforzheim arbeitet Herr Baum in Zusammenarbeit mit der TU Dresden an einer Doktorarbeit im Themengebiet Laserumschmelzen und Laserauftragsschweißen.

Ursula Christian

Frau Ursula Christian ist seit 2001 Mitarbeiterin der Hochschule in Pforzheim im Forschungsprojekt mit der Max- und Erni-Bühler-Stiftung. Ihre Ausbildung zur Metallografin absolvierte sie bei der Firma Kabel-Metall in Nürnberg, wo sie auch danach beschäftigt war. Von 1973 bis 1995 war sie als Gruppenleiterin bei der Firma Diehl in Röttenbach/Nürnberg tätig.

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost ist seit 1996 Professor für Werkstoffkunde, Festigkeitslehre sowie Qualitätsmanagement an der Hochschule Pforzheim.

Von 1984 bis 1991 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Oberingenieur am Institut für Werkstoffe der Ruhr-Universität Bochum tätig. Danach folgte die Tätigkeit als Abteilungsleiter bei der DEKRA AG, Stuttgart und Leiter der Materialprüfanstalt der DEKRA-ETS GmbH, Saarbrücken sowie stellv. Geschäftsführer der DEKRA-ETS ebenfalls in Saarbrücken. Neben der Tätigkeit als Professor an der Hochschule ist er Mitglied im DIN-Arbeitsausschuss "Implantatwerkstoffe" sowie der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde.

Prof. Dr. rer. nat. Britta Nestler

Frau Prof. Dr. rer. nat. Britta Nestler promovierte im Jahre 2000 an der RWTH Aachen, nach dem sie zuvor an derselben Universität und an der University of York in England studiert hatte und die erste Staatsprüfung für die Lehrämter der Sekundarstufen I und II erlangte. Danach erfolgte 2001 eine Ernennung zur Professorin an der Hochschule Karlsruhe. Seit 2005 ist Frau Prof. Nestler mit Lehrtätigkeiten und Forschungsarbeiten zur Habilitation an der Humboldt-Universität zu Berlin beschäftigt. Sie ist zudem Gründungsdirektorin des vor zwei Jahren gegründeten Instituts für Computational Engineering (ICE) an der Hochschule Karlsruhe. In den letzten zwei Jahren erfolgten mehrere Rufe auf Professuren, unter anderem an die Technische Universität München und an die Ruhr-Universität Bochum. Im Jahre 2006 wurde sie zur Professorin mit dem Lehrstuhl „Modellbildung und Simulation“ und mit besonderen Aufgaben in der Forschung an der Hochschule Karlsruhe ernannt.

Dr.-Ing. Frank Pupke

Herr Dr.-Ing. Frank Pupke (Jahrgang 1959) studierte von 1979 bis 1984 Physik an der Technischen Universität Magdeburg. Danach war er als Entwicklungsingenieur bei der MKM Mansfelder Kupfer und Messing GmbH in Hettstedt, einem Hersteller von Halbzeugen aus Kupfer und Kupferlegierungen, tätig. Ab 1991 war er bei dieser Firma für die Metallwirtschaft und von 2001 bis 2004 für den Geschäftsbereich Draht verantwortlich.

Seit 2005 arbeitet er als leitender Ingenieur bei der nkt cables Gruppe in Köln, einem internationalen Hersteller von Kabeln, Bahnleitmaterial und technischen Drähten. Dort ist er für die Entwicklung von Bahnleitmaterial und Metallprodukten verantwortlich. Er promovierte im Jahr 1990 mit der Untersuchung des Rekristallisationsverhaltens von Kupfer bei hohem Kaltverformungsgrad.

Prof. Dr. Hanns Ruder

Herr Prof. Dr. Hanns Ruder ist Theoretischer Astrophysiker an der Universität Tübingen. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören Einsteins Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie. Er gilt weltweit als Experte auf dem Gebiet der Simulation und Visualisierung von relativistischen Effekten mit Höchstgeschwindigkeitsrechnern und war von 1993 bis 1996 Vorstand der Astronomischen Gesellschaft, bis 2006 Sprecher des Sonderforschungsbereichs „Verfahren und Algorithmen zur Simulation physikalischer Prozesse auf Höchstleistungsrechnern“. Neben verschiedenen Auszeichnungen erhielt er 2006 die Medaille für Naturwissenschaftliche Publizistik von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Professor Ruder begeistert sein Publikum nicht nur durch seine geistreiche und amüsante Vortragsart, er unternimmt mit ihm auch virtuelle Flüge und vermittelt dadurch einen ganz neuen Zugang zur Relativitätstheorie.

Dr. Jörg Vetter

Herr Dr. Jörg Vetter (Jahrgang 1954) absolvierte ein Physikstudium und promovierte an der TU Karl-Marx-Stadt (Chemnitz). Seit 1990 ist er bei Sulzer Metaplas auf verschiedenen Gebieten der Anlagen- und Komponentenentwicklung, der Schicht- und Prozessentwicklung sowie der Anwendungsentwicklung im Bereich F&E tätig.

M. Sc. Andreas Zilly

Herr Andreas Zilly ist seit dem Frühjahr 2006 an der Hochschule Pforzheim an der Fakultät für Technik im Bereich Werkstoffkunde als Laboringenieur angestellt. Nach seinem Maschinenbaustudium an der Hochschule Karlsruhe im Jahre 2000 leitete er für drei Jahre die Konstruktionsabteilung in einem Unternehmen der Umformtechnik. Danach absolvierte er ein Masterstudium an der Hochschule Karlsruhe und war dort als Projektingenieur in einem Forschungsprojekt tätig.

Im Rahmen seiner Tätigkeit an der Hochschule Pforzheim ist er zudem Mitbetreuer eines Forschungsvorhabens zur Eigenschaftsoptimierung von Kupferbasislegierungen. Parallel dazu promoviert er zu dieser Themenstellung an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

**Britta Nestler, Ali Aksi, Gieta Dewal, Marcus Jainta, Andreas
Melcher, Oyunaa Nyamsuren-von Stackelberg, Michael Selzer,
Frank Wendler**

**Institute of Computational Engineering am Institut für Ange-
wandte Forschung der Hochschule Karlsruhe – Technik und
Wirtschaft**

Simulationsmethoden in der Werkstoffkunde

Inhaltsverzeichnis

1	Der Wachstumsmarkt „Werkstoffsimulation“	11
2	Pace3D: Eine Simulationssoftware	12
3	Simulation von Geostrukturen.....	14
3.1	Der Rissversiegelungsprozess in Gesteinsadern	14
3.2	Untersuchung von teilgeschmolzenen Kornsystemen (Partial Melts)....	19
3.3	Porositäts- und Permeabilitätsanalyse	24
4	Beschreibung des Lotuseffektes mit Hilfe eines Phasenfeldmodells	28
5	Phasenfeld trifft Elastizitätstheorie: Simulation am Beispiel der Rissausbreitung	32
6	Ausblick: Die Zukunft der Technologie „Werkstoffsimulation“	35
7	Literatur.....	36

1 Der Wachstumsmarkt „Werkstoffsimulation“

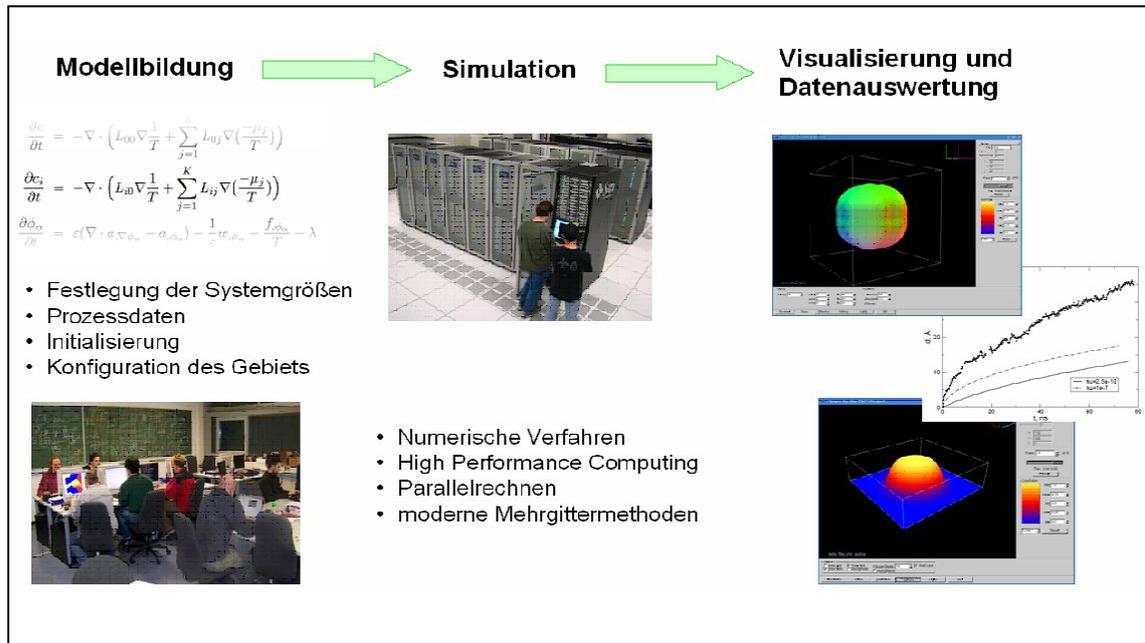
Die Computersimulation hat im vergangenen Jahrzehnt für die Werkstoff- und Bauteilentwicklung sowie für die Prozessoptimierung in der Wirtschaft und Wissenschaft eine Schlüsselrolle eingenommen. Die virtuelle Laborumgebung der numerischen Berechnung und der hochauflösenden Visualisierung stellt eine moderne, zeit-, aufwand- und ressourcensparende Technologie zur Prüfung von Werkstoffen und Bauteilen auf Qualitätsanforderungen wie Belastbarkeit, Langlebigkeit, Effizienz und Wirkungsgrad zur Verfügung. Neue Simulationsverfahren erlauben das Design von Werkstoffen nach Maß wie z.B. komponierte Legierungen, die Analyse von Einflussfaktoren und Prozessführungsbedingungen auf die Mikrostrukturausbildung sowie die systematische Untersuchung von Gefüge-Eigenschafts-Korrelationen. Oftmals können Qualitätsmerkmale von Werkstoffen und Prozessen durch eine geringe Änderung des Bearbeitungsvorgangs oder durch eine Variation der Zusammensetzung erreicht werden. Eine solche detaillierte Bestimmung der Reaktion des Werkstoffs auf eine externe Beanspruchung wie z.B. auf thermische, magnetfeldinduzierte und mechanische Belastung leisten neue Softwarepakete zur Mikrostruktursimulation. Die charakteristischen Kenngrößen der Mikrostruktur sind ausschlaggebend für die Eigenschaften des Werkstoffs. Als ein Beispiel ist in vielen Herstellungsprozessen die Kornstruktur und die Korngrößenverteilung ein entscheidendes Kriterium für die Härte und Bruchfestigkeit des Materials. Simulationen ermöglichen erstmalig den in-situ Einblick nicht nur in das Endgefüge, sondern auch in den dreidimensionalen Strukturbildungsprozess. Durch eine gezielte Prozessführung lässt sich die Gefügeentstehung kontrolliert beeinflussen und Material mit spezifischen Eigenschaften computergestützt designen. Die Berechnungen ersetzen zu einem hohen Maß die experimentelle, metallographische und mechanische Gefügecharakterisierung, die oftmals eine Zerstörung der Bauteile erforderlich macht. Der Werkstoff, das Bauteil und der Prozessablauf der Zukunft lassen sich durch Verfahren der Werkstoffsimulation Ressourcen- und energieeffizient am Computer entwerfen. Aufwendige Versuche lassen sich einsparen und Schwachstellen können im Designstadium am Computer verbessert werden.

2 Pace3D: Eine Simulationssoftware

Am Institut für Computational Engineering wurde das Softwarepaket Pace3D für große dreidimensionale Simulationen und Auswertung von Mikrostrukturen von Materialien entwickelt. Es handelt sich hierbei um ein umfangreiches Softwarepaket mit C/C++ Programmen mit Schnittstellen zur leichten Erweiterbarkeit der zu simulierenden Modelle und Auswerteverfahren. Von Phasenumwandlung, Diffusion mehrerer Komponenten bis hin zu Strömung, Elastizität und Magnetismus können Modelle individuell aufgestellt, die entsprechende Module der Software ausgewählt und Simulationen durchgeführt werden. In Abb. 1 sind die einzelnen Arbeitsschritte beginnend mit der Modellbildung über die Simulation bis hin zur Visualisierung und Datenauswertung zu sehen. Zur Durchführung von Werkstoffsimulationen ist es notwendig, geeignete Anfangsbelegungen und -parameter zu verwenden. Bei der Softwareentwicklung übernimmt das Preprocessing die Generierung von Gebietsbelegungen. Experimentelle Daten lassen sich konvertieren und Materialeigenschaften aus thermodynamischen Datenbanken als Eingabegrößen für die Simulationsrechnungen extrahieren. Im Simulationsschritt wird die Rechnerumgebung für die Simulationsausführung konfiguriert. Durch Parallelisierung ist die Ausführung der Simulation auf Workstations und Clustersystemen gleichsam möglich. Im Einsatz befinden sich sowohl speicher- als auch rechenzeitoptimierte Verfahren, um auch große Gebiete zu simulieren und so detaillierte Einblicke in Prozessabläufe zu erhalten. Das Pace3D Paket bietet eine Umgebung an, mit der die Durchführung von Simulationsserien zur Parameterstudie automatisierbar ist. Durch Einsatz der Postprocessing-Tools können die Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen mit qualitativ hochwertiger Visualisierung dargestellt und mit einer Vielzahl von bestehenden Algorithmen ausgewertet werden.

Abbildung 1

Erforderliche Arbeitsabschnitte zur Werkstoff- und Prozesssimulation, die in dem Pace3D-Softwarepaket umgesetzt sind



3 Simulation von Geostrukturen

Unabhängig von seiner ursprünglichen Verwendung für die Beschreibung von Erstarrungsprozessen in der Metallurgie lässt sich das Phasenfeldmodell auch sehr effektiv für die Modellierung von Mikrostrukturen aus dem Bereich der Strukturellen Geologie einsetzen. Neben dem Gewinn für die reine Grundlagenforschung spielen dabei oft auch das Verständnis verwandter technischer Prozesse und der Einsatz von geologischen Proben als Indikatoren für abbauwürdige Vorkommen nutzbarer Minerale/Erze eine bedeutende Rolle.

Da geologische Prozesse oft auf einer sehr großen Zeitskala ablaufen, die einer experimentellen Untersuchung meist nicht zugänglich ist, kann die computergestützte numerische Simulation die Theoriebildung erheblich unterstützen bzw. motivieren. Dieser Beitrag zum besseren Verständnis geologischer Ereignisse der Erdgeschichte betrifft sowohl die Auswirkung zurückliegender Ereignisse auf die Mikrostruktur geologischer Materialien als auch die Vorhersage zukünftiger Prozesse. Das in Gesteinsproben gefundene Resultat kann nach experimenteller Analyse und Auswertung mit der Simulation eines Prozessmodells verglichen werden – je nach Rechenkapazität und Methode ein in wenigen Stunden bis mehreren Tagen dauernder Vorgang. Ein Vergleich der Ergebnisse erfolgt entweder über die konkrete Morphologie oder über die Analyse statistischer Größen wie mittlere Kornradien oder der Wachstumsdynamik. Zudem kann man das Prozessmodell auf einer quantitativen Ebene mit Daten transparenter geologischer Analogsysteme überprüfen, wie etwa Norkampher-Ethanol oder Octachlorpropanol, die auch zur Interpretation geologischer Mikrostrukturen herangezogen wurden [1].

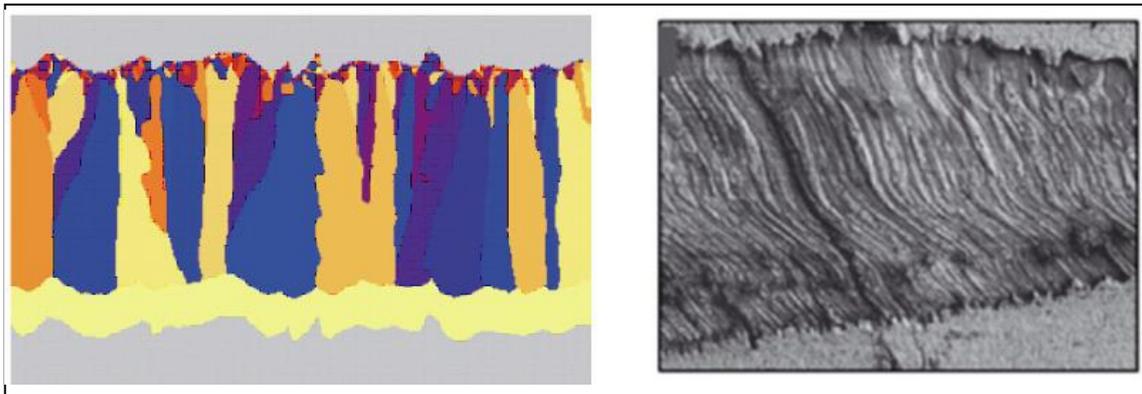
3.1 Der Rissversiegelungsprozess in Gesteinsadern

Eine häufige in Gesteinsproben, wie auch etwa bei Flusskiesel, gefundene Morphologie sind feine Adern, die eine andere mineralische Zusammensetzung

als die umgebende Gesteinsmatrix aufweisen. Unter dem Mikroskop sind dabei meist faserartige oder blockartige Kornsysteme zu erkennen, siehe etwa das Beispiel in Abb. 2 (rechts). Ein wahrscheinlicher Rissversiegelungsprozess, der in der Theorie diskutiert wird, ist die zyklische Wiederholung von mikroskopischer Rissbildung und dem vollständigen Zuwachsen der Kavität. Risse mit einer Breite von 0.05 – 5 mm treten in natürlichem Gestein im Bereich lokalisierter Scherspannungen auf, die durch tektonische Aktivität zustande kommen. Sie zeichnen sich neben einem charakteristischen Rissprofil durch die Distanzparameter der vertikalen Öffnung (vgl. Abb. 2, links) und dem horizontalen Scherversatz aus.

Abbildung 2

Gegenüberstellung einer zweidimensionalen Simulation mit zufälliger Risskante und reiner vertikaler Öffnung (links) und eine Gesteinsader mit Faserstruktur (rechts) [die experimentelle Aufnahme wurde freundlicher Weise von C. Hilgers, RWTH Aachen zur Verfügung gestellt]

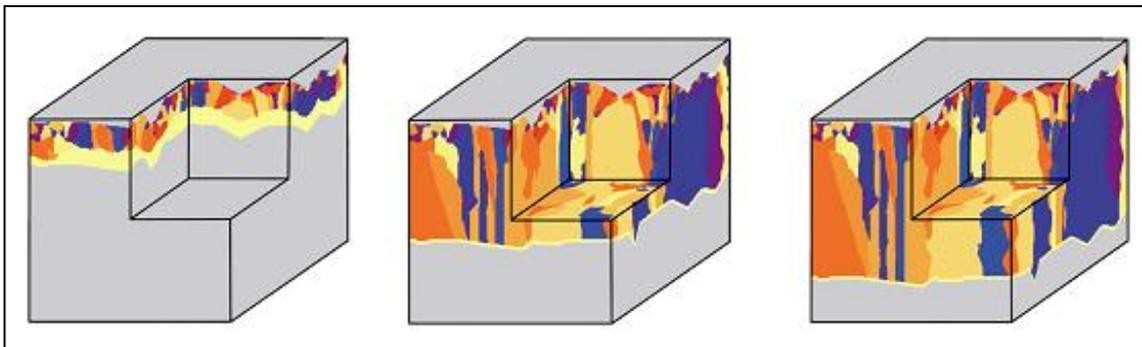


Die Versiegelung wird durch Einströmen einer hydrothermalen Lösung, die mit Mineralien gesättigt ist, eingeleitet. Dadurch können kleine Kristallkörner heterogen an der Risskante keimen, die dann allmählich wachsen und den Riss ausfüllen. Um deren Wachstumsverhalten korrekt zu beschreiben, wird auf die bekannte Kristallsymmetrie und Morphologie unter den Wachstumsbedingun-

gen des Minerals zurückgegriffen. Bildet die Wachstumsform keine Facetten aus, gibt es also keine bevorzugte Wachstumsrichtung. Es handelt sich um isotropes Wachstum. Bei deutlicher Ausbildung der Kristallflächen - mit etwa kubischer oder hexagonaler Symmetrie – ist das Wachstum anisotrop, das im Phasenfeldmodell durch eine Richtungsabhängigkeit der Oberflächenenergie oder des kinetischen Koeffizienten nachgebildet wird. In solchen Situationen werden sich Körner, die bezüglich der Richtung der Rissöffnung eine günstigere Orientierung besitzen gegenüber Körnern mit einer ungünstigeren durchsetzen, weil sie schneller wachsen und als Folge andere dadurch verdrängen.

Abbildung 3

Rissbildungs- und Versiegelungsprozess mit einer zufälligen Wandgeometrie und polykristalliner Kornstruktur als dreidimensionale Simulation



Für das Modell wurde der Riss im diskreten Gitter als obere bzw. untere Randbedingung nachgebildet. Der Riss wird wiederholt an der Unterseite geöffnet und die untere Gesteinsmatrix durch eine frei wählbare vertikale und horizontale Verschiebung getrennt. Der frei werdende Zwischenraum wird mit der flüssigen Phase gefüllt, und das Wachstum setzt sich an der unteren Risskante fort. Dieser uniaxiale Wachstumsprozess, dessen Voraussetzung eine unveränderte Bruchkante aufgrund der elastischen Inhomogenität darstellt, ist der in der Literatur als am wahrscheinlichsten betrachtete Mechanismus der Rissversiegelung [2]. Er ist ein Beispiel für ein durch ein äußeres, geometrisches Template gesteuertes Wachstum, das auch für die Synthese von Nanokristallen interessant ist. Die in den Simulationsreihen variierten Parameter, die das Ergebnis des

Rissversiegelungsprozesses bestimmen, werden hier kurz aufgeführt: die Spaltgröße (d. h. die vertikale Öffnung), die Scherung (also die Bewegung in horizontaler Richtung), der Zeitpunkt eines erneuten Spaltöffnungsereignisses (kurz vor oder nach der Rissversiegelung), die Geometrie der Risskante, Anzahl und Größe der Kristallkeime sowie die Art des Wachstums (isotrop oder anisotrop).

Zuerst wurde nachgewiesen, dass das Modell die in der Mikrostruktur der untersuchten Gesteinsadern vorkommenden Kornbereiche qualitativ realistisch nachbildet. Dazu wurden zunächst 2-D und später dann rechenzeit- und speicherintensivere 3-D Simulationen mit zufallsgenerierten Rissprofilen durchgeführt. Insbesondere zeigte sich mit steigender Oberflächenrauigkeit und steigendem Abbruchwinkel eine Zunahme der Fähigkeit, Korngrenzen zu führen (grain boundary tracking). In Abb. 3 ist das Ergebnis einer 3-D Simulation mit lokal unterschiedlichen Risseigenschaften dargestellt. Durch die unterschiedliche Farbgebung der Körner werden die verschiedenen Körner bzw. Kristallorientierungen symbolisiert.

Zur systematischen Klärung des Geometrieinflusses wurden in den durchgeführten Simulationsserien periodische Zick-Zack-Risse unter Winkeln kleiner, größer oder gleich 90° vorgegeben. Um die Ergebnisse der Simulationen vergleichen zu können, wurde für jede Versuchsreihe eine identische Startkonfiguration mit Kristallkeimen erzeugt und dann die untersuchten Parameter wie Abbruchwinkel, Öffnungs- bzw. Scherungsversatz variiert. Die Simulationen mit dem Programmpaket *pace3D* ergaben, dass neben der oben erwähnten Anisotropie der Körner das vorgegebene Rissprofil in der Gesteinsmatrix und der Öffnungs- sowie Scherungsversatz von entscheidender Bedeutung für die resultierende Morphologie ist. Einige Ergebnisse der Versuchsreihe für einen Abbruchwinkel von 90° und den gleichmäßigen, periodischen Rissgeometrien sind in Abb. 4 gezeigt. Dabei treten abhängig von der Weite der Rissöffnung und der Orientierungsbeziehung benachbarter Körner entweder charakteristische Wellenmuster oder glatte Korngrenzen auf. Bei Simulationen ohne Scherung wachsen die Kristallkörner senkrecht nach unten, bei horizontaler Scherung der unteren Risskante ist die resultierende Kornstruktur abhängig von deren Stärke nach links oder rechts geneigt. Ein interessantes Ergebnis ist auch, dass bei vielen Öffnungszyklen vor allem Körner selektiert werden, deren Vorzugsorien-

tierung in Richtung der Öffnungstrajektorie liegt. In weiteren Untersuchungen wurde der Riss sowohl in vertikale als auch in horizontale Richtung geöffnet und u. a. der Abbruchwinkel verändert. In Abb. 5 ist das Ergebnis für drei unterschiedliche Winkel gegenübergestellt, wobei das erhöhte Führungsvermögen steiler Bruchkanten klar zu erkennen ist.

Abbildung 4

2D Simulationen mit gleichmäßiger Wandgeometrie und unterschiedlicher Scherrate, Zeitpunkt jeweils kurz vor dem vollständigen Versiegeln des Risses

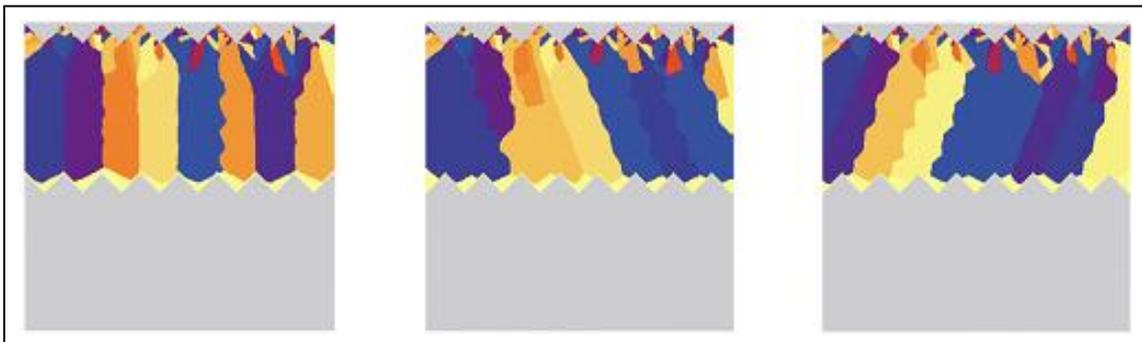
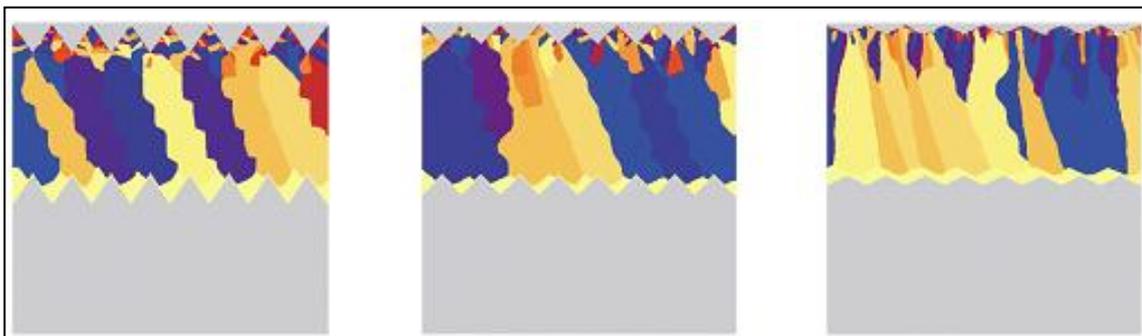


Abbildung 5

2D Simulation mit gleichmäßiger Wandgeometrie und konstanter Scherrate, aber unterschiedlicher Bruchwinkel (von links nach rechts: kleiner, größer, gleich 90°)



3.2 Untersuchung von teilgeschmolzenen Kornsystemen (Partial Melts)

In tieferen Lagen der Erdkruste im Bereich der Kern-Mantel-Grenze koexistiert geschmolzenes Material mit festen, mineralischen Gesteinskörnern. Durch hohe Temperaturen oder durch die Dekompression des aus tieferen Schichten aufsteigenden Gesteinsmaterials kommt es zu einem teilweisen Aufschmelzen der festen Struktur. Ein auf den ersten Blick rein mikroskopischer Effekt, die Ausbildung und Verteilung von Schmelzeinschlüssen zwischen Mikrometer großen Gesteinskörnern, bestimmt Prozesse auf der größten geologischen Längenskala. Die Fließeigenschaften (Rheologie) ganzer Kontinentalplatten sowie die Bildung von sogenannten Plumes als Aufstiegszonen der Lava und damit verbunden das Auftreten von Vulkanismus. Beide Phänomene hängen unmittelbar mit der Permeabilität und der Verteilung von Schmelze in teilgeschmolzenen Kornstrukturen zusammen, da z.B. in großer Tiefe bei entsprechend hohen Drücken keine ausreichend großen Risse oder Klüfte für den Transport von Schmelze bestehen können. Die Untersuchung von Teilschmelzen ist auch wegen der vielen Parallelen zu einem interessanten technischen Verfahren in der Metall-Urformung von großem Interesse. Beim Thixoforming (engl.: semi-solid metal processing) wird ein teilweise geschmolzenes Legierungsgranulat durch Scherspannungen, wie sie z.B. in einem Extruder entstehen, plastisch verformbar und kann somit einfach in Formen gepresst werden. Eine vergleichbare Problemstellung stellt die Kornreifung und das (unerwünschte) komplette Aufschmelzen eines flüssig-fest-Gemenges dar, das auch beim Flüssigphasen-Sintern auftreten kann.

Für die Simulation wurde wie im Fall der Rissbildung jedes einzelne Korn durch einen eigenen Phasenfeldparameter ($\phi_\alpha(\mathbf{x}, t)$, $\alpha = 1, \dots, N$) und zusätzlich die flüssige Phase durch $\phi_L(\mathbf{x}, t)$ beschrieben. Da für den geologischen Kontext ein exaktes thermodynamisches Gleichgewicht zwischen dem festen Mineral und seiner Schmelze angenommen werden kann, muss das gesamte Schmelzvolumen über die Zeit hin konstant bleiben. Daher wurde vorerst auf eine Abhängigkeit von Temperatur und Zusammensetzung, d.h. auf eine Modellierung des Phasendiagramms verzichtet. Im Modell wird dies durch ein Verschwinden der treibenden Kräfte realisiert, weshalb die Evolution ausschließlich in Richtung

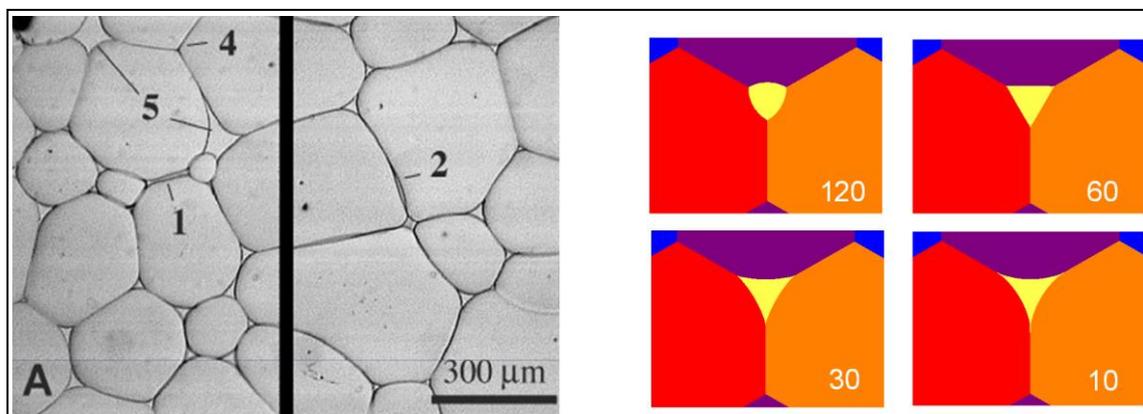
einer Verringerung der freien Oberflächenenergie erfolgt. Für das verwendete Modell, das auf nichterhaltenen Ordnungsparametern (Allen-Cahn Typ) beruht, musste daher eine volumenerhaltende Erweiterung entwickelt, analysiert und implementiert werden [3,4], die auch im Rahmen anderer Materialsimulationen (Blasen, Schäume, Emulsionen) zur Anwendung gekommen ist. Physikalisch bedeutet die Volumenerhaltung, dass die lokal durch Erstarrung freigesetzte Latente Wärme an anderer Stelle zu einem Schmelzen derselben Materialmenge führt.

Von grundlegendem Interesse sind die Bedingungen, die im Kornsystem zu einer Ausbildung eines zusammenhängenden Porennetzwerkes führen, das in der Lage ist, Schmelze über größere Distanzen zu transportieren. In diesem Zusammenhang spielen auch strukturelle Abweichungen von der idealen Gleichgewichtsmorphologie eine wichtige Rolle, also Strukturen mit minimaler Oberflächenenergie. Abb. 6 (links) zeigt einen Ausschnitt aus einem experimentell studierten Analogsystem, einem Norkampher-Alkohol Polykristall, der größere Flüssigeinschlüsse und teilbenetzte Korngrenzen aufweist. In den betrachteten mineralischen Korngefügen spielt der sogenannte Öffnungs- oder Dihedralwinkel θ eine besondere Rolle, also der Winkel, den die flüssig-fest Grenzfläche in der Nähe des Korn-Korn-Fluid-Tripelpunktes bildet.

Abbildung 6

Links: Ausschnitt aus dem Korngefüge des Analogsystems Norkampher-Alkohol mit Nichtgleichgewichtsmerkmalen: (teil-) benetzte Korngrenzen (1 und 2), unbenetzte Tripelpunkte (4) und größere Fluid-Einschlüsse (5) [Bild freundlicherweise von P. Bons und J. Becker zur Verfügung gestellt].

Rechts: In den Phasenfeldsimulationen stellen sich durch Wahl der Oberflächenspannungen die korrekten Dihedralwinkel ($10^\circ - 120^\circ$) in einem Schmelzeinschluss (gelb) ein.

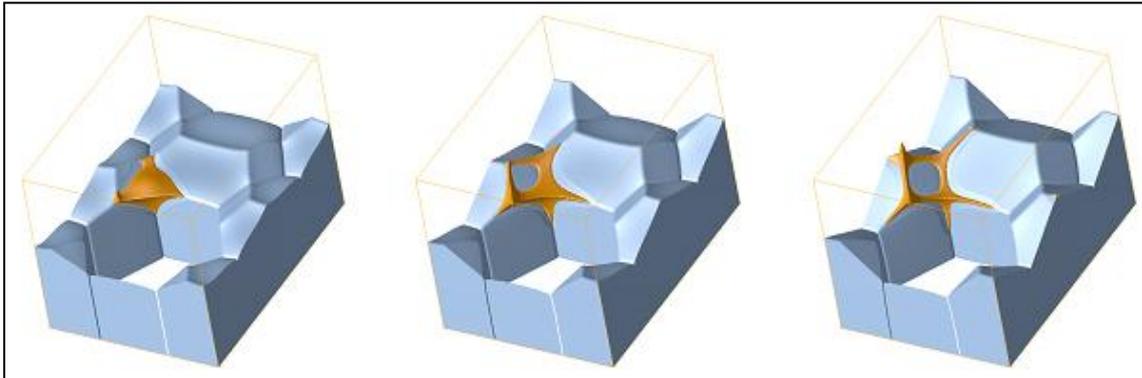


Nach dem Young'schen Gesetz hängt dieser von dem Quotient der Oberflächenspannungen γ_{SS} und γ_{SL} der fest-fest- und fest-flüssig-Grenzfläche ab in der Form $2 \cos(\theta/2) = \gamma_{SS}/\gamma_{SL}$. Durch Variation des Verhältnisses γ_{SS}/γ_{SL} wurde in einer Reihe von Simulationen Dihedralwinkel von 10° bis 120° eingestellt und an einem einzelnen Schmelzeinschluss die sich einstellenden Winkel gemessen. Die Abweichung von den theoretischen Werten betrug dabei weniger als 1° , siehe einige Ergebnisse in Abb. 6 (rechts). Der Übergang zu einer vollständigen Benetzung der Korngrenzen bei verschwindendem Dihedralwinkel wurde mit einer Oberflächenspannung $\gamma_{SL} = 0.49 < \gamma_{SS}$ in 2D- und 3D-Simulationen überprüft. Dabei kriecht die Schmelze von dem ursprünglichen Schmelzeinschluss mit konstanter Rate entlang der Korngrenzen, bis in etwa eine Gleichverteilung erreicht wird. Abb. 7 zeigt einen Ausschnitt aus einem Benetzungsprozess in einer 3D Kornstruktur bei einem Winkel $\theta = 10^\circ$, bei dem für die

Darstellung die obere Hälfte der Körner und ein unteres Korn ausgeblendet wurden.

Abbildung 7

Drei Zeitschritte während der Benetzung einer 3D Kornstruktur, ausgehend von einem isolierten Schmelzeinschluss (orange) mit $\theta = 10^\circ$



Weiterhin wurden mikroskopische Filmaufnahmen des quasi 2D Kornwachstums im System

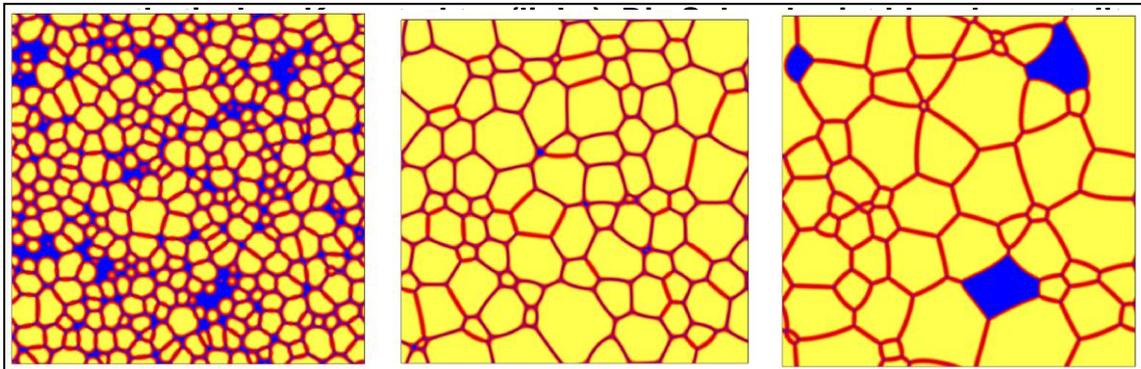
Norkampher-Alkohol ($\theta = 10^\circ$) mit Simulationen verglichen. Mit Bildverarbeitungstechniken wurden digitale Bilder dazu in Simulationsdaten konvertiert und als Startbedingung verwendet, wobei die Geometrie geeignet modifiziert wurde, um periodische Randbedingungen anwenden zu können. Dabei stimmte die Formentwicklung der im Inneren des Simulationsgebietes liegenden Körner sehr gut mit den experimentellen Filmaufnahmen überein, wenn die kinetischen Modellkoeffizienten der fest-fest und der fest-flüssig-Grenze korrekt gewählt wurden. Dies ergibt u. a. eine praktikable Methode, Korngrenzmobilitäten, für deren Größe entweder gar keine oder nur ungenaue experimentelle Daten vorliegen, in Simulationen zu eichen (falls zeitlich aufgelöste experimentelle 2D oder 3D Daten vorliegen).

Auch in Teilschmelzen bewirkt die Reduktion der Oberflächenenergie im Laufe der Zeit eine Vergrößerung der Kornstruktur, d.h. ein Schrumpfen kleinerer Körner auf Kosten der überlebenden größeren. Dieser Prozess tritt als 'normales Kornwachstum' bei der Temperaturbehandlung vieler metallischer Legierungen auf und ist i. a. unerwünscht, da er die Isotropie in den mechanischen

Eigenschaften des Werkstücks verringert. Die Kornreifung in teilweise geschmolzenen Systemen wurde in Simulationsserien für größere Polykristalle durchgeführt. Als Startkonfiguration wurden dabei jeweils zufällige, mithilfe des Voronoi-Algorithmus erzeugte Kornsysteme verwendet und an den Tripel- (2D) bzw. Quadrupelpunkten (3D) sphärische Schmelzeinschlüsse gesetzt. Die Kornreifung zeigt eine besonders starke Abhängigkeit von drei Parametern: dem Dihedralwinkel θ , dem Volumenanteil der Schmelze und deren lokaler Verteilung. In Abb. 8 ist das Endresultat zweier Simulationen mit gleichem Schmelzanteil, aber unterschiedlichem Dihedralwinkel gegeben. Grundsätzlich sinkt die Geschwindigkeit des Kornwachstums in teilgeschmolzenen Systemen mit fallendem Dihedralwinkel θ und steigendem Volumenanteil der Schmelze, falls die Anfangsverteilung der Schmelze entlang der Korngrenzen bzw. Tripellinien möglichst homogen gesetzt wird.

Abbildung 8

Einfluss des Dihedralwinkels bei der Kornreifung: Zwei Korngefüge (Mitte: $\theta = 30^\circ$, rechts: $\theta = 90^\circ$) zur selben Simulationszeit ausgehend von ei-



Wenn Körner während der Reifung über flüssige Bereiche zusammentreffen, treten in Übereinstimmung mit Experimenten teilweise benetzte Korngrenzen auf, was sich im Laufe der Zeit wie in Abb. 8 (rechts) fast auf alle vorhandenen Korngrenzen ausbreitet.

3.3 Porositäts- und Permeabilitätsanalyse

Die Simulationssoftware Pace3D basiert auf einem Multiphasenfeldmodell und beschäftigt sich mit der Simulation von Materialeigenschaften (z.B. Kristallbildung) auf der Basis der diffusen Grenzflächenmodellierung. Um ein realistisches Verhalten des Kristallwachstums zum Beispiel in Schmelzen zu erreichen, ist es nötig, dynamische Größen wie Temperaturschwankungen, Konzentrationsänderungen und Strömungsverläufe zu beachten. Der aktuelle Forschungsstand umfasst einen Löser, der die Simulation der Phasenfeldvariablen zur Beschreibung der Phasenzustände, der Mikrostrukturen und der Phasenumwandlungen übernimmt. Gekoppelt an diese Simulationssoftware sind einzelne Module, die weitere dynamische, physikalische Feldgrößen berechnen können. Als Strömungslöser werden eine Implementierung der Navier-Stokes Gleichungen und eine Implementierung eines allgemeinen Lattice Boltzmann Modells (LBM) verwendet.

Das vorhandene LBM Modell ist ein Modell für die Strömungssimulation kompressibler und inkompressibler Fluide, mit dem zurzeit die Porositäts- und Permeabilitätsanalyse vorgenommen wird.

Allgemein ist die Porosität ein Maß für die Dichte eines Mediums mit Hohlräumen. Sie ist die relative Dichte in Vergleich zum massiven Stoff. Die Maße Porosität und Permeabilität spielen in vielen Bereichen von der Automobilindustrie bei der Entwicklung von Partikelfiltern bis hin zu Geologie, Bodenkunde oder Medizin eine große Rolle. Die Permeabilität wird in der Geotechnik zur Quantifizierung der Durchlässigkeit von Böden und Felsmaterial für Flüssigkeiten oder Gase (z. B. Grundwasser, Erdöl oder Erdgas) benutzt. In der Erdöl- bzw. Erdgasindustrie spielt die Nutzporosität eine große Rolle. Nur in untereinander in Verbindung stehenden Poren können Fluide wie Wasser oder Erdöl fließen. Die Größen: Porosität und Permeabilität von Gesteinstrukturen sind ein wichtiger Indikator z.B. für die Wirtschaftlichkeit einer Ölbohrung.

Die übliche Maßeinheit für die Bestimmung der Permeabilität ist Darcy. Dies ist aus dem Darcy-Gesetz abgeleitet, das ein physikalisches Fließgesetz in porösen Medien beschreibt. Für die Quantifizierung der Durchlässigkeit wird der

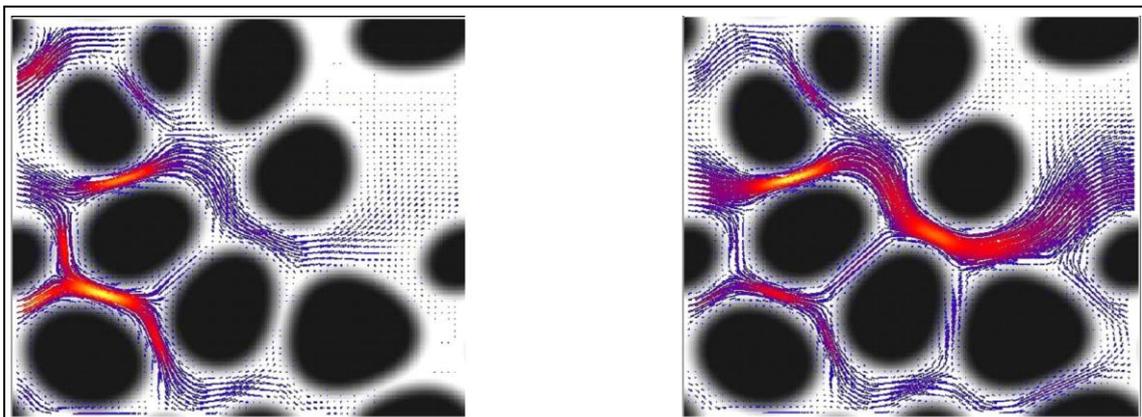
sogenannte Durchlässigkeitsbeiwert benutzt. Dies ist ein Kennwert für das poröse Medium und das durchströmende Fluid, der auch als hydraulische Leitfähigkeit bezeichnet wird.

Das Darcy-Gesetz besagt, dass eine bestimmte Menge eines Fluids, die eine Fläche eines porösen Mediums durchströmt, direkt proportional zum hydraulischen Gradienten ist. Dabei ist der Proportionalitätsfaktor der Durchlässigkeitsbeiwert. Dies ist eine der wichtigsten Größen, die für die Berechnung und Quantifizierung der Permeabilität nötig ist.

Abb. 9 zeigt das Ergebnis einer 2D Simulation eines Strömungsprozesses in einem porösen Medium auf der Basis des kompressiblen Lattice Boltzmann Modells. Für diese Simulation wurde zuerst mit dem Phasenfeld-Modell die Entstehung eines porösen Gebiets simuliert und daran anschließend die Strömungssimulation durchgeführt.

Abbildung 9

Zeitliche Entwicklung der Strömung durch ein poröses Medium mit einem kompressiblen Lattice Boltzmann Modell. Die Strömungsrichtung ist von links nach rechts. Dargestellt sind in schwarz die massiven Partikel und die farbigen Pfeile geben die Richtung und Stärke der Geschwindigkeit der Flüssigkeit im Medium an

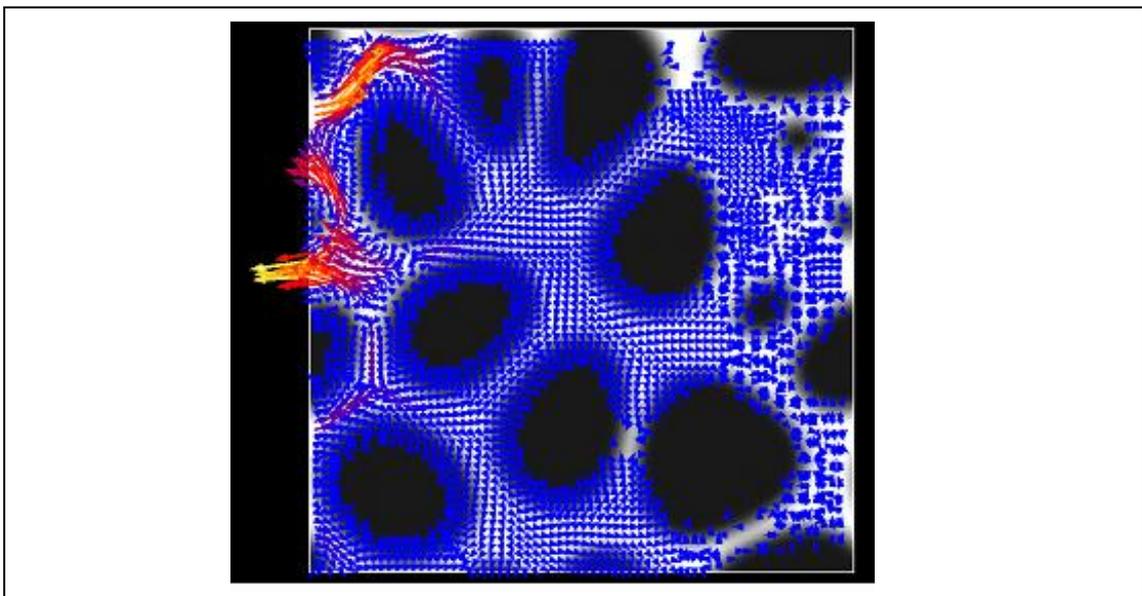


Anhand des Strömungsverhaltens bzw. der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids kann nun mit Hilfe der Darcy-Gleichung, die Permeabilität des Mediums bezüglich des bestimmten Fluids berechnet werden. Mit der Verwendung des kompressiblen Lattice Boltzmann Modells zur Strömungssimulation kann die Permeabilität des Materials z.B. auch bezüglich eines Gases berechnet werden.

Abb. 10 stellt das Ergebnis einer 2D Simulation eines Strömungsprozesses in einem porösen Medium auf der Basis eines inkompressiblen Lattice Boltzmann Modells dar. In der Simulation mit einem inkompressiblen Lattice Boltzmann Modell, mit einer definierten Kapazität und Porosität des Mediums kann beobachtet werden, wie das Fluid wieder aus dem Medium herausströmt.

Abbildung 10

Simulationsergebnis der Strömung durch ein poröses Medium mit einem inkompressiblen Lattice Boltzmann Modell. Die Strömungsrichtung ist von links nach rechts. Die Farbdarstellung entspricht der in Abb. 9.



In Abb. 11 und 12 sind die Profile der Fließgeschwindigkeit des Fluides dargestellt.

Abbildung 11

Fließgeschwindigkeit eines kompressiblen Fluids am Ein- und Ausströmrand des Mediums

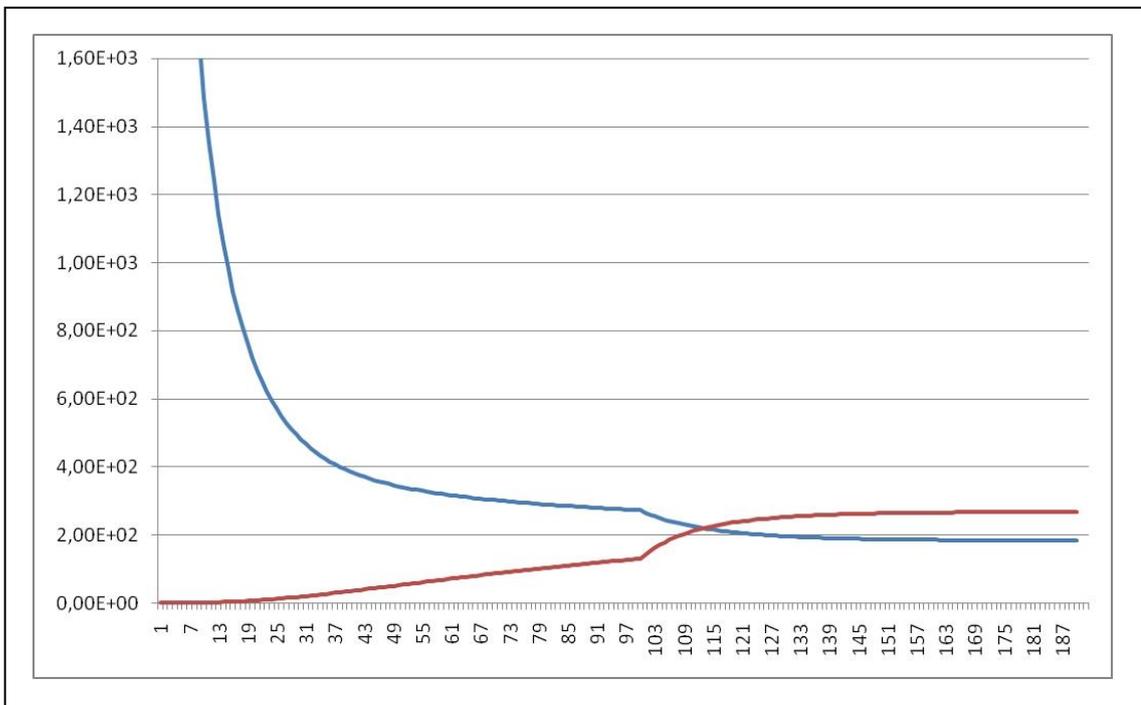
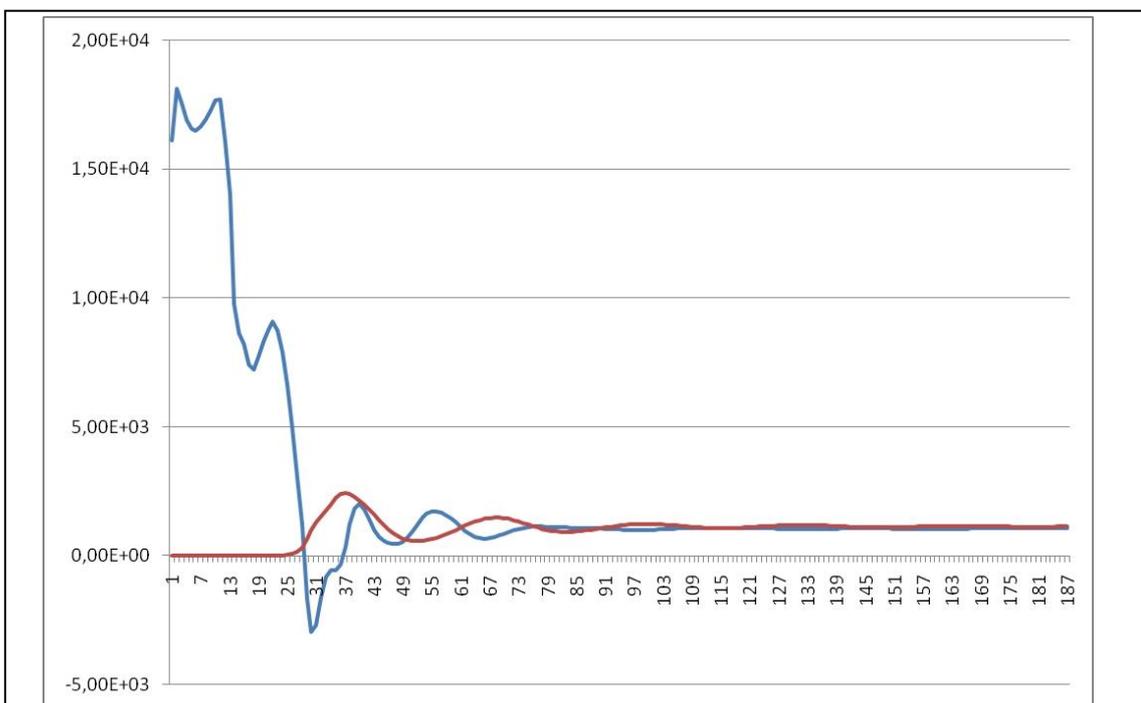


Abbildung 12

Fließgeschwindigkeit eines inkompressiblen Fluids am Ein- und Ausströmrand des Mediums



4 Beschreibung des Lotuseffektes mit Hilfe eines Phasenfeldmodells

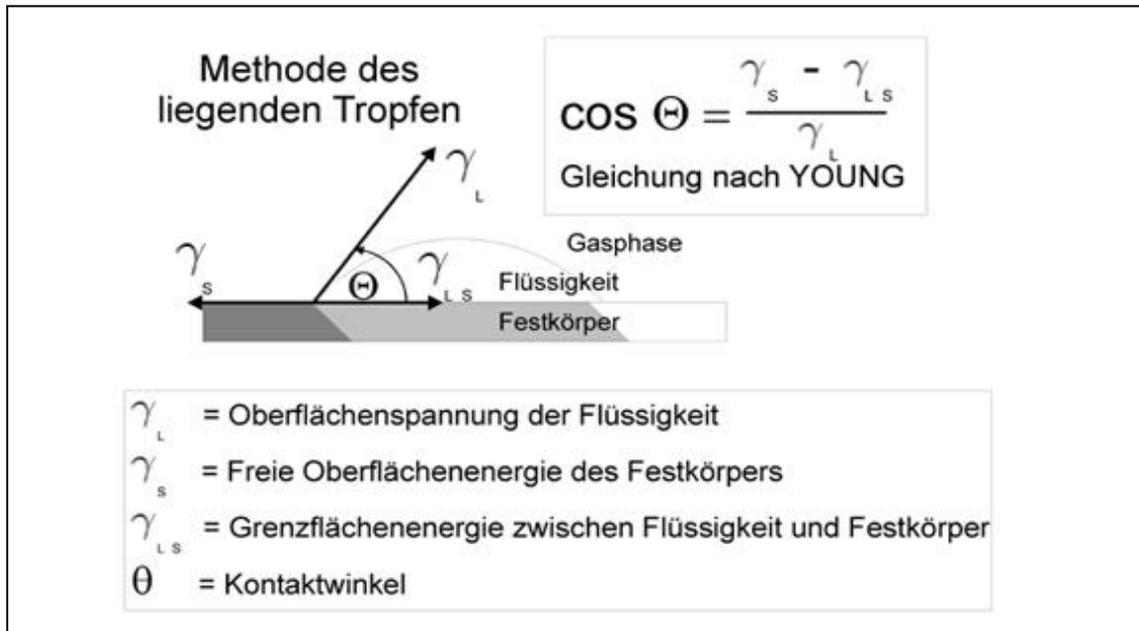
Beim Lotuseffekt handelt es sich um ein Phänomen, das bei vielen Pflanzen auftritt, bei Lotusblüten jedoch am stärksten zu beobachten ist. Die Oberfläche dieser Pflanzen ist von einer Wachsschicht umgeben, die selbst Wasser abweisend ist. Um diesen Wasser und Schmutz abweisenden Effekt zu verstärken, sind die Oberflächen der Pflanzen in einer geeigneten Art und Weise strukturiert.

Die industriellen Anwendungen für die Simulation dieses Effektes sind vielfältig. Angefangen von der Optimierung schon vorhandener, künstlich hergestellter Lotusoberflächen im Fassaden- oder Sanitärbereich über die Herstellung reibungsarmer und damit energiesparender, mechanischer Lager bis hin zu medizinischen Anwendungen können mehrere Industriebereiche von dem Lotuseffekt profitieren.

Tropfen, die sich im freien Raum ohne zusätzliche Kräfte befinden, bilden eine Kugelform aus. Grund hierfür ist die Oberflächenspannung zwischen der Tropfenphase und dem umgebenden Material. Bei der Betrachtung des Benetzungsverhaltens von Tropfen an einer festen, nicht beweglichen Oberfläche treten drei physikalische Phasen auf: Eine Festphase, die unbeweglich bleibt, sowie mindestens zwei fluide Phasen, die auf diesem festen Substrat anhaften. Dabei stellt sich abhängig von den beteiligten fluiden Phasen ein charakteristischer Winkel ein (siehe Abb. 13).

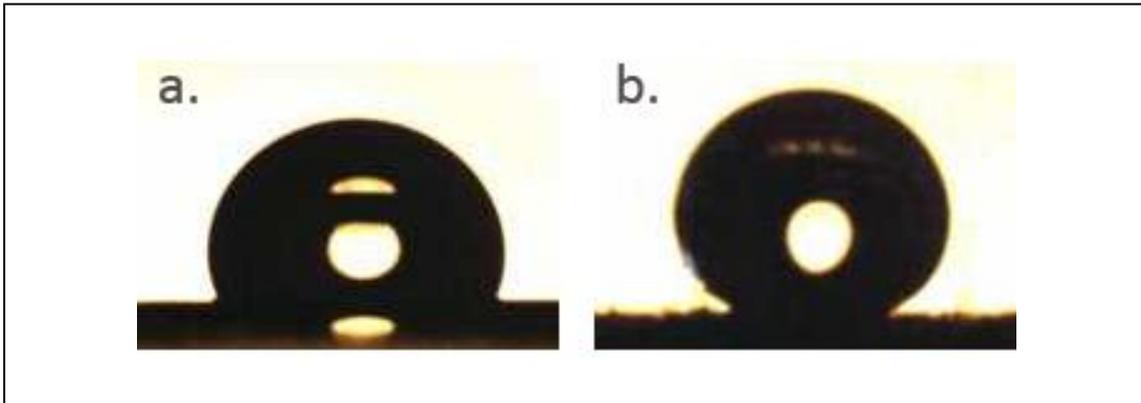
Abbildung 13

Bestimmung des Kontaktwinkels eines Flüssigkeitstropfens auf einer Substratoberfläche (Festkörper)



Um solche, durch Oberflächenenergieminimierung getriebene Prozesse zu simulieren, gibt es unterschiedliche Ansätze. In den vergangenen Jahren wird hierfür häufig eine Phasenfeldmodellierung herangezogen. Dabei werden einzelne physikalische Phasen durch Ordnungsparameter dargestellt, die in einem diffusen Grenzflächenbereich stetig ineinander übergehen [4]. Mit Hilfe des entwickelten Modells ist es möglich, die Oberflächeneigenschaften der simulierten Phasen so einzustellen, dass beliebige Winkel simuliert werden können. Einige Forschergruppen [11] sind zur Zeit mit der Untersuchung geeigneter Materialien und Oberflächenstrukturen beschäftigt, um den Lotuseffekt experimentell zu untersuchen. Abb. 14 zeigt zwei Tropfen, bei denen in beiden Fällen dasselbe Basismaterial verwendet wurde. In Abb. 14 a ist die Oberfläche unbehandelt, und es stellt sich ein Kontaktwinkel von 110° ein, wohingegen die Oberfläche in Abb. 14. b aufgeraut ist und ein Kontaktwinkel von 150° als Ergebnis gemessen wird.

Abbildung 14

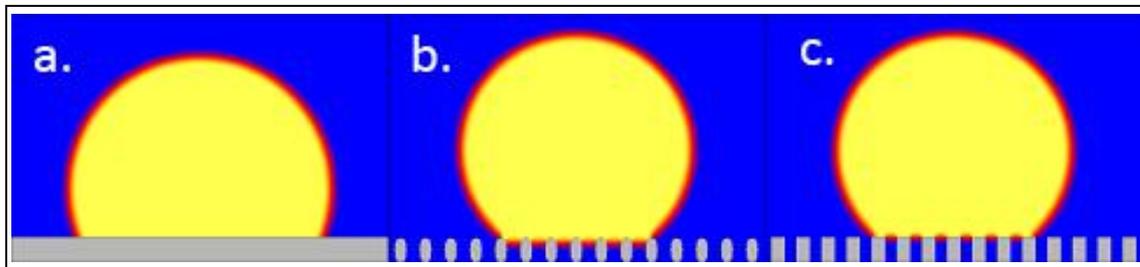
Benetzungsverhalten abhängig von der Oberflächenstruktur (experimentell [11]).

Um zu überprüfen, ob diese experimentellen Ergebnisse mit unserem Modell nachvollzogen werden können, wurden zwei Phasen im Gebiet gefüllt. Die Oberflächenspannungen wurden so gewählt, dass sich ein Kontaktwinkel von 110° am Substrat einstellt. Anschließend wurden bei gleicher Tropfengröße unterschiedlich strukturierte Substrate am unteren Rand gesetzt.

Abb. 15 zeigt Auszüge einer Simulationsserie. Dabei zeigt sich, dass Simulationen mit strukturiertem Substrat (Abb. 15. b und 15. c) einen deutlich größeren Kontaktwinkel haben als ursprünglich eingestellt wurde (15. a). Die Messung des Kontaktwinkel ergab Werte von etwa 120° bis ca. 145° , abhängig von der gewählten Strukturbreite und dem Verhältnis zwischen Stempelbreite und Stempelabstand. In Zukunft soll diese Simulationsreihe fortgesetzt werden, um den Einfluss der Strukturform und komplexer, dreidimensionaler Stempelformen auf den Kontaktwinkel erfassen zu können.

Abbildung 15

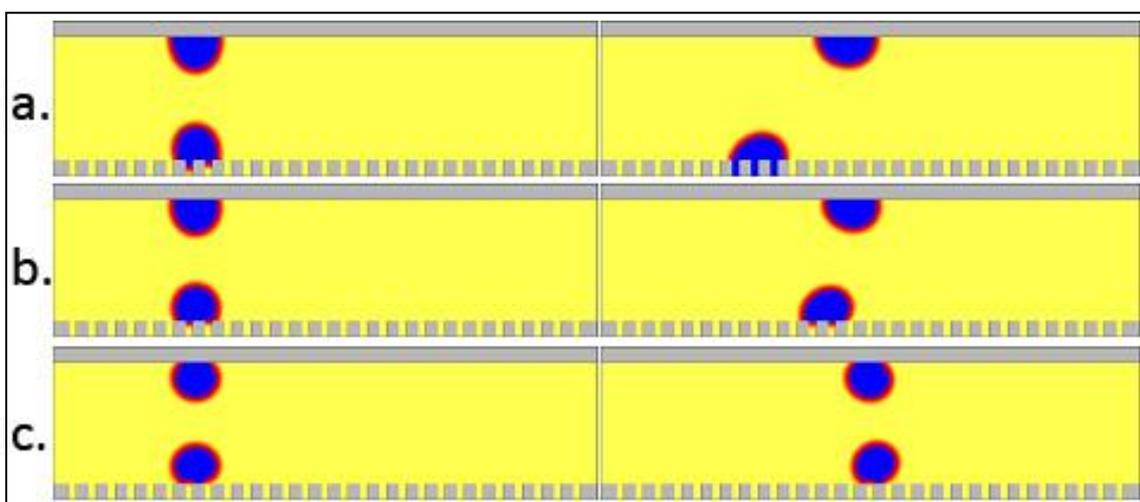
Simulationen mit der Ausbildung unterschiedlicher Kontaktwinkel der Tropfenphase abhängig von der Oberflächenstruktur des Substrat



Nicht nur die statische Messung des Kontaktwinkels ist von Interesse, sondern auch die Adhäsion des Tropfens an der Substratoberfläche unter dem Einfluss äußerer Kräfte wie Gravitation oder Strömung. Dazu wurden für die Simulationen in Abb. 16 verschiedene Substrate gewählt und eine konstante Strömung von links nach rechts eingestellt. Die beiden blauen Tropfenphasen werden von der Strömung mitgetragen, während sie am Substrat anhaften. Es ist zu erkennen, dass sich die Adhäsion bei unterschiedlichen Kontaktwinkeln im Vergleich von strukturierter zu glatter Oberfläche drastisch ändert. Dieser Effekt soll in weiteren Simulationsreihen eingehend untersucht werden.

Abbildung 16

Adhäsionsverhalten für unterschiedliche Kontaktwinkel (a: 90° , b: 112° und c: 134°) zwischen Flüssigkeitstropfen (blau) und Substrat (grau). Es sind jeweils der Beginn und das Ende der Simulation dargestellt. Von links nach rechts wurde eine Strömung aufgeprägt



5 Phasenfeld trifft Elastizitätstheorie: Simulation am Beispiel der Rissausbreitung

Die Untersuchung von Rissausbreitung ist eine sehr wichtige Aufgabenstellung in vielen Anwendungsgebieten der Physik und den Materialwissenschaften. Grundlegend dafür ist das Verständnis der dynamischen Vorgänge, die während der Rissausbreitung in einem mechanischen Körper auftreten.

Beginnend mit der Arbeit von Griffith [5] in den zwanziger Jahren des vorherigen Jahrhunderts ist die fundamentale Basis der Rissausbreitung der Konkurrenzkampf zwischen der elastischen Energie und einem gleichzeitigen Ansteigen der Oberflächenenergie in dem Körper, wenn sich ein Riss ausbreitet. Obwohl in den letzten achtzig Jahren bedeutende Fortschritte in der Erklärung der grundlegenden Phänomene gemacht wurden [6], sind die Mechanismen, die die Dynamik der Rissbildung beschreiben, bis heute noch nicht ganz verstanden. Typische Modellvorstellungen basieren in der Erklärung der auftretenden Phänomene auf einer atomistischen Basis, wobei die Rissausbreitung durch ein sukzessives Aufreißen der Atombindungen erklärt wird. Ein solches Modell und seine theoretischen Vorhersagen hängen dann signifikant von dem zugrundeliegenden empirischen Modell der Atomeigenschaften ab. Ein gegensätzlicher Ansatz versucht die Rissbildung mittels der linearen Elastizitätstheorie oder Plastizitätstheorie zu erklären, was auch durch experimentelle Untersuchungen gerechtfertigt wird. Eine vollständige Modellierung der Rissausbreitung sollte neben der Ausbreitungsgeschwindigkeit auch die Rissform und Längenskala selbstkonsistent beschreiben.

In den letzten Jahren hat sich die Phasenfeld-Modellierung als ein vielversprechender Ansatz zur Beschreibung der Dynamik der Rissausbildung entwickelt. Phasenfeldmodelle gehen über die mikroskopische Grenze der diskreten Modelle hinaus und beinhalten eine Vielzahl der zu erwartenden Eigenschaften der Rissausbildung. Die bedeutendste Eigenschaft solcher Modelle ist aber die direkte Verbindung zwischen der Längenskala der sich ausbildenden Strukturen mit der Grenzflächenbreite des Phasenfeldmodells, die ein rein numeri-

scher Parameter, ohne direkte Verbindung zu irgendwelchen physikalischen Eigenschaften ist. Deshalb besitzen diese Beschreibungen a priori keinen Grenzwert, wenn man die Grenzflächendicke der diffusen Grenzschicht gegen Null gehen lässt. Um diese Eigenschaft zu kompensieren, wird das Phasenfeld-Modell mit den Gleichungen aus der linearen Elastizitätstheorie gekoppelt. Bei diesem Ansatz entwickelt sich in endlicher Zeit eine Singularität, die die Beschreibung des Risswachstums im stationären Zustand nicht zulässt, es sei denn der Radius der Risssspritze ist in der Größenordnung der Grenzflächendicke der Phasenfeld-Formulierung.

Detaillierte Modellentwicklungen und Simulationsanwendungen mit der Phasenfeld-Modellierung wurde in den letzten Jahren von Spatschek et.al. [7-10] veröffentlicht. In den folgenden Abbildungen 17 und 18 werden Simulationsrechnungen zur Rissbildung beruhend auf der Phasenfeld-Modellierung vorgestellt.

Abbildung 17

Simulation eines Rissbildungsprozesses: Die Darstellung zeigt die Phasengrenzen überlagert mit dem Verschiebungsfeld aus der elastischen Zugspannung. Die Rissphase (schwarz) bildet sich entlang der Korngrenze zwischen weißem und grauem Korn aus

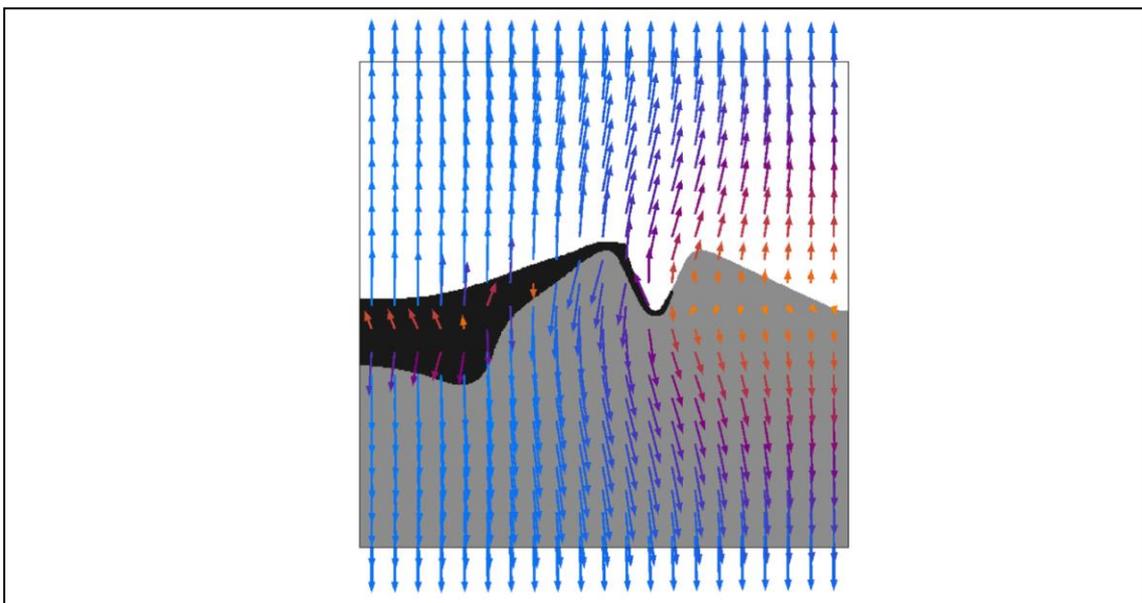
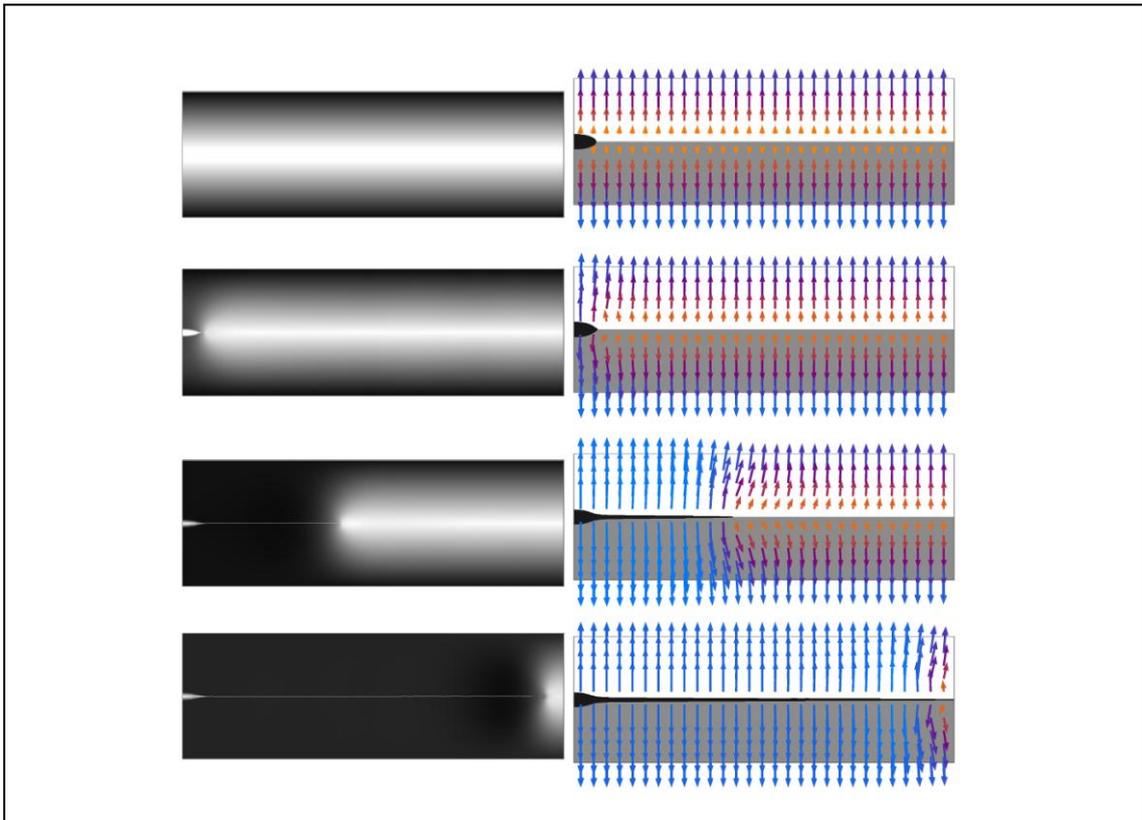


Abbildung 18

Zeitliche Entwicklung eines geraden Risses: Die Bilder links veranschaulichen das normierte Verschiebungsfeld der elastischen Spannung im Material. Die Zeitsequenz rechts zeigt eine überlagerte Darstellung der scharfen Phasengrenzen mit der vektoriellen Darstellung des Verschiebungsfeldes



6 Ausblick: Die Zukunft der Technologie „Werkstoffsimulation“

Die Werkstoffsimulation besitzt für industrielle Anwendungen bereits heute ein weitreichendes Potenzial. Intensive Forschung und Weiterentwicklung sowie der rasante Fortschritt auf dem Gebiet des Hochleistungsrechnens erschließen ständig neue Anwendungsfelder, in denen Computersimulationen Einblick in die Prozesse und Material der Zukunft geben. In aktuellen Arbeiten werden die Simulationsmethoden auf verschiedene Materialien wie Keramiken, Polymere, Geomaterialien, biologische und biomimetische Systeme übertragen, um ein tieferes Verständnis über die Strukturbildungsmechanismen zu erlangen, um Eigenschaften vorherzusagen und diese zielgerichtet zu optimieren. Je komplexer ein Bauteil, umso aufwendiger ist die Entwicklung eines Simulationsmodells, das die Realität möglichst genau widerspiegelt und umso umfangreicher sind die Simulationsrechnungen. Produkte, Herstellungs- und Fertigungsprozesse werden zukünftig am Computer entworfen und optimiert, bevor sie als Prototyp eingerichtet werden. Besondere Herausforderungen an die Entwicklung in diesem Jahrzehnt stellen die Mehrskalensimulationen und die Modellierung gesamter Prozessketten der Fertigung dar. Bei der skalenübergreifenden Behandlung ist das Ziel, Phänomene auf verschiedenen Längen- und Zeitskalen zu erfassen. Neben dem atomistischen Detail und der Mikrostrukturausbildung sollen makroskopische Bedingungen der Prozessführung in eine Werkstoffmodellierung einfließen. Auf dem Weg vom Halbzeug zum Werkzeug wirken aufeinander folgende Bearbeitungsschritte auf das Bauteil ein. Um Materialinformationen entlang der Prozesskette zu gewinnen, ist eine integrale Werkstoffsimulation angestrebt, bei der Simulationsdaten prozessschrittübergreifend und ganzheitlich berücksichtigt werden.

7 Literatur

- [1] N. P. Walte, P. D. Bons, C. W. Paschier, "Deformation of melt bearing systems – insight from in situ grain-scale analogue experiments", *J. Struct. Geol.* 27 (2005) 1666-1679
- [2] C. Hilgers, D. Koehn, P. D. Bons, J.L. Urai, "Development of crystal morphology during unitaxial growth in a progressively widening vein: II. Numerical simulations of the evolution of antitaxial fibrous veins", *J. Struct. Geol.* 23 (2001) 873-885
- [3] B. Nestler, F. Wendler, M. Selzer, B. Stinner, H. Garcke, "Phase-field model for multiphase systems with preserved volume fractions", *Phys. Rev. E.* 78 (2008) 011604-1 - 7
- [4] H. Garcke, B. Nestler, B. Stinner, F. Wendler, "Allen-Cahn systems with volume constraints", *Math. Mod. Meth. Appl. Sci.* 18 (2008) 1347-1381
- [5] A. A. Griffith, "The phenomena of Rupture and Flow in Solids", *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* 21, 163 (1920)
- [6] L. B. Freund, "Dynamic Fracture Mechanics", Cambridge University Press, Cambridge, England, 1998
- [7] R. Spatschek, M. Hartmann, E. Brener, H.Müller-Krumbhaar and K.Kassner, "Phase Field Modeling of Fast Crack Propagation", *Phys. Rev. Lett.* 96, 015502 (2007)
- [8] D. Pilipenko, R. Spatschek, E. A. Brener and H. Müller-Krumbhaar, "Crack Propagation as a Free Boundary Problem", *Phys. Rev. Lett.* 015503 (2007)
- [9] E. A. Brener, V. Marchenko and R. Spatschek, "Influence of strain on the kinetics of phase transitions in solids", *Phys. Rev. E.* 75, 041604 (2007)
- [10] R. Spatschek, C. Müller-Gugenberger, E. Brener and B. Nestler, "Phase-field modeling of fracture and stress induced phase transitions", *Phys. Rev. E.* 75, 066111 (2007).
- [11] Fraunhofer Institut Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Abhängigkeit des Kontaktwinkels von den Oberflächeneigenschaften, <http://www.igb.fraunhofer.de/www/gf/GrenzflMem/gf-physik/dt/GFphys-KontWinkel-Obfl.html>

Andreas Baum

**Potenziale des Laserauftragsschweißens im industriellen Ein-
satz**

–

**Perspektiven aus dem gemeinsamen Forschungsprojekt der
Hochschule Pforzheim mit der Max- und Erni-Bühler-Stiftung**

Inhaltsverzeichnis

1	Einordnung und Abgrenzung von Beschichtungsverfahren	40
1.1	Verfahrensgruppe Thermisches Spritzen	41
1.2	Verfahrensgruppe Auftragschweißen	41
2	Das Laserauftragschweißen	44
2.1	Begriffsdefinitionen.....	44
2.2	Verfahrensprinzip und Kennwerte	45
2.3	Verfahrensvarianten	46
2.4	Werkstoffe beim Laserauftragschweißen	47
2.5	Anwendungsgebiete des Laserauftragschweißens	48
3	Eigenschaften von Auftragschichten.....	49
3.1	Anforderungen an Verschleißschutzschichten	49
4	Mechanische Belastungsfälle an Werkzeugen	51
4.1	Lastfall: Zugbelastung	52
4.2	Lastfall: Druckbelastung	53
4.3	Lastfall: Biegebelastung	55
4.4	Lastfall: dynamische Belastung / Schlagzähigkeit.....	56
5	Verschleißschutz durch Laserauftragschweißen	58
5.1	Verschleißmechanismen	58
5.2	Eigenschaften laserauftraggeschweißter Schichten bei abrasivem Verschleiß	59
5.3	Verschleißversuch zum Gleitverschleiß.....	61
5.4	Verschleißversuch zum Abrasiv - Gleitverschleiß	62
6	Potenziale des Laserauftragschweißens	64
7	Laserauftragschweißen im industriellen Einsatz	66

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags sollen die Potenziale des Laserauftragschweißens verdeutlicht werden. Zunächst werden die teilweise verwirrenden Begrifflichkeiten der gängigen und bekanntesten Beschichtungsverfahren, die in direkter Konkurrenz zum Laserauftragschweißen stehen eingeordnet und gegeneinander abgegrenzt.

Anschließend werden Varianten sowie das grundlegende Funktionsprinzip des Laserauftragschweißens erläutert. In besonderem Maße wird auf den Aufbau von Laserbeschichtungen eingegangen. Jeder der beteiligten Schichtbereiche erfüllt im Gesamtverbund eine bestimmte Aufgabe. Die Eigenschaften der Schichtbereiche müssen daher gezielt eingestellt werden. Die dort angestellten theoretischen Überlegungen werden dann anhand beispielhafter Verschleißversuche verifiziert. Abschließend werden die Potenziale des Laserauftragschweißens sowie die Vorgehensweise zur Überführung des Verfahrens in den industriellen Einsatz erläutert.

Summary

Within this article the potential of laser deposition welding shall be clarified. First, the partially confusing terms of the commonly used and well-known cladding processes which are in direct competition to the laser deposition welding will be classified and delineated.

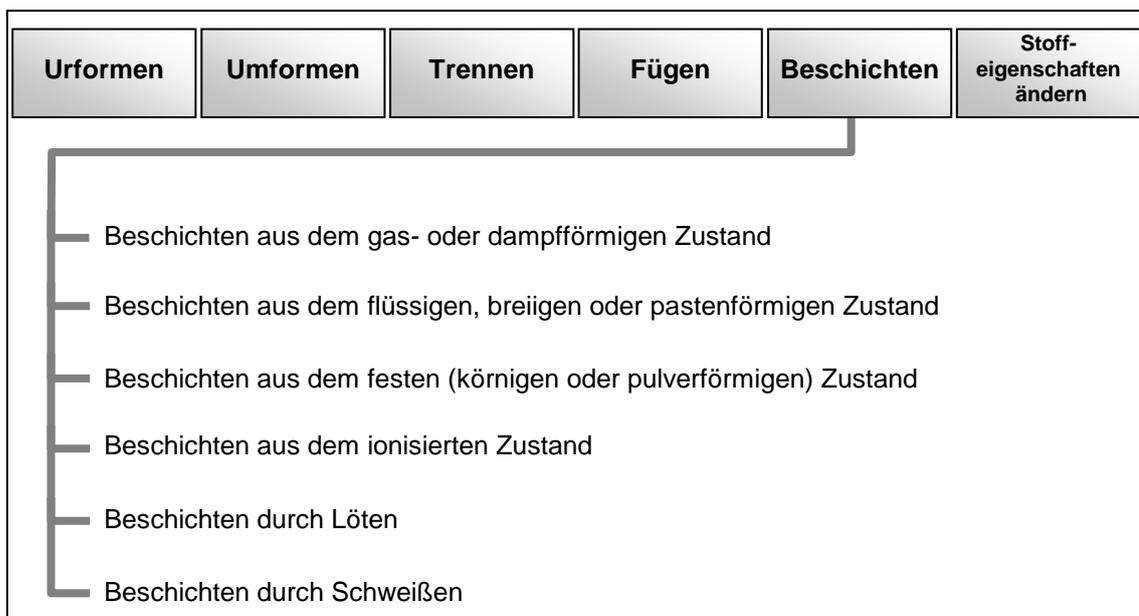
Subsequently, variants and the basic operating principle of the laser deposition welding are explained. In particular the structure of the trace is examined. Each of the involved trace areas performs a certain task within the complete system. The properties of the trace areas therefore must be adjusted targeted. The theoretic considerations are verified by exemplified wear tests. Finally, the potential of the laser deposition welding as well as the procurement for the transfer of the process into the industrial application are explained.

8 Einordnung und Abgrenzung von Beschichtungsverfahren

Nach DIN 8580 werden die Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen gegliedert. Eine dieser Hauptgruppen umfasst alle Verfahren des Beschichtens. Das Beschichten ist nach DIN als „das Aufbringen einer festhaftenden Schicht aus formlosem Stoff auf ein Werkstück“ zu verstehen. Unterhalb der Hauptgruppe des Beschichtens erfolgt die Aufgliederung in weitere Untergruppen. Diese erfolgt anhand des Aggregatzustands des Beschichtungswerkstoffs bzw. der Art der Aufbringung.

Abbildung 1

Gliederung der Beschichtungsverfahren nach DIN



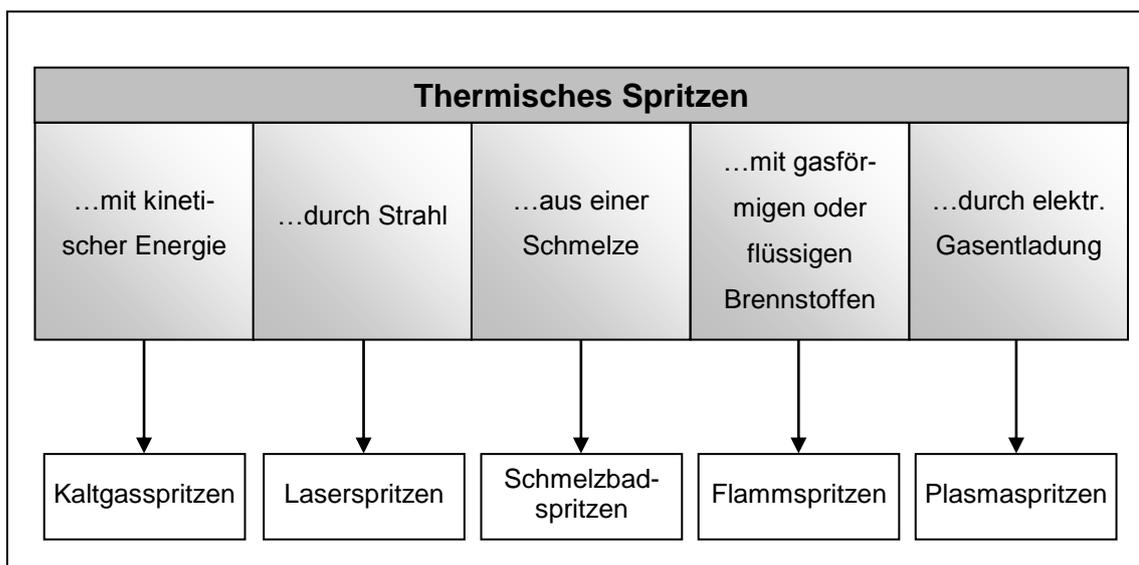
Die Beschichtungsverfahren werden weiterhin in Dünn- und Dickschichtverfahren untergliedert. Zu den Dickschichtverfahren zählen alle Beschichtungsverfahren, deren aufgetragene Schichtdicke größer 10 µm beträgt. Der folgende Beitrag soll sich auf die Verfahren des thermischen Spritzens und die Verfahren des Auftragschweißens beschränken. Beide Verfahrensgruppen gehören zu den Dickschichtverfahren.

8.1 Verfahrensgruppe Thermisches Spritzen

Ordnet man das Thermische Spritzen nach DIN ein, so ist es in der Gruppe „Beschichten aus dem festen (körnigen oder pulverförmigen) Zustand“ zu finden. Die Verfahrensgruppe lässt sich gemäß Abbildung 2 auf die weitläufig bekannten Verfahren herunter brechen.

Abbildung 2

Die Verfahren des Thermischen Spritzens



Allen genannten Verfahren gemein ist das grundsätzliche Funktionsprinzip der Schichtaufbringung. Dabei wird der Spritzzusatzwerkstoff durch eine entsprechende Energiequelle aufgeschmolzen und durch kinetische Energie auf das Substrat geschleudert. Das Substrat selbst wird dabei nicht aufgeschmolzen.

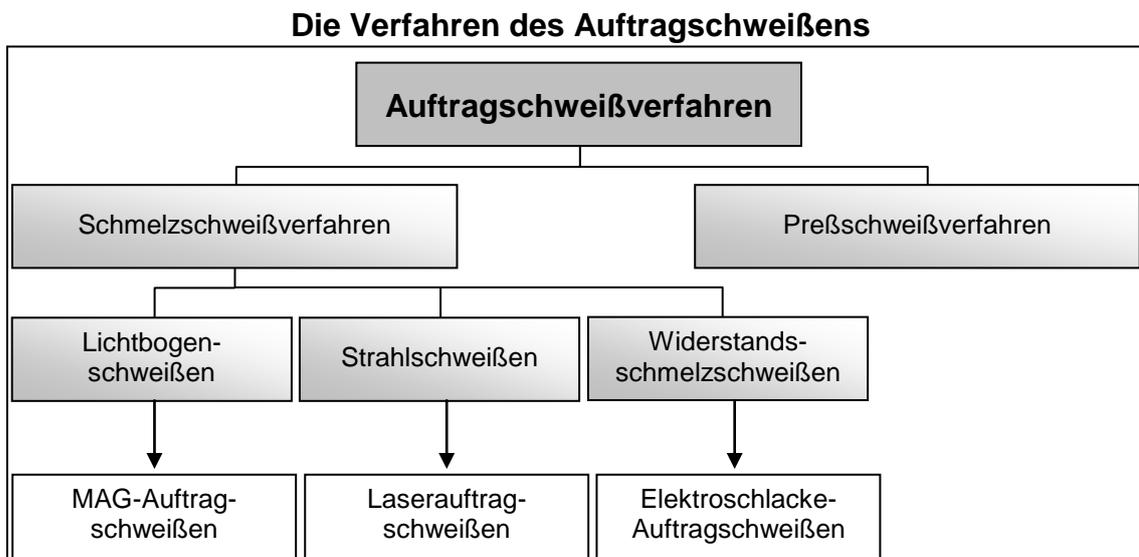
8.2 Verfahrensgruppe Auftragschweißen

Die zweite Verfahrensgruppe, die im Rahmen dieses Beitrags behandelt werden soll, ist die Gruppe der Auftragschweißverfahren, die in direkter Konkurrenz zu den Verfahren des Thermischen Spritzens steht. Die beiden Verfahrensgruppen sind sich prinzipiell sehr ähnlich, weshalb sie auch gerne verwechselt bzw. vermischt werden, unterscheiden sich jedoch in einigen wesentlichen Punkten dennoch deutlich.

Der erste Unterschied zeigt sich bereits in der Eingliederung der Verfahrensgruppe nach DIN (siehe Abb.1). Die Gruppe der Auftragschweißverfahren gehört zu den Verfahren des „Beschichtens durch Schweißen“.

Die Auftragschweißverfahren lassen sich dann wiederum gemäß Abb.3 einteilen.

Abbildung 3



Die beiden Verfahrensgruppen unterscheiden sich jedoch nicht nur in ihrer grundsätzlichen Eingliederung. Ein viel wesentlicherer Unterschied liegt in der Schichthftung. Während bei den Verfahren des Thermischen Spritzens die Schichthftung in erster Linie durch mechanische Verklammerung gepaart mit Diffusion geprägt ist, wird bei den Auftragschweißverfahren sowohl der Beschichtungs- als auch der Grundwerkstoff aufgeschmolzen, wodurch eine Diffusionszone bzw. Aufmischungszone und dadurch eine schweißmetallurgische Schichthftung entsteht.

Für die weitere Betrachtung soll aus jeder Verfahrensgruppe ein Verfahren herausgegriffen werden. Dies sind das Laserauftragschweißen aus der Gruppe der Auftragschweißverfahren und das Flamspritzen aus der Gruppe des Thermischen Spritzens.

Tabelle 1 gibt die wesentlichen Merkmale der beiden Verfahren in übersichtlicher Weise wider.

Tabelle 1

wesentliche Verfahrensmerkmale

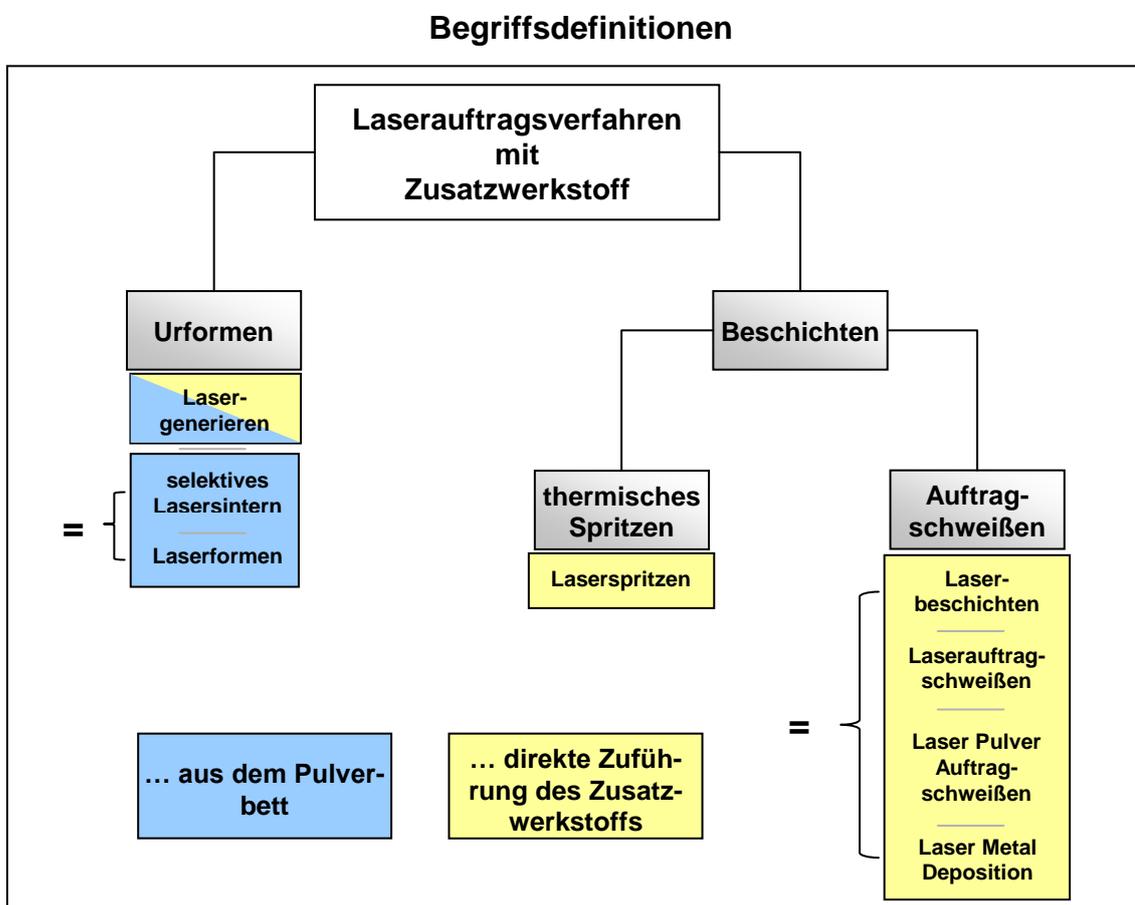
	Flammspritzen	Laserauftragschweißen
(Einzel)Schichtdicke [mm]	0,05 - 5	0,1 - 2
Auftragsrate [kg/h]	< 50	< 2
Präzision des Werkstoffauftrags	gering	hoch
Wärmeeintrag	gering	mittel
Substrat- aufmischung [%]	0	< 5
Haftfestigkeit	gering	hoch
Schichtstruktur	porös	dicht

9 Das Laserauftragschweißen

9.1 Begriffsdefinitionen

Für das Laserauftragschweißen gibt es in der Literatur eine Vielzahl von Begriffen, welche nicht immer dieselbe Bedeutung haben. Abb. 4 ordnet diese Begriffe und Verfahrensbezeichnungen den entsprechenden Verfahrenen zu.

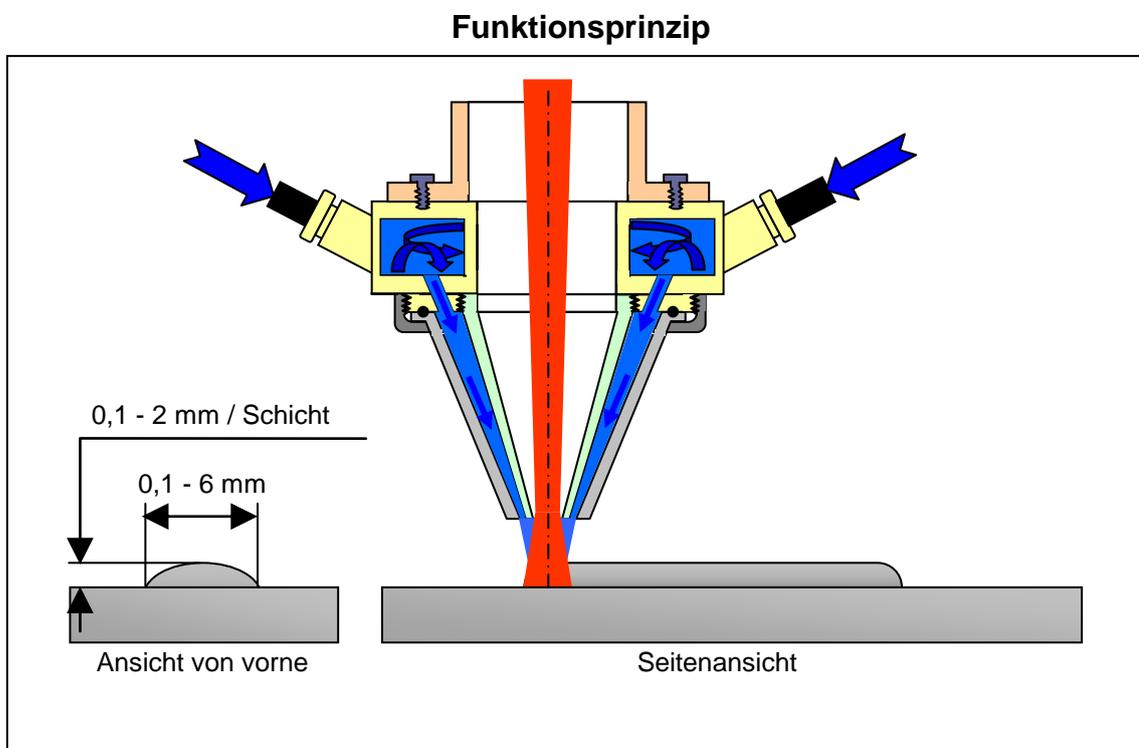
Abbildung 4



9.2 Verfahrensprinzip und Kennwerte

Abb.5 zeigt das Verfahrensprinzip des Laserauftragschweißens. Die Laserstrahlung (rot) tritt zentrisch aus dem Beschichtungskopf aus. Der Zusatzwerkstoff wird über vier Anschlüsse am Umfang des Beschichtungskopfs zugeführt (blaue Pfeile) und zunächst in einer Verwirbelungskammer gleichmäßig über den Umfang verteilt, wonach es koaxial zum Laserstrahl aus der ringspaltförmigen Düsenöffnung austritt. Die Laserstrahlung schmilzt den Zusatzwerkstoff teilweise im Flug und teilweise auf dem Substrat auf. Durch die Vorschubbewegung entsteht dann entsprechend ein raupenförmiger Auftrag mit den in Abb.5 dargestellten maximalen Abmessungen der Einzelspur. Für einen flächenhaften oder volumenförmigen Auftrag werden die Einzelspuren entsprechend nebeneinander bzw. aufeinander aufgetragen.

Abbildung 5

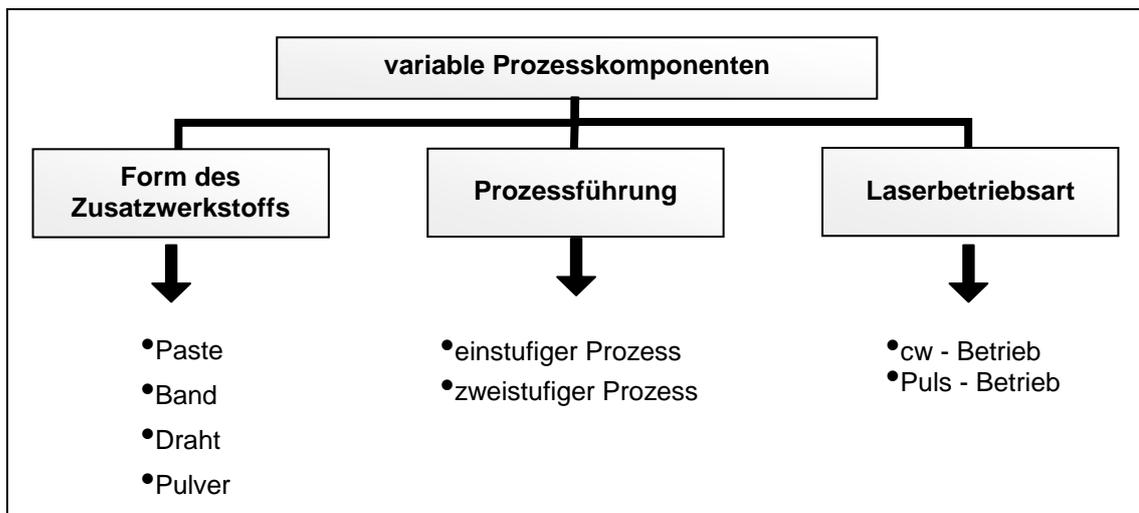


9.3 Verfahrensvarianten

Die Verfahrensvarianten des Laserauftragschweißverfahrens lassen sich anhand der variablen Prozesskomponenten identifizieren. Diese sind in Abb.6 dargestellt.

Abbildung 6

variable Prozesskomponenten beim Laserauftragschweißen



Neben der bekanntesten Verfahrensvariante, dem Laser-Pulver-Auftragschweißen, was in der Regel automatisiert durchgeführt wird, wird im manuellen Bereich das Laser-Draht-Auftragschweißen durch Puls laser häufig für kleinere Reparaturen eingesetzt.

Neben den in Abb.6 dargestellten Verfahrensvarianten können dann beispielsweise beim Laser-Pulver-Auftragschweißen auch noch anlagentechnische Varianten eingeführt werden. Als Beispiel ist hier die Art der Pulverzufuhr zu nennen. Die bekanntesten Vertreter sind hier die koaxiale oder die laterale Pulverdüse.

9.4 Werkstoffe beim Laserauftragschweißen

Die Werkstoffe, die zum Laserauftragschweißen eingesetzt werden, werden in erster Linie nach Ihrem Einsatzzweck unterschieden. Diese sind entsprechend in Abb.7 dargestellt.

Abbildung 7

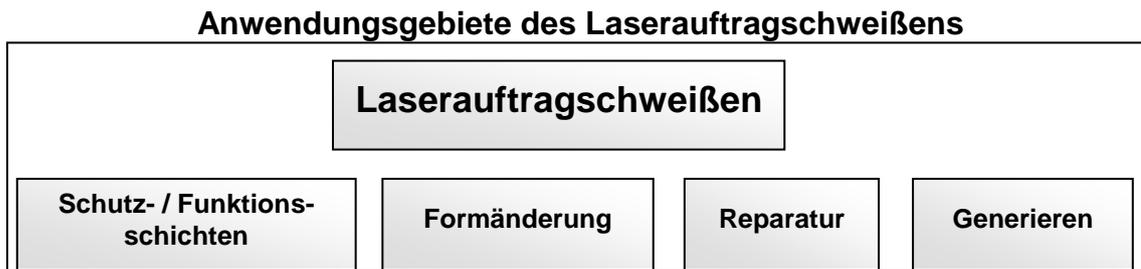
Werkstoffe beim Laserauftragschweißen			
Werkstoffe mit hoher Korrosionsbeständigkeit	Werkstoffe mit hoher Verschleißbeständigkeit	Werkstoffe mit hoher Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit	Werkstoffe mit Sonderfunktionen
FeNiCr-Legierungen NiCr-Legierungen Ti-Legierungen	Eisenhartlegierungen Nickelhartlegierungen Kobalthartlegierungen Hartmetalle		z.B. Leichtbau Ti-Legierungen

Die Werkstoffe die am häufigsten zum Einsatz kommen sind Hartlegierungen und hier insbesondere die Nickelhartlegierungen. Aufgrund ihrer guten Korrosions- und Verschleiß Eigenschaften eignen diese sich für eine große Anzahl von Anwendungen und sind dementsprechend weit verbreitet. Sehr interessant, aber in Bezug auf das Laserauftragschweißen weitgehend unerforscht, ist die Anwendung von Hartmetallen – meist ein Verbund aus WC / Co – als Ersatz für Sinterhartmetallanwendungen.

9.5 Anwendungsgebiete des Laserauftragschweißens

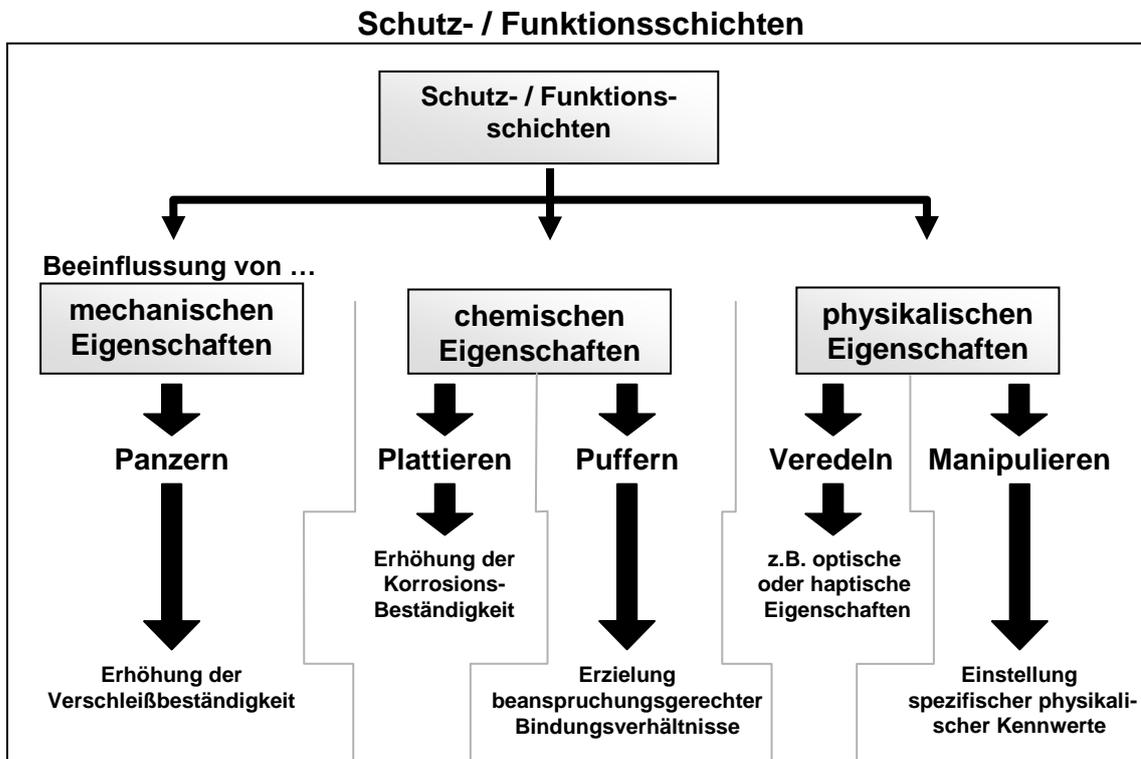
Die Anwendungsgebiete des Verfahrens reichen bis in alle Zweige der Industrie und können als grobe Übersicht entsprechend Abb.8 eingeteilt werden.

Abbildung 8



Das zweifellos größte Potenzial bietet das Anwendungsfeld der Schutz- und Funktionsschichten. Welches sich in weitere Anwendungsfelder aufgliedern lässt (siehe Abb.9).

Abbildung 9



10 Eigenschaften von Auftragschichten

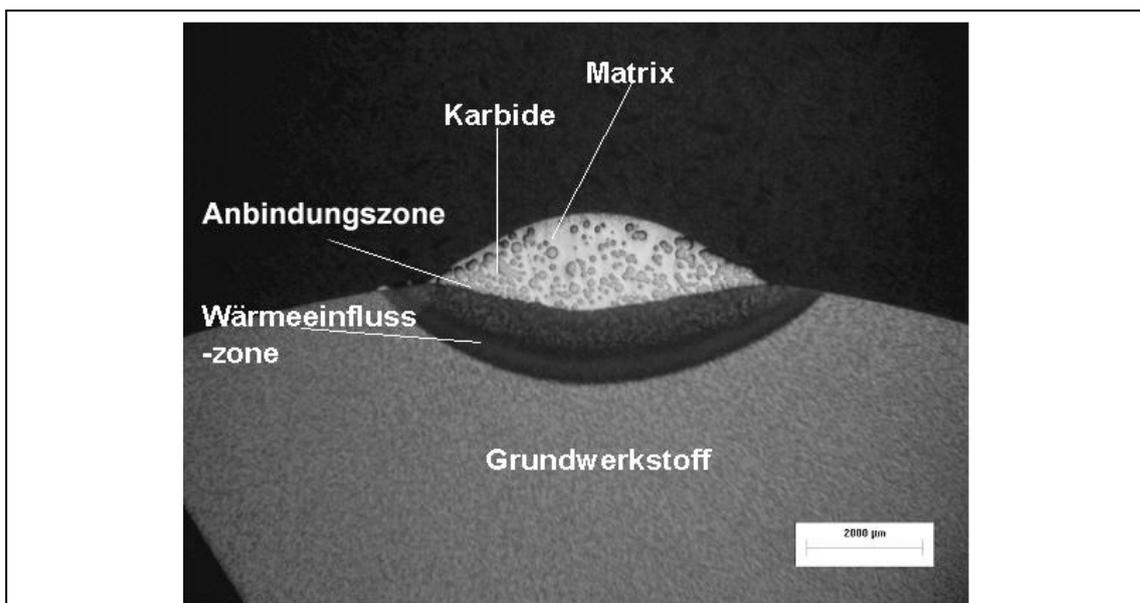
Für eine funktionsfähige Laserbeschichtung muss die Schicht wichtige Merkmale erfüllen, die im Folgenden näher erläutert werden.

10.1 Anforderungen an Verschleißschutzschichten

Charakteristisch für Auftragspuren, die durch Laserauftragschweißen erzeugt werden, sind die vier Zonen. Diese sind in Abb.10 dargestellt.

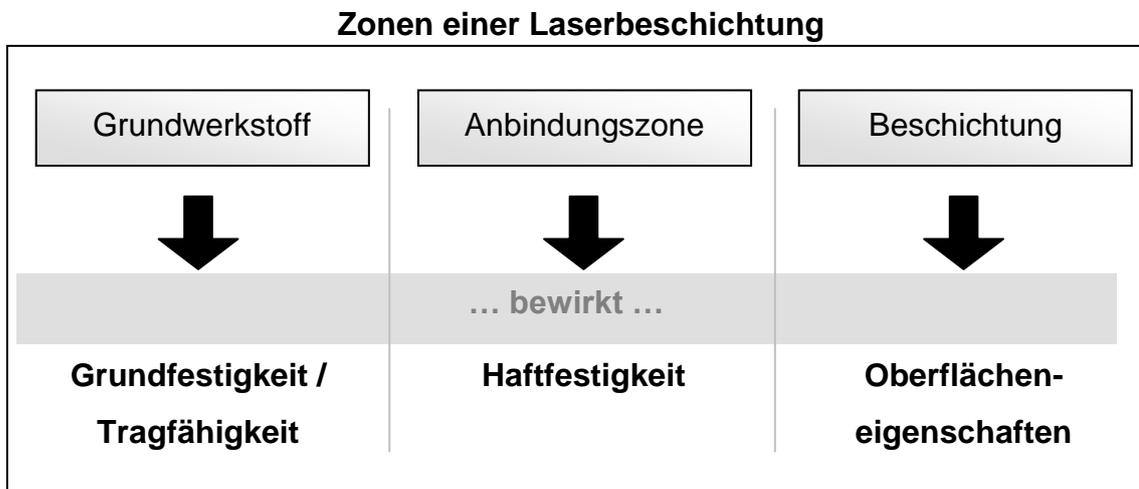
Abbildung 10

Aufbau einer Auftragspur



Bei der ersten Zone handelt es sich um den reinen Beschichtungswerkstoff, der je nach Art des Werkstoffes auch mehrphasig aufgebaut sein kann. Die zweite Zone ist die Anbindungszone, in der Grund und Beschichtungswerkstoff vermischt werden. Diese Zone wird auch als Diffusionszone bezeichnet und weist abhängig von den verwendeten Parametern eine mehr oder weniger starke Aufmischung auf. Die dritte Zone ist die Wärmeeinflusszone, die durch den Energieeintrag in den Grundwerkstoff entsteht und in der Regel unerwünscht aber unvermeidbar ist. Die vierte Zone ist der reine Grundwerkstoff.

Abbildung 11



Jeder der genannten Zonen kommt eine bestimmte Bedeutung innerhalb des Schichtverbunds zu. Während der Grundwerkstoff zusammen mit der Wärmeinflusszone die Grundfestigkeit bieten muss bzw. für die Tragfähigkeit verantwortlich ist, obliegt der Anbindungszone die Bereitstellung der Haftfestigkeit der Schicht auf dem Grundwerkstoff. Die Beschichtung sorgt dann letztendlich für die gewünschten Oberflächeneigenschaften.

Für die anwendungsspezifische Funktionsfähigkeit der Beschichtung müssen diese Zonen sorgfältig aufeinander abgestimmt sein. Hierzu wird von der entsprechenden Anwendung ein Beanspruchungsprofil erstellt, welches im Prinzip ein Abbild der wirkenden mechanischen Belastungen darstellt.

11 Mechanische Belastungsfälle an Werkzeugen

Die Analyse des Beanspruchungsprofils beinhaltet im Prinzip eine Gewichtung der wirkenden mechanischen Grundbelastungsfälle. Diese ist in aller Regel ein Verbund aus:

- Zug
- Druck
- Biegung
- Torsion
- Scherung

Die zeitliche Komponente spielt hierbei eine ebenso wichtige Rolle. In Bezug auf die Grundbelastungsfälle unterscheidet man hierbei:

- statisch bzw. quasistatisch
- dynamisch
 - schwellend
 - wechselnd
 - schlagartig (Impulsbelastung)

Im Rahmen von Untersuchungen wurden einige der Belastungsfälle an laserauftraggeschweißten Proben untersucht.

11.1 Lastfall: Zugbelastung

In der Regel ist es, aufgrund des Sprödbruches, nicht üblich an harten und spröden Werkstoffen Zugversuche durchzuführen. Dennoch gibt es in der Literatur eine inoffizielle Norm, im Rahmen derer Zugversuche an spröden und harten Beschichtung durchgeführt werden. In Anlehnung an diese Norm wurden die folgenden Zugversuche durchgeführt.

Der Probenaufbau ist in Abb.12 dargestellt. Es handelt sich dabei um zwei zylinderförmige Stahlteile, die über eine Schraube miteinander verbunden werden. Die Beschichtung erfolgt dann ca. 10 mm um diese Verbindungsstelle herum. Eine dünne Kupferscheibe zwischen den beiden Stahlzylindern verhindert ein Verschweißen der beiden Stahlteile untereinander. Im Anschluss daran wird die Probe auf ein definiertes Durchmessermaß geschliffen und dem Zugversuch unterzogen.

Diese aufwendige Probenherstellung ist erforderlich um den Einfluss des Grundwerkstoffs auf den Zugversuch möglichst stark einzugrenzen.

Abbildung 12

Zugprobe mit Laserbeschichtung



Wie erwartet, kam es aufgrund der Sprödigkeit zu relativ großen Schwankungen der Messwerte. Es genügen hier bereits kleinste Kerben, um die Probe zu Bruch zu bringen. Die in Tab. 2 angegebenen Werte sind daher als Maximalwerte zu betrachten.

Tabelle 2

Ergebnisse der Zugprüfung

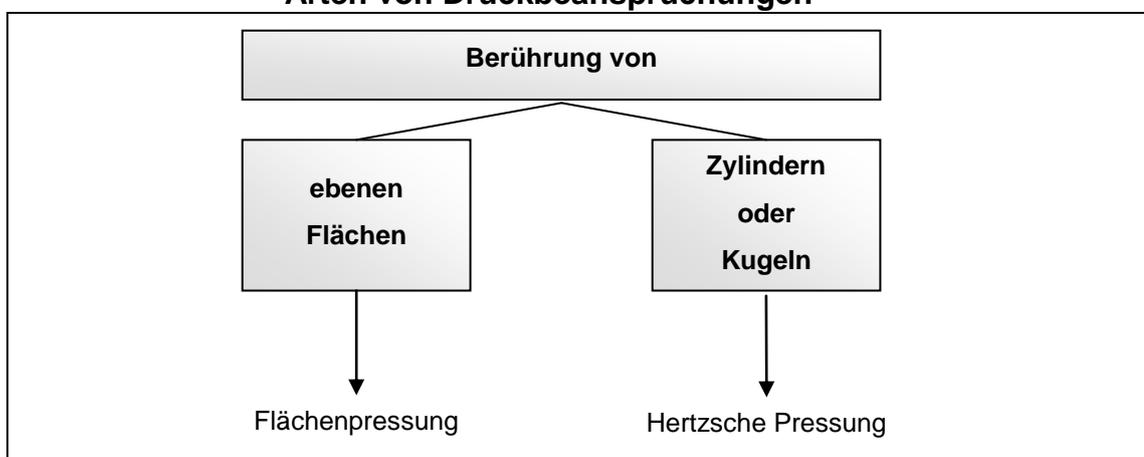
Werkstoff	Zugfestigkeit N/mm ²
St 37	470
NiBSi / WSC sph.	bis zu 1256
Stellite 21	bis zu 990

11.2 Lastfall: Druckbelastung

Beim Lastfall der Druckbelastung sind gemäß Abb.13 zwei Fälle zu unterscheiden.

Abbildung 13

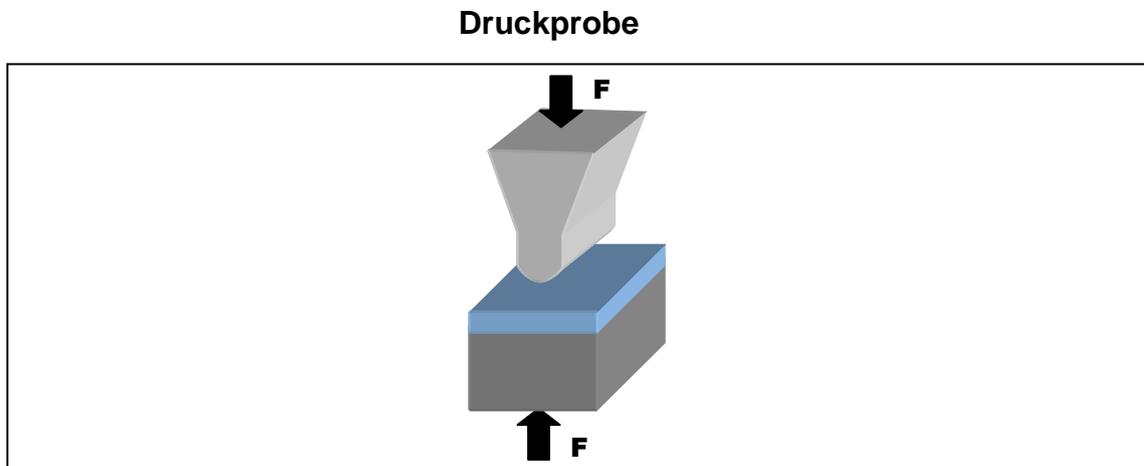
Arten von Druckbeanspruchungen



Bei der Berührung von ebenen Flächen handelt es sich um die reguläre Flächenpressung. Eine Besonderheit ergibt sich bei der Berührung von Kugeln oder Zylindern auf ebenen Flächen. Hier spricht man von der Hertzschen Pressung. Die maximalen Spannungen liegen bei dieser Art der Flächenpressung unterhalb der Oberfläche, weshalb hier der Verschleißmechanismus der Oberflächenzerrüttung eine wesentliche Rolle spielt.

Der Versuchsaufbau, der für die Druckversuche eingesetzt wurde, ist in Abb. 14 dargestellt.

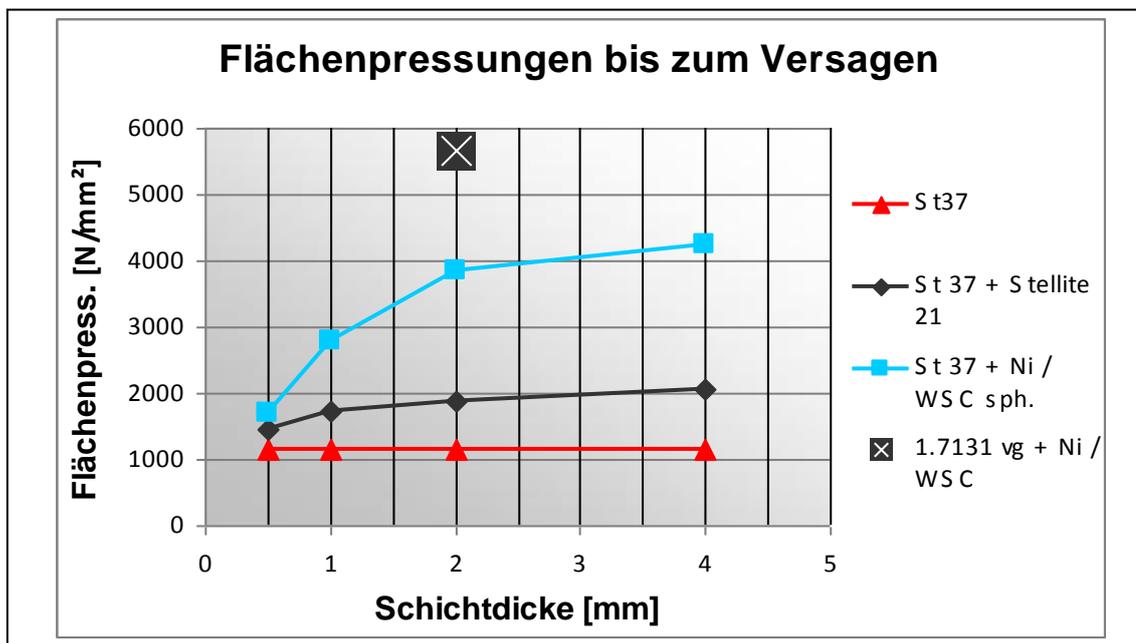
Abbildung 14



Der Versuchablauf wurde so gestaltet, dass die Flächenpressung sukzessive bis zum Versagen der Beschichtung erhöht wurde. Abhängig vom Grundwerkstoff und der Schichtdicke ergaben sich die in Abb.15 dargestellten Ergebnisse. Als Besonderheit ist hierbei der Stichversuch mit einem vergüteten Grundwerkstoff zu nennen, der eine gegenüber den weichen Grundwerkstoffen wesentlich höhere Festigkeit erzielte.

Abbildung 15

Ergebnisse des Druckversuchs

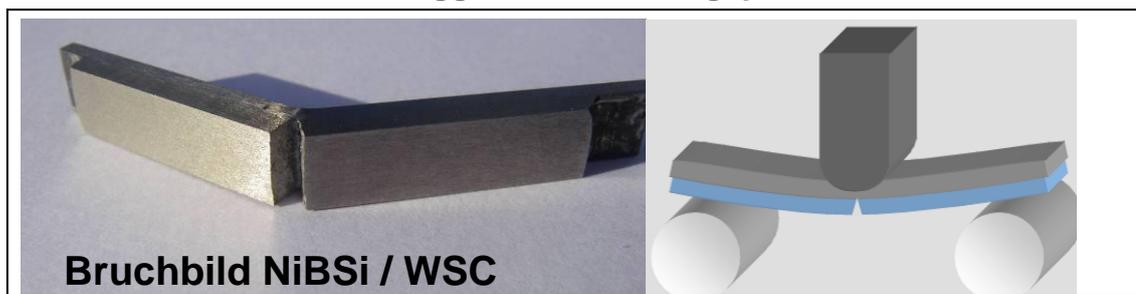


11.3 Lastfall: Biegebelastung

Hochbelastete Werkzeuge erfahren im Einsatz eine mehr oder weniger ausgeprägte elastische Verformung. Aus diesem Grund ist der Lastfall der Biegebelastung ein wesentliches Element im Beanspruchungsprofil eines solchen Werkzeugs und muss bei der Schichtauslegung entsprechend berücksichtigt werden.

Abbildung 16

laserauftragsgeschweißte Biegeprobe



Der Biegeversuch zur Ermittlung der Biegebruchzähigkeit an Auftragwerkstoffen und zur simultanen Ermittlung der Haftfestigkeit wurde entsprechend Abb.16 aufgebaut. Die Probe besteht dabei aus Grundwerkstoff und Beschichtung, wobei die Beschichtung nach unten zeigt. Im Versuchsablauf wurde dann eine definierte Kraft auf die Probe aufgebracht und schrittweise bis zur Zerstörung der Probe gesteigert.

Die Ergebnisse des Biegeversuchs sind in Tab.3 dargestellt. Sie entsprechen in sofern den theoretischen Erwartungen, als dass die harte aber spröde NiBSi / WSC Beschichtung den geringsten Biegewinkel bzw. die geringste Biegespannung aufnehmen konnte.

Tabelle 3

Ergebnisse des Biegeversuchs

Werkstoff	max. Biegewinkel bis Bruch [°]	durchschnittliche Rückfederung [%]	max. Biegespannung bis Bruch [N/mm ²]
NiBSi / WSC	2,4	78,9	490
Stellite 21	5,5	76,5	980
Stellite 6	8,5	72,1	1540
1.2379 ng	8,6	56,6	1770
1.2379 vg	15,2	87,9	3480

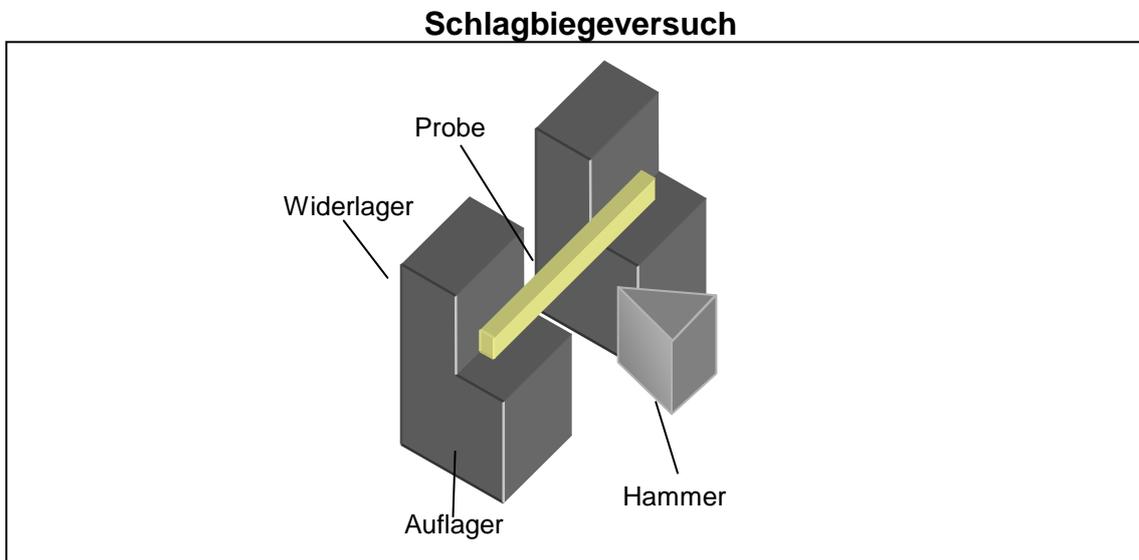
11.4 Lastfall: dynamische Belastung / Schlagzähigkeit

Der weit verbreitete Kerbschlagbiegeversuch ist in der Regel zur Prüfung der Zähigkeit von Stählen vorgesehen. Dabei sorgt die eingebrachte Kerbe für eine Sollbruchstelle in der Probe, die gegenüber Hartmetallen recht zäh sind.

Da Hartmetalle ein Spröbruchverhalten aufweisen, würde eine Kerbe bei diesen Materialien zum sofortigen Bruch mit einer nicht reproduzierbar messbaren Zähigkeit führen. Aus diesem Grund wendet man bei spröden Materialien den so genannten Schlagbiegeversuch an.

Der einzige Unterschied der beiden Prüfungen liegt in der fehlenden Kerbe an der Probe. Der Versuchsaufbau ist in Abb.17 dargestellt.

Abbildung 17



Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tab.4 dargestellt. Es zeigen sich wie bereits aus theoretischer Sicht erwartet deutliche Unterschiede zwischen den zähen Beschichtungen aus den eingesetzten Stellite und der Hartmetallbeschichtung aus NiBSi / WSC.

Tabelle 4

Ergebnisse des Schlagbiegeversuchs

Werkstoff	Schlagzähigkeit [J/mm ²]
NiBSi / WSC	0,89
Stellite 6	17,16
Stellite 21	18,62
1.2379 vergütet	> 21 *
* Probe nicht gebrochen	

12 Verschleißschutz durch Laserauftragschweißen

Wie bereits erwähnt wurde, liegen die größten Potenziale des Verfahrens in der Herstellung von Schutz- und Funktionsschichten. Der Einsatzzweck dieser Schichten liegt vor allem im Verschleißschutz.

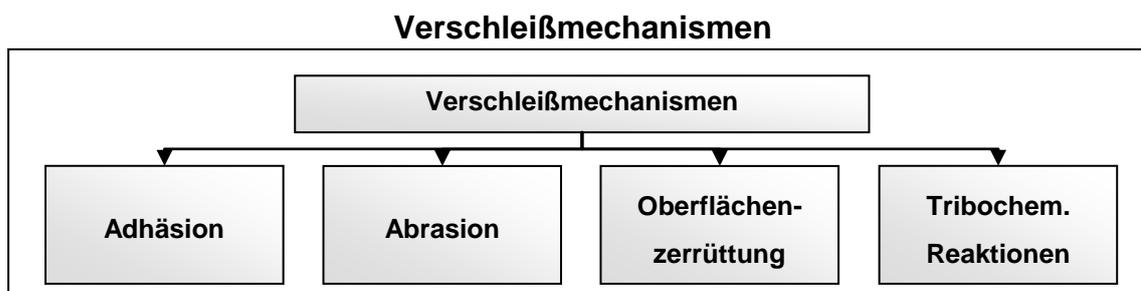
Die Oberflächeneigenschaften der Beschichtung können über eine Reihe von Schichtparametern beeinflusst werden. Dazu zählen u.a. die Zusammensetzung des Beschichtungswerkstoffes, die Karbidart, -form, -größe und -verteilung, sowie die Auftragstrategie.

Die Auslegung der Schichten erfolgt auch hier anhand des Beanspruchungsprofils in Bezug auf die auftretende Form des Verschleißes.

12.1 Verschleißmechanismen

Jedes so genannte Tribosystem setzt sich aus einer Kombination aus vier grundlegenden Verschleißmechanismen zusammen, die in Abb.18 dargestellt sind.

Abbildung 18

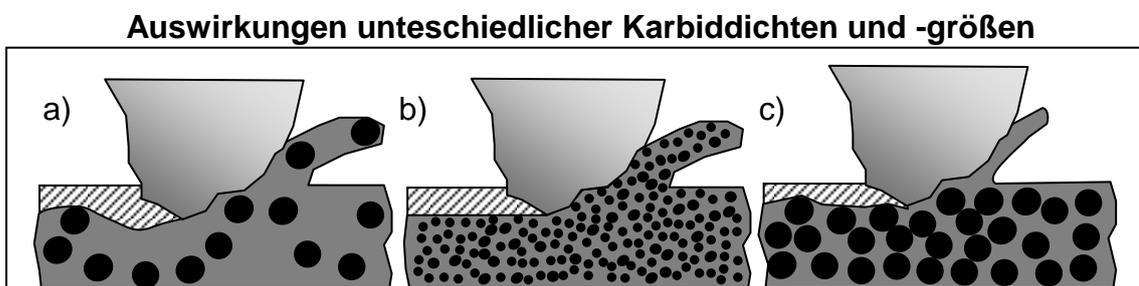


Im Rahmen dieses Beitrags sollen im Folgenden die Möglichkeiten des Verschleißschutzes in Bezug auf Abrasion näher beleuchtet werden.

12.2 Eigenschaften laserauftraggeschweißter Schichten bei abrasivem Verschleiß

Die Einflussmöglichkeiten auf die Verschleißigenschaften bei abrasiver Beanspruchung sind sehr vielfältig. Abb.19 zeigt beispielsweise, wie durch die Karbidgröße und -verteilung das Verschleißverhalten beeinflusst werden kann.

Abbildung 19



Hartmetalle stellen ein Verbund aus Matrix und Hartstoffen dar. Jeder dieser Bestandteile erfüllt eine bestimmte Aufgabe. Während die Matrix als Binder fungiert und für den Zusammenhalt und die Duktilität der Schicht sorgt, bestimmen die Hartstoffe die Widerstandsfähigkeit gegen Verschleiß. Entsprechend des Binderanteils ist die gesamte Beschichtung mehr oder weniger duktil. Mit zunehmendem Hartstoffgehalt wird der Verschleißwiderstand der Schicht erhöht.

Abb.19 a) ist ein Beispiel für eine relativ duktile Auftragspur mit geringem Hartstoffgehalt. Die Hartstoffdichte ist sehr gering, so dass Rauheitsspitzen leicht in die relativ weiche Matrix eindringen können und diese entsprechend schnell verschleißt.

Abb.19 b) zeigt eine Auftragspur mit einem sehr hohen Gehalt an feinen Karbiden. Die Rauheitsspitzen des Reibpartners können hier aufgrund der hohen Karbidichte nicht in die Spur eindringen. Die geringe Karbidgröße hat jedoch Vor- und Nachteile. Der Vorteil ist eine trotz der hohen Karbidichte relativ hohe Duktilität. Der Nachteil ist, dass die Karbide aufgrund ihrer geringen Größe auch nur eine geringe Anbindungsfläche zur Matrix besitzen und daher relativ leicht aus dem Gefügeverbund herausgetrennt werden können.

Bei schlechter Abfuhr der Verschleißpartikel können sie dann zusätzlich als Abrasivmittel wirken.

Abb.19 c) zeigt hingegen eine Auftragspur mit einem hohen Gehalt an großen Karbiden. Diese haben nicht den Nachteil der geringen Anbindungsfläche zur Matrix. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit, dass Hartstoffe durch einhakende Rauheitsspitzen herausgerissen werden, sehr gering. Allerdings befinden sich zwischen den Karbiden auch relativ große Zwischenräume, in die die Rauheitsspitzen des Reibpartners eindringen können. Dadurch besteht die Gefahr von Auswaschungen, d.h. Abtrag der Matrix um die Karbide herum. Bei entsprechend fortgeschrittener Auswaschung kann es daher passieren, dass komplette Karbide aus dem Werkstoffverbund herausgelöst werden und einen Lunker hinterlassen.

Wie an diesem Beispiel zu ersehen ist, sind die Einflüsse auf die Schichteigenschaften nicht nur im makroskopischen, sondern auch im mikroskopischen Bereich vielfältig und zu optimieren.

Zur Überprüfung und dem Vergleich der abrasiven Verschleißigenschaften werden in aller Regel Prüfstände eingesetzt. Für den vorliegenden Fall werden die Proben auf zwei unterschiedliche Verschleißarten überprüft.

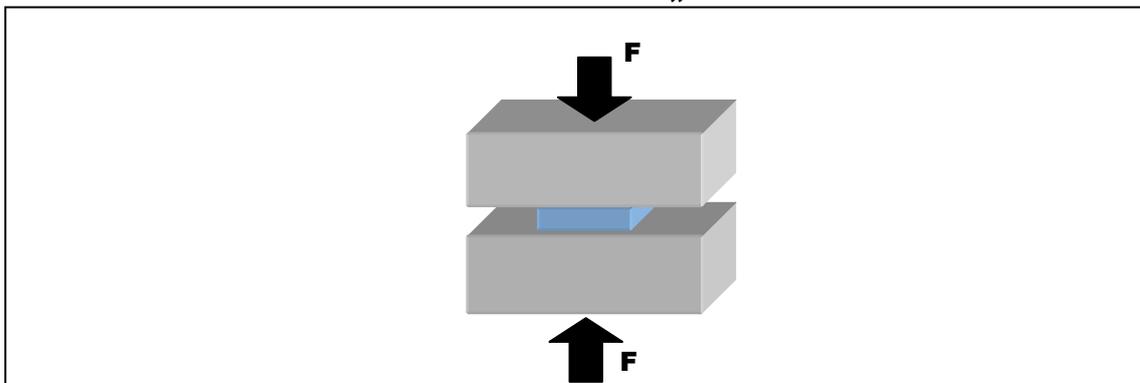
12.3 Verschleißversuch zum Gleitverschleiß

Der so genannte Gleitverschleiß ist eine Verschleißart, die sich aus den Verschleißmechanismen Abrasion, Adhäsion und tribochemischer Reaktion zusammensetzt.

Der Versuchsaufbau ist in Abb.20 dargestellt und besteht aus zwei Proben die mit einer definierten Kraft belastet werden und eine Relativbewegung zueinander ausführen.

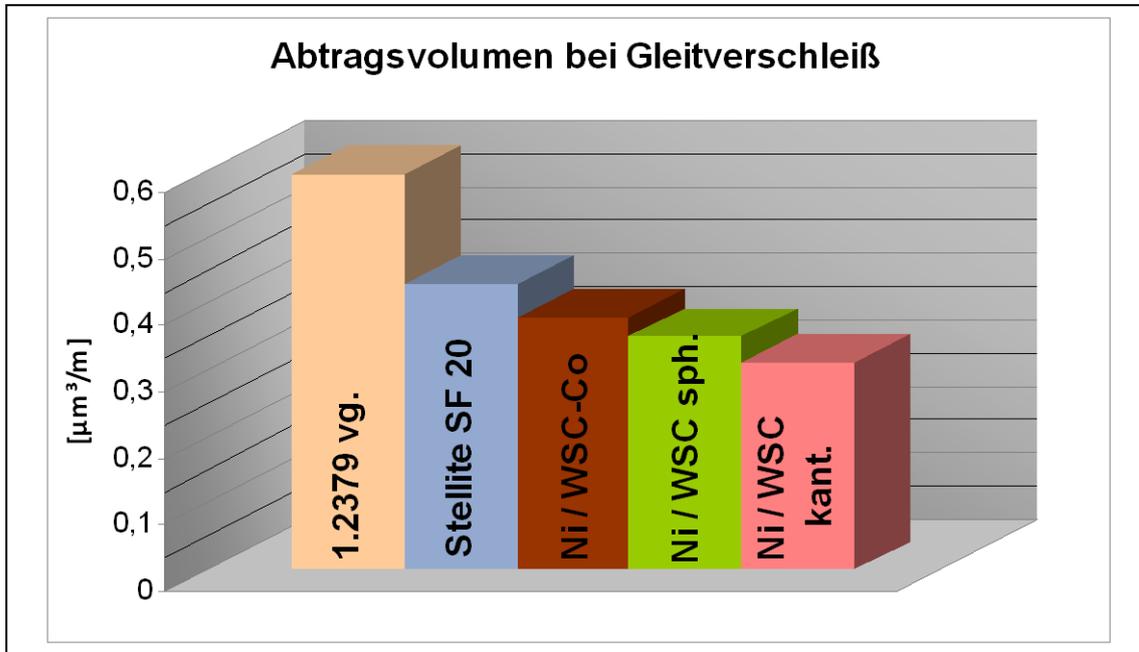
Abbildung 20

Verschleißversuch Abrasion „Gleitverschleiß“



In den Verschleißversuchen diente eine Probe aus vergütetem 1.2379 als Referenzprobe. Als normierter Verschleißkennwert wurde dann das abgetragene Volumen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abb.21 dargestellt. Da der vorherrschende Verschleißmechanismus bei diesem Versuch die Adhäsion ist, wirken sich die Hartstoffanteile hier nicht so gravierend auf das Verschleißverhalten aus, wie beim folgenden Versuch.

Abbildung 21

Ergebnisse des Verschleißversuchs zur Abrasion „Gleitverschleiß“

Die besten Verschleißeigenschaften gegenüber dem Referenzstahl zeigten die Nickel-Basis Beschichtungen. Innerhalb dieser Beschichtungen weisen die kantigen WSC - Hartstoffe einen leichten Vorteil gegenüber den sphärischen Hartstoffen auf. In Standzeiten ausgedrückt, erreicht die Nickel-Basis Beschichtung mit kantigen Karbiden gegenüber dem Referenzstahl eine rund doppelte Standzeit.

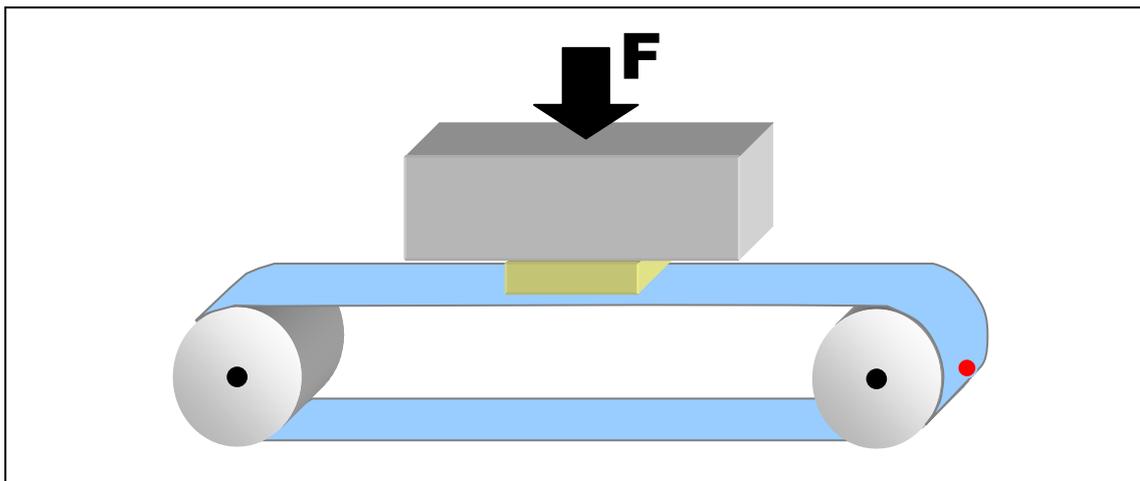
12.4 Verschleißversuch zum Abrasiv - Gleitverschleiß

Bei diesem Verschleißversuch herrschen grundsätzlich die gleichen Verschleißmechanismen, wie beim Versuch zum Gleitverschleiß. Der Unterschied liegt hier in der durch das Abrasivmittel verschobenen Signifikanz der Verschleißmechanismen. Während beim normalen Gleitverschleiß die Adhäsion zu den vorherrschenden Verschleißmechanismen gehört, steht beim Abrasiv – Gleitverschleiß die Abrasion im Vordergrund.

Der hierfür verwendete Versuchsaufbau ist in Abb.22 schematisch dargestellt. Als abrasiver Reibpartner dient ein mit Zirkonoxid bestücktes Band mit definierter Körnung. Die Probe wird auch hier mit einer definierten Kraft belastet.

Abbildung 22

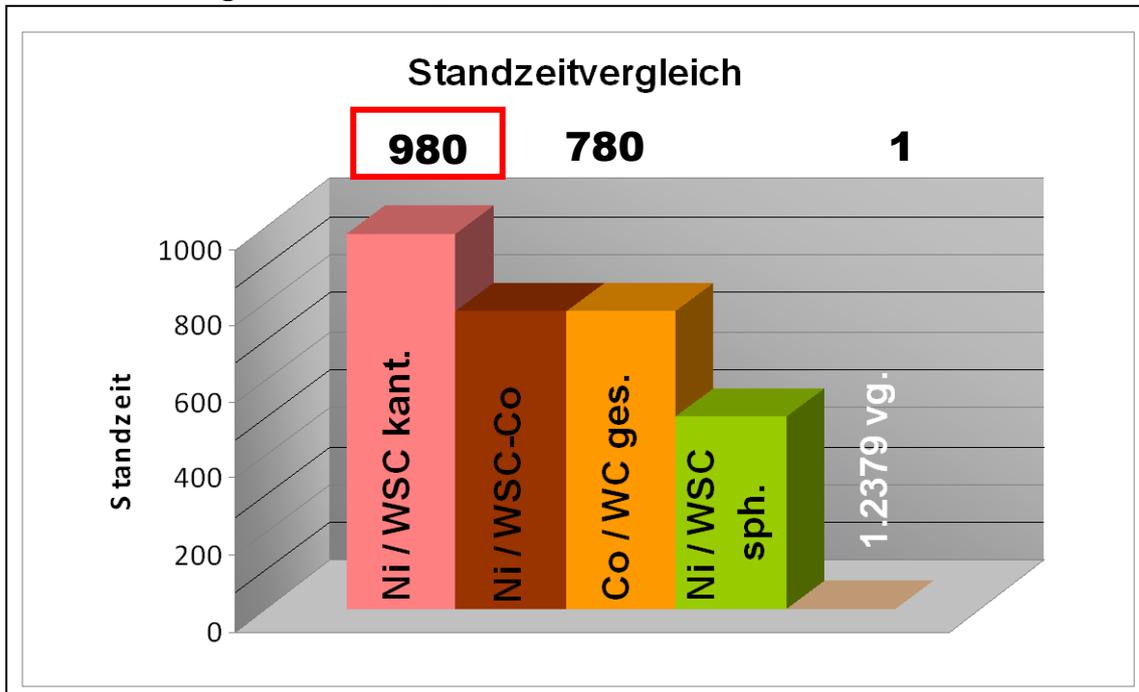
Ergebnisse des Verschleißversuchs zur Abrasion „Abrasive-Gleitverschleiß“



Die Versuche werden auch bei diesem Versuch auf eine Referenzprobe aus vergütetem 1.2379 bezogen. Eine Probe aus gesintertem Hartmetall wird zusätzlich untersucht.

Die Ergebnisse dieses Verschleißversuches sind in Abb.23 dargestellt. Bei dieser Verschleißart zeigen sich die Vorteile der karbidhaltigen Beschichtungen deutlich. Die Hartstoffe wirken vor allem dem abrasiven Verschleiß entgegen, wie der Standzeitvergleich der beiden Versuche zeigt. Der Versuch bestätigt auch die theoretischen Überlegungen, die unter 5.2 angestellt wurden. Das gesinterte Hartmetall (WC/Co ges.), dessen Hartstoffe im Bereich von 2,5 μm liegen, weisen im Vergleich zu den Hartmetallbeschichtungen, deren Hartstoffe im Bereich von 40 μm liegen einen deutlich höheren Verschleiß bzw. eine deutlich geringere Standzeit auf. Gegenüber dem Referenzstahl konnten hier Standzeitverbesserungen von bis zu 980 fach erreicht werden.

Abbildung 23

Ergebnisse des „Abrasiv-Gleitverschleiß“ Versuchs**13 Potenziale des Laserauftragschweißens**

Die gezeigten Versuchsergebnisse untermauern das Potenzial des Laserauftragschweißens in der industriellen Anwendung. Die Vorteile kommen insbesondere bei abrasiven Verschleißbeanspruchungen zum Tragen. Das Verfahren bringt neben diesen Vorteilen aber auch noch weitere Potenziale mit sich. So bietet es u.a. auch neue Gestaltungsmöglichkeiten bei der Herstellung von Bauteilen durch...

- ... den Aufbau kompletter 3D-Strukturen mit hoher Endkonturnähe
- ... die partielle oder vollständige Beschichtung von Freiformflächen
- ... den Einsatz kostengünstiger Grundwerkstoffe
- ... die Integration innerer Strukturen
- ... Kombinierbarkeit einer großen Anzahl von Werkstoffen

Abbildung 24

Anwendungsbeispiele zum Laserauftragschweißen

Mit dem Verfahren lassen sich außerdem beanspruchungsgerechte Oberflächen herstellen, z.B. durch...

- ... anwendungsspezifische Schutz- und Funktionsschichten
- ... die Herstellung gradierter Schichten
- ... die Herstellung von Schichtsystemen

Ein beliebtes Einsatzgebiet des Laserauftragschweißens ist außerdem die Reparatur von Werkzeugen und Bauteilen. Simultan mit der Reparatur können auch die Gebrauchseigenschaften optimiert werden, z.B. durch...

- ... Erhöhung der Standzeit durch angepasste Beschichtungen
- ... durch Gewichtseinsparung, da das teure und dichte verschleißfeste Material nur an den Stellen eingesetzt wird, an denen es auch tatsächlich Vorteile bringt

Ein weiterer Aspekt sind Kostenvorteile, die sich abhängig vom Anwendungsfall mit dem Verfahren erzielen lassen. Diese resultieren aus ...

- ... der Verkürzung der Fertigungszeit im Vergleich zu Sinterhartmetallen
- ... der Einsparung von Arbeitsgängen (z.B. Wärmebehandlung)
- ... einem wirtschaftlichen, gezielten Materialeinsatz
- ... einer möglichen hohen Automatisierung des Prozesses

14 Laserauftragschweißen im industriellen Einsatz

Die Überführung von Anwendungen aus dem Laborstatus in den erfolgreichen industriellen Einsatz erfordert eine strukturierte Vorgehensweise.

So müssen im ersten Schritt die auftretenden Belastungs- und Verschleißmechanismen der Anwendung analysiert und quantifiziert werden. Aus dieser Analyse folgt dann die Definition der potentiellen Beschichtungswerkstoffe, sowie der geeigneten Schichtparameter. Mit Hilfe von Prüfstandsversuchen, die die auftretenden Belastungs- und Verschleißmechanismen möglichst realitätsnah nachbilden sollten, kann die tatsächliche Eignung sowie die Optimierung der Beschichtung mit geringem Aufwand umgesetzt werden. Ist der Einsatz von Prüfständen nicht oder nur mit unzureichender Zuverlässigkeit durchführbar, muss die Erprobung der Beschichtung entsprechend im realen Einsatz erfolgen.

**Jörg Vetter, Georg Erkens, Jones Alami, Jürgen Müller, Martin
Fromme, Urs Baier**

Neue Hochleistungs-Hartstoffbeschichtungen

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	69
2 Der "Zwerg" ist der Trumpf	71
3 Die Schichtarchitekturen – das Werkzeug für kreative Schichtdesigner	73
4 Das Resultat des Schichtdesigns überzeugt.....	78
5 Makroskopische Eigenschaften durch Nanodesign: die Anwendungen	79
6 Literatur.....	82

Zusammenfassung

Hochleistungsschichten für die Umformung, Zerspanung, Komponenten und dekorative Beschichtungen basierend auf PVD- und PE-CVD-Hartstoffschichten werden hinsichtlich der Optimierung der Leistungsfähigkeit im Nanodesign entwickelt und appliziert. Verschiedene Schichtarchitekturen kommen je nach geforderten Anwendungsbedingungen zum Einsatz: monolagige Schichten, Gradientenschichten, multilagige Schichten, mikrolegierte Schichten und Nanokomposite.

Summary

High performance coatings for forming, cutting, components and decoration based on hard coatings deposited by PVD and PE-CVD are developed and applied using the nanodesign tools to optimize functional properties. The main coating architectures are monolayer coatings, gradient coatings, multilayer coatings, micro alloyed coatings and nanocomposites.

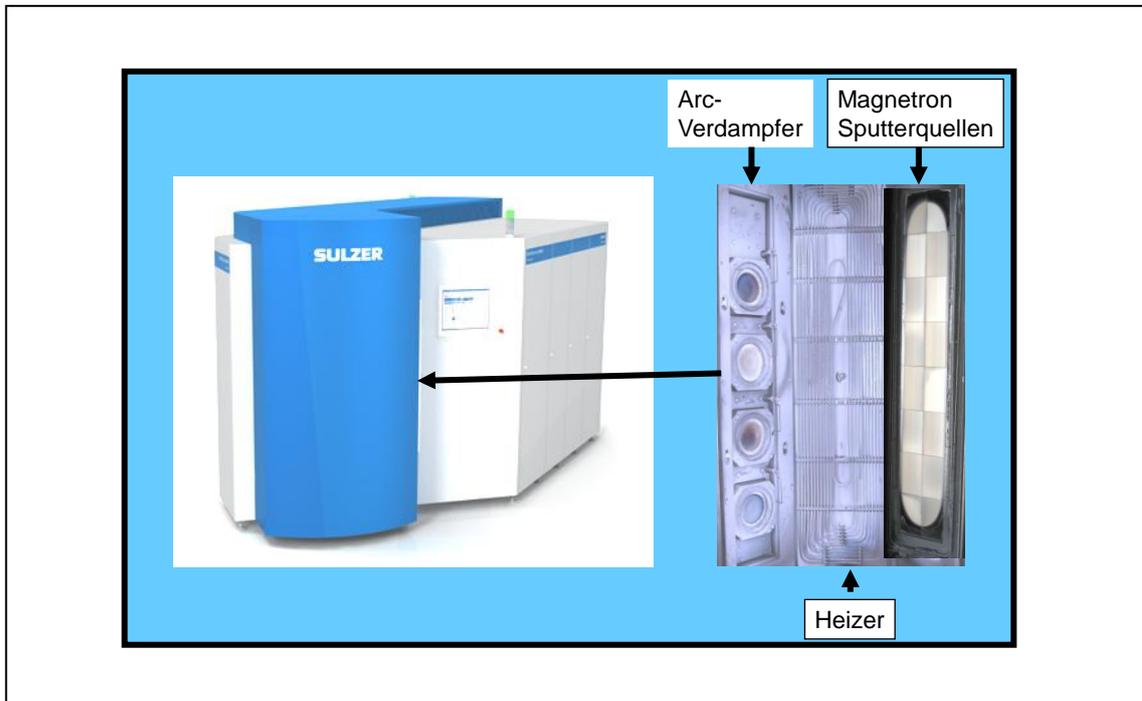
15 Einleitung

Hartstoffschichten mit Härten von mindestens 1000 HV bis ca. 4000 HV für die Oberflächenveredelung von Werkzeugen und Komponenten sowie zur Dekoration werden seit mehr als 20 Jahren eingesetzt. Alle begann mit den goldfarbenen Titanitridschichten (TiN), die mittels des CVD-Verfahrens (deutsch Chemische Abscheidung aus der Dampfphase) bei Temperaturen um 1000 °C abgeschieden worden sind. Bald folgten die PVD-Verfahren (deutsch Physikalische Abscheidung aus der Dampfphase), die Beschichtungstemperaturen um 450 °C und darunter ermöglichten, so dass ohne Anlasseffekte auch HSS (deutsch Schnellarbeitsstahl) sowie Kalt- und Warmarbeitsstähle beschichtbar wurden. Schließlich gelang es, Temperaturen von 200 °C zu realisieren, so dass auch Kugellagerstähle und karburierte Stähle beschichtet werden konnten. Bei der dekorativen Beschichtung von Kunststoffen werden sogar Temperaturen um 50 °C eingehalten. Die wichtigsten zur Zeit eingesetzten PVD-Verfahren sind folgende: ARC-Verdampfung (fachlich kathodische Vakuumbogen-Verdampfung), das Magnetron-Sputtern und die PE-CVD (deutsch plasmagestützte CVD) /1,2/. Mit diesen Verfahren werden meist Schichten im Dickenbereich von (1- 10) µm abgeschieden. In jüngster Zeit wurden auch Komponentenbeschichtungen (z.B. Kolbenringe) im Schichtdickenbereich bis zu 50 µm industriell umgesetzt /3,4/.

Neben den verfahrenstechnischen Weiterentwicklungen entstanden neue Schichtkonzepte, die unterschiedliche funktionelle Anforderungen bedienen können. Die höchstmögliche Flexibilität zur Darstellung von maßgeschneiderten Schichten ist in Hybridanlagen gegeben, die die Vorteile der Arc-Verdampfung mit den Vorteilen des Magnetron-Sputterns verbinden. Dies kann in dem Anlagenkonzept DOMINO realisiert werden /5/.

Abbildung 1:

DOMINO-Hybridanlage als Kombination von Arc-Verdampfern und Sputterquellen zur Abscheidung maßgeschneiderter Schichtarchitekturen



16 Der "Zwerg" ist der Trumpf

Eine industrielle Revolution in der Materialwissenschaft und Dünnschichttechnologie für tribologische Anwendungen setzte in den letzten 10 Jahren ein: die Nano-Technologie. **Nano** kommt vom griechischen Wort **nanos** "der **Zwerg**" und steht bei Messgrößen für den milliardsten Teil einer physikalischen Einheit: 1. 000.000 Nanometer = 1 Meter.

Diese Nano-Welt wurde möglich, da vorrangig getrieben durch die Mikroelektronik, die analytischen Werkzeuge (Elektronenmikroskopie wie HR-TEM, Mikro-Raman und andere) hinreichend kostenoptimiert bereitgestellt wurden, um Informationen im Nanometerbereich über festkörperphysikalische Strukturen herauszufinden (CPU's in unseren Computern basieren auf der 45 nm-Technologie!).

Abbildung 2:

Definition von NANO unter dem Blickwinkel der Werkzeugbeschichtung

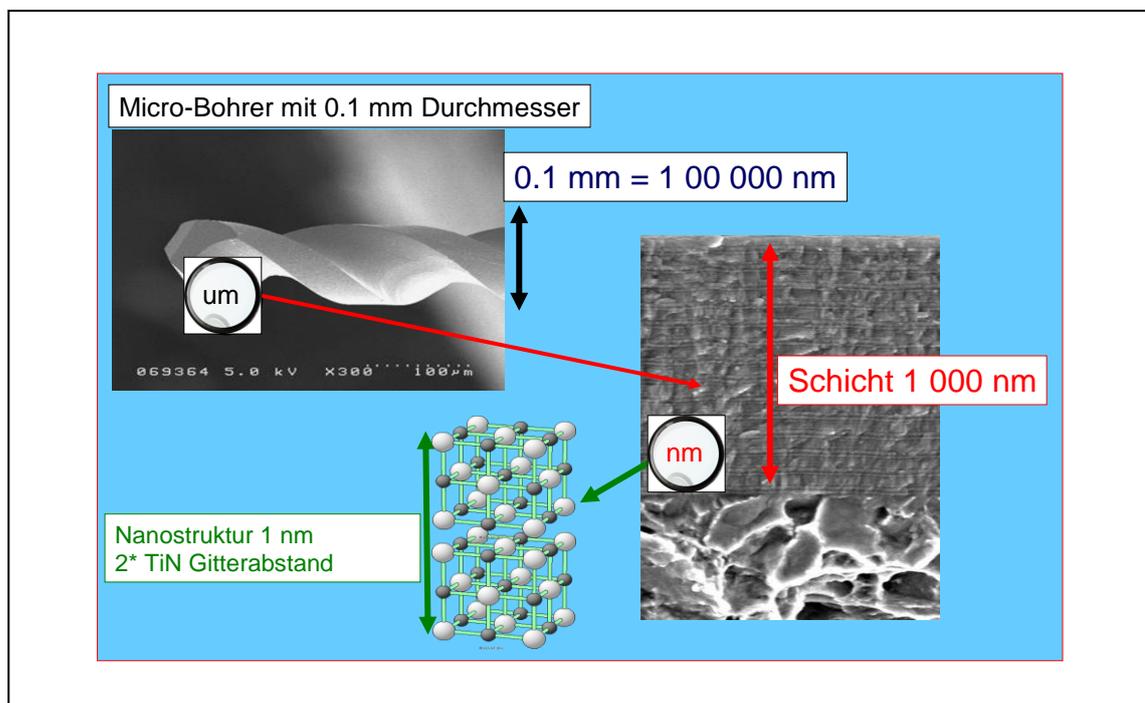


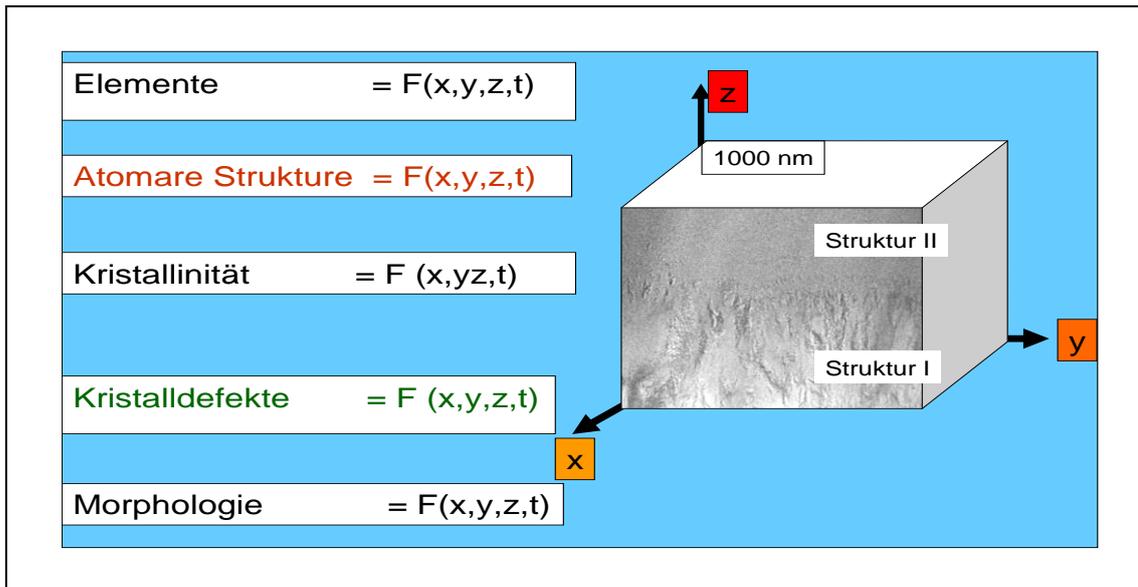
Abbildung 2 zeigt einen Micro-Bohrer des Durchmessers von 0.1 mm. Die darauf aufgebraute Schicht Hartstoffschicht hat eine Dicke von ca. 1 μm . Wir müssen dann noch mal um den Faktor 1000 kleiner auflösen, um in die Nano-dimensionen zu kommen, die gezielt eingestellt werden soll, um Leistungspotentiale freizusetzen.

17 Die Schichtarchitekturen – das Werkzeug für kreative Schichtdesigner

Im Laufe der Schichtentwicklungen standen Forderungen an, die Schichten mit Eigenschaften auszustatten, die den klassischen PVD-Schichten (TiN, CrN, u..a) überlegen sind. Zahlreiche Schichtparameter werden dazu zeitabhängig im Schichtvolumen durch Prozessparameter verändert. Die wesentlichen Schichtkenngrößen, die je nach Schichtsystem beeinflussbar sind, zeigt Abbildung 3. Neben der gezielten Einstellung der chemischen Zusammensetzung sind zahlreiche Freiheitsgrade in den Schichten einstellbar: Korngrößen, Eigenspannungen, Defektstruktur, u.a). Als Beispiel der Strukturänderung ist in Abbildung 3 eine TEM-Aufnahme (Transmissionselektronen-Mikroskopie) von Al-TiN gezeigt, die den Effekt der Änderung der Intensität des Ionen - Bombardement belegt. Die obere feinere Schicht (defektreichere Schicht) ist durch ein intensiveres energetisches Bombardement entstanden. Die Möglichkeiten der Einstellung der Schichtparameter im Nanodesign durch die gezielte Beeinflussung des Schichtwachstums ermöglicht das "trimmen" von Schichteigenschaften, um anwendungsseitig den jeweiligen tribologischen Eigenschaften gerecht werden zu können.

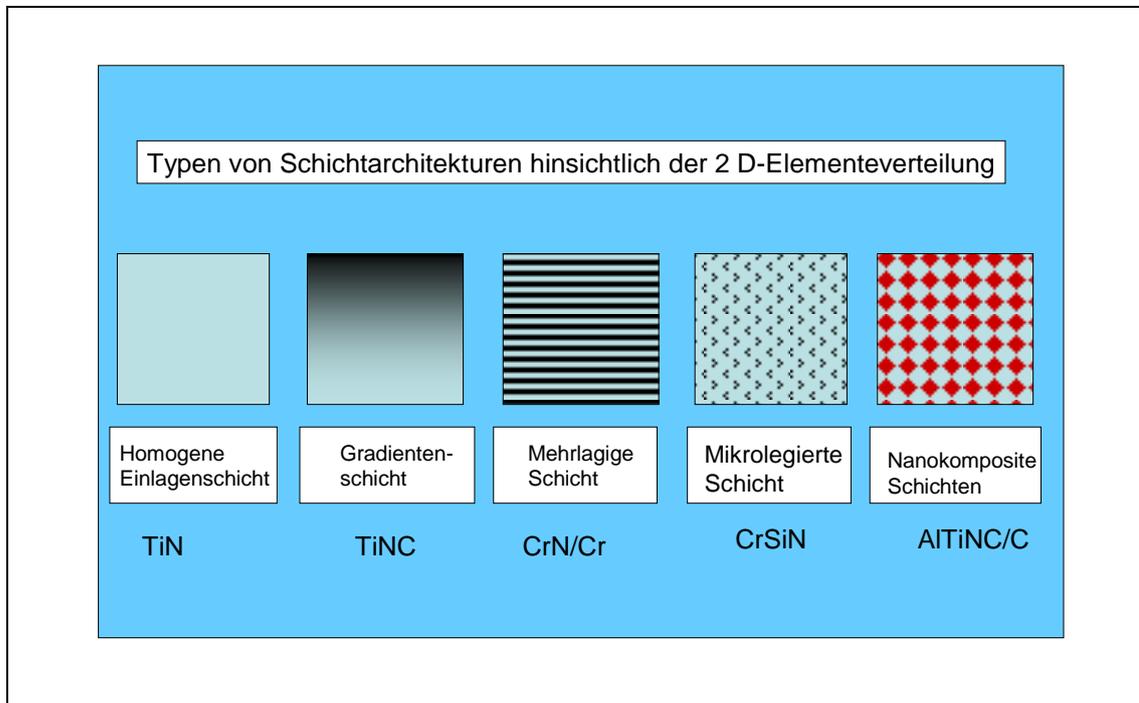
Abbildung 3:

Schichtkenngrößen, die beim Nanodesign von Schichten ortsabhängig im Volumen durch zeitliche Änderung prozessrelevanter Größen verändert werden können (Beispiel: TEM einer AlTiN-Schicht)



Mit Hilfe der in Abbildung 3 dargestellten Methoden sind verschiedene Basisarchitekturen erforscht und entwickelt worden, die in Abbildung 4 gezeigt sind. Grundlage der in Abbildung 4 dargestellten Klassifikation ist ein 2 D Modell hinsichtlich der Elementverteilung.

Abbildung 4

Schichtarchitekturen hinsichtlich der 2D-Verteilung der Elemente***Homogene Einlagenschicht:***

Schichten, die über die Schichtdicke im wesentlichen aus einer Phase bestehen. Bei PVD-Schichten sind dies fast ausschließlich Nitride und Karbonitride, die fast ausschließlich eine NaCl-Kristallstruktur aufweisen. Beispiele: traditionelle Schichten wie TiN, CrN, die im täglichen Einsatz bei verschiedenen Werkzeugen und Komponenten sind /6/.

Gradientenschicht:

Charakteristisch für diese Schichten sind Veränderung der Schichtzusammensetzung bzw. Eigenschaften über die Schichtdicke: Beispiel: TiSiNC - Kohlenstoffzunahme in Richtung der Schichtoberfläche bei TiSiCN und dem klassischen TiCN /7/

Mehrlagige Schicht:

Schichten, die aus mehreren Einzellagen bestehen. Falls die Dicke der Einzelschichten im Nanometerbereich liegt, wird von Nanomultilagen gesprochen. Ein spezieller Fall sind die Superlattice-Strukturen, die Einzelschichtdicken im Bereich von (2- 5) nm aufweisen. Beispiel: CrNml – Zweilagigkeit durch Stickstoffmodulation im Beschichtungsprozess, so dass ein Lagensystem Cr/CrN entsteht und CrN/AlCrN /8/.

Mikrolegierte Schicht:

Schichten in denen geringe Anteile von zusätzlichen Elementen eingebracht sind, ohne dass diese eine eigenständige Phase ausbilden, aber zur signifikanten Veränderung der Eigenschaften führen. Die Elemente sind als Minorelemente in den Körnern verteilt bzw. befinden sich an den Korngrenzen. Verschiedene festkörperphysikalische Mechanismen werden dabei genutzt, wie Verfestigungsmechanismen und im Einsatz bei erhöhten Temperaturen auch gezielte Diffusionsprozesse zur Erniedrigung der Oxidationsrate oder der Reibwerte. Beispiel: CrSiN mit Si Gehalten bis ca. 3 at% (Mikrolegierungselement : X, hier X = Si).

Nanokomposite:

Schichten, die verschiedene Phasen enthalten, deren funktionale Dimensionen im Nanometerbereich liegen. Beispiele: a-C:H:W - WC-Karbide im amorpher a-C:H-Matrix (a-C:H – amorphe wasserstoffhaltige Kohlenstoffschicht) oder aber freie Kohlenstoffinseln in einer kristallinen Matrix wie beim AlTiNC/C-System /9/.

Oft werden die verschiedenen Konzepte innerhalb eines Schichtsystems kombiniert.

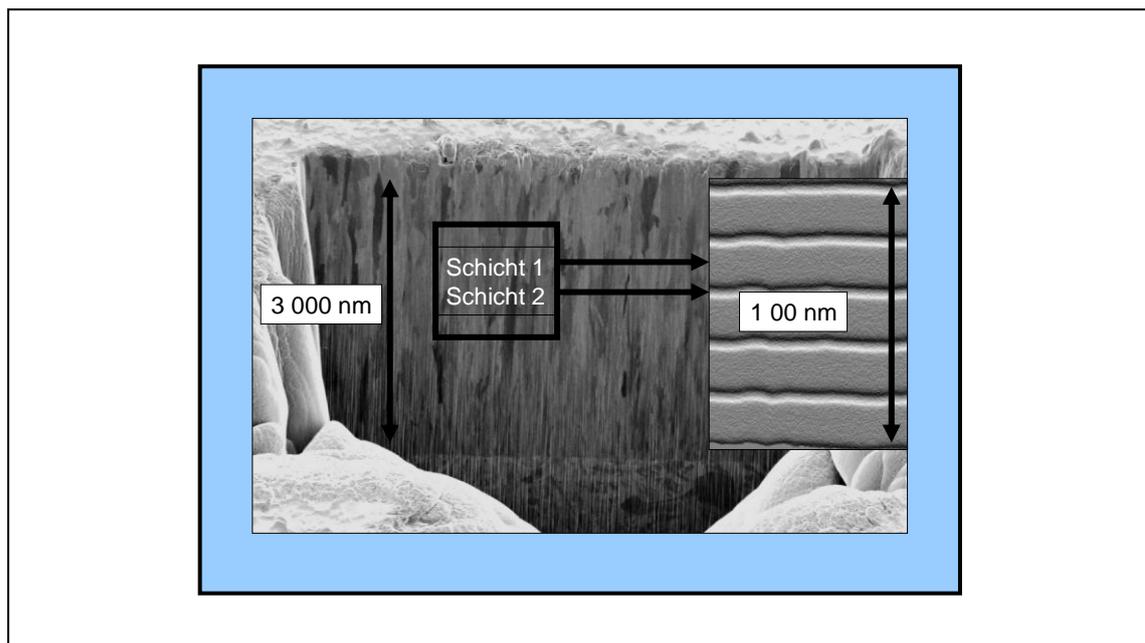
Zur Verdeutlichung des komplexen Aufbaues von Schichten wird nachfolgend in Abbildung 5 eine REM-Aufnahme (Rasterelektronenmikroskopie) einer Hochleistungsschicht, die im Nanodesign entwickelt wurde, vorgestellt. Deutlich ist die Kornstruktur der Schicht zu erkennen. Durch das Schichtwachstum vergrößern sich die Körner in Richtung der Schichtoberfläche. Bei hinreichend großen Vergrößerungen wird dann erst der nanolagige Schichtaufbau deutlich. Hier ist

eine Kombination des Nanodesings gezeigt, die eine mikrolegierte TiSiXN-Schicht mit einer Monoschicht des Types AlTiN als nanomultilagige Schicht vereint.

Für die Schichtoptimierung werden bei anderen Schichtensystemen wiederum Nanokomposite innerhalb der Nanolagen ausgebildet, wie dies im System Al-TiNC/C der Fall ist.

Abbildung 5

Raterelektronische Aufnahme einer mittels des Arc-Verfahrens abgeschiedenen Hartstoffschicht und Darstellung des nanolagigen Aufbaues bestehend aus zwei Schichten: Schicht 1 AlTiN und Schicht 2 mikrolegierte TiSiXN-Schicht

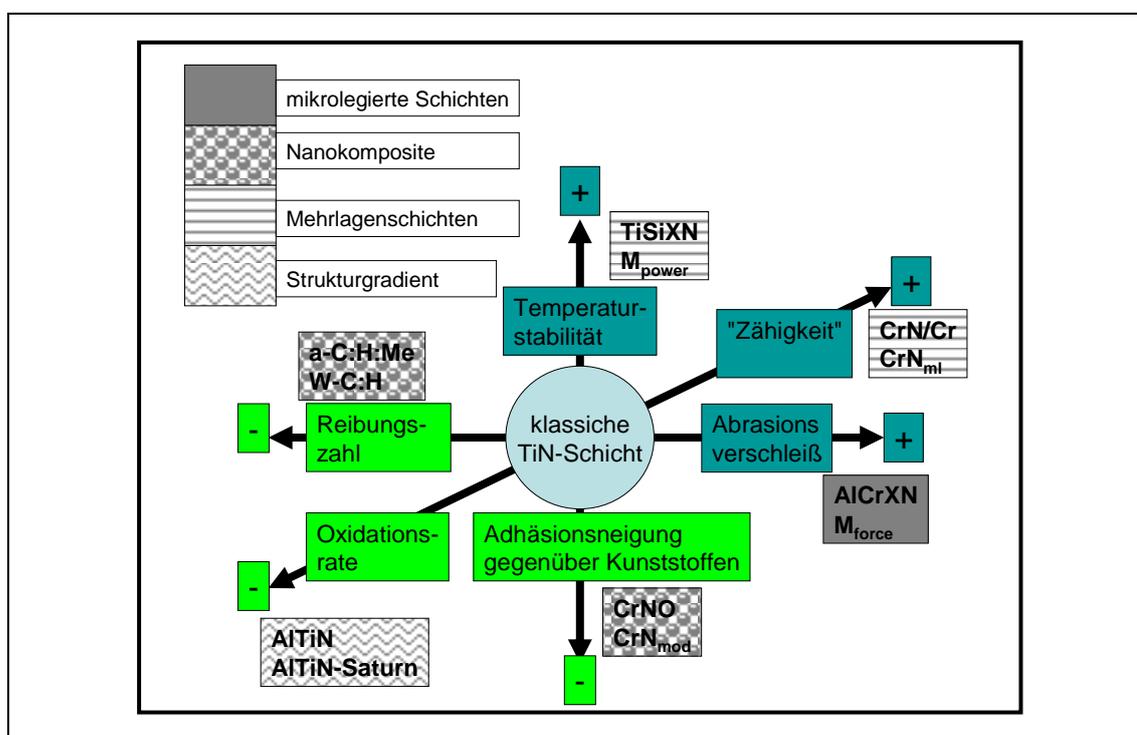


18 Das Resultat des Schichtdesigns überzeugt

Durch die Maßschneidung von Schichten im Nanodesign, können die für die jeweiligen Anwendungen erforderlichen funktionellen Eigenschaften eingestellt werden. Ausgewählte funktionelle Eigenschaften und Schichtvertreter im Nanodesign sind in Abbildung 6 aufgeführt.

Abbildung 6

Schichten im Nanodesign mit maßgeschneiderten funktionellen Eigenschaften



Das Schichtportfolio umfasst so Schichten, die hinsichtlich der im Einsatz geforderten Eigenschaften "getrimmt" sind: niedrige Oxidationsrate, hohe Phasenstabilität, niedriger Abrasionsverschleiß, niedrige Reibungszahl bei Festkörperreibung, geringe Adhäsionsneigung gegenüber Kunststoffen, hohe "Zähigkeit", thermische Barrieren durch niedrige Leitfähigkeit, Stabilität gegenüber aggressiven Medien, u.a.m. .

19 Makroskopische Eigenschaften durch Nanodesign: die Anwendungen

Die Oberflächenveredelung von Werkzeugen mit PVD-Schichten hat einen enormen Durchdringungsgrad erreicht. Beispiele sind in Abbildung 7 dargestellt. Häufig können die Werkzeuge erst durch die PVD-Beschichtung für Bearbeitungsoperationen eingesetzt werden, die starken Oberflächenbeanspruchungen ausgesetzt sind. Ein herausragendes Beispiel ist dabei die trockene Zerspanung gehärteter Stähle, die für Kunststoffwerkzeuge eingesetzt werden (Härten von 55 HRC und mehr!). Bei dieser Anwendung setzt das mehrlagige Schichtsystem Mpower (mikrolegierte TiSiXN-Schicht in Kombination mit Al-TiN) Maßstäbe.

Abbildung 7

Auswahl von spanenden Werkzeugen, die mit klassischen Schichten und Schichten im Nanodesign beschichtet werden

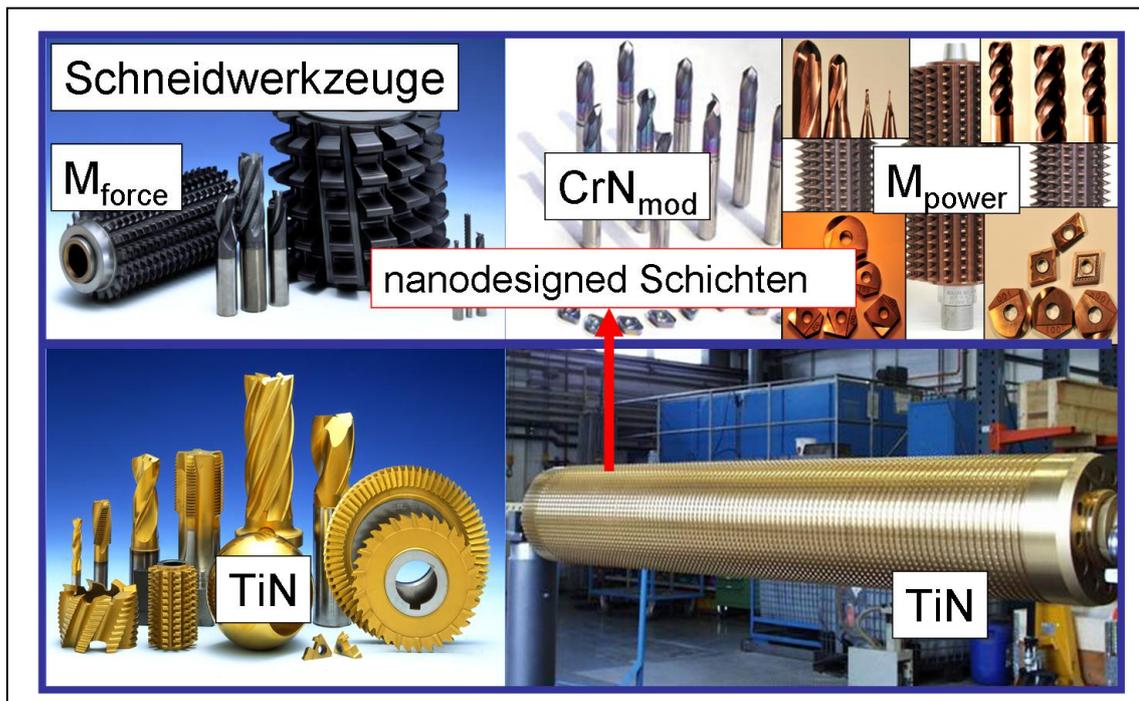


Abbildung 8

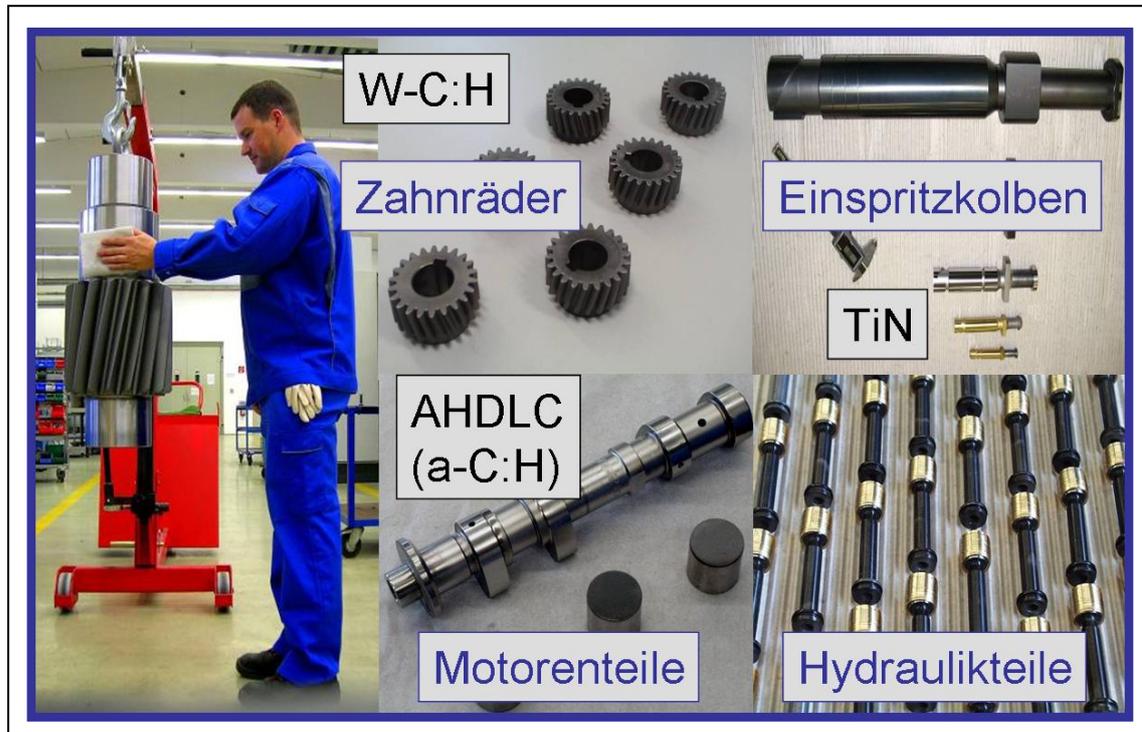
Auswahl von Umformwerkzeugen und Plastifizierschnecke, die mit klassischen Schichten und Schichten im Nanodesign beschichtet werden



Neben den spanenden Werkzeugen werden auch die verschiedensten Umformwerkzeuge, Urformwerkzeuge wie Druckgusswerkzeuge sowie Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung beschichtet. Gerade bei Gesenken, deren Oberflächen extrem belastet werden, sind Schichten im Nanodesign - im Beispiel die Multilagenschicht CrN/Cr – unumgänglich. Beispiele sind in Abbildung 8 gezeigt. Häufig wird bei Umformwerkzeugen auch eine gezielte Nitrierung vor der Beschichtung durchgeführt, um eine Stützwirkung der PVD-Hartstoffschichten zu gewährleisten /7,10/.

Abbildung 9

Auswahl von beschichteten Komponenten bei denen häufig zur Reibungsminderung die mehrlagigen Nanoschichten W-C:H zum Einsatz kommen



Zusätzlich zu den Werkzeugbeschichtungen nimmt die Komponentenbeschichtung für Motorenteile (Tassenstößel, Kolbenringe u.a.), für die Hydraulik (Kolben, Steuerscheiben u.a.) für die Antriebstechnik (Zahnräder, Zahnradwellen u.a.) für den allgemeinen Maschinenbau (Führungsbahnen, Verbindungselemente, u.a.) einen hohen Stellenwert ein. In zahlreichen Anwendungen kommen dafür die nanostrukturierten mehrlagigen W-C:H-Schichten zum Einsatz /11/. Beispiele dafür sind in Abbildung 9 aufgeführt.

Die in den Abbildungen 7,8 und 9 dargestellten Beispiele zeigen auch auf, dass die PVD-Technologie für größere Bauteile eingesetzt werden kann. Beschichtungslängen bis zu 4 Metern sind durchaus üblich.

20 Literatur

- /1/ B. Rother, J. Vetter, 1992 ,. Plasmabeschichtungsverfahren und Hartstoffschichten, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- /2/ J. Vetter, 2005, in Handbook of Thermoprocessing Technologies, Herausgeber A. von Starck, A. Mühlbauer, C. Kramer, Vulkan-Verlag, Essen 2005 ISBN 3-8027-2933-1
- /3/ J. Vetter, J. Crummenauer, G. Barbezat, J. Avissar: Surface treatment of automotive parts: research and application, Vakuum in Forschung und Praxis 19(2007), 18-23
- /4/ J. Vetter, J., G. Barbezat, Hart, korrosionsfest, reibungsmindernd, Sulzer Technical Review 1/2007
- /5/ G. Barbezat, A. Refke, J. Vetter, J. Nestler, M., Oberflächenlösungen für die Anforderungen der Zukunft, Sulzer Technical Review 4/2007
- /6/ J.A. Sue, A.J. Perry, J Vetter, Young's modulus and stress of CrN deposited by cathodic vacuum arc evaporation ,Surf. Coat. Techn 68/69 (1994) 126
- /7/ J. Vetter, W. Burgmer, H.G. Dederichs, A.J. Perry, The architecture and performance of multilayer and compositionally gradient coatings made by cathodic vacuum arc evaporation, Surf. Coat. Techn. 61 (1993) 209
- /8/ J Vetter, E. Lugscheider, S.. Guerreiro, (Cr:Al)N coatings deposited by the cathodic vacuum arc evaporation, Surf. Coat. Technol. 98 (1998) 1233

- /9/ J. Vetter, T. Ishikawa, N. Shima, Plasma Process and Polymers, Nano-composite AlTiNCO coatings deposited by reactive cathodic arc evaporation, 2007, 4 p. 668-672
- /10/ J. Vetter, T. Michler, H. Steuernagel, Hard coatings on thermochemically pretreated soft steels: application potential for ball valves, Surf. Coat. Techn. 111(1999)210
- /11/ Vetter, J., Kayser, O., Fromme, M.: Auswahl harter Kohlenstoffschichten für industrielle Anwendungen: von der Umformung bis zum Pumpenelement, EFDS Workshop Kohlenstoffschichten-tribologische Eigenschaften und Verfahren zu ihrer Herstellung, Dortmunder Oberflächenzentrum, 2004.

Ursula Christian

Werkstofftechnische Untersuchungen zur Klärung von Verarbeitungsproblemen und Ausfallursachen

Inhaltsverzeichnis

1 Problem und ihre Ursachen	86
1.1 Oberflächenfehler.....	86
1.1.1 Nichtmetallische Einschlüsse in der Oberfläche	86
Abbildung 1	87
1.1.2 Harte Phasen durch Zinkausdampfung.....	87
1.1.3 Warm und Kaltverletzungen	89
1.1.4 Anschmelzungen und Aufplatierungen.....	90
1.1.5 Bearbeitungs- und Druckmartensit.....	91
1.1.6 Schlechte Bearbeitungsoberfläche	92
1.2 Materialfehler.....	94
1.2.1 Seigerungen.....	94
1.2.2 Korngrenzenbeläge	95
1.2.3 Fehler bei der Wärmebehandlung.....	97
1.2.4 Karbidvergrößerung.....	97
1.2.5 Bleiverteilung.....	99
1.3 Korrosion	100
1.3.1 Wasserstoffversprödung	100
1.3.2 Entzinkung	101
1.3.3 Spannungsrisskorrosion.....	102
1.3.4 Rost an Edelstahl	105

Zusammenfassung

Schwierigkeiten bei der Verarbeitung und Ausfall von Materialien und Bauteilen haben vielschichtige Ursachen. Zum einen ist die Wahl und die Zusammensetzung der Werkstoffe für die Bearbeitung von entscheidender Bedeutung zum anderen kommen Einflüsse wie Temperatur, Oberflächenbeschaffenheit, Gefügeausbildung und chemische sowie mechanische Beanspruchung zum Tragen.

Die daraus resultierenden Schwierigkeiten führen zu frühzeitigem Verschleiß, zu Versprödung, zu mangelhafter chemischer Beständigkeit oder zu Ausfällen durch Risse und Brüche.

Mit Hilfe einer metallographischen- und gegebenenfalls einer rasterelektronen-mikroskopischen Untersuchungen können Werkstoffanalysen erstellt und die Fehlerursachen beseitigt werden.

Die vorgestellten Beispiele behandeln die unterschiedlichsten Auswirkungen von werkstofftechnischen, aber auch verarbeitungstechnischen Problemen und zeigen Wege auf zu möglichen Abstellmaßnahmen der Schwierigkeiten.

Im Einzelnen werden die Fehlerursachen behandelt, die aus Oberflächenfehlern unterschiedlicher Herkunft, aus Materialfehlern bedingt durch Herstellung oder Wärmebehandlung, und aus Korrosionseinflüssen resultieren.

21 Problem und ihre Ursachen

Bei der Verarbeitung und dem Einsatz unterschiedlicher metallischer Werkstoffen entstehen Schäden deren Ursachen sowohl im Material als auch in der Veredelung bzw. den Betriebsbedingungen zu suchen sind. Dafür sind häufig Oberflächenfehler, Materialfehler, oder Korrosion verantwortlich.

21.1 Oberflächenfehler

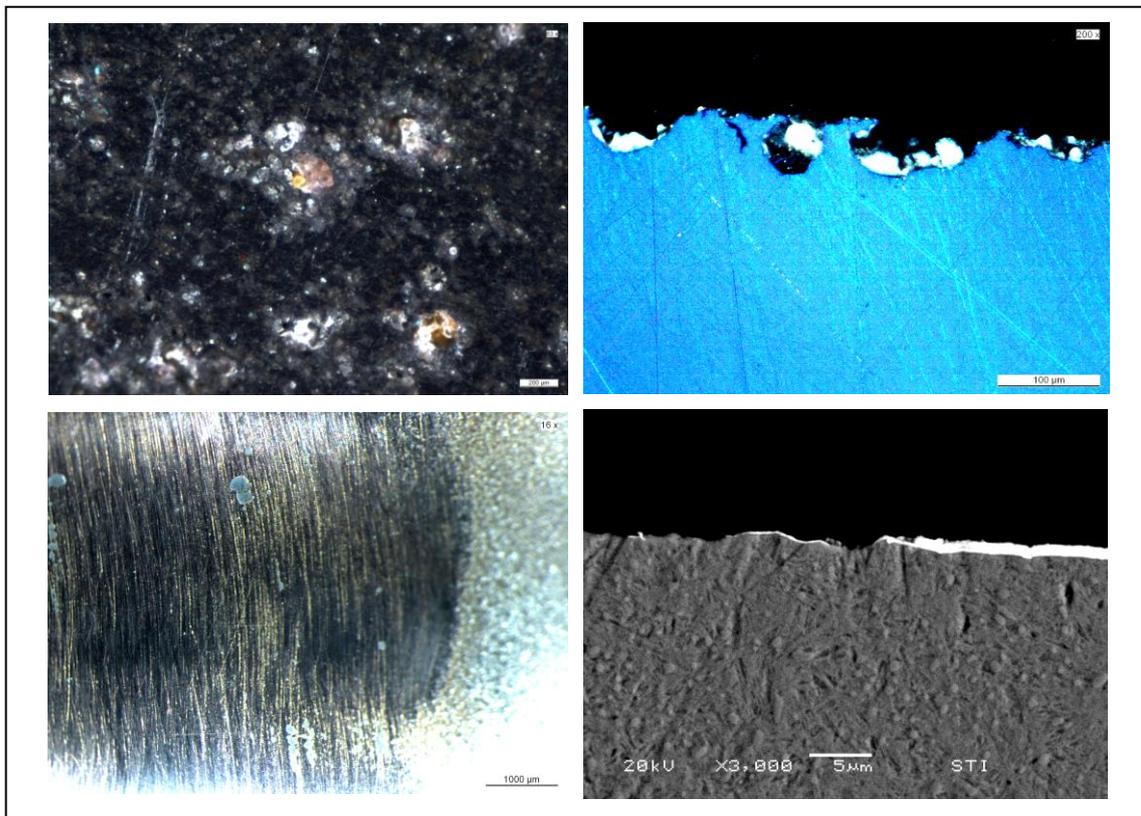
21.1.1 Nichtmetallische Einschlüsse in der Oberfläche

Keramische Partikel kommen als Verunreinigungen auf die Materialoberfläche. Sie bestehen aus Quarz also SiO_2 , aus Siliziumkarbid oder Aluminiumoxid. Bei SiO_2 spielt in erster Linie Bodenkontakt oder Staub, aber auch Strahlrückstände eine Rolle. Finden sich Siliziumkarbidpartikel so handelt es sich um Schleifmittel als Rückstände einer Oberflächenbehandlung bzw. Reinigung. Ausmauerung von Schmelz- und Glühöfen, die durch Beschädigungen, Alterungen oder nicht ordnungsgemäßen Brennung bröselig geworden ist, fällt als harte Aluminiumoxid-Teilchen auf die weiche Halbzeugoberfläche (Abb. 1 oben links).

Wie das Bild oben rechts zeigt verankern sich die harten Partikel zum Teil in der Oberfläche und führen beim Weiterverarbeiten zu erheblichen Werkzeugverschleiß. Selbst dünne Hartschichten werden zerkratzt und verlieren dadurch den Schutz gegen Reibschweißungen - im Bild unten rechts und links ist ein auf diese Weise beschädigtes Werkzeug zu sehen. Eine Reibschweißung ist in der Regel davon die Folge und bewirkt somit eine rasche Werkzeugzerstörung.

Ebenso problematisch wirken die Teilchen bei einer Oberflächenveredelung. Beim Polieren, verursachen die eingedrückte Partikel die unerwünschten Polierkommas oder Polierkometen, auch beim Galvanisieren führen diese Stellen zu unschönen Fehlern.

Abbildung 1



21.1.2 Harte Phasen durch Zinkausdampfung

Zink hat einen relativ niedrigen Dampfdruck und es kommt bei hohen Temperaturen zu einer Zinkausdampfung an der Oberfläche. Das geschieht in erster Linie beim Gießen, aber auch beim Pressen und dem induktiven Glühen kommt es zu einem Austreten von einer Zinkdampfphase, die sich dann an Wärmebrücken auf der kalten Oberfläche niederschlägt (zum Beispiel Kokillenrand oder wassergekühlter Pressdorn).

Entsteht dann ein Kontakt zwischen der Materialoberfläche und dem Kondensat, so bilden sich dort zinkreiche Phasen die zum Teil sehr hart und spröde sind. Abb. 2 zeigt die zinkreiche Phase auf der Gussoberfläche – rechts die auf einer Halbzeugoberfläche.

Bei den teilweise sehr dicken zinkreichen Phasen auf der Gussoberfläche, die in ihrer Zusammensetzung von Gamma über Delta bis Epsilon reichen, (Abb.2 rechts) kommt es bedingt durch ihre Härte und Sprödigkeit durch die Weiter-

verarbeitung zu Ausbrüchen an der Oberfläche und zu einem verstärkter Werkzeugverschleiß an den Umformwerkzeugen.

Die dünnen Zinkschichten wie sie beim der Warmumformung und Glühung entstehen können, erzeugen beim Beizen rote Flecken oder Stippen, die auf eine β -Anreicherung zurückzuführen sind (Abb. 3). Solche Fehler sind häufig auch noch nach dem Polieren und einer Oberflächenbeschichtung sichtbar.

Abbildung 2

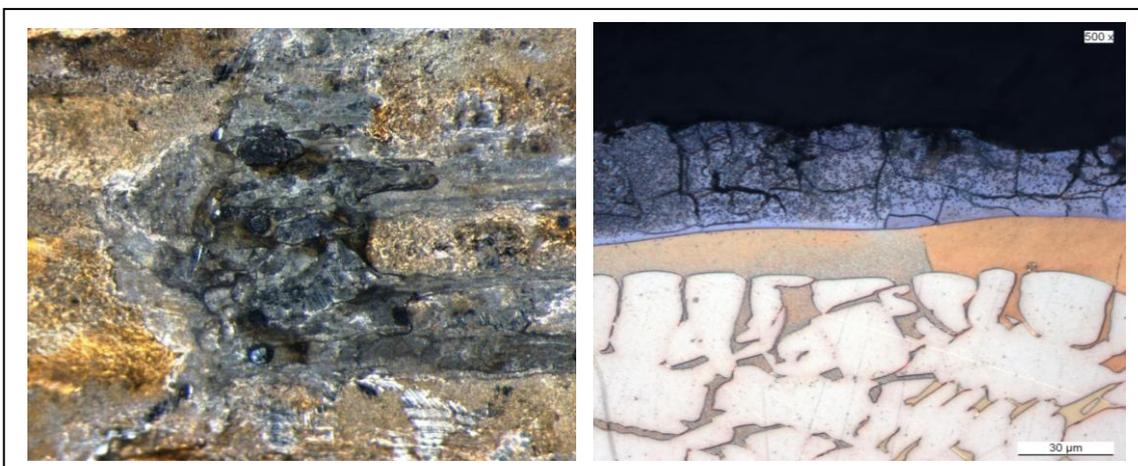
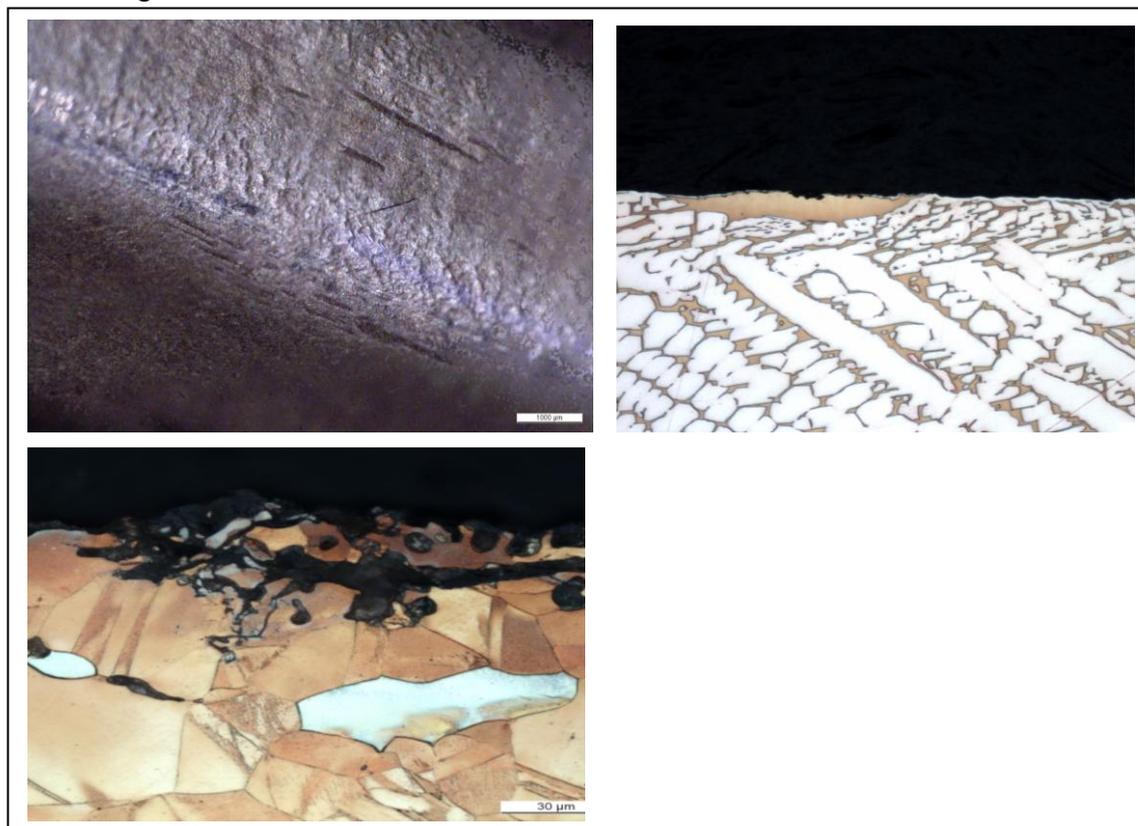


Abbildung 3

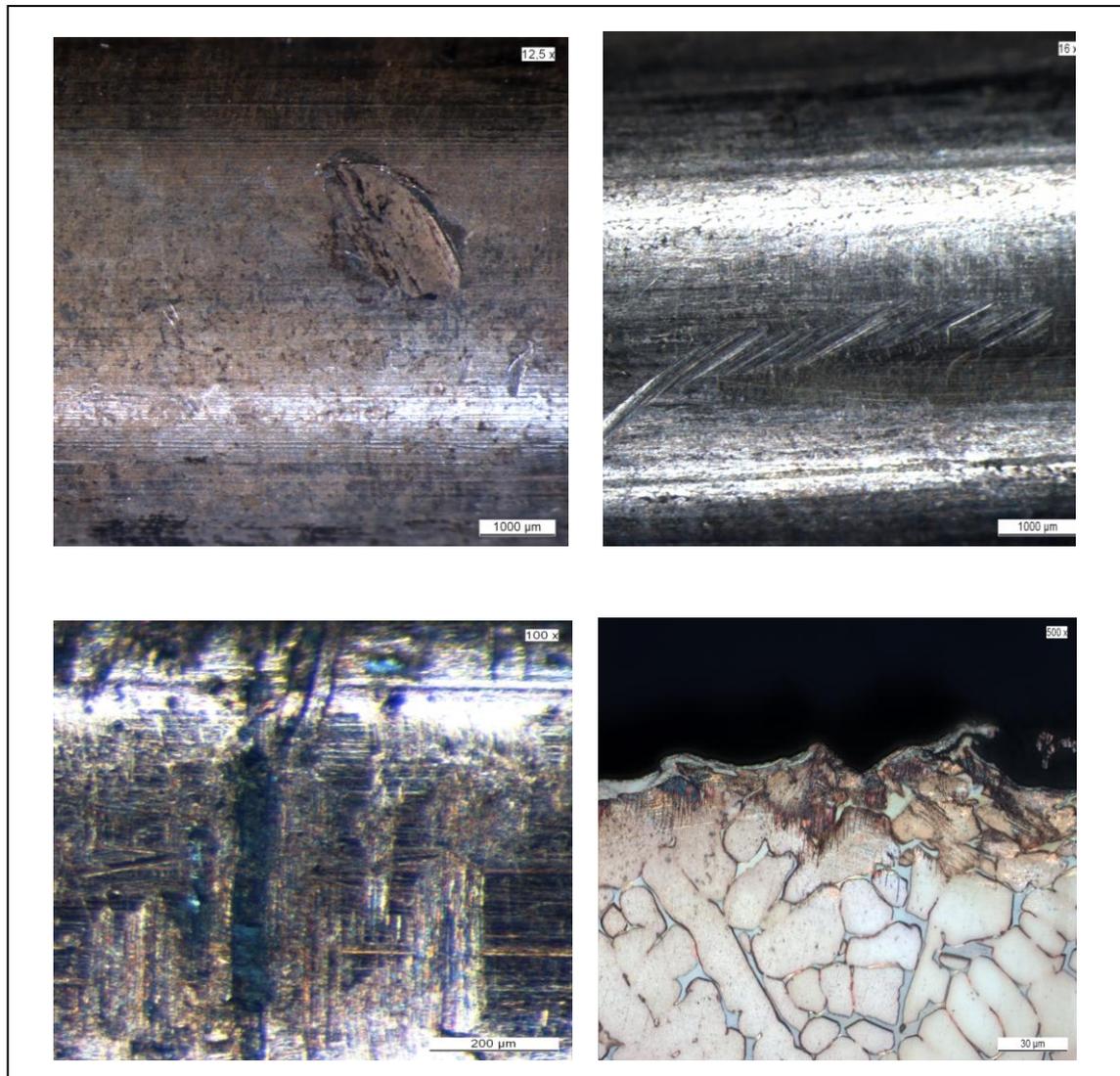


21.1.3 Warm und Kaltverletzungen

Häufig kommt es an Halbzeugen bei der Weiterverarbeitung zu Schwierigkeiten, weil die Materialoberfläche Verletzungen aufweist (Abb. 4). Das können fladenförmige Überschmierungen sowie kratzerförmige Vertiefungen mit und ohne Oxidation sein. Dabei sind diese Fehlstellen nicht nur ein optisches Problem, sondern führen beim Ziehen zu Schubspannungen am Kerbgrund. Die dadurch erzeugte Scherbeanspruchung führt unter Bildung von in 45° zur Oberfläche verlaufenden Lüderschen Linien letztlich zum Bruch. Deshalb stellt sich häufig die Frage, wo die Ursache dieser Fehlstellen liegt. Zum einen kann es sich um Warmverletzungen handeln, (Bild links oben) die beim Pressen Walzen oder beim Glühen durch Kanten und Rollen entstehen. Ein oxidiertes Fehlergrund und eine in Verformungsrichtung ausgerichtete Fehlerorientierung und ein verformungsfreier Fehlergrund sind ein Indiz für diese Beschädigungsursache (Bild links unten). Eine weitere Möglichkeit für Fehlstellen sind aber Transport oder unsachgemäße Lagerung. Diese Kaltverletzungen verlaufen meist schräg und zeigen einen hellen scharfkantigen Fehlergrund mit Verformungsmerkmalen (Bild rechts oben). Kommt es dabei neben Adhäsion und Abrasion noch zur Oberflächenzerrüttung und tribochemischen Reaktionen so liegt eine Reibkorrosion vor (Bilder unten).

Leider sind häufig eine genaue Zuordnung und damit zuverlässige Abstellmaßnahmen nicht mehr möglich.

Abbildung 4

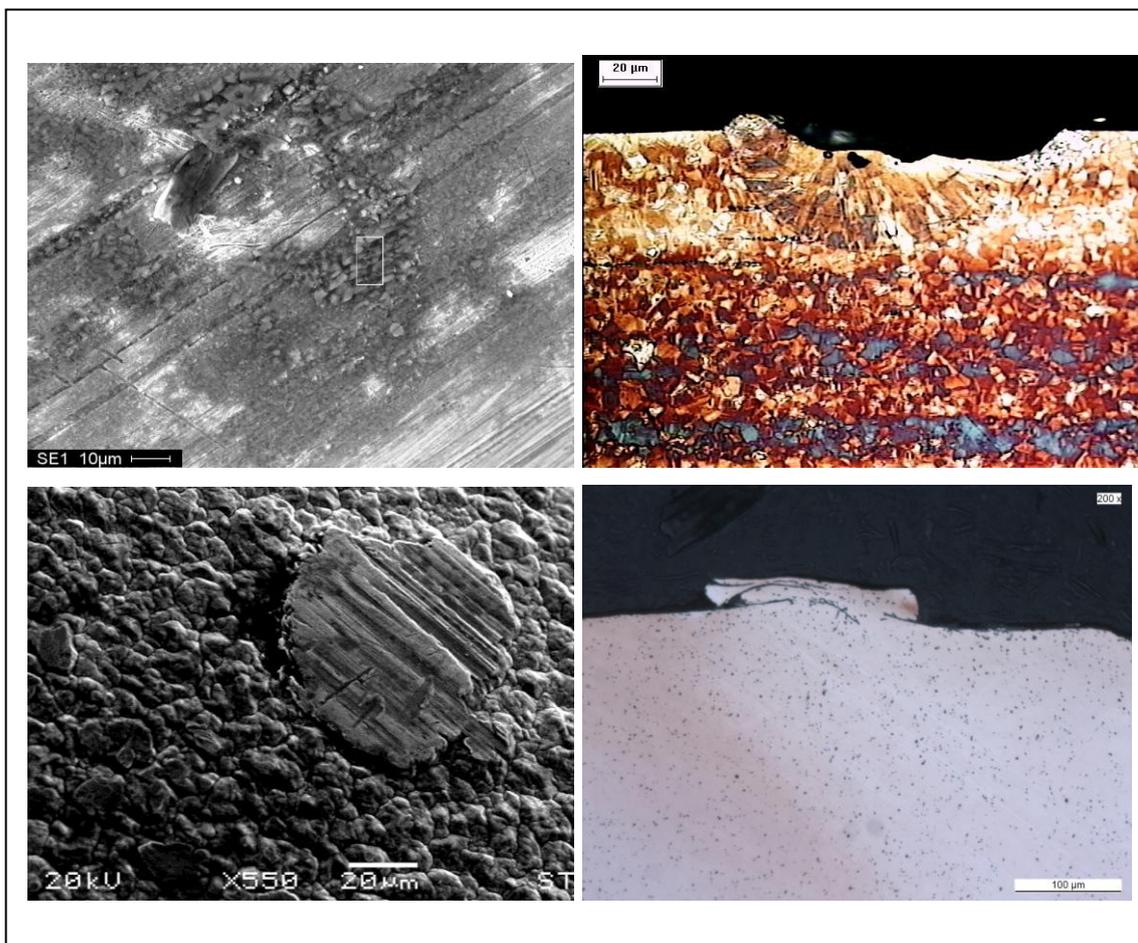


21.1.4 Anschmelzungen und Aufplatierungen

Bei Erwärmungen mittels Gleichstromglühe kann es unter unglücklichen Umständen an der Oberfläche partiell zu einer stärkeren Energieaufnahme kommen. Möglich sind dadurch kleine Anschmelzungen die sich nur als kleine Punkte zeigen (Abb. 5). Signifikant dafür ist ein kleiner Krater mit einem Kristallisationsrand (Rasterbild oben links). Gelingt es einen dieser Punkte, sie liegen in der Regel unter einem halben mm Durchmesser, im metallographischen Schliff anzuschleifen, so erkennt man die in Schichten in kreisförmiger Erstarrung (Bild oben rechts).

Ebenso kleine kreisförmige Oberflächenfehler entstehen beim Aufplattieren von Metallflittern (Bilder unten links und rechts). Die anhaftenden, aus dem Verarbeitungsprozess kommenden Flitter, werden bei der Weiterbearbeitung so stark angedrückt, dass es zu einer Teilverschweißung kommt. Dadurch bleiben sie auch nach dem Beizen und Waschen bestehen. Diese Partikel führen bei der Weiterverarbeitung durch Biegen, Polieren oder Galvanisieren zu unschönen Oberflächenfehlern.

Abbildung 5



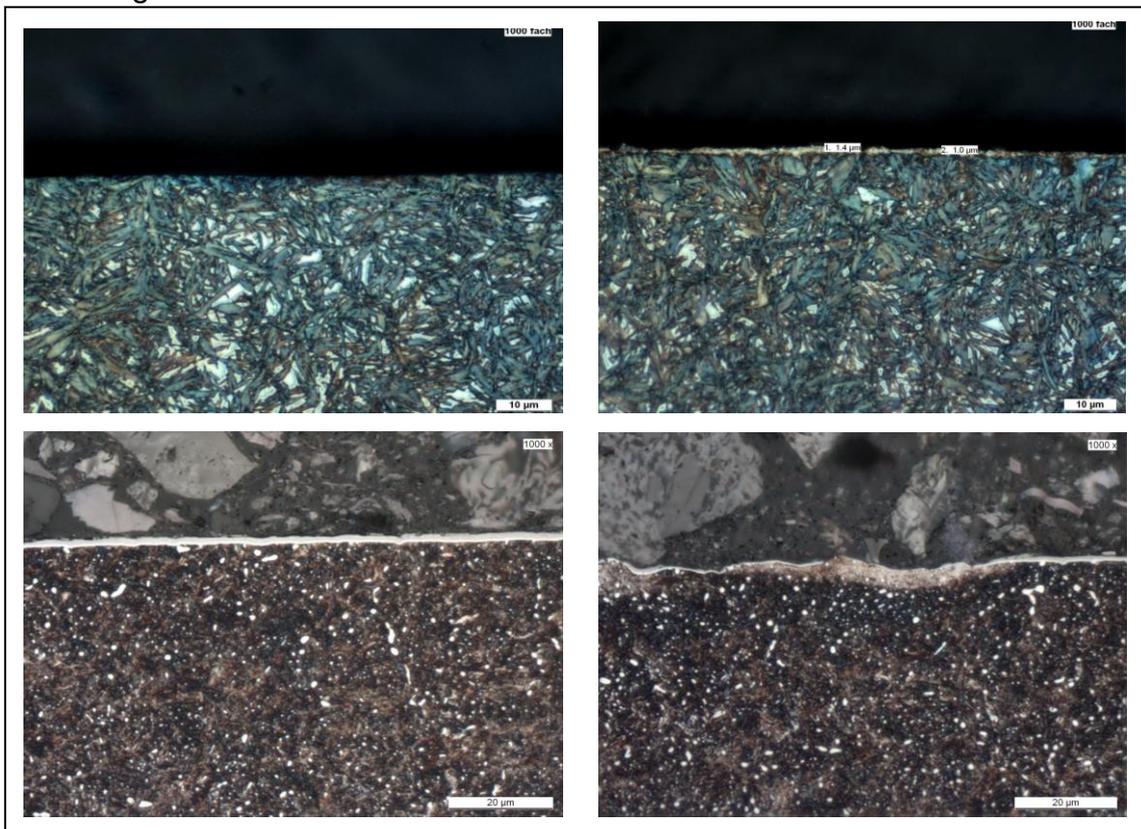
21.1.5 Bearbeitungs- und Druckmartensit

Verformungsmartensit ist in der Presse bekannt geworden, als der weiße Martensit, der an der Oberfläche von Schienensträngen durch Ausbrüche zu erheblichen Schäden geführt hat. Dieser Martensit entsteht in der Regel ungewollt durch Druck und Reibung und ist besonders spröde.

In dem in Abb. 6 oben dargestellten Beispiel hat die Bearbeitung von Getriebekonen stellenweise zu einer schmalen Verformungsmartensitbildung geführt (Bild links ohne Druckmartensit Bild rechts Druckmartensit von 1-1,5µm). Diese schmalen Zonen wurden vom Automobilhersteller nicht toleriert, da ein Abplatzen im Einsatz zu einem raschen Verschleiß bei der Synchronisation führen würde. Durch gezielte Optimierung der Bearbeitungsparameter konnte der Mangel abgestellt werden.

In der unteren Bildreihe sehen sie links eine ordnungsgemäße Dünnhartschicht. Auf der rechten Seite sehen sie eine Fehlstelle deren Ursache in der Entstehung von Druckmartensit unterhalb der Beschichtung zu suchen ist, die Schicht gibt erst noch nach, durch eine Ablösung der aufgehärteten Zone geht auch die Schicht und somit deren Schutzwirkung verloren.

Abbildung 6

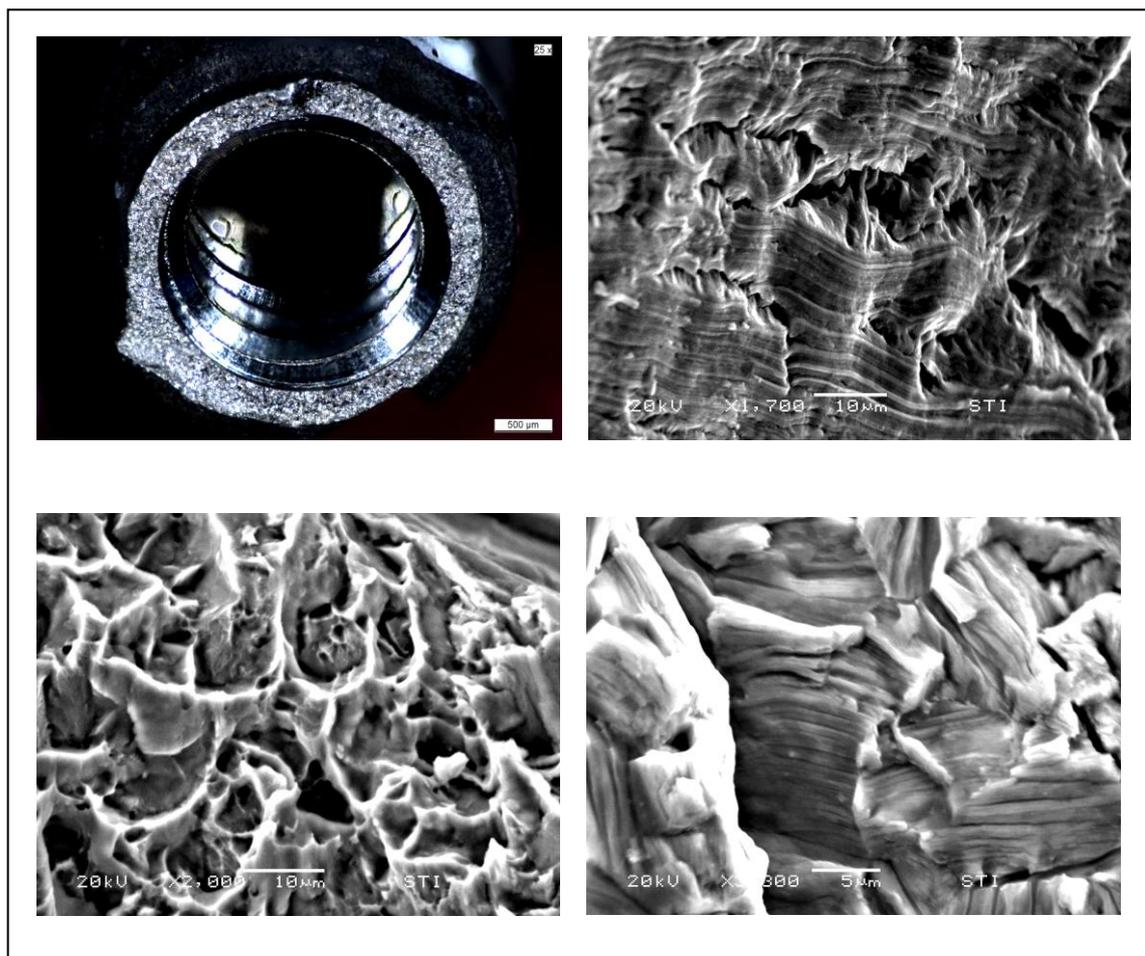


21.1.6 Schlechte Bearbeitungsoberfläche

Drehen und Bohren können bei zähen Werkstoffen oder nicht geeigneten Spanwerkzeugen zu einer schlechten Oberfläche führen. Vor allem bei Anferti-

gen von kleinen Bohrungen kommt durch mangelnde Spanabfuhr und partieller Erwärmung häufig zu einer sehr rauen Oberfläche die bei Belastung eine Kerbwirkung darstellt. In dem hier vorgestellten Beispiel wird in ein Titanimplantat ein Innengewinde geschnitten und dabei entstehen deutliche tiefe Drehriefen (Abb.7 oben). Wirkt dann in diesem Bereich eine starke Biege-Wechselbelastung so tritt an den im Gewindegrund befindlichen Bearbeitungs-kerben eine plastische Verformung und dann in Folge ein Anriss mit duktiler Gewaltbruchstruktur ein. Bild oben rechts zeigt die bearbeitete Innenfläche und unter links die Bruchstruktur im Bereich der Anrisse. Bei fortgesetzter Belastung kommt es durch Schwingungsriss zur fortgesetzten Trennung entlang des Kerbgrundes, der letztlich zum Versagen führt (Bild unten rechts).

Abbildung 7



21.2 Materialfehler

21.2.1 Seigerungen

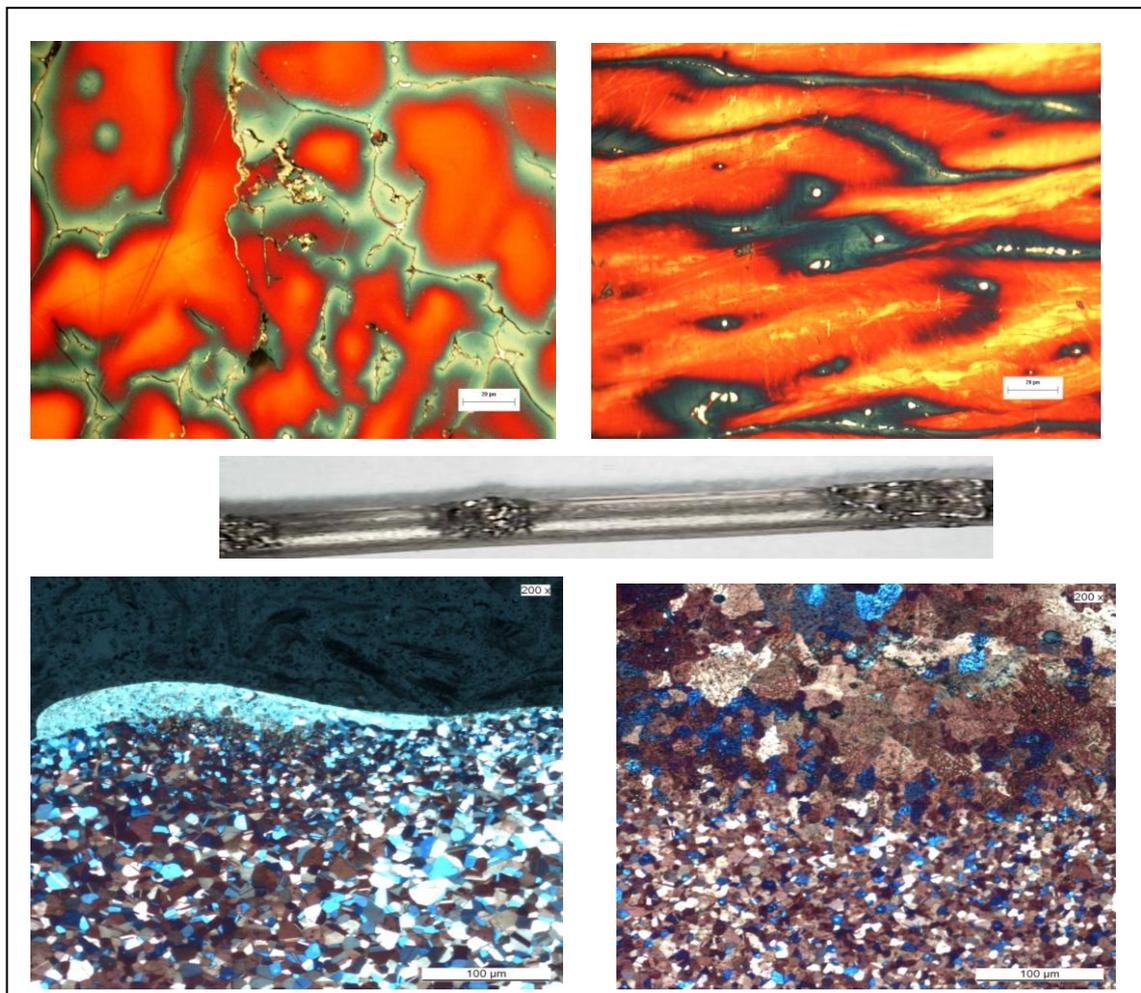
Bei der Erstarrung eines Gusses entstehen Konzentrationsunterschieden, bedingt durch Kristallseigerungen. Bei Legierungen mit einem großen Erstarrungsintervall sind diese besonders ausgeprägt. In der Regel kommt es bei langsamer Abkühlung bzw. durch eine Homogenisierung zum Konzentrationsausgleich.

Entstehen sie aber in Folge von gestörten Gießbedingungen, wie zum Beispiel Vorerstarrung in der Schmelze, durch mangelnde Durchmischung beim Nachlegieren oder einseitige Kühlung in der Kokille sind die Diffusionswege in der Regel so groß, dass ein Ausgleich nicht mehr möglich ist.

Diese Seigerungen haben großen Einfluss auf das Werkstoffverhalten wie die beiden Beispiele zeigen. Im ersten Fall (Abb.oben links dargestellt) sind die Legierungselemente, die bei einer Auslagerung die Härtesteigerung bringen, so stark geseigert, dass sie beim anschließenden Lösungsglühen in den angereicherten nur teilweise aufgelöst werden (Bild oben rechts). In den verarmten Bereich kommt es zwar zu einer vollkommenen Löslichkeit allerdings reicht die Menge der Legierungselement nicht für eine Härtesteigerung aus. Der Aushärtungseffekt ist gestört.

Der zweite Fall zeigt, dass Anreicherungen zu einer partiellen Senkung der Schmelztemperatur führen. Kommt es dann zu einer Wärmebehandlung dicht unterhalb Solidus, wie beim der Schnellwärmeglühung, so entstehen an Teilen des Glühgutes Anschmelzungen (Bild Mitte und Bildreihe unten).

Abbildung 8



21.2.2 Korngrenzenbeläge

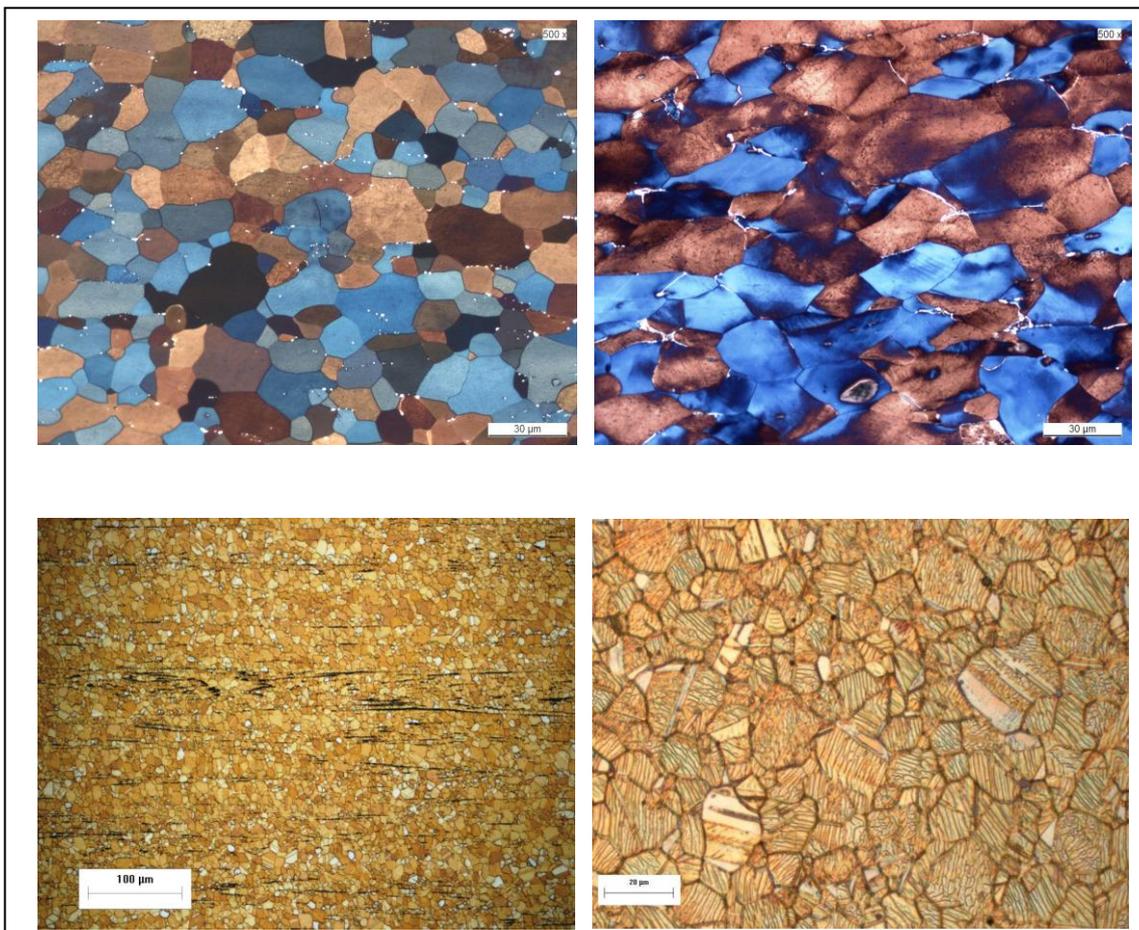
Beispiel Glüh- β und Tertiärzementit: Bei zweiphasigen Gefügen können verschiedene Verteilungsbilder auftreten. Hat man zwei im Umformverhalten sehr unterschiedliche Kristallarten, so ist es wichtig, dass es an den Grenzflächenbereichen überwiegend zu Kontakten zwischen den duktilen Werkstoffen kommt. Bei Messing und bei Stahl also überwiegend α/α Grenzflächen entstehen.

Bei ungünstigen Verhältnissen kommt es aber zu einer zellularen Ausscheidung der harten Phasen an den Grenzflächen. Stahl mit einem Kohlenstoff von $\leq 0,05\%$ führt eine schnelle Abkühlung führt zu einer Unterdrückung der Zementitausscheidungen aus dem Ferrit (Die Abbildung 9 links zeigt die ord-

nungsgemäße kugelige Ausscheidung). Eine nachträglich bei der Bearbeitung oder im Einsatz stattfindende Tertiärausscheidung erfolgt dann als Korngrenzementit, (zu sehen im Bild rechts) und führt dadurch zu einer spürbaren Versprödung.

Ist bei Bereich CuZn 35 - 38 das Restbeta zeitlig angeordnet wie Bild unten links zeigt liegen viele α - α Mk Grenzfläche vor. Kommt es aber bedingt durch abnehmende Löslichkeit des Zinks im α -Mischkristall Temperaturen ≥ 500 °C, zu β -Mk Ausscheidungen, das heißt bei Glühungen im Hochtemperaturbereich scheidet sich ein β -Mischkristall um die α -Mk aus. Der Kontakt α - α Korngrenzen liegt somit nicht mehr vor (Bild rechts unten). Bei entsprechender Ausscheidungsmenge führt das zu einer harten, unflexiblen Schale und somit zu einer stark eingeschränkten Umformbarkeit.

Abbildung 9

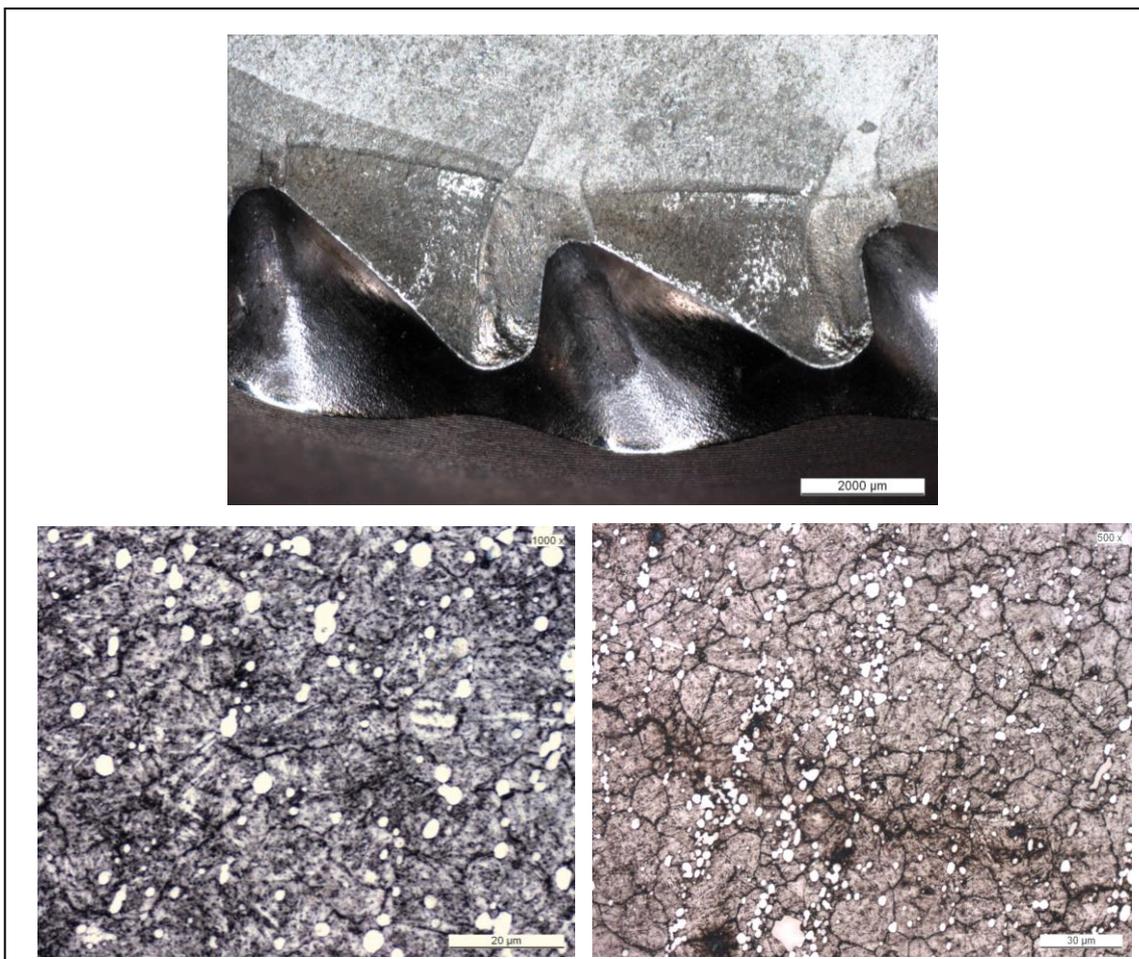


21.2.3 Fehler bei der Wärmebehandlung

Beim Härten wird eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung angestrebt. Übersteigen die inneren Spannungen die Kohäsionsfestigkeit partiell so kommt es an dieser Stelle zur Rissbildung.

Durch nicht aufgelöste Karbidsäume auf den Austenitkorngrenzen oder Vorausscheidung an der Korngrenze kommt es zu einer unregelmäßigen Spannungsverteilungen zwischen Korngrenze und Korninneren. Abbildung 10 links unten zeigt die Gefügeausbildung im Zentrum – rechts die in der Randzone mit bereits vorhandenen Korngrenzenrissen. Bei stärkeren Belastungen führen diese Materialschwächungen zu Dauerbrüchen (Bruchbild oben).

Abbildung 10



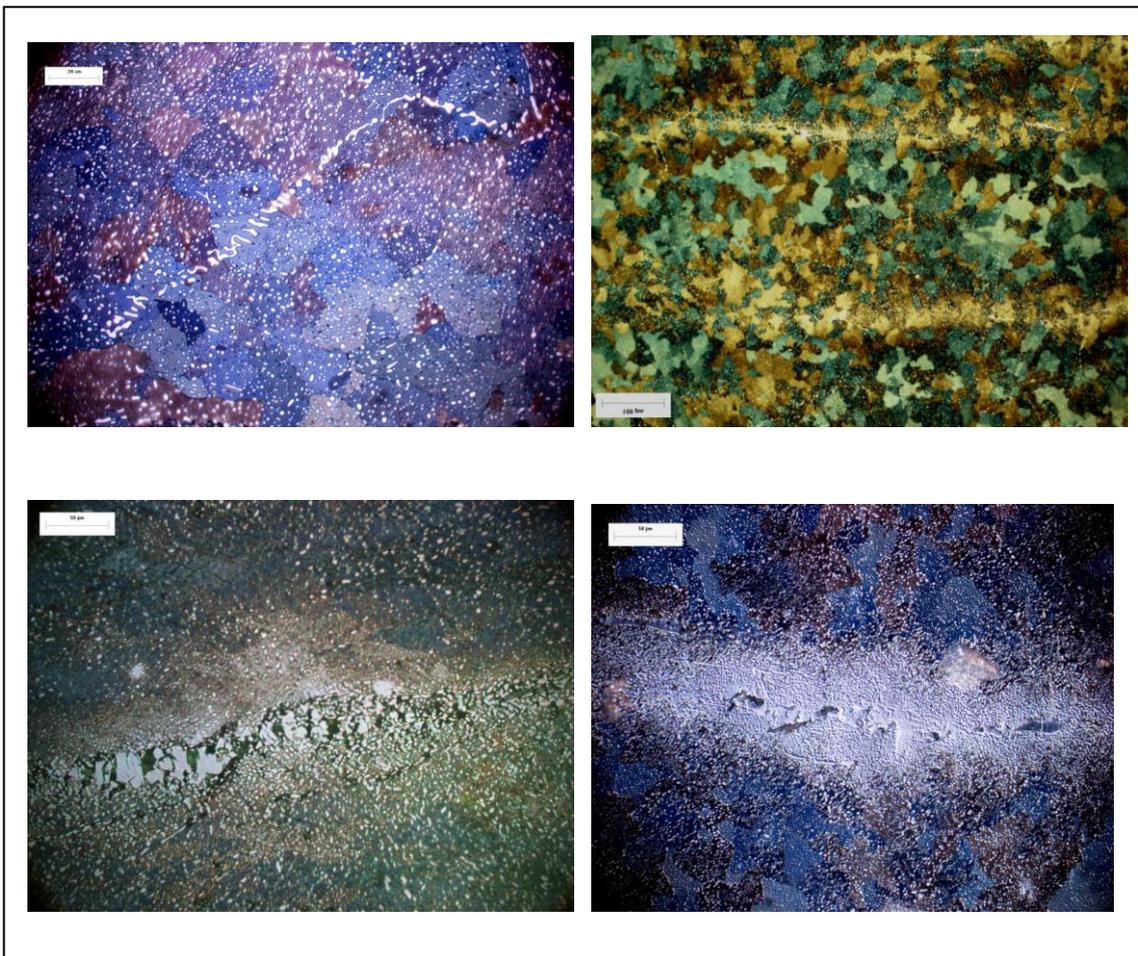
21.2.4 Karbidvergrößerung

Grobe Karbide sind häufig die Ursache für Brüche hochfester Werkstoffe.

Die vorliegende Struktur führte zum Bruch und hier zum Ausfall einer Kaltwalze. Die ursprünglichen Primäraustenitkorgrenzen weisen eine deutliche Belegung mit Karbiden auf (Abb. 11 links oben). Zudem zeigt die Übersicht eine zeilige Anordnung von Seigerungen (Bild oben rechts). Bei höherer Auflösung erkennt man Bereiche mit groben und feinen Karbiden die stark gehäuft auftreten. Die groben Karbide sind aus dem Ledeburit entstanden, (Bild unten links) wogegen die Häufung der feinen Karbide im Wesentlichen aus der Umwandlung stammen, bedingt durch starke Seigerung von Legierungselementen im γ -Mischkristall (Bild unten rechts).

Deutlich ist zu sehen, dass diese Anhäufung von harten spröden Legierungsbestandteilen, bei der Belastung zu Mikrorissen geführt hat, die dann als innere Kerben schnell einen Dauerbruch verursacht haben.

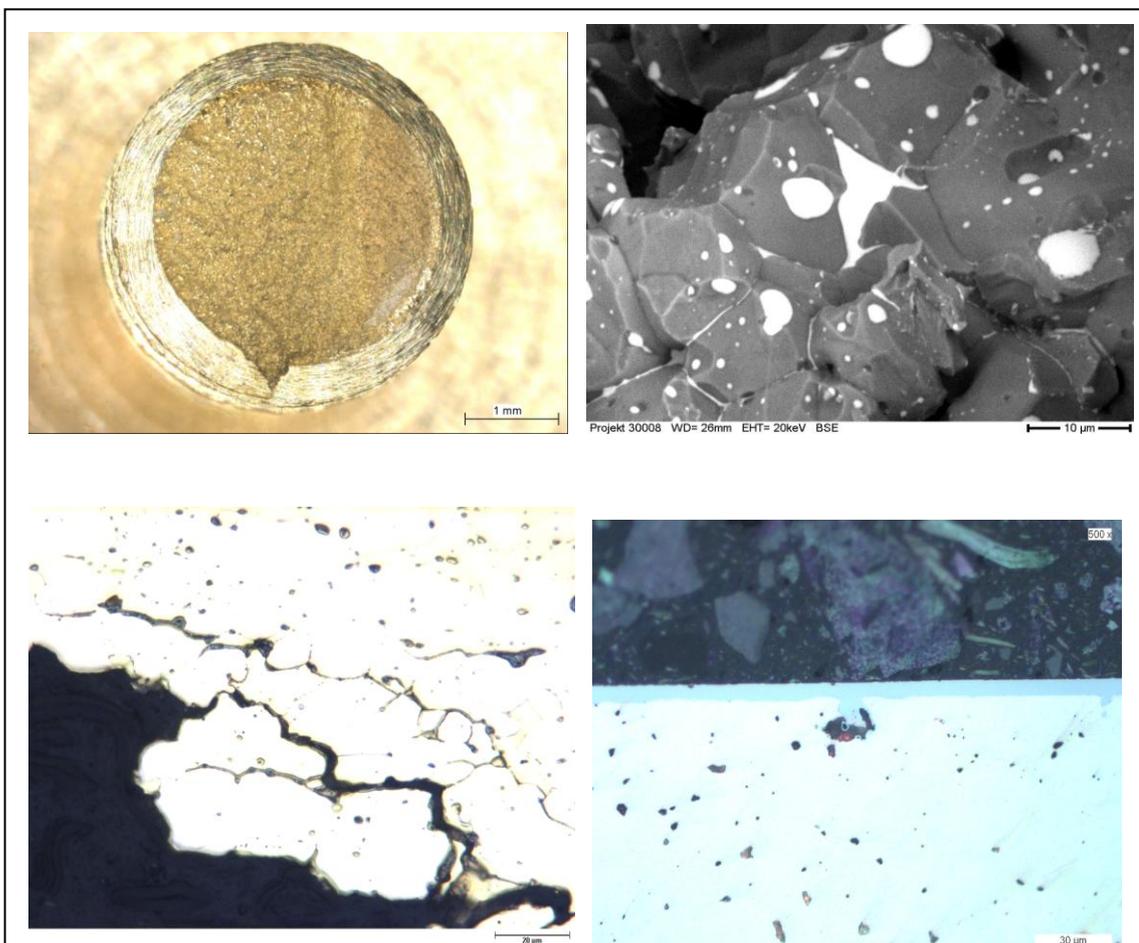
Abbildung 11



21.2.5 Bleiverteilung

Das Zulegieren von Blei erfolgt in Kupferzinklegierung zur Verbesserung der spanenden Bearbeitung. Dabei erfüllt das Blei die Aufgabe die der Schwefel beim Automatenstahl hat, die Funktion des Spanbrechens. Da Blei unlöslich im Messing ist, scheidet es sich als elementare Bleipartikel ab. Sind diese Partikel ungünstig ausgebildet und angeordnet, können Probleme bei der Weiterverarbeitung auftreten. Kommt es zu erheblichen Druckbelastungen im Bereich von ca. 300°C, zum Beispiel durch unsachgemäße Bearbeitung, zu einer Bildung eines Bleifilms auf den Korngrenzen bewirkt der dann eine starke Verringerung der Festigkeit (Abb. 12 oben links und rechts). Man spricht dann von Warmverprödung, signifikant ist hierfür ein gold glänzender interkristalliner Bruch (Bild unten links). Zum anderen haben die groben Bleipartikel häufig Störungen bei der galvanischen Oberflächenbeschichtung zur Folge (Bild unten rechts).

Abbildung 12



21.3 Korrosion

Die Korrosion an Metallen kann mit und ohne zusätzliche mechanischer Beanspruchung entstehen. Die hier vorgestellten Beispiele zeigen beide Fälle.

21.3.1 Wasserstoffversprödung

Wasserstoffbedingte Schäden beobachtet man in erster Linie an Bauteilen aus ferritischen bzw. martensitischen Stählen. Im wesentlichen beruht dieser Effekt auf zwei Eigenschaften: der hohen Diffusionsgeschwindigkeit des Wasserstoffs im Eisengitter und seiner Fähigkeit sich atomar zu lösen und sich molekular oder atomar auszuscheiden, zudem vermag Wasserstoff bei Temperaturen zwischen 200 und 500°C Eisenkarbid in Methan umzusetzen.

Der kleine Durchmesser des Wasserstoffatoms (Wasserstoff kann im Gitter als Proton aufgefasst werden) verleiht ihm hohe Beweglichkeit und ermöglicht relativ rasche Anreicherung in energetisch günstigen Lagen, beispielsweise in elastisch auf geweiteten Gitterbezirken. Deshalb gelten Stähle mit hoher Streckgrenze, im hohen Maß aber martensit-ausgehärtete Stähle, als extrem anfällig.

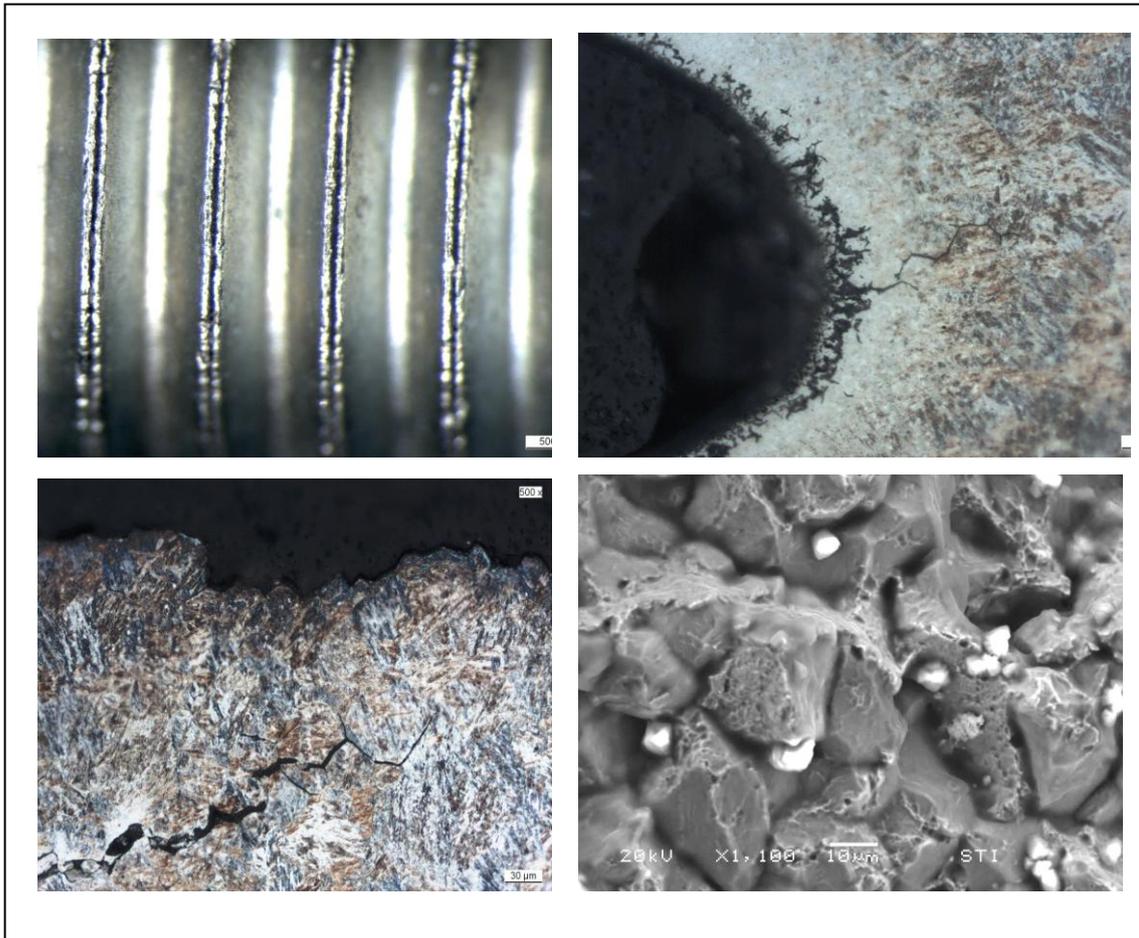
Die Wasserstoffaufnahme im Gitter ist besonders groß, wenn der Wasserstoff atomar angeboten wird, beispielsweise bei der elektrolytischen Beladung oder bei Korrosionsprozessen.

Die hier vorgestellten verzinkten Schrauben mit gerolltem Gewinde wurde vor dem verzinken gehärtet (Abb. 13 oben links). Der Gewindegrund zeigt deutliche korrosive Angriffe und feine Anrisse (Bild oben rechts). Diese Anrisse erzeugen einen verzögerten Bruch der darauf beruht, dass sich Wasserstoff im aufgeweiteten Gitter anreichert, von der Rissspitze beginnend, das Gitter dabei lokal spaltet, und somit einen inneren Anriss erzeugt der sich mit dem Außenriss verbindet. Signifikant dafür sind die interkristallinen verzweigten Brüche (Bild unten links) und die auf den Kornflächen im Rasterelektronenmikroskop sichtbaren Krähenfüße (Bild unten rechts).

Höherfeste Schrauben sind besonders davon betroffen, da sie beim Beizen besonders viel Wasserstoff aufnehmen. Mit einer 3 bis 24-stündigen Glühung bei 180-200° versuchen die Hersteller die Gefahr der Wasserstoffversprödung

zu minimieren, streichen diese Schadensursache aber aus ihrem Gewährleistungsumfang.

Abbildung 13



21.3.2 Entzinkung

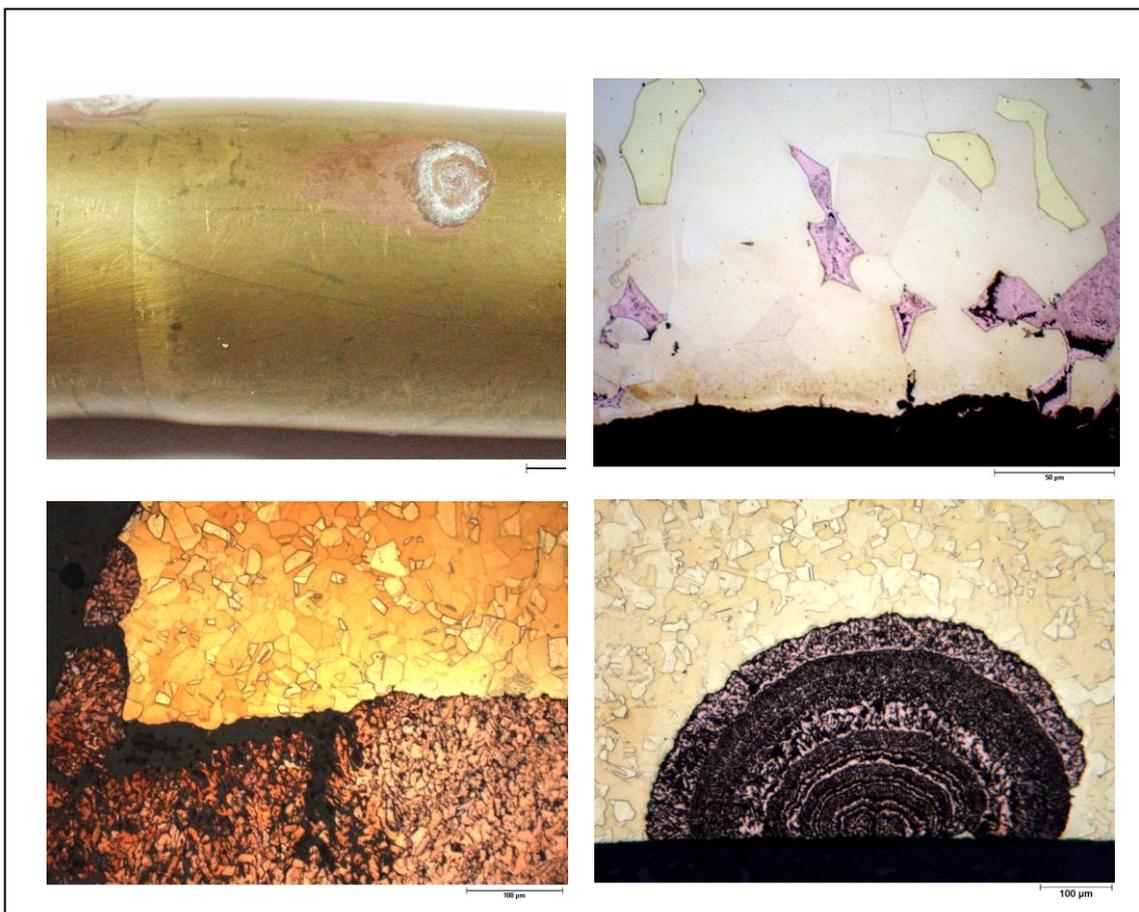
Entzinkung tritt in der Regel bei Messinglegierungen mit mehr als 20% Zink auf, wobei wie eine Erklärung lautet, sich das Zink auslöst und Kupfer zurückbleibt eine zweite Meinung sagt, das Messing als ganzes in Lösung geht und das Kupfer sich wieder am Messing anlagert. Vermutlich laufen beide Vorgänge ab. Das sichtbare Erscheinungsbild ähnelt dem Rost (Abb.14 oben links). Besonders gefährdet ist die β -Phase in heterogenen, sprich in $\alpha+\beta$ -Legierungen (Bild oben rechts). Es tritt eine partielle Entzinkung ein. Wird so eine β -Zeile angeschnitten gehen diese Materialauflösungen schnell durch die gesamte Wand.

Bei reinen α -Mischkristallen kommt es zu einer flächig auftretenden Entzinkung und damit ist das Fortschreiten des Angriffs geringer (Bild unten links). Eine besondere Form ist die pfropfenförmige Entzinkung (Bild unten rechts).

Als korrosionsauslösend gelten vor allem saure Flüssigkeiten aber auch chlorhaltige Lösungen.

Es gibt Legierungselemente die den α -Mk beständig gegen Entzinkung machen, da muss dann aber gewährleistet sein, dass eventuelle β -Mk Ausscheidungen keine Zeilenbildung in Oberflächenrichtung aufweisen, zudem setzen größere Mengen an Verunreinigungen besonders Fe+Mn durch Bindung an das Arsen diesen schützenden Effekt außer Kraft.

Abbildung 14



21.3.3 Spannungsrissskorrosion

Die Spannungsrissskorrosion ist eine Rissbildung mit inter- oder transkristallinem Verlauf in Metallen bei gleichzeitiger Einwirkung bestimmter korrosiver Mittel

und Zugspannungen, und tritt nur dann auf, wenn eine gute Beständigkeit gegenüber einer Flächenkorrosion in Form von passivierenden Deckschichten gegeben ist.

Auslösung der Rissbildung ist ein Zusammenwirken von Werkstoff – Korrosionsmedium – und mechanischer Belastung.

Die Riss auslösenden Zugspannungen liegen dabei weit unterhalb der Streckgrenze und sind häufig im Bereich von Eigenspannungen zu suchen, die auch im Einsatz entstehen können. Deshalb wird zwar die Rissanfälligkeit mit einer abschließenden Spannungsarmglühung nach der Endbearbeitung minimiert aber nicht ausgeschlossen. Eine weitere Sicherheit bringt das Einbringen von Druckspannungen in die Oberfläche durch Strahlen mit Feststoffen. Es muss aber dafür gesorgt werden, dass die so erzeugte beständige Oberflächenschicht nicht durch andere Vorgänge wie zum Beispiel Erosion abgetragen wird.

Im englischen Sprachgebrauch ist heute noch der Begriff season cracking bekannt. Er ist entstanden während einer Monsunzeit, als in Indien 1920 das während der warmen Periode in die Atmosphäre befindliche Ammoniakgas in Verbindung mit dem Regen auf Messingteilen erheblichen Schaden durch Rissbildung erzeugte. Wenn man die Häufigkeit der Ausfälle betrachtet, stellt man auch in unseren Breiten im Herbst und im Frühjahr eine erhöhte Spannungsrissneigung fest, die sich mit der um diese Jahreszeit verbreit erhöhten Niederschlagsmenge und den auftretenden Temperaturschwankungen an den, den Umwelteinflüssen ausgesetzten Metallteilen, erklären lässt.

In der Tafel in Abbildung 15 sind die kritischen Kombinationen von Metall und Korrosionsmedium aufgelistet.

Die von mir vorgestellten Spannungsrissbeispiele zeigen die Rissbildung in Messingteilen. Das Bild in Abb.16 oben in der Mitte zeigt einen typischen Rissverlauf im Kerbgrund einer Verschraubung. Liegt bei Messing ein $\alpha+\beta$ Mk Gefüge vor, so verläuft die Rissbildung im β -Mk transkristallin und lässt die α -Mk scheinbar unberührt (Bild oben links). Das rechte Bild zeigt die entsprechende Bruchstruktur im Rasterelektronenmikroskop mit den Korrosionsprodukten auf den Flächen.

Links unten erkennt man den leicht angegriffenen interkristallinen Bruchverlauf.

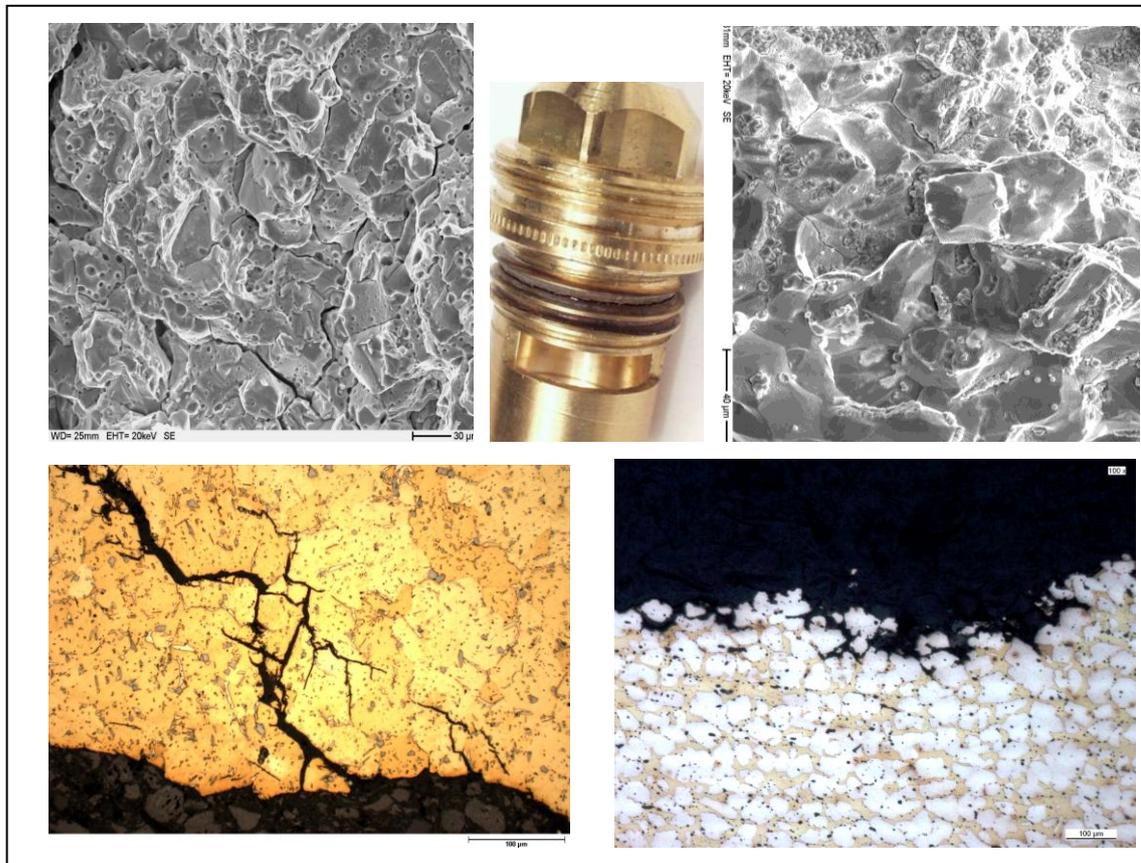
Das rechte Gefügebild unten weist die typische starke Verzweigung von Spannungsrisskorrosion im einphasigen Messing auf, in diesem Fall im β -Mischkristall einer Sondermessingprobe.

Abbildung 15

Für die Auslösung einer Spannungsrisskorrosion gibt es folgende ungünstige Kombinationen

Hochlegierte Stähle	Cl-haltige Lösungen und O-haltiges Hochtemperaturwasser
Nickelbasis-Legierungen	Alkalihydroxid Lösung und reines Hochtemperaturwasser
Nickelbasis-Legierungen	Alkalihydroxid Lösung und reines Hochtemperaturwasser
Aluminiumbasislegierungen	speziell halogenhaltige Lösungen
Titanbasis-Legierungen	chloridhaltige wässrige und organische Lösungen
Messing	wässrige Ammoniakverbindungen und saure Wässer

Abbildung 16



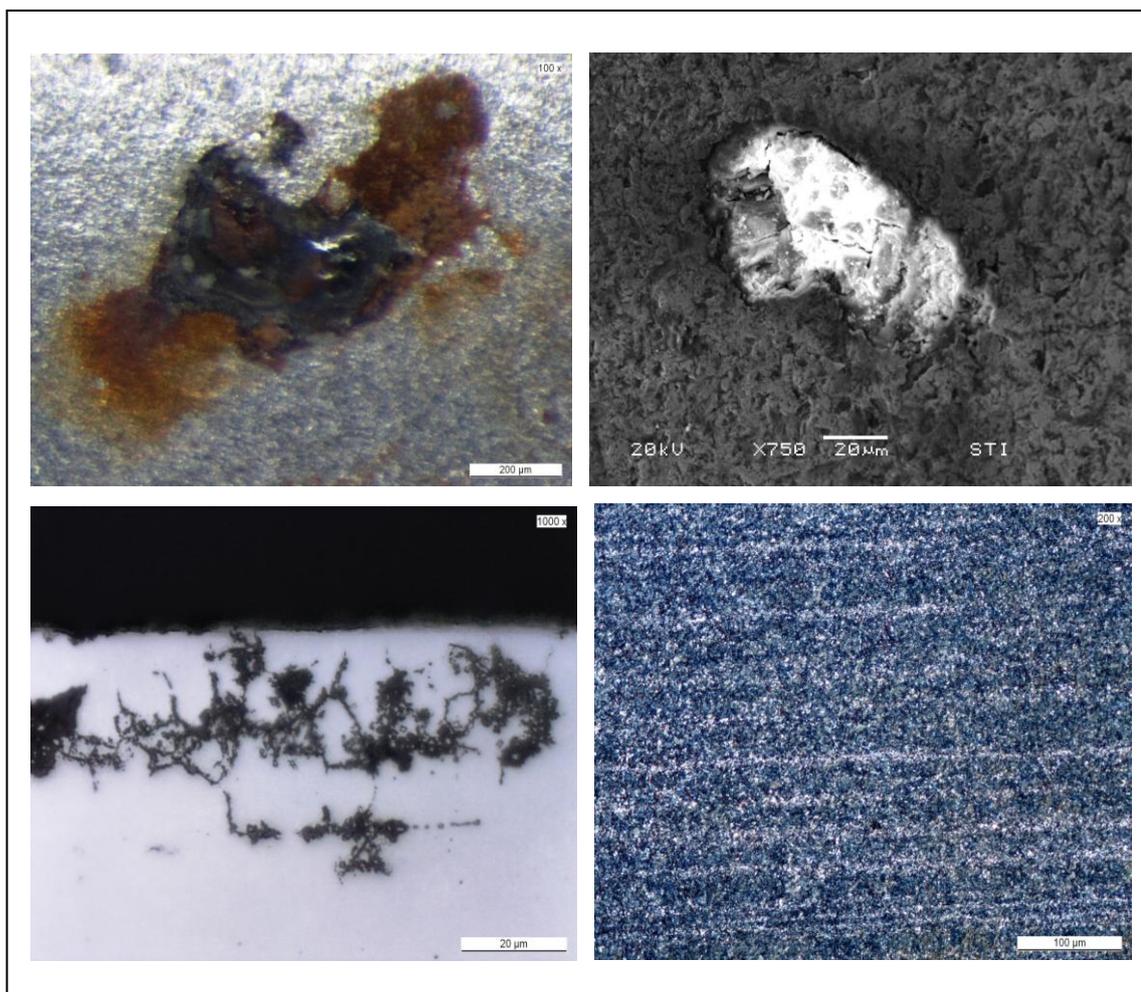
21.3.4 Rost an Edelstahl

An medizinischen Geräten die einer gründlichen und deshalb häufig aggressiven Reinigung unterzogen werden kommt es häufig zu einer Beanstandung wegen Rosterscheinungen. Da die Werkzeuge zum Teil hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind sind als Werkstoff in der Regel hoch chromlegierter Stahl im Einsatz. Trotz der diesen Legierungen zugesprochenen Rostbeständigkeit zeigen Teile im täglichen Gebrauch deutliche rote Korrosionsstellen, die als Eisenoxid analysiert werden (Abb. 16 oben links). Entfernt man die teilweise lose auf der Oberfläche anhaftenden Stellen, so erkennt man unterhalb häufig nichtmetallische Einschlüsse als Rückstände der Bearbeitung (Bild 16 oben rechts). Ebenso macht sich eine deutliche Anfälligkeit der Laserbeschriftung bemerkbar. Im Mikroschliff wird deutlich, dass es sich bei dem sichtbaren braunen Löchern nur um einen Bruchteil der Schädigung handelt. Es kommt nach dem Eintritt des korrosionsauslösenden Mediums, durch die beschädigte

Passivierungsschicht hindurch, zu einem verstärkten Angriff im Bereich unterhalb der Oberfläche (Bild unten links). Als aggressives Element lässt sich im REM mittels EDX schnell Chlor ausmachen. Die erhöhten hygienischen Anforderungen machen eine intensivere Reinigung nötig, dazu kommt, dass die Teile dabei längere Zeit in der nicht bewegten Lösung liegen bleiben alles Faktoren die den Korrosionsangriff erhöhen.

Eine Beseitigung des Problems kann eigentlich nur eine Veränderung des Werkstoffes bringen zumal bei den verwendeten Legierungen es häufig durch Seigerungen zu einer Karbidausscheidung und damit einer abnehmenden Beständigkeit kommt (Bild unten rechts).

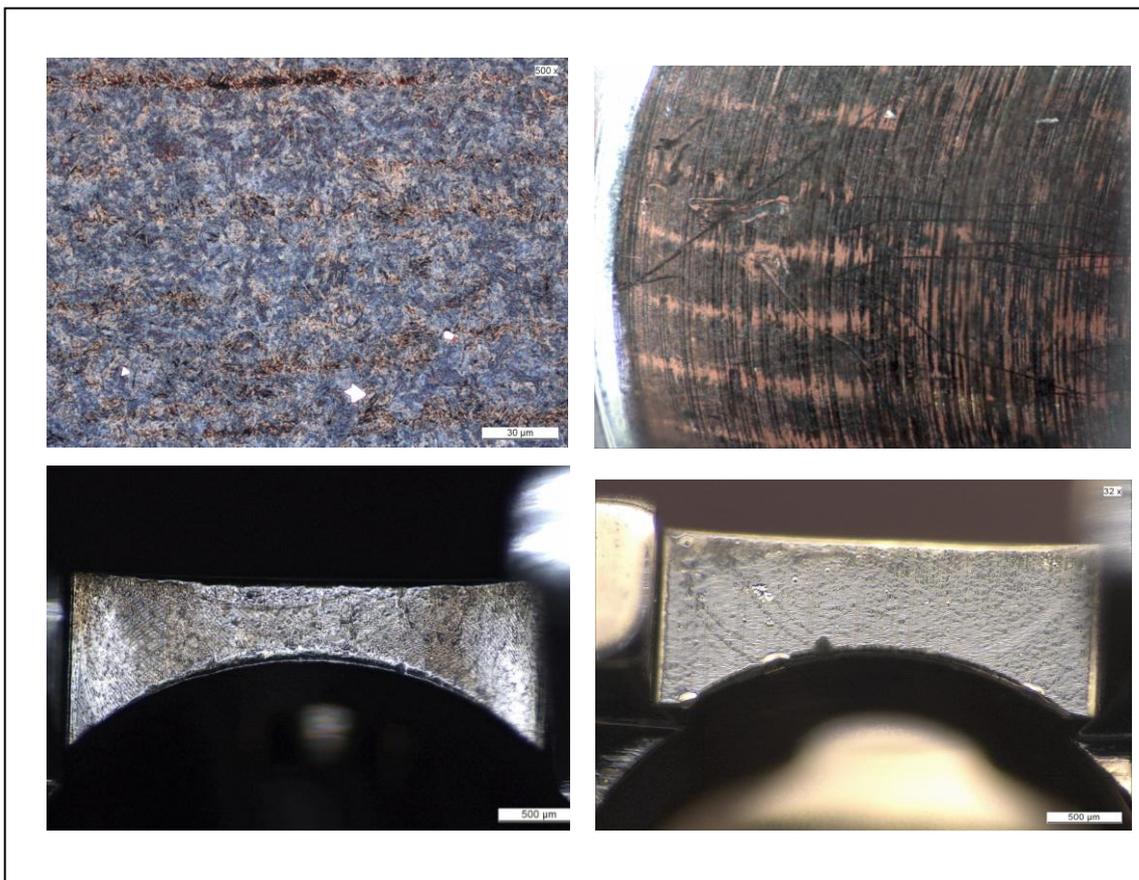
Abbildung 16



Die Wahl fiel auf einen Stahl der neben dem deutlich erhöhten Nickel – Chromgehalt als austenitischer Stahl auslagerungsfähig ist und somit gute Festig-

keitseigenschaften mitbringt (Abb. oben links). Das heißt eine Wärmebehandlung bringt durch Lösungsglühung und anschließender Aushärtung die nötige Festigkeit bei deutlich verbesserter Korrosionsbeständigkeit. Allerdings zeigt ein Korrosionstest in einer Kupfersulfatlösung, eine Anfälligkeit für einen Angriff durch die Bearbeitung (Bild oben rechts). In schwer zugänglichen Bereichen kann die Bearbeitungsstruktur mechanisch nur unzureichend entfernt werden (Bild unten links). Erst eine völlige Entfernung durch elektrolytisches Polieren führte zu einem zufrieden stellenden Ergebnis (Bild unten rechts).

Abbildung 17



Andreas Zilly, Hochschule Pforzheim

Frank Pupke, nkt cables GmbH

Fortschrittsbericht zu mikrolegierten Kupferbasislegierungen

-

**Neueste Erkenntnisse aus der Ermüdungsprüfung von
Hängerseilen**

Inhaltsverzeichnis

nkt cables group.....	110
Einleitung	110
Hängerseile	112
Ermittlung der realen Belastungszustände	119
Verwendete Prüfmethode n	120
Ergebnisse und Optimierungsansätze	124
Ausblick.....	125
Literatur	127

Zusammenfassung

Hängerseile in Oberleitungen werden beim Anhub durch Stromabnehmer dynamisch belastet, wodurch es zu Brüchen kommen kann. Die Norm DIN EN 50119:2008 stellt daher Anforderungen an die dynamische Prüfung von Hängern. Bisher eingesetzte Seile und Werkstoffe erfüllen diese Anforderungen nicht durchgehend. Weitere Verbesserungen wurden daher erforderlich und durch deutliche Eigenschaftsoptimierung von CuMg- Hängerseilen umgesetzt

Summary

The stranded conductors of droppers for overhead contact lines are dynamically stressed when being lifted by a pantograph. The dynamic stresses can result in breaks. Therefore, the standard EN 50119:2008 establishes requirements on the dynamic dropper testing. The conductors and materials used so far do not completely comply with these requirements. Further improvements have been necessary and were done by remarkable optimization of the properties of CuMg- droppers.

nkt cables group

Die nkt cables group GmbH mit dem Konzernsitz in Köln ist ein Unternehmen mit weltweit 3140 Mitarbeitern in 9 Werken in 5 europäischen Ländern und einem Werk in China. Die nkt cables GmbH in Köln, wo derzeit 500 Mitarbeiter beschäftigt sind, blickt auf eine lange Tradition zurück. Seit mehr als 100 Jahren sind Fahrdrähte und Seile für elektrische Bahnen aus Kupfer, Kupfer-Silber und seit einigen Jahren auch aus Kupfer-Magnesium und Kupfer-Zinn eine Garantie für zuverlässige Energieübertragung und höchstmögliche Geschwindigkeit auf internationalen Strecken. Mit dem Zusammenschluss der dänischen NKT Cables A/S und der Felten & Guillaume Kabelwerke GmbH zur heutigen nkt cables group GmbH steht den Bahnkunden ein neuer, starker Partner mit einer breiten Produktpalette zur Verfügung. Darüber hinaus ist nkt cables ein Hersteller von Hoch- und Höchstspannungskabeln und deren Garnituren sowie von Lichtwellenleiterseilen und deren Anwendungen. Für die Erweiterung der Produkt- und Serviceleistungen, den Ausbau der Entwicklungsbereiche und für die Einführung neuer Produktlinien wird im Jahre 2010 ein Umzug des Werkes Köln einschließlich der gesamten Administration der nkt cables GmbH in einen Neubau im modernen CHEM-Park nach Leverkusen stattfinden.

Einleitung

Bei einer Fahrleitung für elektrische Bahnen handelt es sich um ein komplexes System aus mehreren stromführenden Komponenten, von denen die einen nahezu statisch beansprucht werden und andere wiederum hochdynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Die Leistungsübertragung von der Oberleitung auf die Triebfahrzeuge soll störungsfrei unter ständigem elektrischem und mechanischem Kontakt erfolgen. In der Praxis wird dies dadurch realisiert, dass der Stromabnehmer (Pantograf) mit durchschnittlich 70 – 120 N gegen den Fahrdraht gepresst wird. Bei hohen Geschwindigkeiten liegt der Wert auch darüber /1/. Dieser örtliche Anhub führt zu einer Entstehung von transversalen Impulsen, die sich in Form von Wellen längs der Oberleitung ausbreiten. Dadurch

wird das Zusammenspiel von Schleifleiste und Fahrdraht beeinflusst. Besonders beim Fahren im Zugverband mit mehreren Stromabnehmern, wie es zum Beispiel beim gekoppelten ICE praktiziert wird, versetzt der erste Pantograf die Oberleitung in Schwingung und die weiteren fahren dann in diese Schwingungen hinein, was deren Kontaktgüte beeinträchtigt. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit resultiert aus der so genannten Wellengleichung und ist von der Vorspannung sowie von der Dichte des Fahrdrahtes abhängig. Wenn die Fahrgeschwindigkeit v genauso groß wie die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c_p wird, dann wächst die Auslenkung des Fahrdrahtes theoretisch ins Unendliche. Dadurch ist eine Stromaufnahme nicht mehr gewährleistet. Daher sind der Fahrdraht und seine Zugspannung so zu wählen, dass bei der zu fahrenden Geschwindigkeit die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit nach praktischen Erfahrungen das 1,4- bis 1,5-fache der Fahrgeschwindigkeit beträgt. Diese durch die Materialeigenschaften bedingte physikalische Grenze wird als „catenary barrier“, als Oberleitungsgrenze bezeichnet und ist, vergleichbar mit der Schallgrenze bei Flugzeugen, eine ständige Herausforderung bei weiteren Geschwindigkeitserhöhungen /2/.

Abbildung 1

Oberleitungssystem, ICE-Schnellbahnstrecke Köln-Rhein-Main**Hängerseile**

Vor allem die vertikalen Hängerseile, die die Verbindung zwischen dem Tragseil und dem Fahrdrabt herstellen und im Ruhezustand nur durch das Fahrdrabt- und das Eigengewicht statisch auf Zug beansprucht werden, unterliegen bei der Durchfahrt einer Bahn hochdynamischen Beanspruchungen. Dabei ist die Schwingungsamplitude beim Anheben der Leitung am größten und nimmt danach als gedämpfte Schwingung kontinuierlich ab. Bedingt durch diese Schwingungen kann es an den Hängerseilen zu einer Materialermüdung kommen, die letztlich zum Bruch führen kann. Dadurch erhöht sich unmittelbar die

Belastung der benachbarten Seile, was wiederum zu einer Verminderung deren Lebensdauer führt. Ein weiteres Problem tritt dann auf, wenn es zu einer Kollision zwischen einem gebrochenen Hängerseil und dem Stromabnehmer kommt, was aufgrund der hohen Geschwindigkeiten sehr schnell zu großen Beschädigungen führen kann. Daher kann der Bruch eines einzelnen Hängerseiles eine Reparatur an der Bahnstrecke mit entsprechenden Ausfällen und kostenintensiven Folgen erforderlich machen. Die Zuverlässigkeit des elektrischen Eisenbahnbetriebs hängt in hohem Maße von der Verfügbarkeit und Güte der Bahnenergieversorgung ab. Dabei ist die Fahrleitung das einzige Teilsystem, welches aus wirtschaftlichen und technischen Gründen nicht redundant gestaltet werden kann /3/. Die zunehmende Auslastung des Fahrweges der Bahnen und die steigenden Geschwindigkeiten moderner Züge stellen ständig wachsende Anforderungen auch an die Oberleitungsanlagen. Dadurch treten vermehrt Schäden und wachsender Verschleiß an den einzelnen Komponenten auf /4/.

Die derzeit bei nkt cables hergestellten Seile für die Hänger bestehen aus niedriglegierten Kupfer-Magnesium-Legierungen mit Mg-Gehalten zwischen 0,1 – 0,7%. Kupfer-Magnesium hat sich schon lange bei der Verwendung als Bahnleitmaterial überaus bewährt. Es wird bereits seit den siebziger Jahren im kontinuierlichen Strangguß hergestellt und als Substitut für das umweltschädliche Kupfer-Cadmium bei Bahnleitmaterial eingesetzt. Die Herstellung und Verarbeitung von CuMg ist relativ aufwendig und erfordert umfassende Kenntnisse, die bei nkt cables seit Jahrzehnten vorhanden sind und ständig erweitert werden. Legierungen mit einem Mg-Gehalt von unter einem Prozent weisen ein homogenes Mischkristallgefüge auf. Dabei kann bei der Herstellung das Verhältnis zwischen Zugfestigkeit und Leitfähigkeit sehr genau eingestellt werden. Dies ist sehr wichtig, da die Hängerseile häufig zu den stromführenden Komponenten an der Oberleitung zählen.

Die Abbildung 2 zeigt das Gefüge eines Einzeldrahtes aus einem Hängerseil im Längsschliff. Deutlich zu erkennen ist dabei die überaus homogene Gefügebildung, was gerade für die dynamischen Beanspruchungen von sehr großer Bedeutung ist.

Abbildung 2

Hängerseildrahtgefüge, CuMg(Bz II), 500-fach

Damit die Hängerseile wie alle Oberleitungsbauteile der in der Anlagenspezifikation geforderten Lebensdauer gerecht werden, müssen diese den gestiegenen Anforderungen standhalten können. Das setzt jedoch einen genauen Kenntnisstand über die tatsächlich auftretenden Belastungen voraus. Die Hängerseile können zu-nächst als stehende Seile, wie die Seile von Brücken, betrachtet werden, die neben den statischen Zugkräften auch durch zeitlich in Größe und Häufigkeit veränderliche Zugkräfte belastet werden. Zudem erfahren sie durch den Fahrdrahtanhub eine Biegung und werden in Schwingung versetzt. Aufgrund des sehr komplexen mechanischen Verhaltens des Seils, z. B. durch die wendelförmige Umschlingung der einzelnen Drähte und Litzen mit punktförmigen Kontaktstellen kommt es zu sehr unterschiedlichen Beanspruchungsverläufen über den Seilquerschnitt /5/.

Die verschiedenen Kräfte führen zu einem Belastungskollektiv, das für die Seilschädigung im Betrieb neben den Umwelteinflüssen für die endliche Lebensdauer der Seile von entscheidender Bedeutung ist. Lassen sich in einer theoretischen Betrachtung Korrosion und sonstige äußere Einflüsse wie mechanische

Beschädigungen oder Montagefehler ausschließen, so kann man davon ausgehen, dass die mit der Betriebsdauer zunehmende Materialermüdung durch die dynamische Belastung der Seile verursacht wird /6/.

Diese Belastung lässt sich als eine Kombination aus einer Zugschwell- und einer Biegeschwellbeanspruchung beschreiben. Umfangreiche Versuche und Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl an der Bahnstrecke als auch am Prüfstand keine Vorzeichenänderung der Biegung stattfindet und daher nicht von einer Biegewechselbeanspruchung, wie vielfach angenommen wird, ausgegangen werden kann. Daher ist eine reine Biegewechselprüfung zur Prüfung von Hängerseilen nur bedingt geeignet.

Die Hängerseile müssen daher für diese beiden auftretenden Belastungsarten dimensioniert werden. Die Zugschwell- und die Biegeschwellfestigkeit gibt die Spannung an, die ein Bauteil bei dynamischer Belastung über einen längeren Zeitraum ohne Bruch und unzulässige Verformungen aushält. In einem Wöhlerdiagramm lassen sich die Werte der verschiedenen Spannungsamplituden in Abhängigkeit der jeweiligen Versagenszyklenzahlen auftragen und dadurch gut miteinander vergleichen.

Im Gegensatz zu vielen anderen Maschinenelementen sind Seile infolge von Verschleiß und schwellenden Beanspruchungen sowie Zusatzbeanspruchungen (z. B. Sekundärspannungen, Pressungen usw.) faktisch nicht dauerfest /5/, /6/. Dazu kommt noch der Effekt, dass bei den für Bahnleitmaterialien verwendeten Kupferbasislegierungen, wie bei allen kubisch flächenzentrierten Gefügen, ohnehin keine echte Dauerfestigkeit existiert /7/. Daher muss bei der Prüfung eine gewisse Schwingspielzahl zu Vergleichszwecken als Dauerfestigkeit definiert werden, nach deren Erreichen die Bruchhäufigkeit deutlich abnimmt. Dafür wird eine Grenzlastspielzahl von 107 bis 108 empfohlen /8/. Die Hängerseile müssen so bemessen werden, dass sie eine ausreichende Lebensdauer aufweisen. Diese ist von vielen Parametern abhängig. Sie lassen sich unterteilen in konstruktions- und fertigungsbedingte Parameter, Belastungsparameter und Umwelteinflüsse.

Die konstruktions- und fertigungsbedingten Parameter beinhalten die geometrischen Abmessungen wie Seilkonstruktion (z. B. Schlagart und -länge), Seildurchmesser, freie Seillänge, Oberflächenbeschaffenheit, Festigkeitskennwerte sowie die Ausführung der Seilendverbindung. So führt eine gewisse Oberflächenrauigkeit zu Spannungserhöhungen im Mikrobereich, was die Initiierung eines ersten Anrisses begünstigt /9/. Ebenso ist dies bei Kerben der Fall, die den Einzeldrähten sowohl fertigungs- als auch montagebedingt oder durch Verschleißmechanismen zugefügt werden können.

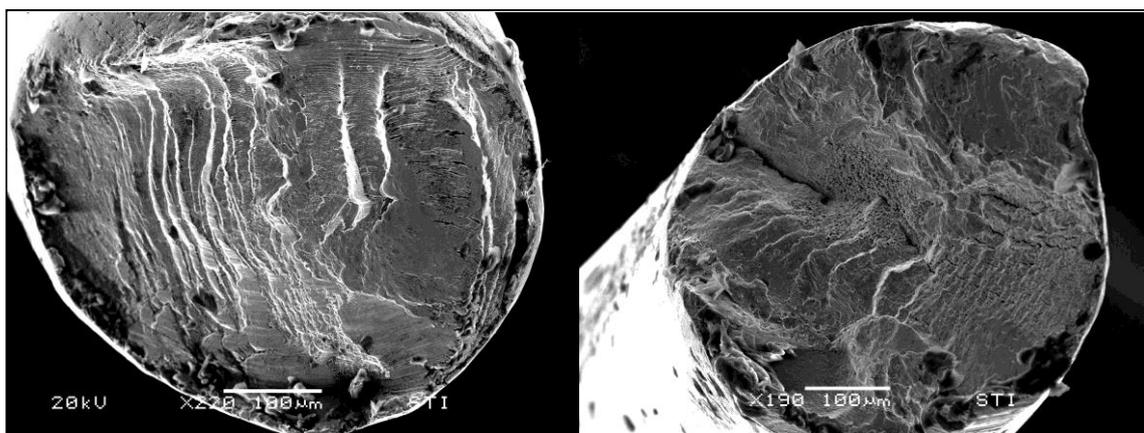
Bei den Belastungsparametern sind es zum einen die Zugkraft als auch die Amplitude der Biegung, die maßgeblich für das Versagen in Betracht gezogen werden können. Durch die auftretenden Schwingungen kommt es zu einer Relativbewegung zwischen den einzelnen Drähten, was an den punktförmigen Kontaktstellen zu Reibkorrosion und damit zu einer Schwächung des Einzeldrahtquerschnittes führt.

Des Weiteren sind die Hängerseile zahlreichen Umwelteinflüssen ausgesetzt. Durch ihre Verwendung im Freien ist eine Schmierung die gleichzeitig als Korrosionsschutz dient, wie sie oft bei stehenden und laufenden Seilen in der Fördertechnik eingesetzt wird, nicht realisierbar. So würden Öle oder Fette aus den Seilen ausgewaschen werden und durch sommerliche Außentemperaturen aus dem Seilverband austreten und somit den Fahrdrabt und das Gleisbett verschmutzen. Zudem ist ein Nachschmieren nach einer gewissen Anzahl von Lastwechsel an der Strecke praktisch nicht realisierbar. Dieser ungeschmierte Betrieb begünstigt auch wiederum die Reibkorrosion im Seil. Die parallel zur mechanischen Beanspruchung wirkenden Korrosionsmechanismen wirken sich dabei negativ auf die Zeitfestigkeit aus /10/. Vor allem in Gegenden mit einer hohen Luftverschmutzung durch Abgase oder durch einen hohen Salzgehalt in Küstennähe oder entlang von gestreuten Straßen im Winter ist mit einer deutlichen Minderung der Lebensdauer zu rechnen. Durch die vertikale Einbaulage führen die Hängerseile das Regenwasser entsprechend nach unten ab, was besonders zu Staunässe im unteren Klemmenbereich führen kann.

Diese aufgezeigten Einflüsse führen letztendlich zum Versagen des Bauteils durch Bruch der Einzeldrähte. Betrachtet man bei einem gebrochenen Seil die einzelnen Drahtbrüche, so lassen sich diese grob in die zwei Brucharten Ermüdungsbruch und Überlastbruch unterteilen. Je nach Belastung sind auch Drahtbrüche möglich, die beide Brucharten aufweisen. Der Ermüdungsbruch, der auch als Schwingbruch bezeichnet wird, findet in mehreren Phasen statt. Zu Beginn kommt es zu einem Anriss, der meistens von einer stark beanspruchten Stelle ausgeht. Dies kann durch einen Materialfehler an der Oberfläche, eine Kerbe oder eine einmalige Überlast verursacht werden. Unter den weiteren zyklischen Beanspruchungen kommt es dann zu einer Schwingrissbildung mit den typischen Rastlinien und Schwingungstreifen, die unter dem Mikroskop gut zu erkennen sind. Kann der Restquerschnitt den auftretenden Belastungen nicht mehr standhalten, kommt es zu einem Restbruch, der sich durch seine zerklüftete Oberfläche sehr gut von der Schwingbruchfläche unterscheiden lässt. In der **Abbildung 3** sind Schwingungsbrüche von Einzeldrähten der beiden untersuchten Werkstoffe CuMg (Leitbronze II) und einer Cu-Mehrstofflegierung (Fe, Ag, Cr, und andere) zu sehen. Diese beiden Werkstoffe zeigen in ihrem Bruchverhalten keine signifikanten Unterschiede.

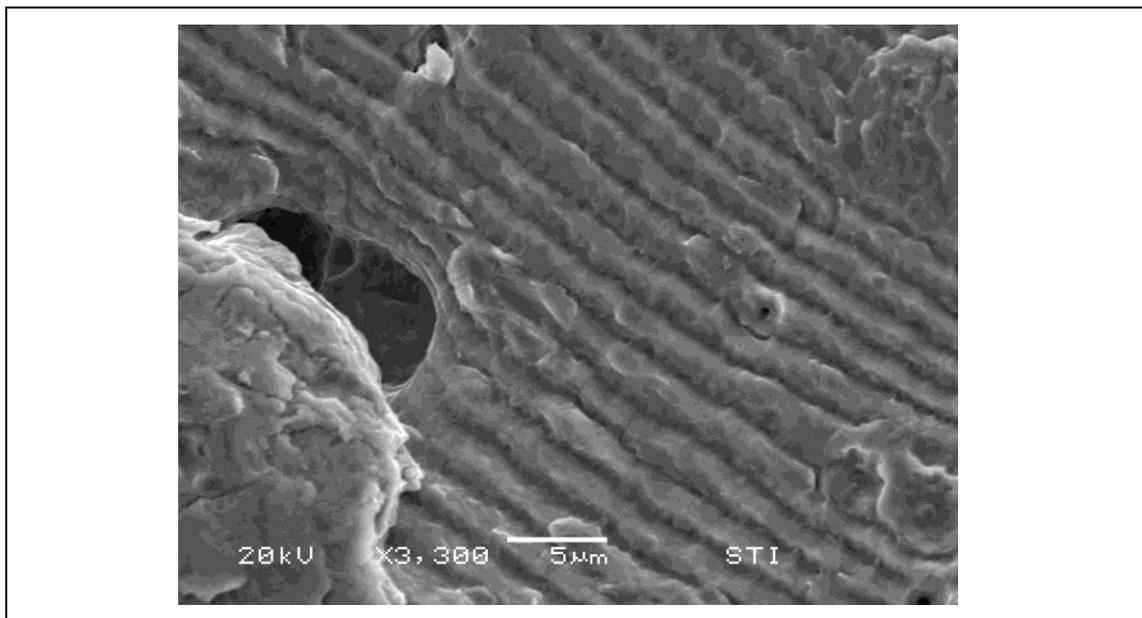
Abbildung 3

Drahtbruch CuMg (Bz II) (links) und Cu-Mehrstofflegierung (rechts)



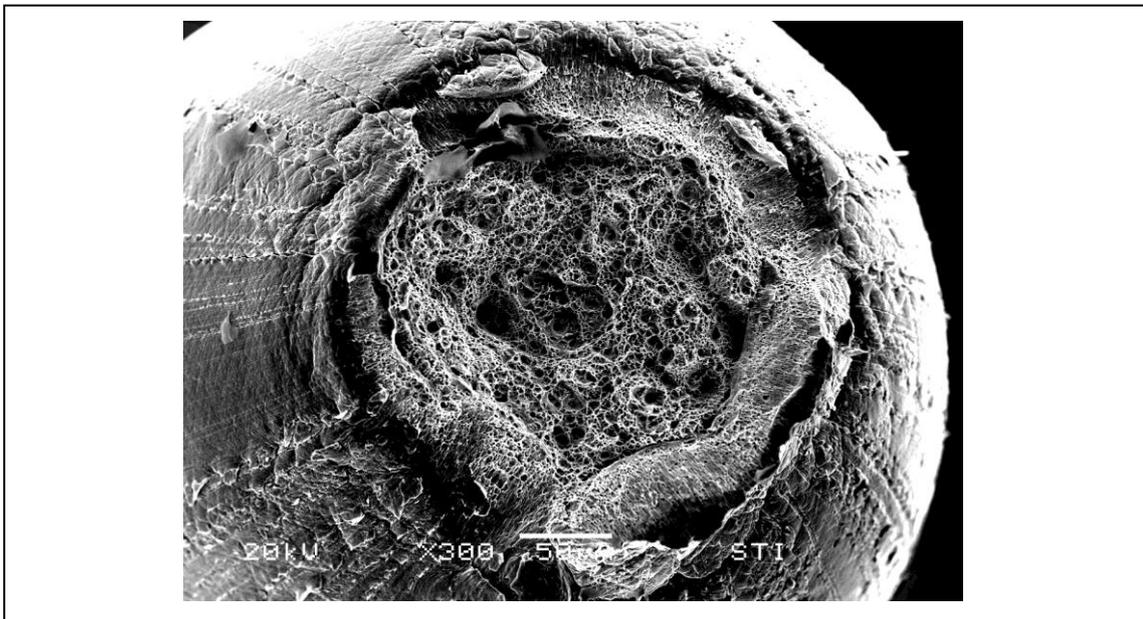
Die **Abbildung 4** zeigt eine Detailaufnahme solcher Schwingungslinien in 3.300-facher Vergrößerung.

Abbildung 4

Schwingungslinien

Nachdem eine gewisse Anzahl der Drähte gebrochen ist, versagt der restliche Seilquerschnitt durch die erhöhte Zugspannung innerhalb sehr kurzer Zeit. Dabei treten an den Drähten Überlastbrüche auf, die je nach Drahtlage als so genannte Einschnürungsbrüche durch überwiegend axiale Zugkräfte oder als Scherbrüche ausgebildet sind. Die letzteren treten dann auf, wenn zusätzlich zur Zugkraft noch eine lokale Querpressung durch die Nachbardrähte erfolgt. Dies ist besonders dann der Fall, wenn es zu einer Verjüngung des Seils durch Zugbeanspruchungen kommt. Ein solcher Überlastbruch ist in der **Abbildung 5** dargestellt.

Abbildung 5

Einschnürungsbruch, CuMg (Bz II)

Idealerweise sollte ein Austausch des Hängerseils erst dann erforderlich sein, wenn durch die verschleißbedingte Querschnittabnahme des Fahrdrahtes so-wieso eine umfangreiche Revision an der Bahnstrecke erforderlich ist. Durch eine Optimierung der beeinflussbaren Parameter und durch umfangreiche Prüfungen soll dies erreicht werden.

Ermittlung der realen Belastungszustände

Um ein Prüfen der Hängerseile unter den realen Bedingungen zu ermöglichen, bzw. Ergebnisse aus den einzelnen Prüfverfahren richtig interpretieren zu können, muss, wie bereits erwähnt, der reale Belastungsfall bekannt sein. So wurden zu-nächst an einer unbefahrenen stromlosen Teststrecke Versuche durchgeführt, sowie an einer Hochgeschwindigkeitsbahnstrecke mit Hilfe von hochauflösenden Filmaufzeichnungen der Belastungszustand eines Hängerseils sowohl bei der Durchfahrt von einem als auch von zwei Pantografen im Zugverband analysiert. Die dabei ermittelten Kräfte stimmen zudem sehr gut mit

Versuchsdaten anderer Institute überein, die aus entsprechender Fachliteratur entnommen werden konnten. Dabei wurde erkannt, dass die bisher durchgeführten Dauerprüfungen bei nkt cables zwar in ihrer Belastungsfolge denen an der Bahnstrecke sehr ähnlich sind, aber in der Größe der Zugkraft und der Biegungsamplitude deutlich darüber liegen.

Verwendete Prüfmethode

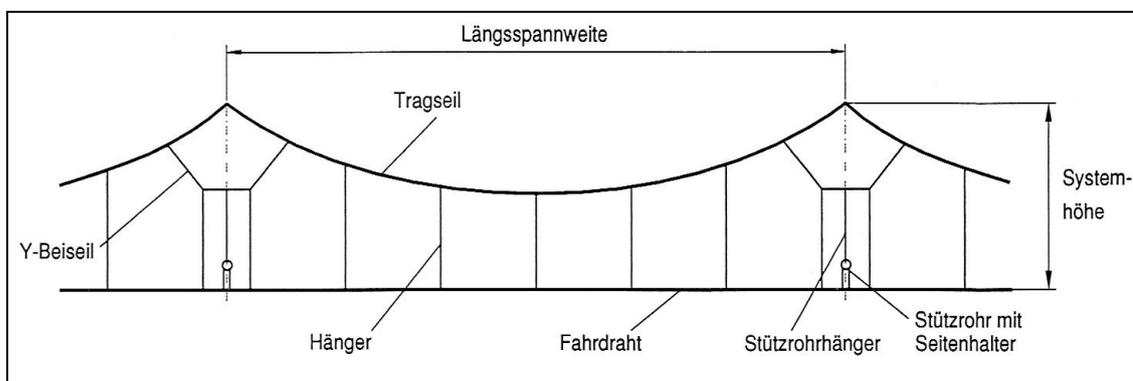
Bei den gängigen Seilprüfmethode spielen Seile aus Kupferlegierungen eine eher untergeordnete Rolle. Die am meisten verwendeten Seile sind Stahlseile in der Fördertechnik und als Befestigungselemente. Daher sind deren Prüfverfahren aufgrund des bereits erwähnten auftretenden Belastungskollektivs für Hängerseile nicht hinreichend einsetzbar. Da die bisherige Norm für Oberleitungen /11/ zwar die Anforderungen für die Hängerseile definiert, nicht aber die Prüfmethode dazu erläutert, fehlt derzeit noch der Vergleich der unterschiedlichen Lebensdauerangaben bei Hängerseilen verschiedener Hersteller. Dadurch kann ein Dauertest mit einer sehr hohen Schwingspielzahl, aber eher niedrigen Zugkraft- und Biegeamplituden, eine höhere Lebensdauer suggerieren, als ein Seil, das im Test wesentlich höheren Beanspruchungen als an der Bahnstrecke ausgesetzt ist, und daher auf den ersten Blick weniger Lastwechsel erträgt. Daher müssen Angaben bzgl. Lastwechsel immer im Kontext mit den Prüfmethode betrachtet werden, was jedoch in der Regel nicht möglich ist, da hierzu bei nur wenigen Herstellern aussagekräftige Angaben zu entnehmen sind.

Ein weiterer großer Einflussfaktor auf die Lebensdauer der Hängerseile ist die Art und Ausführung der Seilendverbindungen. Diese hat bei den gängigen stromfesten Hängern die Aufgabe, sowohl die mechanische als auch die elektrische Verbindung zwischen dem Fahrdraht und dem Tragseil über das Hängerseil herzustellen. Daher bilden Seil und Seilendverbindung eine Belastungseinheit. Analysen von Angaben aus der Instandhaltung von Oberleitungsanlagen und von den durchgeführten Seilprüfungen haben ergeben, dass häufig Seilbrüche im Einflussbereich der Seilendverbindungen entstehen. Das zeigt,

wie wichtig eine Eliminierung dieser Einflüsse bei der reinen Lebensdauerbetrachtung des Seils ist. Hingegen sind diese bei einer Produktoptimierung der Oberleitungsbaugruppe „Hänger“ von entscheidender Bedeutung. Eine vollständige Vermeidung der Einwirkungen der Seilendverbindung auf das Seil ist jedoch nicht möglich. Auch wenn das Seil bei Zugschwellbeanspruchung auf der freien Länge zwischen den Klemmen bricht, ist der Einfluss insbesondere dadurch wirksam, dass einzelne Litzen oder Drähte kürzer gefasst und damit stärker belastet sind. Das gilt besonders bei kürzeren Seilen /12/. Daher ist es wiederum wichtig, dass die Prüflinge den realen Längen angepasst werden. Wie in der **Abbildung 6** zu sehen ist, müssen die Hängerseile den geometrischen Bedingungen einer Oberleitung zwischen den Masten angepasst werden, und variieren daher in ihrer Länge.

Abbildung 6

Aufbau eines Längskettenwerkes /13/

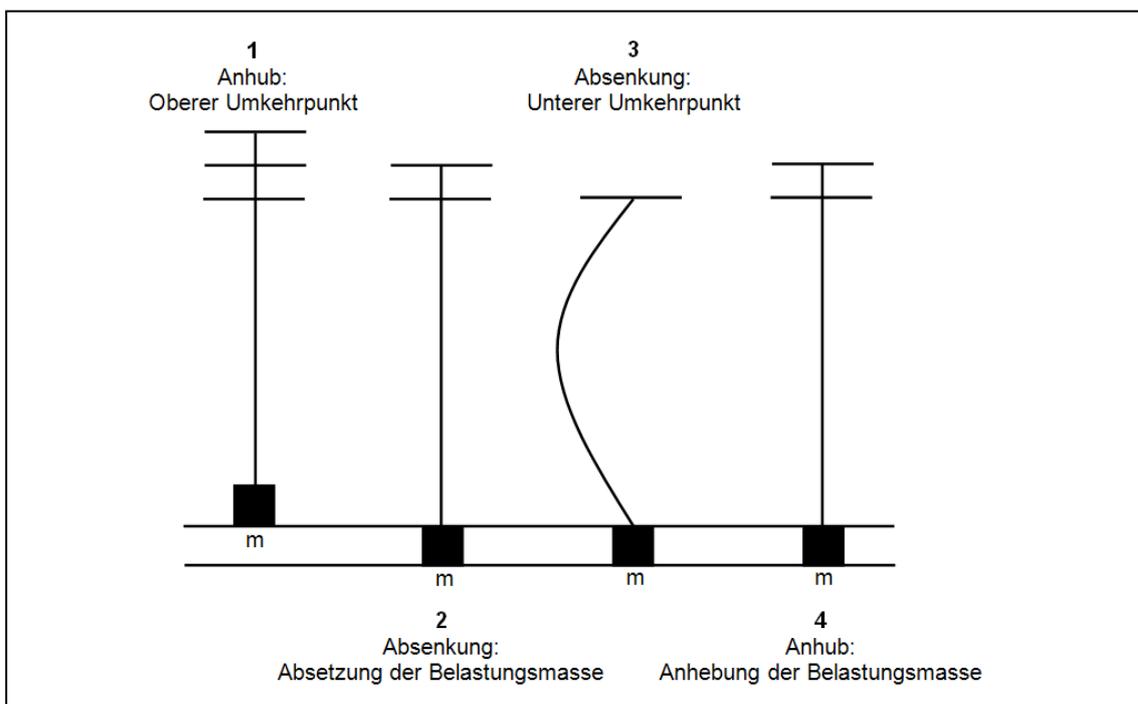


Bei der derzeit für die mechanische Ermüdungsprüfung bei nkt cables eingesetzten Prüfanlage lassen sich daher mehrere Seillängen parallel prüfen. Die dabei verwendete Prüfmethode, die in **Abbildung 7** schematisch dargestellt ist, wird im Entwurf der revidierten Fassung der EN 50119 erläutert. Sie besteht aus einem abwechselnden Last- und Stauchzyklus, wobei die Kraft im Hänger zwischen 100 N und 400 N betragen sollte, bei einer Stauchamplitude von 20 mm bis 200 mm. Dabei müssen mindestens 2.000.000 Zyklen bei einer Prüf-

frequenz zwischen 0,5 Hz und 10 Hz erreicht werden. Da die Beschleunigungskraft im Seil jedoch abhängig von der Hubfrequenz und der Drehzahl der Prüf-anlage ist, wurde ermittelt, dass für die geprüften Hänger mit einer Länge von 0,5 m selbst bei der niedrigsten Frequenz von 0,5 Hz und einer Gewichtskraft von 120 N die Gesamtkraft noch deutlich über der in der Norm aufgeführten Obergrenze von 400 N liegt. Dennoch wird bei nkt cables die Standard-Seilprüfung unter diesen harten Bedingungen durchgeführt. Die niedrige Frequenz hat zur Folge, dass der Prüfstand für 2.000.000 Zyklen über 46 Tage rund um die Uhr im Einsatz ist. Dies zeigt, wie zeitaufwendig die Langzeittests sind, um eine genügend große Anzahl von Ergebnissen zu bekommen. Die Prüfung nur einer Seillänge oder womöglich nur von Einzeldrähten stellt zwar unter Umständen eine gute Ergänzung zum Prüfprogramm dar, sollte aber aufgrund der Praxisferne nicht als alleinige Quelle für Lebensdauerangaben dienen.

Abbildung 7

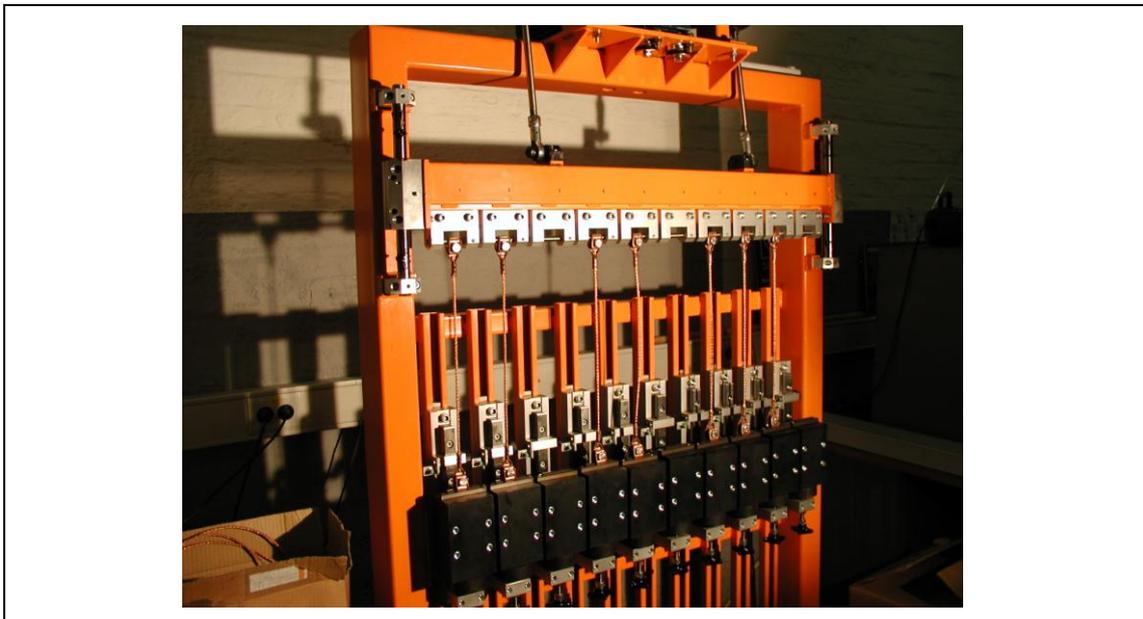
Schematischer Ablauf der Ermüdungsprüfung



Der aktuellen Literatur über Seile ist zu entnehmen, dass Seilbrüche im Klemmenbereich bei einer Versuchsauswertung nicht berücksichtigt werden sollen, um Aussagen über die reinen Seileigenschaften bei der kombinierten Zug-schwell-Biegeschwellbelastung erhalten zu können. In bereits durchgeführten Versuchen wurden daher durch entsprechende Maßnahmen die Klemmeneinflüsse soweit vermindert, dass seitdem am Prüfstand eine deutliche Zunahme der Brüche außerhalb der Klemmeneinflusszone (entspricht in der Regel etwa dem doppelten des Abstandes des Seildurchmessers /12/) zu verzeichnen ist. Derzeit wird untersucht, wie sich diese Erkenntnisse in der Praxis umsetzen lassen.

Abbildung 8

Prüfstand für Hängerseile bei nkt cables



Ergebnisse und Optimierungsansätze

Wie die vorangegangenen Betrachtungen gezeigt haben, handelt es sich bei einem Hängerseil um ein sehr komplex belastetes Bauteil, bei dem aufgrund der gestiegenen Anforderungen noch deutlicher Optimierungsbedarf besteht. Der Einsatz von Finite-Elemente-Methoden (FEM) bei Seilen liefert derzeit zwar schon gute Ansätze, kann aber jedoch erst langfristig in Verbindung mit herkömmlichen Methoden zu deren Verbesserung wirkungsvoll eingesetzt werden. Daher sind aufwendige experimentelle Untersuchungen und statistische Auswertungen nach wie vor sehr wichtig.

Um einen direkten Vergleich der Herstellerangaben bzgl. der erreichbaren Zyklenzahlen in Anbetracht der Prüfmethode zu ermöglichen, soll das Prüfverfahren und die Parameter in einer Neufassung der EN 50119 vereinheitlicht werden. Die dabei bei nkt cables gewonnenen wertvollen Erkenntnisse werden dabei hilfreich sein.

Neben einer ständigen Verbesserung des Werkstoffes ist es bei nkt cables auch ein wichtiges Ziel, die Prüfmethode so zu optimieren, dass sie mit einem vertretbaren Aufwand möglichst nahe den realen Bedingungen entsprechen. Durch eine systematische Auswertung der Schwingspielzahlen im Prüfstand und des Bruchgefüges der einzelnen Drähte lassen sich Aussagen über die eigentliche Versagensursache treffen. So ist z. B. die prozentuale Verteilung der verschiedenen Brucharten bei einem Seilbruch im Prüfstand ein wichtiges Indiz dafür, ob das Prüfverfahren auch für die gestellte Aufgabe geeignet ist. Eine auffällig hohe Anzahl von Überlastbrüchen in Kombination mit einer verhältnismäßig niedrigen Zyklenzahl würde auf zu große Prüfkräfte hindeuten. Da es sich bei der Oberleitung um ein relativ „weiches System“ handelt, sind die Beschleunigungskräfte beim Anhub und Absenken der Fahrdrahtmasse nicht so hoch wie bei dem derzeit verwendeten Prüfstand. Dort kommt es beim Anheben des Prüfgewichts zu Spannungsspitzen, die derzeit um den Faktor 3,5 höher sind, als die an der Bahnstrecke. Darum ist eine Kompensation der zu hohen Beschleunigungskräfte unter Beibehaltung der bewährten Zugkräfte ein weiterer Schritt zur Anpassung der Prüfbedingungen.

Derzeit werden bei nkt cables im Dauerversuch Hängerseile aus der Legierung CuMg (Leitbronze II) sowie einer Cu-Mehrstofflegierung geprüft (s. o.). Die verschiedenen Werte können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 1

Prüfergebnisse von Hängerseilen

Legierung	Prüfergebnisse in Millionen Lastwechsel		
	Min.	Max.	Mittelwert
CuMg (Bz II)	1,513	3,884	2,235
Cu-Mehrstofflegierung	1,031	2,701	1,841

Die dabei erreichten Lastwechselzahlen entsprechen derzeit noch nicht bei allen Prüflingen den im Entwurf der revidierten Fassung der EN 50119 geforderten Werten. Dies ist ganz klar ein Resultat der zu harten Prüfbedingungen, welche deutlich über den Beanspruchungen im Kettenwerk liegen. Nach ersten Optimierungsschritten liegen einige Prüflinge bei deutlich über 2.000.000 Lastwechseln. Entscheidend für die Aussagefähigkeit der Ermüdungstestergebnisse sind praxisrelevante und reproduzierbare Prüfbedingungen im Rahmen der EN 50119. Unter diesen Voraussetzungen kann davon ausgegangen werden, dass bereits mit den derzeit verwendeten Legierungen ein Ermüdungsverhalten erreicht wird, dass den hohen geforderten Zyklenzahlen sicher entspricht.

Ausblick

Mit Hilfe weiterer Untersuchungen in Kooperation zwischen nkt cables, dem Institut für Metallformung an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg und dem Werkstoffentwicklungs- und Prüflabor an der Hochschule Pforzheim, werden zukünftig Seile entstehen, die einer noch höheren Belastung an der Bahnstrecke standhalten können. Damit werden sie einen wichtigen Beitrag

zur Erhöhung der Sicherheit und Verfügbarkeit bei gleichzeitig steigender Geschwindigkeit und Auslastung leisten.

Literatur

- /1/ C. Müller: Aktiv geregelter Stromabnehmer, EI – Eisenbahningenieur (2003), Heft 10, S. 32 – 33, Tetzlaff Verlag
- /2/ C. de Barrin: Copper in the transport systems of the future: The example of the high-speed train. European Copper Institute, 2007
- /3/ H. Biesenack, G. George, G.Hofmann, A. Schmieder: Energieversorgung elektrischer Bahnen. B.G. Teubner Verlag, 2006
- /4/ U. Richter, R. Schneider: Automatische optische Inspektion von Oberleitungen. EI – Eisenbahningenieur (2001), Heft 2, S. 18 – 23, Tetzlaff Verlag
- /5/ S. Ziegler, K.-H. Wehking: Drahtschwingfestigkeit und Seillebensdauer - Zuverlässiges Berechnungsmodell, Hebezeuge Fördermittel (2007), Heft 4, S. 192 – 195, Huss-Medien GmbH
- /6/ A. Klöpfer: Untersuchung zur Lebensdauer von zugschwellbeanspruchten Drahtseilen. Dissertation, Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, 2002
- /7/ J. Rösler, H. Harders, M. Bäker: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. B.G. Teubner Verlag, 3. Auflage, 2008
- /8/ G. Schott: Werkstoffermüdung – Ermüdungsfestigkeit. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 4. Auflage, 1997
- /9/ D. Radaj, M. Vormwald: Ermüdungsfestigkeit. Springer-Verlag, 3. Auflage, 2007
- /10/ B. Heine: Werkstoffprüfung. Fachbuchverlag Leipzig, 2003

- /11/ DIN EN 50119: Oberleitungen für den elektrischen Zugbetrieb. Beuth Verlag, Januar 2002
- /12/ K. Feyrer: Drahtseile. Springer-Verlag. 2. Auflage, 2000
- /13/ F. Kießling, R. Puschmann, A. Schmieder, P. Schmidt: Fahrleitungen elektrischer Bahnen. B.G. Teubner Verlag, 2. Auflage, 1998

Hanns Ruder

**Was auch Einstein sicher gern gesehen hätte - Visualisierung
relativistischer Effekte**

Manchem mag die Einsteinsche Relativitätstheorie als der Inbegriff einer abstrakten, unanschaulichen Theorie erscheinen. Dabei haben sowohl die Spezielle als auch die Allgemeine Relativitätstheorie höchst anschauliche Auswirkungen. Besser gesagt, sie hätten — wenn wir jeden Tag mit 90% der Lichtgeschwindigkeit zu unserem Arbeitsplatz in der Nähe eines Schwarzen Loches pendeln würden, wobei vielleicht noch ein Wurmloch zu passieren wäre. Dies ist heute leider genauso wenig möglich wie zu Zeiten Einsteins. Zum Glück gibt es inzwischen aber leistungsfähige Computer, die es uns wenigstens erlauben, die visuellen Effekte sichtbar und sogar erfahrbar zu machen.

Als sichtbarer Effekt der Speziellen Relativitätstheorie fällt einem als Erstes wohl die Längenkontraktion ein: Ein bewegtes Objekt erscheint in Bewegungsrichtung um den Faktor

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1)$$

verkürzt; hier ist v die Geschwindigkeit des Objekts relativ zum Beobachter, c bezeichnet die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Senkrecht zur Bewegungsrichtung bleiben alle Längen unverändert.

Man muss nicht allzu kühn sein, um zu vermuten, dass man die Längenkontraktion nicht nur messen, sondern bei sehr hohen Geschwindigkeiten auch unmittelbar sehen kann. Abb. 1 zeigt die Erde mit einem Teleskop aus der Entfernung der Mondbahn betrachtet. Abb. 1.a ist das gewohnte Bild, das entsteht, wenn Erde und Betrachter zueinander ruhen; es verändert sich nur unmerklich, solange die Geschwindigkeit einer Relativbewegung sehr viel niedriger als die Lichtgeschwindigkeit ist. Abb.1.b zeigt die längenkontrahierte Erde, wie wir sie sehen könnten, wenn die Lorentzkontraktion unmittelbar sichtbar wäre. Die Bewegung verläuft in Richtung der Polachse mit einer Geschwindigkeit von 95% der Lichtgeschwindigkeit.

Abb. 1.a

Das gewohnte Bild der Erde, mit einem starken Teleskop aus der Entfernung der Mondumlaufbahn betrachtet. Der Beobachter bewegt sich relativ zur Erde nicht.



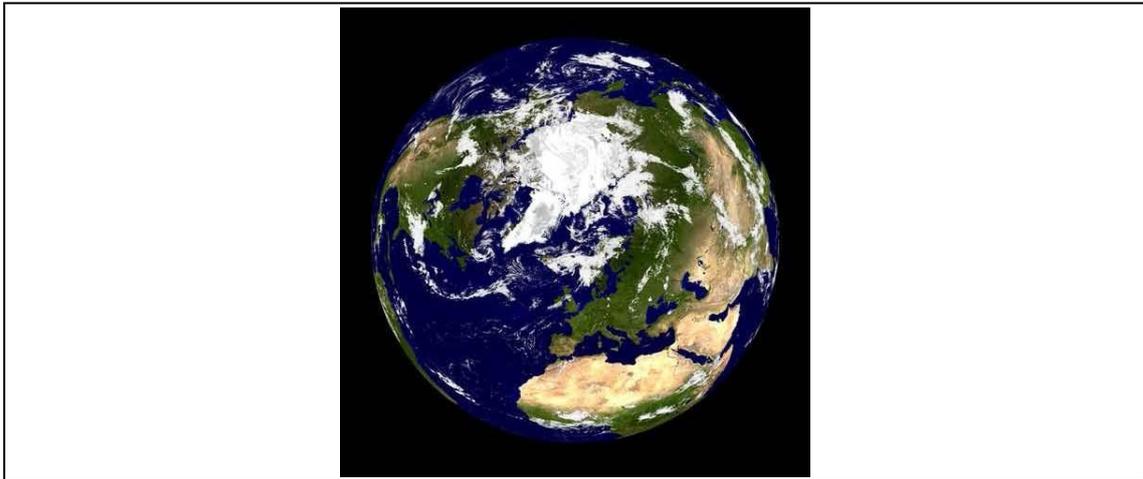
Abb.1.b

Die längenkontrahierte Erde, wie wir sie sehen könnten, wenn die Lorentzkontraktion unmittelbar sichtbar wäre. Die Bewegung verläuft in Richtung der Polachse mit einer Geschwindigkeit von 95% der Lichtgeschwindigkeit.



Abb. 1.c

Die Erde, wie sie sich tatsächlich zeigt, wenn der Beobachter sich mit 95% der Lichtgeschwindigkeit an ihr vorbei bewegt. Die Auswirkungen der endlichen Lichtlaufzeit kompensieren weitgehend den Einfluss der Längenkontraktion auf das Bild, so dass der Umriss der Erde wieder genau kreisförmig erscheint.



Dabei kommt es nur auf die relative Bewegung an: Das Relativitätsprinzip besagt, dass es keinen absoluten Bezug für Bewegung an sich gibt; es kommt immer nur auf die relative Bewegung von Objekten oder Bezugssystemen an. Dieses Relativitätsprinzip war auch schon durch die Galilei-Invarianz der klassischen Mechanik realisiert. Als neues Element der speziellen Relativitätstheorie kommt hinzu, dass die Geschwindigkeit eines Lichtstrahls im Vakuum — genauer gesagt: jeder physikalischen Erscheinung, die keine Ruhemasse aufweist, und die sich im Vakuum ausbreiten kann — in jedem Bezugssystem die gleiche ist, auch wenn sich verschiedene Bezugssysteme ihrerseits gegeneinander bewegen. Geschwindigkeiten können daher nicht mehr, wie gewohnt, einfach zueinander addiert werden.

In Abb.1.b spielt es dank des Relativitätsprinzips keine Rolle, ob wir uns vorstellen, dass die Erde am Beobachter vorbeifliegt, oder umgekehrt. Abb. 1.b ist jedoch fiktiv: ein realistisches Bild kommt selbst durch Lichtstrahlen zustande. Dabei spielt ein sehr elementarer Effekt, nämlich die endliche Geschwindigkeit des Lichts, eine wichtige Rolle. Abb. 1.c berücksichtigt die dadurch bedingte

endliche Lichtlaufzeit und zeigt daher, was wir bei der genannten Geschwindigkeit tatsächlich sehen. Das Resultat erstaunt: Man hätte wohl erwartet, dass das Bild noch kurioser aussieht als Abb. 1b. In Wirklichkeit kompensiert der Effekt der Lichtlaufzeit aber einen erheblichen Teil der Veränderungen die die Längenkontraktion verursacht hat. Der Umriss der Erde ist wieder genau kreisförmig, auf den ersten Blick erkennt man hauptsächlich eine Drehung des gewohnten Bildes.

So simpel dieser Effekt also ist, so hat die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit dennoch einen genauso großen Einfluss auf das endgültige Bild wie die Längenkontraktion. Spätestens seit den Arbeiten von Olaf Römer ist aber bekannt, dass Licht sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet; sogar den Wert dieser Geschwindigkeit hatte Römer recht gut bestimmen können. Hat sich also jemals ein Physiker vor Einstein überlegt, welche Auswirkungen das bei einem Blick aus dem Fenster während einer sehr schnellen Reise hat? Anscheinend nicht. Dabei wäre er nämlich auf interessante Ergebnisse gestoßen: Entsprechend dem Stand der Physik vor 1900 muss er sich zunächst entscheiden, ob er die Maxwell-Gleichungen im Bezugssystem der Erde oder im Bezugssystem des Beobachters lösen will. Die Maxwellgleichungen sind die Grundgleichungen der Elektrodynamik und bestimmen daher auch die Ausbreitung des Lichts als elektromagnetische Welle. In der Sprache der Physik des 19. Jahrhunderts kann man diese Unterscheidung auch als die Frage formulieren, ob die Erde sich relativ zum Äther bewegt, oder aber der Beobachter, oder möglicherweise beide.

Abb. 2.a

Dieses Bild der Erde hätte ein Physiker vor Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie erwartet, und zwar für den Fall, dass die Erde im absoluten Raum ruht und der Beobachter sich mit 95% der Lichtgeschwindigkeit relativ dazu bewegt.

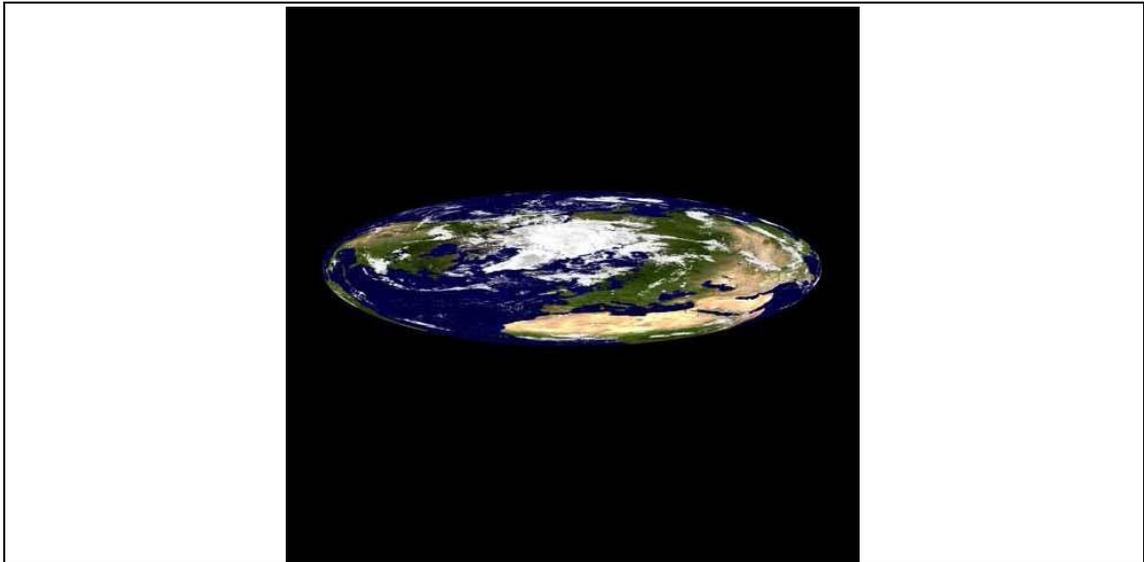
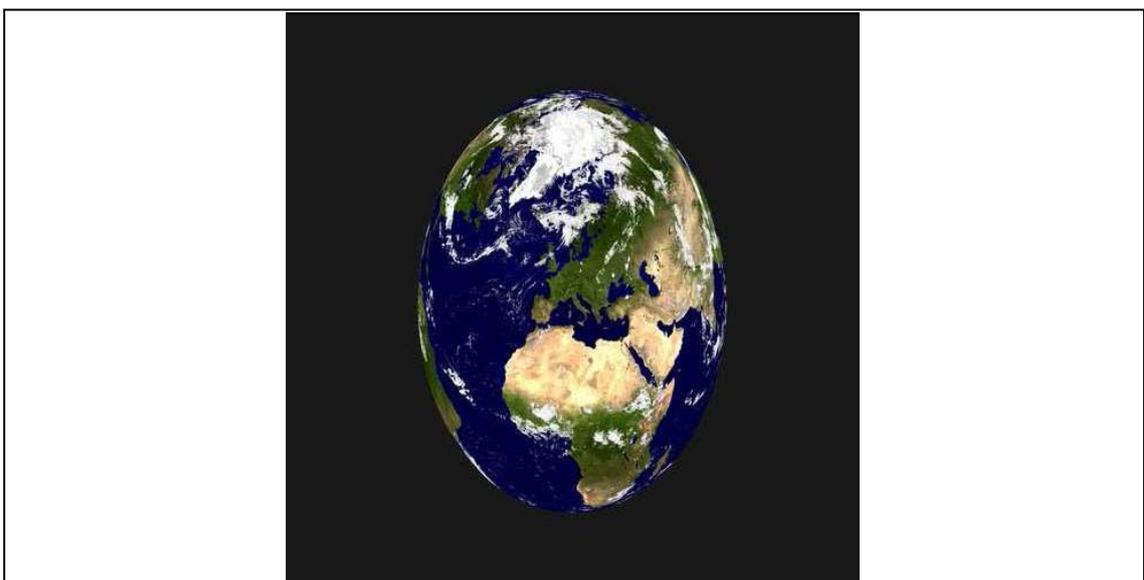


Abb. 2.b

Der gleiche Physiker müsste dieses Bild vorhersagen für den Fall, dass die Erde sich gegen den Äther bewegt und der Beobachter ruht.



Das Ergebnis ist unterschiedlich, je nachdem, ob wir die Erde oder den Beobachter als bewegt ansehen. So etwas galt bei den Physikern auch schon vor der Einsteinschen Relativitätstheorie als problematisch. Die Gleichungen der Newtonschen Mechanik sind nämlich invariant gegenüber einem Wechsel von einem Inertialsystem zu einem anderen. Auch hier sollte also nur die relative Bewegung eine Rolle beim Ausgang eines Experiments spielen.

Was wir in Abb. 2 anschaulich dargestellt sehen, ist eines der Hauptprobleme der Physik im ausgehenden 19. Jahrhundert: Die Maxwellgleichungen gehorchen einer anderen Art von Invarianz als die Newtonsche Mechanik. Die beiden sind also gewissermaßen nicht miteinander verträglich. Nicht von ungefähr gab Einstein seiner grundlegenden Arbeit zur Speziellen Relativitätstheorie den Titel: „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“.

Kehren wir also ins beginnende 21. Jahrhundert zurück, in dem diese Probleme gelöst sind, die Spezielle Relativitätstheorie hervorragend experimentell bestätigt ist und ihren festen Platz in der Physik hat. Wir haben in Abb. 1.c bereits gesehen, dass der Umriss der Erde kreisförmig bleibt, auch wenn sich der Betrachter mit hoher Geschwindigkeit an ihr vorbei bewegt; die Längenkontraktion wird durch den Lichtlaufzeiteffekt in dieser Hinsicht ausgeglichen. Dennoch wird das Bild gegenüber dem Fall ohne relative Bewegung verändert, was in Abb. 1.c nicht so deutlich zu erkennen ist. In Abb. 3 wurde daher ein Netz aus Längen- und Breitenkreisen über die Erde gelegt; die Verzerrung ist hier deutlich zu sehen.

Bisher haben wir nur die geometrischen Veränderungen gezeigt, die das Bild eines schnell bewegten Gegenstandes erfährt. Zwei weitere Effekte sind der Dopplereffekt und der Searchlight-Effekt. Der Dopplereffekt ist uns in seiner akustischen Variante vertraut: Nähert sich ein Einsatzfahrzeug mit großer Geschwindigkeit, ist der Ton seiner Sirene zu höheren Frequenzen verschoben, entfernt es sich wieder, wird der Ton sehr viel tiefer. Das gleiche passiert mit der Frequenz des Lichts, das von einem Objekt stammt, das sich mit relativistischer Geschwindigkeit auf uns zubewegt: Vor allem in der Mitte des Bildes erkennen wir eine starke Verschiebung zu blauen Farben hin. Entfernt sich das

Objekt von uns, sehen wir es dagegen stark nach Rot verschoben. [Abb. 4]

Abb. 3.a

Zur Verdeutlichung der Verzerrung bei relativistischer Bewegung ist hier ein Netz von Längen- und Breitenkreisen über die Erde gelegt. In diesem Referenzbild ruht der Beobachter relativ zur Erde; der Standpunkt liegt diesmal $1/3$ des Erdradius über der Erdoberfläche.

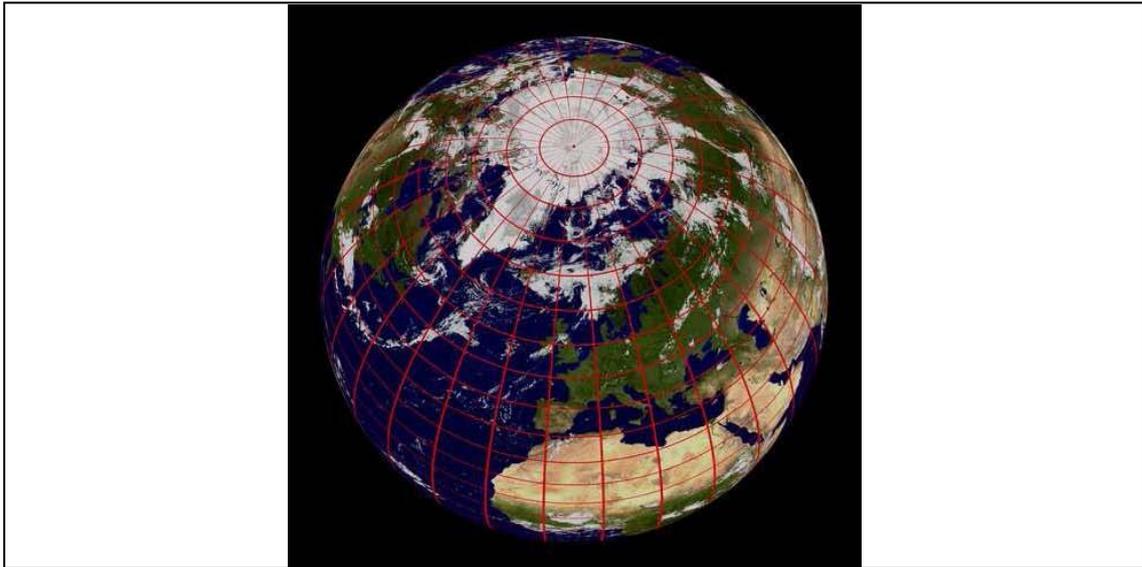
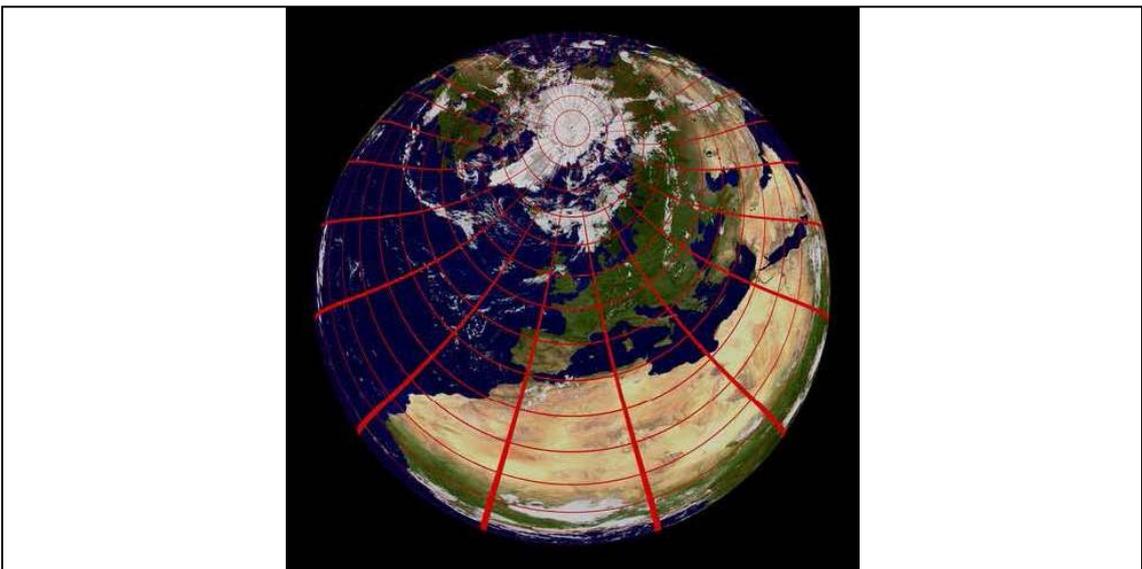


Abb. 3.b

Hier bewegt sich der Betrachter mit 99,9% der Lichtgeschwindigkeit relativ zur Erde. Der Abstand zur Erdoberfläche ist der gleiche wie in Abb. 3.a.



Der Searchlight-Effekt beruht teilweise auf der Aberration der Lichtstrahlen. Aberration bedeutet, dass Lichtstrahlen bei schneller Bewegung bevorzugt von vorne zukommen scheinen. Auch dieser Effekt hat eine Analogie im Alltag: Fährt man schnell durch fallenden Schnee, so scheinen die Schneeflocken hauptsächlich von vorne zu kommen, obwohl sie tatsächlich (bei Windstille) gleichmäßig von oben nach unten sinken. Da die Lichtstrahlen also gewissermaßen gebündelt werden, ist der unmittelbar vor einem liegende Teil des Bildes erheblich heller als seitliche Teile, oder gar das Bild bei einem Blick nach hinten. [Abb. 5]

Nicht nur der Raum, auch die Zeit ist bei Einstein nicht mehr, was sie bei Newton einmal war. Was die Längenkontraktion für den Raum das ist die Zeitdilatation für die Zeitdimension der vierdimensionalen Raumzeit: Der Zeitablauf in einem bewegten System erscheint um den gleichen Faktor (s. Gl.(1)) verlangsamt. Dies sieht man sehr schön an Myonen, die in ca. 10km Höhe durch die kosmische Höhenstrahlung erzeugt werden. Diese Myonen bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit. Da sie eine mittlere Lebensdauer von ca. $2,2\mu\text{s}$ ($1\mu\text{s}$ ist ein Millionstel einer Sekunde) haben, würde man vielleicht erwarten, dass sie im Mittel ca. 660m weit kommen, bevor sie wieder zerfallen. Trotzdem weist man aber noch am Erdboden eine relativ große Zahl von Myonen nach. Tatsächlich ist die Flugzeit des Myons, würde sie im Bezugssystem der Erde gemessen, erheblich länger; im bewegten Bezugssystem des Myons dagegen ist dank der Zeitdilatation nur so viel Zeit vergangen, wie es der Lebensdauer des Myons entspricht.

Dennoch wird im Bezugssystem des Myons die gleiche Geschwindigkeit relativ zur Erde gemessen. Zwar ist die verstrichene Zeitspanne kürzer; vom System des Myons aus ist jedoch die Erde bewegt, so dass die Entfernung vom Entstehungsort zum Erdboden längenkontrahiert ist und damit um den gleichen Faktor kürzer erscheint wie die verstrichene Zeit.

Dabei ist wichtig, dass man die Bezugssysteme nicht unzulässig kombiniert; dies führt unweigerlich zu widersprüchlichen Ergebnissen. Bestimmt man etwa im obigen Beispiel die Länge der vom Myon zurückgelegten Strecke im Ruhesystem der Erde (wie man das normalerweise tun wird) und nimmt die Lebens-

dauer als Obergrenze für die Flugzeit, so folgert man irrtümlich, dass das Myon erheblich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs war. Ein gleichermaßen falsches Ergebnis erhält man, wenn man für einen Raumflug beispielsweise zum Zentrum unserer Milchstraße die von der Erde ausgemessene Entfernung, ca. 30 000 Lichtjahre, durch die im Raumschiff gemessene Reisezeit dividiert.

Abb. 4

Dopplereffekt

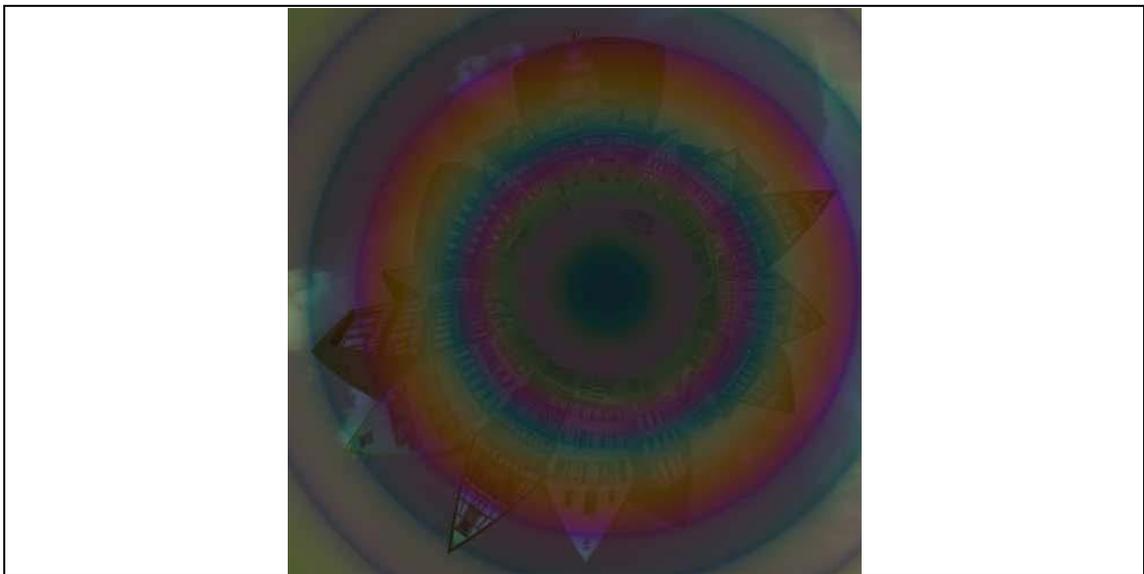


Abb. 5

Searchlight-Effekt



Abb. 6 zeigt den Tübinger Marktplatz von oben aus der Sicht eines Myons, kurz bevor es mit knapper Lichtgeschwindigkeit den Erdboden erreicht.

Allgemeine Relativitätstheorie

Bisher haben wir uns mit den visuellen Effekten der speziellen Relativitätstheorie beschäftigt. Auch die allgemeine RT hält eine erstaunliche Fülle von optisch eindrucksvollen Kuriositäten bereit. Eine Bewegung des Objekts relativ zum Beobachter ist dabei nicht erforderlich. Ursache der Verzerrungen ist vielmehr die relativistische Lichtablenkung, also die Tatsache, dass sich Photonen nicht mehr auf Geraden im Raum bewegen. Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie werden nämlich nicht nur die Bahnen massiver Körper durch andere Massen beeinflusst, sondern auch die Bahnen von Photonen, d.h. also Lichtstrahlen.

Formal kommt dies daher, dass sich Photonen, ebenso wie massive Körper, auf so genannten Geodäten der Raumzeit bewegen. In einer gekrümmten Raumzeit spielen Geodäten die gleiche Rolle wie Geraden in einer euklidischen Raumzeit (also einem flachen Raum mit einer unabhängigen überall gleich ablaufenden Zeit): Sie sind die kürzesten Verbindungen zwischen zwei Punkten. Die Krümmung der Raumzeit wird ihrerseits von allen vorhandenen Massen erzeugt.

Anschaulich kann man diese Lichtablenkung verstehen, indem man sich an die berühmte Formel $E = mc^2$ erinnert: Da Photonen Energie besitzen, kann man ihnen eine Masse (wenn auch keine Ruhemasse) zuordnen. Auf diesem Wege kann man sogar im Rahmen der Newtonschen Gravitationstheorie die Bahn eines Photons berechnen. Das Ergebnis ist qualitativ ähnlich, als Ablenkung kommt aber nur die Hälfte des korrekten relativistischen Wertes heraus. Der Unterschied lässt sich auf die allgemein relativistische Zeitdilatation zurückführen: In der Nähe großer Massen vergeht die Zeit langsamer als weit davon entfernt.

Historisch lieferte die Ablenkung von Lichtstrahlen, die nahe an der Sonne vorbeilaufen, eine der ersten Möglichkeiten, die Vorhersagen der Allgemeinen Re-

lativitätstheorie zu überprüfen. Die Gelegenheit dazu bot sich bei der Sonnenfinsternis von 1919; der theoretisch vorhergesagte Wert von $1,75''$ konnte eindrucksvoll bestätigt werden. Mittlerweile lässt sich mit hochgenauen Radioteleskopmessungen sogar die Lichtablenkung am Rand der Erde nachweisen, obwohl diese nur 0,575 Tausendstel einer Bogensekunde beträgt!

Abb. 6

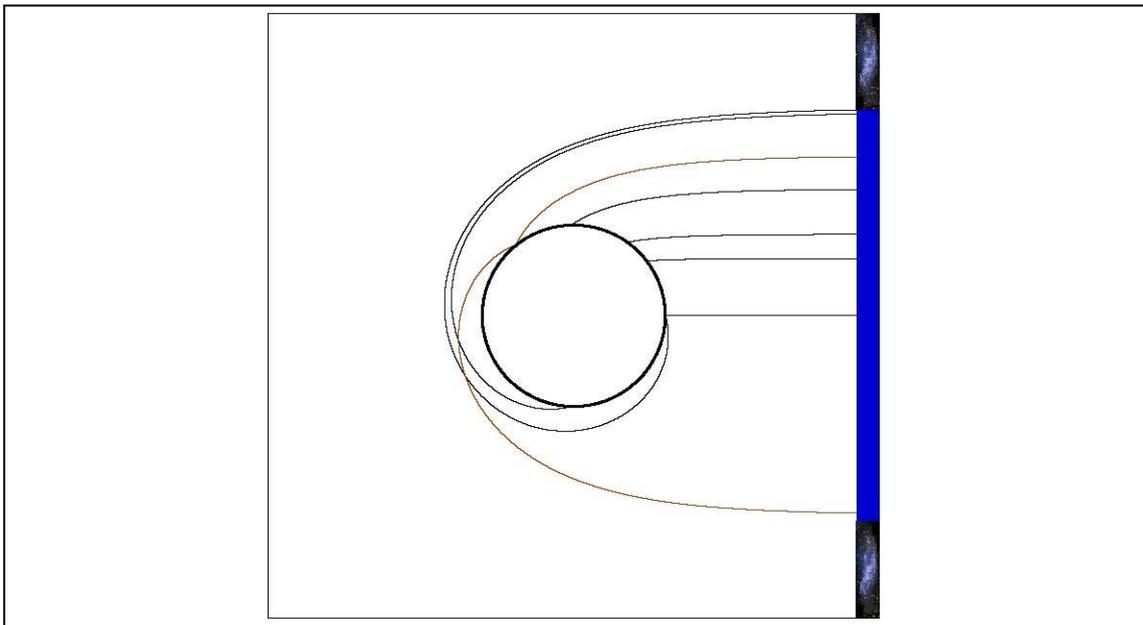
Ausblick beim senkrechten Sturz auf den Tübinger Marktplatz mit 90% der Lichtgeschwindigkeit.



Mit bloßem Auge lassen sich solche geringen Ablenkungen natürlich nicht erkennen. Deutlich sichtbar wird der Effekt aber, wenn wir die Ablenkung des Lichts an einem sehr kompakten Objekt, etwa einem Schwarzen Loch oder einem Neutronenstern, betrachten.

Abb. 7

Lichtstrahlen in der Umgebung eines sehr kompakten Neutronensterns.



Schauen wir also wieder auf unsere wohlbekannte Erde, wobei wir ein Schwarzes Loch — mit ausreichendem Sicherheitsabstand — vor der Erde vorbeiziehen lassen. Nähert sich das Schwarze Loch, wie in der Sequenz Abb.8 gezeigt, der Sichtlinie, wird das Bild zunächst in ähnlicher Weise verzerrt, wie dies der Fall wäre, wenn sich eine Linse zwischen Erde und Betrachter befände. Nicht von ungefähr spricht man ja von Gravitationslinsen — wobei nicht nur Schwarze Löcher, sondern auch Sterne, Galaxien oder ganze Galaxienhaufen als Gravitationslinsen wirken können. Befindet sich das Schwarze Loch schließlich genau auf der Linie zwischen Erde und Betrachter, so entsteht eine ringförmige Struktur, da nun Lichtstrahlen auf allen Seiten um das Schwarze Loch herum zum Betrachter gelenkt werden können. Abb.9 zeigt das Phänomen des Einsteinrings für Schwarze Löcher mit unterschiedlichen Massen, bei gleichen Abständen zwischen Erde, Schwarzem Loch und Betrachter.

Abb.8

Ein Schwarzes Loch durchquert den Bereich zwischen der Erde und dem Betrachter. Der Betrachter ist ca. 830 000 km von der Erde entfernt, also knapp das Dreifache der Entfernung zwischen Erde und Mond. Das Schwarze Loch zieht mit einem Abstand von ca. 240 000 km an der Erde vorbei, seine Masse beträgt das 326-fache der Masse unserer Sonne. Ist das Schwarze Loch nahe genug an der Sichtlinie, dann wird die Ablenkung stark genug, so dass Lichtstrahlen nicht nur rechts, sondern auch links um das Schwarze Loch herum den Betrachter erreichen können. Es erscheint daher ein zweites Abbild der Erde auf der anderen Seite des Schwarzen Loches. Dieses zweite Abbild ist spiegelbildlich zum Hauptbild; man erkennt dies besonders schön am Umriss von Afrika auf dem letzten Bild.

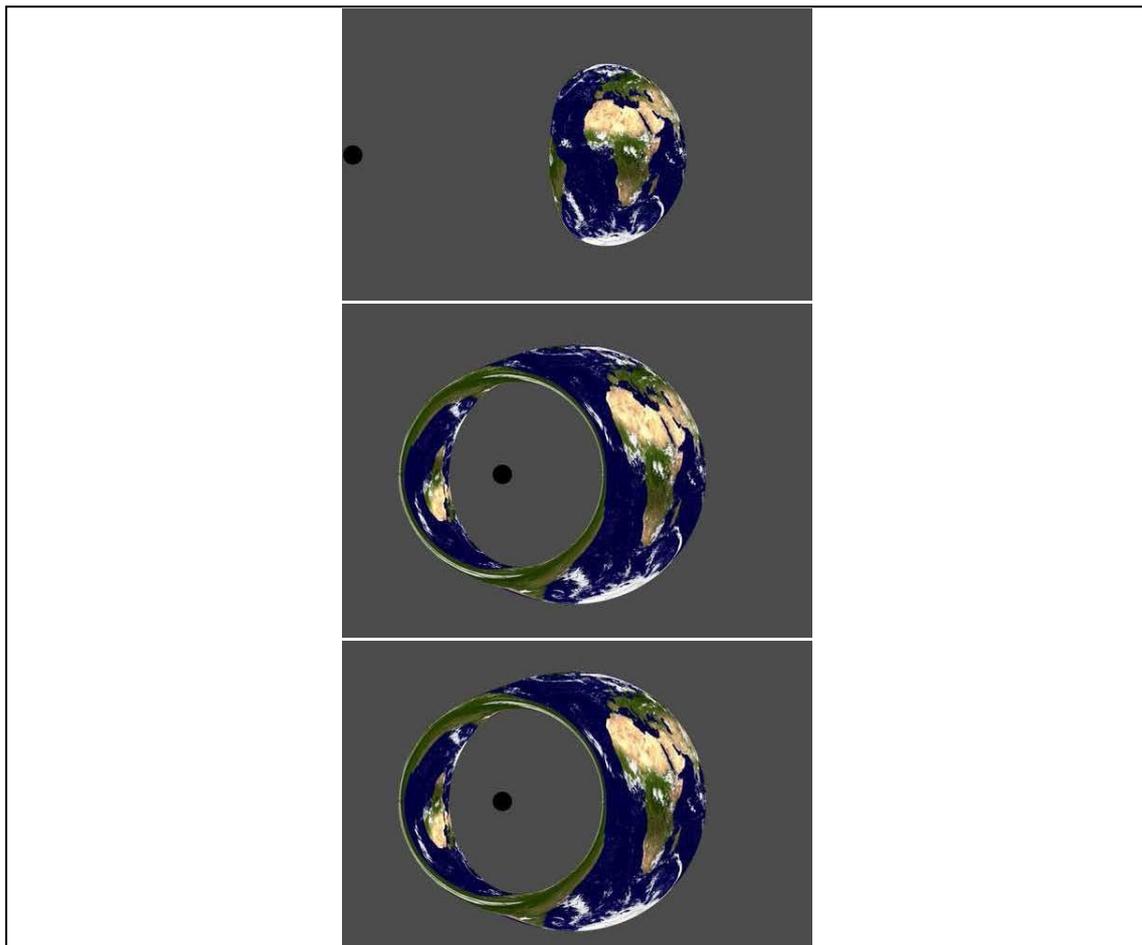


Abb. 9

Ein Schwarzes Loch befindet sich genau auf der Linie zwischen der Erde und dem Betrachter. Infolge der Symmetrie dieser Situation können Lichtstrahlen auf allen Seiten um das Schwarze Loch herum gelenkt werden. Die entstehende ringförmige Struktur bezeichnet man als Einsteinring. Im oberen Bild beträgt die Masse des Schwarzen Loches das 16,3-fache der Masse unserer Sonne, im mittleren Bild das 163-fache und im unteren das 326-fache. Die Abstände sind die gleichen wie in Abb. 8

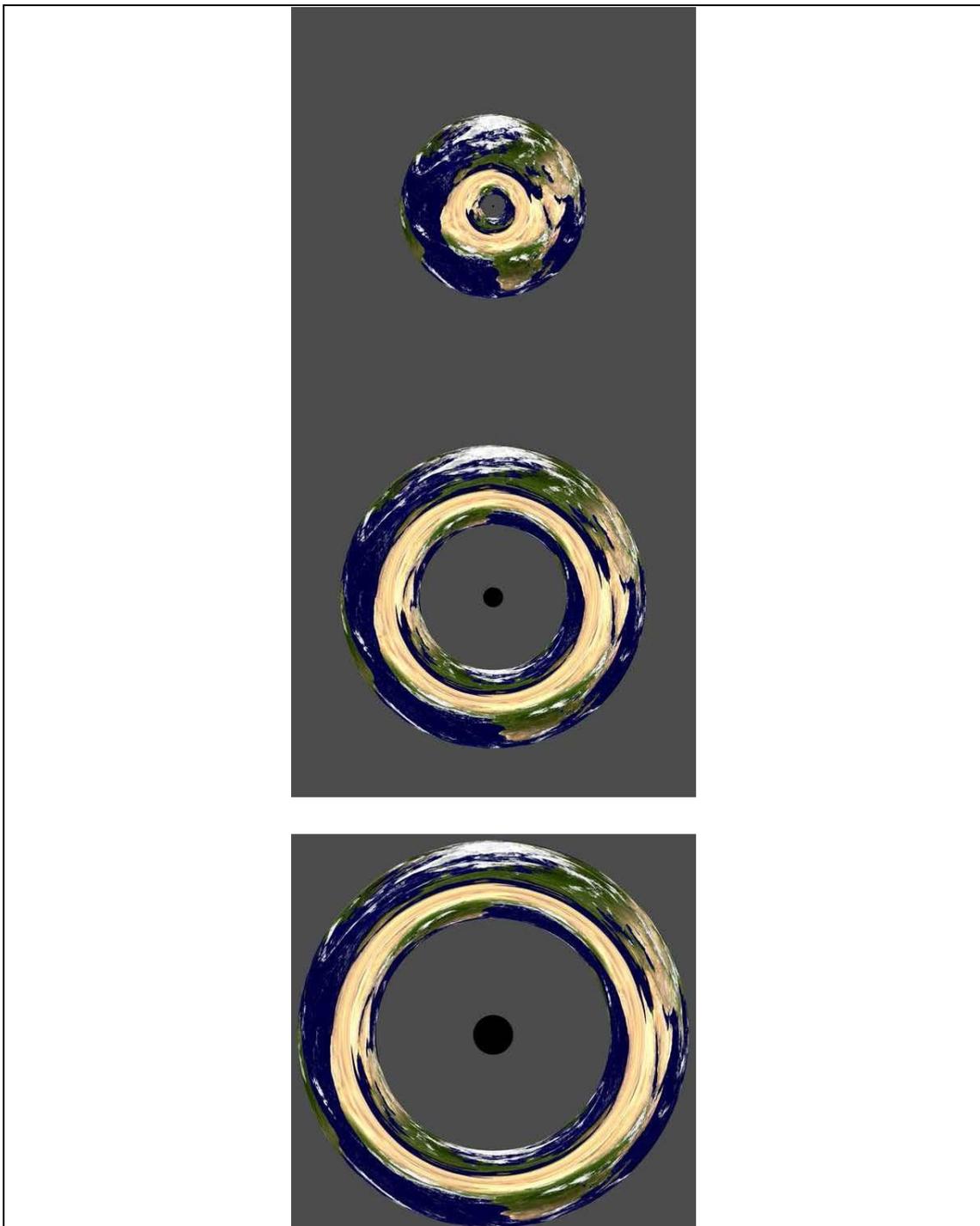


Abb. 10.a

Hier wirkt ein rotierendes Schwarzes Loch als Gravitationslinse und erzeugt einen Einsteinring, der infolge der Rotation asymmetrisch erscheint. Das Schwarze Loch rotiert mit der maximalen Geschwindigkeit, die die Relativitätstheorie erlaubt.

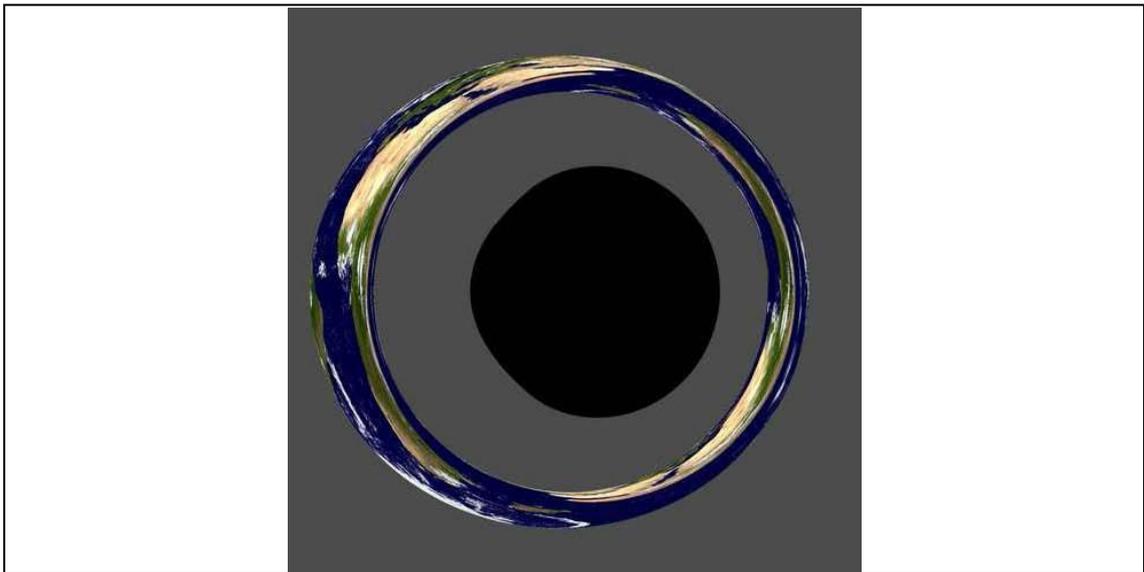
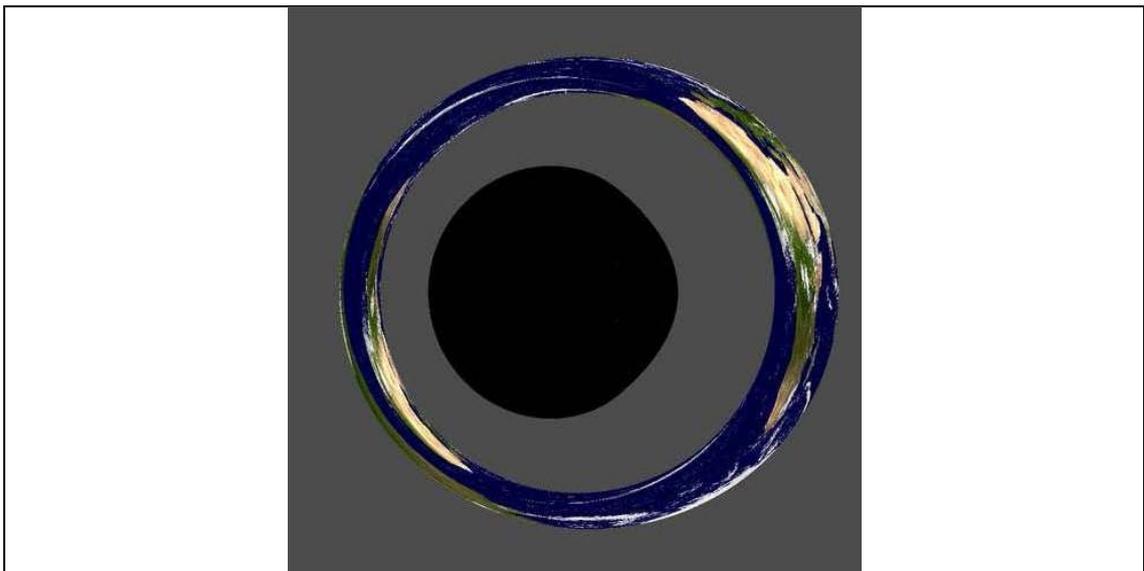


Abb. 10.b

Hier rotiert das Schwarze Loch entgegengesetzt zu dem im oberen Bild.



Nicht nur die Erde rotiert um ihre eigene Achse, alle Sterne im Universum, selbst Schwarze Löcher, tun dies ebenso. In der Newtonschen Gravitationstheorie hat die Rotation keinen Einfluss auf das Gravitationsfeld, das von einem Stern erzeugt wird. Anders in der Einsteinschen Relativitätstheorie: Hier entsteht ein Mitführungseffekt, der so genannte Lense-Thirring-Effekt, der die Bahnen von massiven Objekten wie auch von Photonen beeinflusst. Je nach Rotationsgeschwindigkeit und -richtung entsteht also beim Betrachter ein anderes Bild als ohne Rotation, wenn die Lichtstrahlen, die das Bild aufbauen, nahe an einem kompakten rotierenden Objekt vorbei gelaufen sind. Abb.10.a zeigt erneut einen Einsteinring, diesmal verursacht durch ein rotierendes Schwarzes Loch. Der Unterschied zum nicht rotierenden Fall ist recht gering; am ehesten erkennt man ihn im Vergleich mit Abb.10.b; hier rotiert das Schwarze Loch mit der gleichen Geschwindigkeit, aber entgegengesetzt zu dem von Abb. 10.a.

Da ein Schwarzes Loch selbst kein Licht emittiert, kann man es nicht "sehen": Beim Beobachter kommen nur Lichtstrahlen an, die von anderen Objekten emittiert worden und am Schwarzen Loch vorbei gelaufen sind, aber keine, die den Horizont durchquert hätten, also aus dem Loch selbst herausgekommen wären. Bei einem Neutronenstern ist dies anders: Lichtstrahlen können sehr wohl von der Oberfläche des Sterns emittiert werden und einen entfernten Beobachter erreichen. Dies ist zwar astrophysikalisch sehr interessant, visuell aber eher langweilig, da die Oberfläche eines Neutronensterns kaum strukturiert ist.

Wir verabschieden uns daher von der real existierenden Erde als Anschauungsobjekt und wenden uns einer fiktiven Erde zu, die zwar noch die bekannten Kontinente zeigt, dabei aber Masse und Radius eines Neutronensterns aufweist. Ein realer Neutronenstern entsteht als eine mögliche Existenzform eines Sterns am Ende seiner Entwicklung; er stellt die kompakteste Form eines Objekts aus Materie dar, die in der Natur möglich ist. Ein solcher Neutronenstern weist ungefähr das 1,4fache der Masse unserer Sonne auf; diese Masse ist aber auf eine Kugel von nur ca. 20km Durchmesser komprimiert!

An der Oberfläche eines solchen extremen Objekts herrscht eine enorm starke

Gravitation, die dafür sorgt, dass die Oberfläche praktisch völlig glatt ist, da jegliche Unebenheit sofort von der übermächtigen Gravitation “geplättet” wird. Ein Neutronenstern weist also keine Struktur auf, die sich für eine Visualisierung eignen würde. Wir versehen daher einen solchen Neutronenstern künstlich mit der vertrauten Oberflächenstruktur der Erde — gewissermaßen ein Neutronenstern, der in der Haut der Erde steckt.

Wie man an der Zeichnung in Abb.7 erkennen kann, werden die Lichtstrahlen durch die Lichtablenkung gewissermaßen um den Stern herum gelenkt. Es erreichen daher auch Strahlen von Teilen der Rückseite des Sterns den Beobachter — ohne Lichtablenkung wäre dies nicht möglich. So ist in Abb. 11.a etwa Australien zu sehen, das auf dem Referenzbild Abb. 1.a nicht sichtbar war.

In Abb. 11.b treiben wir dieses Spiel noch ein wenig weiter. Hier ist die Masse des Sterns so weit erhöht und der Radius gleichzeitig soweit verringert worden, wie es im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie überhaupt möglich ist, ohne dass im Inneren des Sterns ein unendlich hoher Druck entsteht. In der Natur kann ein solcher Stern jedoch nicht existieren, da es keine realistische Materieform gibt, die eine stabile Existenz eines solchen Objekts erlaubt. Abb. 7 zeigt, dass Lichtstrahlen den Stern nun komplett umrunden können; ebenso können Lichtstrahlen von der Rückseite des Sterns sowohl “rechts” als auch “links” herum den Betrachter erreichen. Dies wird in Abb. 11.b wiederum an Australien deutlich, das einerseits rechts unten und andererseits, stark verzerrt, links oben am Rand zu erkennen ist.

Science Fiction, relativistisch

Neutronensterne und Schwarze Löcher mögen uns als fantastische Gebilde erscheinen, und doch ist inzwischen so gut wie sicher, dass sie in unserem Universum existieren — und nicht einmal als besondere Ausnahmerecheinung. Darüber hinaus haben sich Science-Fiction-Autoren immer wieder von der Einsteinschen Relativitätstheorie zu noch ausgefalleneren Phantasien inspirieren lassen; manchmal mehr, manchmal weniger in der Übereinstimmung mit

der korrekten Theorie. Zwei dieser Konstrukte wollen wir nun betrachten: Wurmlöcher und Warp-Antriebe. Beide dürften zwar auch in ferner Zukunft nicht realisierbar sein, sie sind aber durch die Allgemeine Relativitätstheorie zumindest nicht grundsätzlich ausgeschlossen.

Will man als Science Fiction Autor eine Zivilisation beschreiben, die sich über einen größeren Bereich erstreckt als beispielsweise ein Sonnensystem, stößt man sofort auf das Problem der großen Entfernungen und damit der langen Zeitspannen, die für Reisen wie auch die Übertragung von Nachrichten benötigt werden. Mit Zeitspannen im Bereich von Wochen sind zwar die alten Römer durchaus klar gekommen; hier sprechen wir jedoch von Jahren bis Jahrtausenden!

Abb.11.a

Hier sehen wir einen Neutronenstern mit einer Masse von ca. 1,4 Sonnenmassen, wie er in der Natur tatsächlich vorkommt. Dieser Neutronenstern wurde allerdings als Erde "verkleidet", um die Effekte der Lichtablenkung besser sichtbar zu machen. Da die Lichtstrahlen teilweise um den Stern herum gebogen werden, sind auch Teile der Sternoberfläche zu sehen, die dem Betrachter anderenfalls verborgen blieben. Besonders deutlich sieht man dies am Beispiel von Australien, das nun am rechten unteren Rand sichtbar wird, ohne Lichtablenkung (s. Abb. 1.a) dagegen verdeckt war.

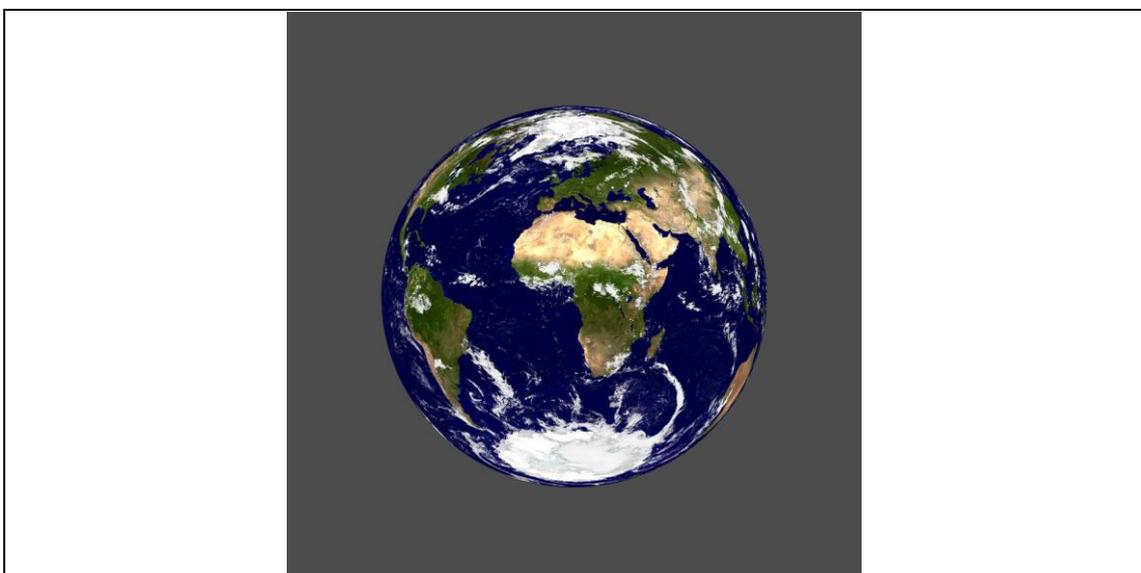
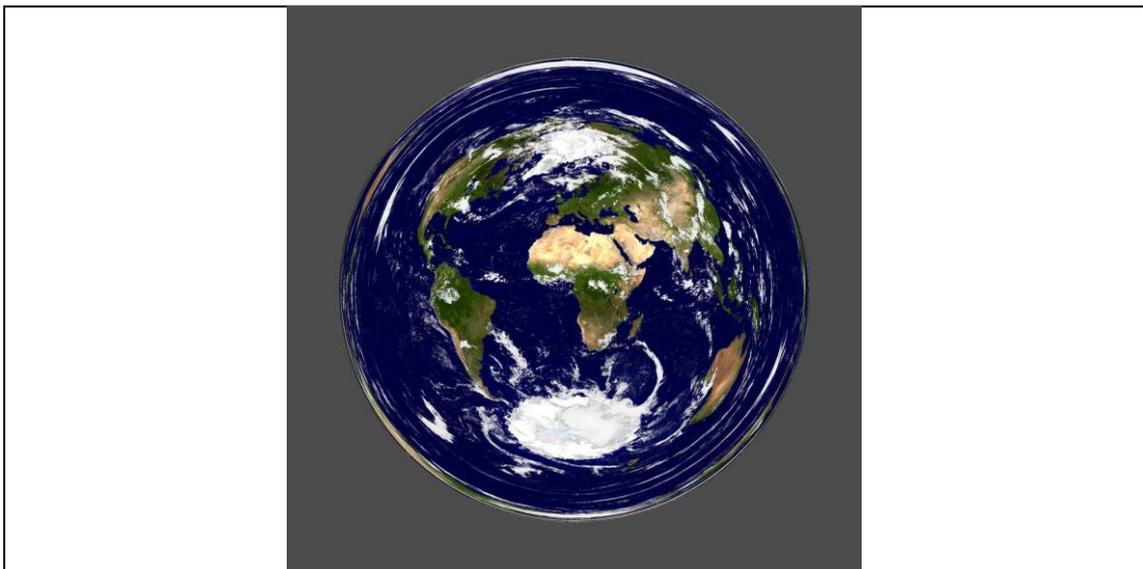


Abb. 11.b

Hier sehen wir ein fiktives Objekt mit der gleichen Masse wie oben, aber einem Durchmesser von nur gut 9 km. Damit handelt es sich um das kompakteste Objekt, das gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie zulässig ist ohne dass der Druck im Zentrum unendlich groß wird. In der Natur kann ein solches Objekt jedoch nicht existieren, da es keine Materieform gibt, die seine stabile Existenz ermöglichen würde. Die Lichtablenkung wird hier noch stärker als in Abb. 11.a: Es ist nun die gesamte Oberfläche sichtbar, und zwar sogar mehrfach. So ist Australien nun einmal am rechten unteren und einmal am linken oberen Rand zu erkennen.



Dies gilt zwar zunächst nur die daheim Gebliebenen: Für die Reisenden im Raumschiff ist eine Reise zum Zentrum unserer Milchstraße und zurück dank der speziell-relativistischen Zeitdilatation grundsätzlich durchaus in gut 40 Jahren zu bewältigen — während dessen sind aber auf der Erde ungefähr 60000 Jahre vergangen! Dieses Synchronizitätsproblem dürfte den Aufbau einer interstellaren Zivilisation vor große organisatorische Probleme stellen — man stelle sich nur einmal die Auswirkungen auf ein Rentenversicherungssystem vor!

Kein Grund zum Verzagen, die Allgemeine Relativitätstheorie hält Alternativen bereit! Sehr beliebt im Katalog futuristischer Reiseveranstalter sind Wurmlöcher, die als eine Art Abkürzung zwischen weit entfernten Punkten unseres

Universums dienen oder sogar zwei ansonsten vollkommen getrennte Universen verbinden können. Der Begriff 'Wurmloch' ist dabei leider etwas irreführend: Ein Wurmloch ist nämlich keine röhrenartige Konstruktion. Es besteht eher aus zwei kugelförmigen Gebilden — eines in jeder der beiden Welten — die von außen zunächst die gleiche räumliche Geometrie aufweisen wie ein Schwarzes Loch. Diese Gebilde hängen so ineinander, dass man, wenn man sich auf das vermeintliche Schwarze Loch zu bewegt, irgendwann nicht mehr weiter nach innen gelangt, sondern sich vielmehr in der anderen Welt wieder nach außen bewegt. Die beiden Umgebungen um das Wurmloch herum können dabei an verschiedenen Orten im gleichen Universum liegen, oder sie können sich in zwei ansonsten völlig getrennten Universen befinden. Das Durchqueren eines Wurmlochs erfordert keine besonders lange Zeit, und auch außerhalb des Wurmlochs vergeht nicht mehr Zeit als für den Reisenden (die Details sind allerdings von der genauen Struktur des Wurmlochs abhängig; so könnten Wurmlöcher möglicherweise sogar für eine Reise in die Vergangenheit dienen). Man wird hier also nicht nur das Problem der langen Reisezeit, sondern auch das der Synchronizität los!

Abb.12 und 13 zeigen ein solches Wurmloch mitten auf dem Tübinger Marktplatz; das andere Ende befindet sich im Weltall, von der Erde genauso weit entfernt wie der Mond. Das Bild vermittelt einen guten Eindruck von der kugelförmigen Gestalt des Wurmloches. Man kann dieses Wurmloch aus allen Raumrichtungen gleichermaßen "betreten". Dies erkennt man noch einmal deutlich an Abb. 13, bei der wir ein Stück um das Wurmloch herum gehen; die Position des Wurmlochs selbst verändert sich dabei nicht. Das letzte Bild zeigt das Wurmloch von oben; außer Pflastersteinen sieht man hier zwar nicht viel, man erkennt aber wieder deutlich, dass das Wurmloch nicht eine in irgendeine bestimmte Richtung führende Röhre ist.

Abb. 12

Ein Wurmloch auf dem Tübinger Marktplatz. Auf dem oberen Bild sehen wir links am Wurmloch vorbei einen Teil des Rathauses. Im unteren Bild stehen wir zwischen Rathaus und Wurmloch und blicken in die entgegengesetzte Richtung. Dadurch ändert sich in gleicher Weise die Blickrichtung im inneren Teil, wo der Blick von der anderen Seite des Wurmlochs ins Universum hinaus geht: Im oberen Bild blicken wir auf die Erde, dahinter ist die Milchstraße zu sehen. Im unteren Bild schauen wir von der Erde weg, sehen die Erde aber noch als Ring, der das gesamte Universum einschließt.

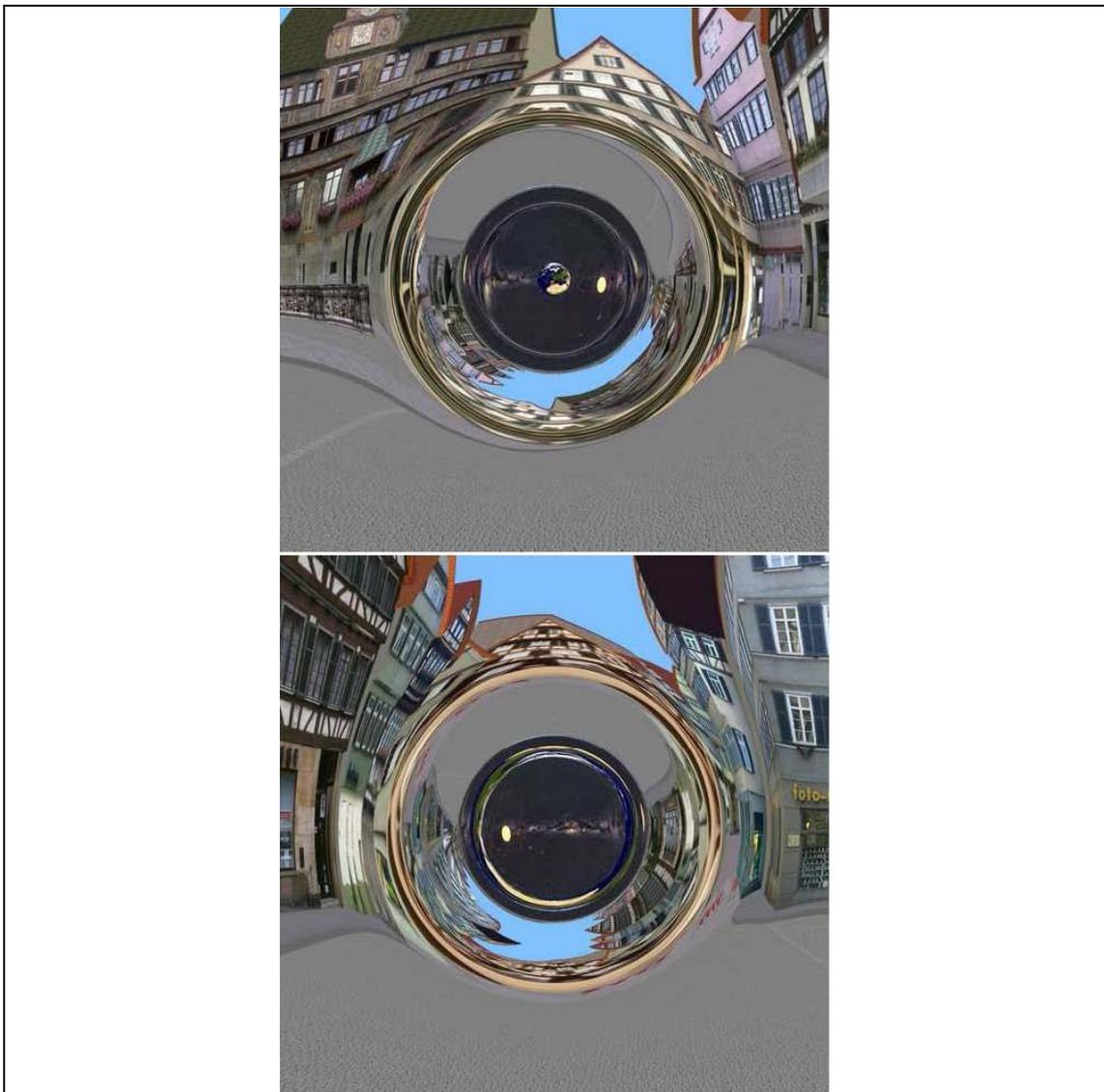


Abb. 13

Wir gehen um das Wurmloch herum und betrachten es aus zwei weiteren Richtungen, im unteren Bild direkt von oben. Das Wurmloch verändert dabei seine Position nicht. Es gibt keine "Rückseite"; aus allen Richtungen erkennt man die kugelförmige Gestalt.

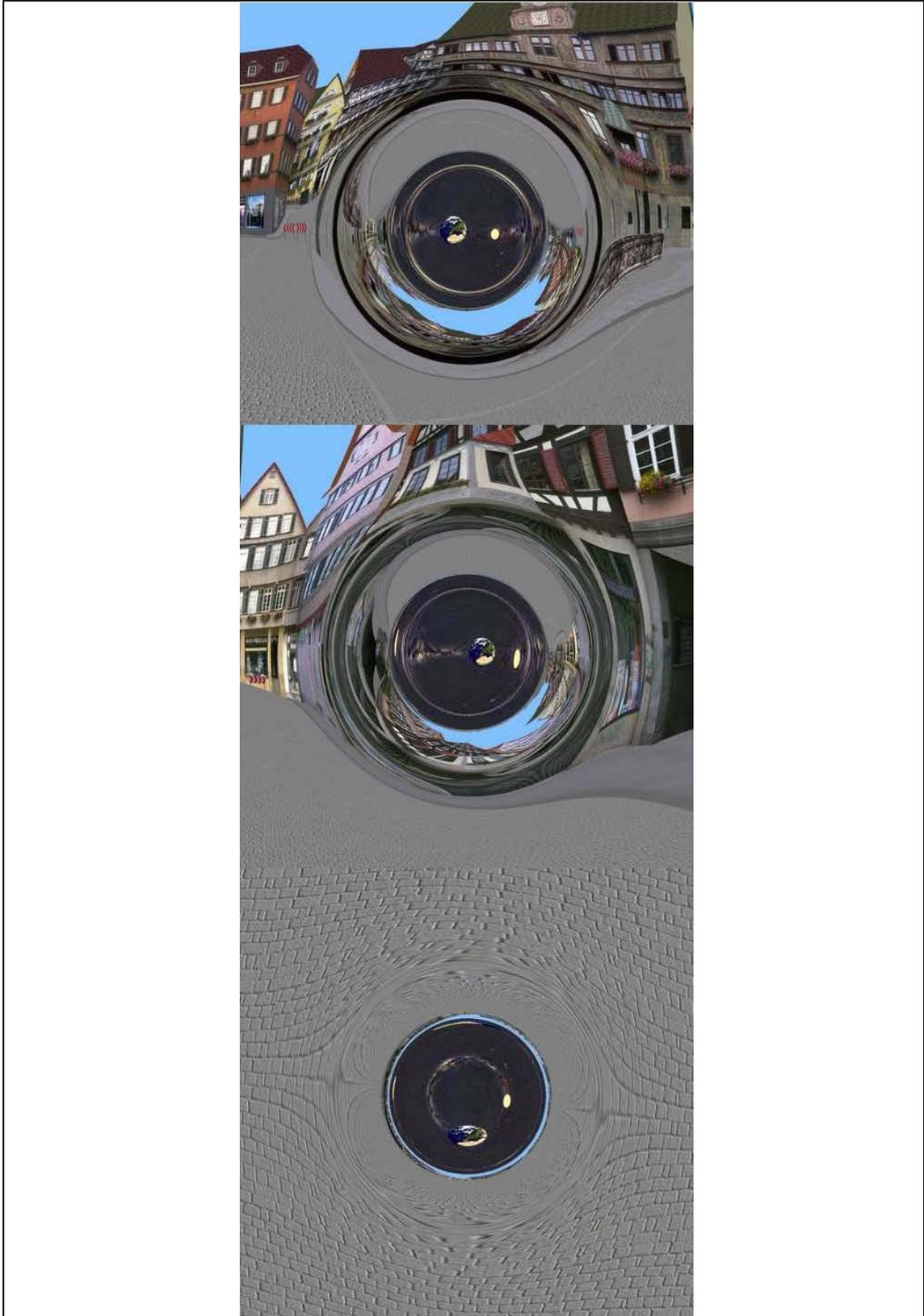


Abb. 14

Wir haben das Wurmloch durchquert und befinden uns nun auf der anderen Seite im Weltall. Wir haben uns herumgedreht und blicken durch das Wurmloch zurück zum Tübinger Marktplatz.



Das Wurmloch weist in seiner Umgebung die gleiche räumliche Struktur wie ein Schwarzes Loch auf, daher werden Lichtstrahlen in ähnlicher Weise “verbogen” wie in der Umgebung eines Schwarzen Loches. Der geneigte Leser ist daher sicher auch nicht mehr sonderlich überrascht, dass er in einem ringförmigen Bereich um das Wurmloch herum wieder das Bild seines gesamten Universums sieht. Anders als beim Schwarzen Loch gibt es hier aber keinen Horizont, vielmehr sieht man im inneren Bereich die Umgebung auf der anderen Seite des Wurmlochs. Auch hier hat man einen umfassenden, nichts auslassenden Rundumblick!

Wurmlöcher eignen sich zwar gut für Reisen zu vorher bestimmten Punkten — ungeeignet sind sie aber für den Individualreisenden, der seine Reiseroute spontan entscheidet, oder gar für eine Forschungsmission “to boldly go where no man has gone before”. Zum Glück gibt es da noch das Warp-Triebwerk: Hier wird nicht das Raumschiff relativ zu seiner Umgebung beschleunigt, vielmehr wird ein Teil dieser Umgebung mit dem Raumschiff darin innerhalb der gesamten Raumzeit verschoben. In Vorwärtsrichtung wird der Raum gestaucht,

hinter dem Raumschiff gedehnt, wie man dies beispielsweise mit einem Gummiband ausprobieren könnte. Hier können beliebig hohe Geschwindigkeiten erreicht werden, da die Beschränkung auf die Lichtgeschwindigkeit nur für eine Bewegung relativ zur Umgebung gilt, nicht aber für Verzerrungen der Raumzeit selbst. Die Reise benötigt zwar noch einige Zeit, die von der Geschwindigkeit der Verzerrung abhängig ist, aber immerhin vergeht die Zeit innerhalb der Warp-Blase genauso schnell wie außerhalb. Als Bonus ist die Besatzung des Raumschiffs keinen Trägheitskräften als Folge hoher Beschleunigung ausgesetzt.

Die technischen Probleme bei der Realisierung solcher Reisepläne sollen nicht verschwiegen werden: Bei der mittlerweile wohl eher konventionell anmutenden Variante einer speziell-relativistischen, fast lichtschnellen Reise stößt man vor allem auf das Treibstoffproblem: Bei einem Materie-Antimaterie-Triebwerk, das die denkbar günstigste Ausnutzung des Treibstoffs erlaubt, benötigt man für die oben erwähnte Reise zum Zentrum der Milchstraße das 30000-fache der Masse von Raumschiff plus Ladung allein während der Beschleunigungsphase beim Hinflug. Beim Abbremsen am Zielort ist erneut ein entsprechender Treibstoffaufwand nötig. Man beachte, dass der beim Abbremsen benötigte Treibstoff zunächst mit beschleunigt werden musste — damit braucht man insgesamt eine Menge an Materie-Antimaterie-Treibstoff, die fast eine Milliarde mal so schwer ist wie die Masse des Raumschiffs und seiner Ladung!

So gewaltig diese Anforderungen sind, so erscheinen sie doch fast banal im Vergleich zu der Herausforderung, ein stabiles Wurmloch zu betreiben, das einem Raumschiff als Abkürzung auf dem Weg zu fernen Welten dienen könnte. Es ist durchaus denkbar, dass Wurmlöcher auf natürlichem Wege entstehen, beispielsweise während des Urknalls. Ein solches natürliches Wurmloch ist jedoch nicht stabil; es zieht sich so schnell zusammen, dass ein Raumschiff keine Chance hätte, es zu durchqueren. Wer es dennoch probiert, wird unweigerlich von dem kollabierenden Wurmloch in der Singularität zerquetscht.

Andererseits bietet die Allgemeine Relativitätstheorie die Möglichkeit, ein stabiles Wurmloch zunächst zu postulieren und dann die Feldgleichungen gewissermaßen rückwärts zu benutzen, um herauszufinden, welche Verteilung von

Materie man bereitstellen müsste, um die Existenz eines solchen Wurmlochs zu sichern. Das Ergebnis einer solchen Rechnung enthält aber eine unangenehme Überraschung: Erforderlich ist Materie mit negativer Energie (oder negativer Masse). Solche Materie ist in unserer Alltagswelt vollkommen unbekannt. In dem nach wie vor recht dunklen Bereich, indem sich Relativitätstheorie und Quantentheorie treffen, kann solche Materie aber wahrscheinlich vorkommen. Dummerweise allerdings nur in Verbindung mit riesigen Mengen an Materie mit positiver Energie: Für unser gewünschtes Wurmloch wäre insgesamt ungefähr so viel Materie nötig, wie das gesamte bekannte Universum enthält! Von den technischen Schwierigkeiten, solche ungeheuren Mengen in die erforderliche Form zu bringen, wollen wir hier erst gar nicht reden...

Abb. 15.a

Wir befinden uns in einem Raumschiff, das von einer Warp-Blase eingeschlossen ist, die sich mit Warp 1,1 genau auf die Erde zu bewegt. Die Blickrichtung ist in Flugrichtung nach vorne.

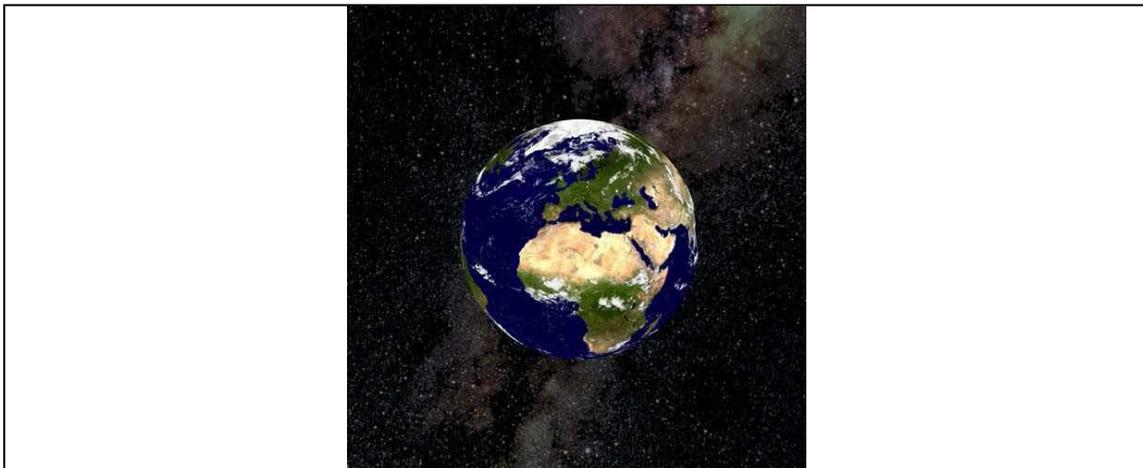


Abb. 15.b

Wieder befinden wir uns in einem Raumschiff, das von einer Warp-Blase eingeschlossen ist. Diesmal bewegt sich die Blase mit dem Raumschiff von der Erde weg, und wir schauen in Flugrichtung nach hinten auf die Erde. Die Geschwindigkeit ist wieder Warp 1,1.

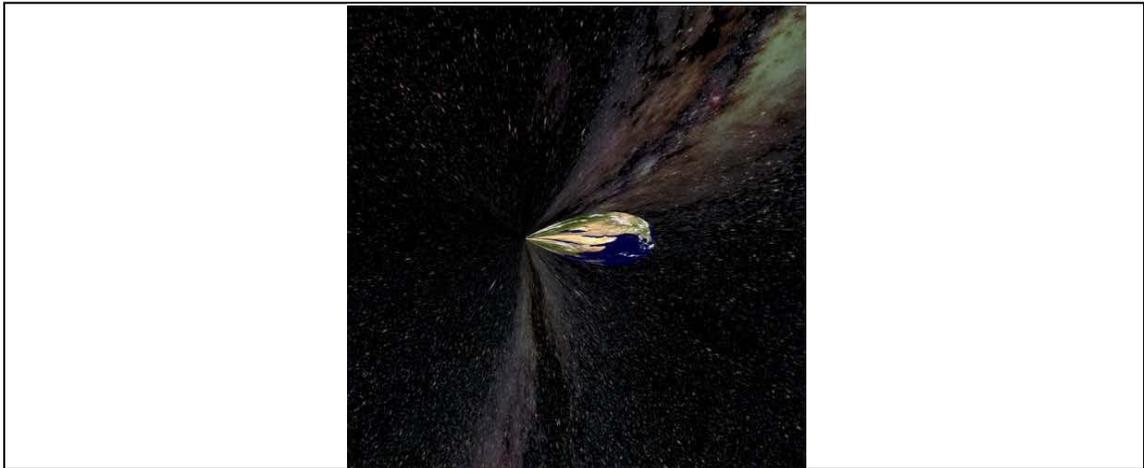
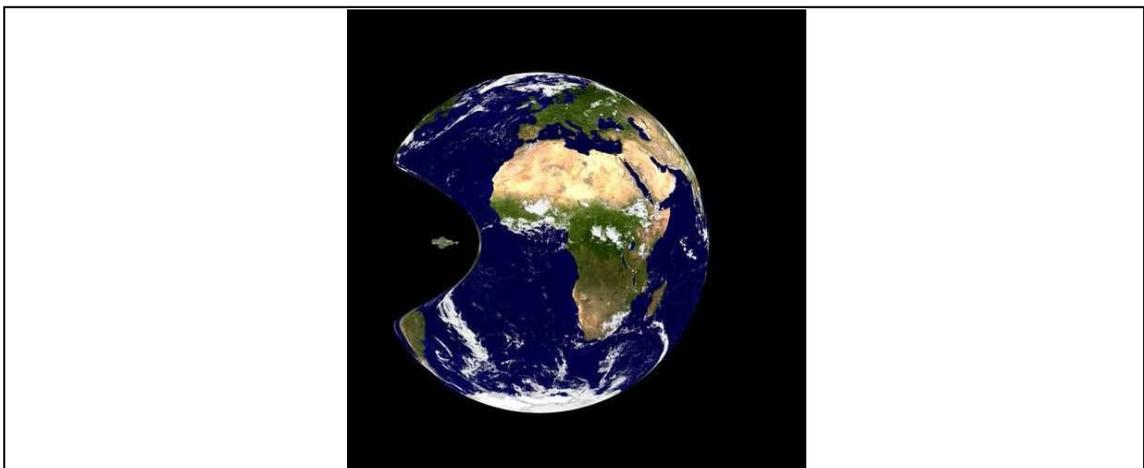


Abb. 16

Wir befinden uns außerhalb der Warp-Blase und schauen auf die Erde, während sich die Warp-Blase mitsamt einem Raumschiff darin mit Warp 1,1 zwischen uns und der Erde hindurch bewegt.



Der Warp-Antrieb bietet hier leider keinen Ausweg: Auch dafür ist Materie mit negativer Energie nötig. Darüber hinaus könnte ein solcher Antrieb möglicherweise gar nicht von dem Raumschiff selbst gesteuert werden, und vielleicht könnte das Raumschiff nicht einmal selbständig in die Warp-Blase eintreten oder sie verlassen.

Die letzten Bemerkungen haben uns nun auf den harten Boden der Tatsachen zurückgeführt. So schade es auch sein mag, dass die von der Relativitätstheorie grundsätzlich erlaubten, phantastischen Möglichkeiten für Reisen durchs Weltall wohl nie Realität werden können — umso erfreulicher ist es doch, dass uns moderne Computer und leistungsstarke Teleskope die Möglichkeit geben, wenigstens die visuellen Eindrücke einer solchen Reise zu genießen. Dabei ist nicht nur der erforderliche Aufwand unvergleichlich geringer, diese Möglichkeit steht zudem Allen zur Verfügung und ist nicht auf die wenigen Besatzungsmitglieder beschränkt.

Gästeliste Technik-Forum 2008

Baidinger, Irene

Studentin der Hochschule Pforzheim, Studiengang Maschinenbau

Baum, Dipl.-Ing. (FH) Andreas

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Lehrgebiet Fertigungstechnik der Hochschule Pforzheim

Bayersdorfer, Maik

Leitung LEONI Draht GmbH, Weißenburg

Benzler, Dipl.-Ing. (FH) Armin

Weingarten, Baden

Beyer, Dipl.-Ing. Kurt

Technischer Leiter, HFB GmbH, Hettstedt

Bocon, Ruth

Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Böhm, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang

Laboringenieur Bereich Werkstoffkunde und –prüfung, Hochschule Pforzheim

Börner, Dr. Felicitas

Witzenmann GmbH, Pforzheim

Bräuner, cand.-Ing. Marc

Student der Hochschule Pforzheim, Studiengang Maschinenbau

Bürkle, Horst

Gesellschafter, Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Gästeliste Technik-Forum 2008

Christian, Ursula

Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Lehrgebiet Werkstoffkunde der Hochschule Pforzheim

Cruz, cand.-Ing. Tom

Student der Hochschule Pforzheim, Studiengang Maschinenbau

Dachser, Stefan

Dresdner Bank AG, Karlsruhe

Ehrengrubner, Rudi

Business Development Manager, Gutmann Aluminium Draht GmbH, Weissenburg

Erhardt, Prof. Dr. Martin

Rektor der Hochschule Pforzheim

Fasel, Rainer

Assistent Technik, Metallwarenfabrik Marktoberdorf, Marktoberdorf

Fischer, Kurt

Geschäftsführer, Fischer Spanntechnik, Ditzingen

Fottler, Dr.-Ing. Friedrich

Aerodrome consulting team

Franke, Hans-Dieter

Mpower GmbH, Stuttgart

Gegenheimer, Horst

Meister Produktion, Ferdinand Wagner GmbH, Pforzheim

Gästeliste Technik-Forum 2008

Gietzelt, Dr.-Ing. Thomas

IMVT, Forschungszentrum Karlsruhe

Grupp, Thorsten

Robert Zapp Werkstofftechnik GmbH, Ratingen

Guimaraes Wilhelm, Stephan

Student der Hochschule Pforzheim, Studiengang Maschinenbau

Gude, Sven

Leitung Anwendungstechnik, C. HAFNER GmbH & Co. KG, Pforzheim

Hammes, Stefan

IHK-Referent, IHK Nordschwarzwald, Pforzheim

Hansis, Dr. Werner

Vorstand der Stiftung Max- und Erni-Bühler-Stiftung, Pforzheim

Hehl, Nadine

Studentin der Hochschule Pforzheim, Studiengang Maschinenbau

Heide, Andreas

Leitung Gießerei, Sundwiger Messingwerk GmbH & Co. KG, Hemer

Heinkel, Harry

Produktionsleiter, Hoffmann Räumtechnik GmbH, Pforzheim

Helbling, Georg

Leiter Arbeitsvorbereitung, Hoffmann Räumtechnik GmbH, Pforzheim

Herbst, Gerhard

Gruppenleiter Glühen, Maschinenfabrik Niehoff GmbH & Co. KG, Schwabach

Gästeliste Technik-Forum 2008

Hill, Reinhold

QS, H+W GmbH Härte und Werkstofftechnik, Eppingen

Holzappel, Dr. Bernhard

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

Igual, Sverino

Werdohl

Janelt, Andreas

Zapp Stahlwerke GmbH, Schwerte

Jeschke, Thea

Vertrieb, Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Jost, Prof. Dr.-Ing. Norbert

Leiter des Lehrgebietes Werkstoffkunde der Hochschule Pforzheim

Käufler, Dr. Andrea

Entwicklung, Wieland-Werke AG, Vöhringen

Keller, Jörg

Entwicklung, Sekels GmbH, Ober-Mörlen

Keller, Thomas

Technischer Leiter, Leicht+Müller SYSOTEC GmbH, Remchingen

Kerler, Dietmar

Meister W + B, Ferd. Wagner GmbH, Pforzheim

Kloiber, Dipl. Betriebswirt (FH) Heinrich

Kaufm. Leiter , Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Gästeliste Technik-Forum 2008

Kreismeyer, Heinz

Geschäftsführer, Kreismeyer Umformtechnik

Kromer, Dipl.-Ing. Roland

Liebherr Verzahntechnik GmbH, Ettlingen

Krumm, Thomas

Geschäftsführer, Krumm e.K., Bahlingen

Krummenauer, Benjamin

Student der Hochschule Pforzheim, Studiengang Maschinenbau

Kusterer, Dipl.-Ing. (FH) Daniel

QS, H+W GmbH Härte und Werkstofftechnik, Eppingen

Laag, Thomas

Leitung Entwicklung Edelmetalle, C. HAFNER GmbH & Co. KG, Pforzheim

Liebmann, Gerd

Geschäftsführer, Liebmann-Consulting GmbH, Stuttgart

Leicht, Timo

Administration, Leicht+Müller SYSOTEC GmbH, Remchingen

Maier, Thomas

Geschäftsführer, Fischer Spanntechnik, Ditzingen

Malek, Uwe

Leicht+Müller SYSOTEC GmbH, Remchingen

Menge, Dr.-Ing. Rainer

Geschäftsführer, NBM, Pforzheim

Gästeliste Technik-Forum 2008

Merkle, Dipl.-Ing. Klaus

Fertigungsleiter, DENTAURUM J.P. Winkelstroeter KG, Ispringen

Morgenthaler, Werner

IHK Nordschwarzwald, Pforzheim

Moser, Holger

Student der Hochschule Pforzheim, Studiengang Maschinenbau

Müller, Daniel

Student der Hochschule Pforzheim, Studiengang Maschinenbau

Münzenmaier, Frank

Vertriebsleiter Stahl, Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Nestler, Prof. Dr. Britta

Center of Computational Materials Science and Engineering, Hochschule Karlsruhe

Nixdorf, Stefan

Technischer Leiter, Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Nyilas, Dr. Arman

Freelance Eng. Consultant CEME, Stutensee

Obst, Dr. Bernhard

Karlsruhe

Pflieger, Lothar

Zapp Stahlwerke GmbH, Schwerte

Gästeliste Technik-Forum 2008

Pickavavé, Ing. grad. Herrmann
Geschäftsführer, Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Ramos, Dipl.-Ing. (FH) Elmer
Inovan GmbH, Birkenfeld

Rapp, Marco
Bühler Co. GmbH, Pforzheim

Reisacher, Markus
Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Reisacher, Tobias
Abteilungsleiter Elektrokonstruktion, Witzenmann GmbH, Pforzheim

Richter, Dipl.-Ing. Michael
Inovan GmbH, Birkenfeld

Riegelsberger, Dipl. Betriebswirtin (FH), M.A. Birgit
Assistentin des Vertriebsleiters, Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Ruck, Dipl.-Ing. (FH) Klaus
Geschäftsführer, Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Ruder, Prof. Dr. Hanns
Universität Tübingen

Ryda, Gerhard
H & F Greuner Spezialmaschinen GmbH, Wien

Schaible, Heinrich
Geschäftsführer, Dr. Maier & Partner GmbH, Stuttgart

Gästeliste Technik-Forum 2008

Schätzl, Dipl.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. Hans-Georg
Chefredakteur, Verlag Meisenbach GmbH Umformtechnik, Bamberg

Schefer, Dietrich
Konstruktion, Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Schittler, Markus
Vermögensberater, Fürst Fugger Privatbank, Stuttgart

Schlee, Edmund
Leiter, Qualitätssicherung, Hoffmann Räumtechnik GmbH, Pforzheim

Schön, Dipl.-Ing- (FH) Klaus
Produktbetreuer Walzen – Vertrieb, Kennametal AMSG GmbH, Mistelgau

Schönauer, Michael
Student der Hochschule Pforzheim, Studiengang Maschinenbau

Schreiner, Thorsten
IT, Bühler & Co. GmbH, Pforzheim

Schreiner, Dipl.-Ing. Volker
Betriebsleiter, Ferd. Wagner GmbH, Pforzheim

Sterzl, Dipl.-Ing. Tobias
Entwicklung, DENTAURIUM J.P. Winkelstroeter KG, Ispringen

Steuernagel, Dipl.-Ing. (BA) Holger
Fertigungsleiter, Wieland-Werke AG, Vöhringen

Steff, Dr. Wolfgang
Leiter Entwicklung, LEONI Draht GmbH, Weißenburg

Gästeliste Technik-Forum 2008

Schwarz, cand.-Ing. (FH) Ronny

Student der Hochschule Pforzheim, Studiengang Maschinenbau

Siegle, Christel

Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Lehrgebiet Werkstoffkunde der Hochschule Pforzheim

Tews, Dr. Peter

Leiter Produktion und Technik Edelmetallhalbzeug, Allgemeine Gold u. Silberscheideanstalt GmbH, Pforzheim

Vetter, Dr. Jörg

Geschäftsbereichsleiter, Sulzer Metaplas GmbH

Vockentanz, Rainer

Konstruktionsleiter, Maschinenfabrik Niehoff GmbH & Co. KG, Schwabach

Voiticek, Dipl.-Ing. Alfred

Produktionsleiter, Plansee Metall GmbH, Liezen

Wagner, Jürgen

Dipl.-Ing. Erich Fetzer GmbH + Co., Reutlingen

Wahl, Prof. Dr.-Ing. Roland

Leiter des Lehrgebietes Fertigungstechnik der Hochschule Pforzheim

Walter, Willy

LEONI Draht GmbH, Weißenburg

Wegscheider, Anton

Direktor Private Banking, Sparkasse Pforzheim Calw

Gästeliste Technik-Forum 2008

Weinland, Dipl.-Ing. Regina

Laboringenieurin Bereich Kunststofftechnik, Hochschule Pforzheim

Weißbach, Dr.-Ing. Uwe

Leiter Entwicklung, Voestalpine HTI GmbH & Co. KG, Annweiler

Weissinger, Dipl.-Ing. Rene

Key Account Manager Sport, Buchholz Media

Weix, Dipl.-Ing. Günter

Leiter Produktentwicklung, Inovon GmbH, Birkenfeld

Werning, Manfred

Leitung Engineering, Sundwiger Messingwerk GmbH & Co. KG, Hemer

Wickenhöfer, Matthias

Produktmanagement, LEONI Draht GmbH, Weißenburg

Wildermuth, Dr. Eberhard

GB-Leiter, Witzenmann GmbH, Pforzheim

Wößner, Dr.-Ing. Johannes

Vollmer Feinmessgerätebau GmbH, Hagen

Zauter, Dr. Roland

Technisches Marketing, Wieland-Werke AG, Ulm

Zilly, M.Sc. Andreas

Laboringenieur Bereich Werkstoffkunde und –prüfung, Hochschule Pforzheim

Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge

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

Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge

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
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 Geschäftsberichten 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** Februar 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** August 2004
Lohn, Zins, Preise und Beschäftigung – Eine empirische Analyse gesamtwirtschaftlicher Zusammenhänge in Deutschland
-

Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge

114. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2004
Technik-Forum 2003: Materialentwicklung für die Kaltumformtechnik. Mit Beiträgen von Andreas Baum, Ursula Christian, Steffen Nowotny, Norbert Jost, Rainer Menge und Hans-Eberhard Koch
115. **Dirk Wenzel** Nov. 2004
The European Legislation on the New Media: An Appropriate Framework for the Information Economy?
116. **Frank Morelli, Alexander Mekyska, Stefan Mühlberger** Dez. 2004
Produkt- und prozessorientiertes Controlling als Instrument eines erfolgreichen Informationstechnologie-Managements
117. **Stephan Thesmann, Martin Frick, Dominik Konrad** Dez. 2004
E-Learning an der Hochschule Pforzheim
118. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juni 2005
Technik-Forum 2004: Innovative Werkstoffaspekte und Laserbehandlungstechnologien für Werkzeuge der Umformtechnik
119. **Rainer Gildeggen** Juni 2005
Internationale Produkthaftung
120. **Helmut Wienert** Okt. 2005
Qualifikationsspezifische Einkommensunterschiede in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Universitäts- und Fachhochschulabsolventen
121. **Andreas Beisswenger, Bernd Noll** Nov. 2005
Ethik in der Unternehmensberatung – ein vermintes Gelände?
122. **Helmut Wienert** Juli 2006
Wie lohnend ist Lernen? Ertragsraten und Kapitalendwerte von unterschiedlichen Bildungswegen
123. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2006
Technik-Forum 2005: Umformwerkzeuge - Anforderungen und neue Anwendungen. Mit Beiträgen von Edmund Böhm, Eckhard Meiners, Andreas Baum, Ursula Christian und Jörg Menno Harms
124. **Mario Schmidt** Dez. 2006
Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement
125. **Norbert Jost (Hrsg.)** Okt. 2007
Technik-Forum 2006: Innovative neue Techniken für Werkzeuge der Kaltverformung. Mit Beiträgen von Franz Wendl, Horst Bürkle, Rainer Menge, Michael Schiller, Andreas Baum, Ursula Christian, Manfred Moik und Erwin Staudt.
126. **Roland Wahl (Hrsg.)** Okt. 2008
Technik-Forum 2007: Fortschrittsberichte und Umfeldbetrachtungen zur Entwicklung verschleißreduzierter Umformwerkzeuge. Mit Beiträgen von Klaus Löffler, Andreas Zilly, Andreas Baum und Paul Kirchhoff.
127. **Julia Tokai, Christa Wehner** Okt. 2008
Konzept und Resultate einer Online-Befragung von Marketing-Professoren an deutschen Fachhochschulen zum Bologna-Prozess
128. **Thomas Cleff, Lisa Luppold, Gabriele Naderer, Jürgen Volkert** Dez. 2008
Tätermotivation in der Wirtschaftskriminalität
129. **Frank Thuselt** Juni 2009
Das Arbeiten mit Numerik-Programmen. MATLAB, Scilab und Octave in der Anwendung.
130. **Helmut Wienert** August 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.)** Okt. 2009
Technik-Forum 2008: Werkstoffe und Technologien zur Kaltverformung. Mit Beiträgen von Britta Nestler, Andreas Baum, Jörg Vetter, Ursula Christian, Andreas Zilly und Hanns Ruder.
-

