

Tribologie und Werkstoff

Anwendungsorientierte Optimierung des Reib- und Verschleißverhaltens von Werkstoffen

Eine kurze Einführung in die „Tribologie“ zeigt, dass Reibung und Verschleiß „System-Eigenschaften“ sind. Zur weitergehenden Erforschung dieser Eigenschaften ist die Entwicklung immer modernere Prüfanlagen notwendig, mit dem Ziel die reale Anwendungen immer genauer nachzubilden. Basierend auf den damit gewonnenen Erkenntnissen, lassen sich Werkstoffe für diese Anwendung optimieren. Beispiele dafür sind die Optimierung von Werkstoffen, die ohne zusätzliche Schmierung (z.B. in Lagern) auskommen, oder nicht zum Verschweißen neigen (z.B. im Weltraum).

Tribologie - Definition

Tribologie ist ein Kunstwort, das in den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts entstand und etwas beschreibt, das schon den Ägyptern Schwierigkeiten bereitete.

Tribologie ist die Lehre von der wissenschaftlichen Erforschung und der technischen Anwendung (Tribotechnik) und Beeinflussung von Eigenschaften und Vorgängen zwischen aufeinander einwirkenden, relativ zueinander bewegten oder in Bewegung gesetzten Oberflächen (Tribosystem). Sie schließt Erscheinungen und Vorgänge zwischen solchen Oberflächen beim Übergang von Ruhe in Bewegung oder umgekehrt sowie sämtliche Wechselwirkungen ein. Dies bezieht sich sowohl auf Festkörper untereinander als auch auf Festkörper und ihre flüssige oder gasförmige Umgebung.

Tribologie beschäftigt sich mit den Gebieten von "Reibung, Verschleiß und Schmierung" sowie deren Wechselwirkungen in Forschung, Lehre und Anwendung. Auf diese Weise trägt die Tribologie zur Erhaltung von Werten durch Minderung von Verschleiß, zur Einsparung von Energie durch Verringerung der Reibung und zur Steigerung der Lebenserwartung, Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit von Tribosystemen bei.

Die Tribotechnik - die Anwendung der Erkenntnisse aus allen Gebieten tribologischer Forschung zur Beherrschung von Reibung und Verschleiß - bezieht interdisziplinäres Wissen aus Physik, Chemie, Mechanik, Konstruktionslehre, Werkstoffkunde, Schmierstoffkunde sowie Betriebswirtschaftslehre, Organisation, Arbeitsmethodik und Rechtskunde mit ein. Sie befasst sich z. B. mit der Minderung von Reibungskraft und Verschleiß in Lagern, Verzahnungen und Führungen durch Auswahl geeigneter Schmierstoffe, mit der Optimierung von Reibungskraft, Verschleiß und Betriebsverhalten in Kupplungen und Bremsen oder bei der spanlosen und spangebenden Formgebung. Die Aufgaben werden teils mit, teils ohne Anwendung von Schmierstoffen gelöst.

Die Synthese aus industrieller Anwendung der praktischen tribologischen Erkenntnisse (Tribotechnik) und den theoretisch-wissenschaftlichen tribologischen Erkenntnissen (Tribologie) ist das Ziel der industriellen Tribologie.

Tribosystem - oder tribologisches System genannt, drückt bereits aus, dass Reibung und Verschleiß nicht Werkstoffeigenschaften sind, sondern „System-Eigenschaften“. Für die ausreichend fundierte Beschreibung eines tribologischen Prozesses und für dessen Verständnis - letztlich aber für zielführende Konstruktion, Dimensionierung und Prüfung von tribologisch beanspruchten Elementen - ist es notwendig, möglichst viele Informationen zu berücksichtigen. Diese Erkenntnisse führten zum Begriff des "tribologischen Systems". Man versteht darunter die Gesamtheit der bei einem tribologischen Vorgang beteiligten stofflichen Partner in ihrem Zusammenwirken, dem Belastungskollektiv, den daraus resultierenden tribologischen Kenngrößen und Wechselwirkungen, insbesondere z.B.

- beteiligte Werkstoffe
- kinematisch-dynamische Effekte
- Oberflächengestalt
- chemische Einflüsse

Die stofflichen Elemente eines Tribosystems sind der Grundkörper, der Gegenkörper, der Zwischenstoff und das Umgebungsmedium. Diejenigen Oberflächen, die miteinander in Kontakt kommen können, sind von besonderer Wichtigkeit. Dies gilt insbesondere bei Anwesenheit von Schmierstoffen oder anderen Zwischenstoffen (flüssige, plastische, feste oder gasförmige Stoffe). Aber auch das Umgebungsmedium (z. B. Luft, oder eben keines, d.h. Vakuum) kann den Reibungs- und Verschleißprozess entscheidend beeinflussen. Diese Medien sind wesentlich für Oxidationsprozesse, Abtransport von Verschleißprodukten sowie Einbringen von Staub und Schmutz verantwortlich.

Tribometer - Simulations- und Prüfanlagen

Tribometer – Die Messung von Reibung und Verschleiß ist in der Realität meist problematisch, weil man das System (z.B. ein Getriebe) während des Betriebes nicht aufschneiden kann, um Reibkräfte zu messen oder den Verschleiß zu bestimmen. In vielen Fällen startet man daher mit „Modell-Prüfanlagen, sogenannten Tribometern“. Mit einfachen Prüfkörpern, z.B. eine Kugel gleitet gegen eine Scheibe, lassen sich Reibkraft und Verschleiß (beider Partner) relativ einfach bestimmen. Jedoch hängt die Aussagekraft dieser Ergebnisse vom Zusammenhang zwischen dem Tribometer und der Realität ab.

Das in der Tribologie notwendige Vorgehen kann man folgend darstellen: Analyse des realen System und eventueller Versagensfälle, Auswahl oder Design einer adäquaten Simulationsanlage (Tribometer), und Nachstellung des Versagensfalles in der Simulation. Wenn hiermit der Zusammenhang zwischen Simulation und Realität gezeigt wurde, kann eine Weiterentwicklung auf Basis der Modellversuche erfolgen. Schließlich erfolgt der Übertrag der vielversprechendsten Lösung in den Feldversuch. Hauptziel dieses Vorgehens ist die Reduzierung von Entwicklungskosten und -zeit, da Modellversuche billiger sind als Feldversuche.

Im Bereich Werkstoff- und Produktionstechnik der ARS Research GmbH (ARC/WP) wurden daher spezielle Anlagen entwickelt die einerseits die Bedürfnisse der österreichischen (und europäischen) Raumfahrtindustrie abdecken, als auch andererseits der Forschung wichtige Grundlagen-Experimente ermöglichen.

Das einzige österreichische Vakuum-Tribometer nach dem Prinzip Stift-Scheibe ermöglicht nicht nur Reibtests an Luft mit variierender Feuchte oder unter beliebigen anderen Gasen, sondern auch unter Vakuum. Tests unter Vakuum sind in erster Linie Voraussetzung für den Einsatz im Weltraum oder vakuum-technischen Anlagen (Halbleiterherstellung). Darüber hinaus erfüllen sie aber einen viel weiter grundlegenden Aspekt: sie erweitern ganz besonders das Verständnis um die Verschleißeffekte, die an Luft stattfinden, da sich der Einfluss des Sauerstoffes „extrahieren“ lässt: "unter Vakuum ist die Oxidation ausgeschaltet". Ein Vergleich der Ergebnisse aus Tests unter Vakuum und Luft zeigt den Einfluss des Sauerstoffes.

Als Zweites wurden sogenannte "Kaltverschweißungs-Prüfstände" entwickelt. Die Entwicklung dieser Anlagen, ist ein gutes Beispiel für das systemorientierte Vorgehen in der Tribologie: Bei einem Satelliten-Mechanismus (siehe Abb.1) wird ein Anker durch einen Elektromagnet zwischen zwei End-Stops hin und her bewegt wird. Bei jeder Bewegung erfolgte ein Aufschlag an einem der End-Stops. Nach mehreren tausend Zyklen blieb der Anker an der abgebildeten Position stecken. Der Mechanismus fiel durch sogenanntes Kaltverschweißen aus: Unter Vakuum und durch das wiederholte Aufschlagen wurde die Oberflächenschicht (Oxide) zerstört, die darunterliegenden Metallteile freigelegt, welche dann miteinander kaltverschweißten.

Nach dieser Systemanalyse wurden die "Kaltverschweißungs-Prüfstände" entwickelt (siehe Abb.2). Diese messen in einem sich regelmäßig schließenden und wieder öffnenden Kontakt

die Adhäsionskräfte. Es wird die Kraft gemessen, die notwendig ist, um den oben beschriebenen Mechanismus wieder zu öffnen. Mit Tests, die die Situation des abgebildeten Mechanismus simulierten, konnten Adhäsionskräfte gemessen werden, die der Realität entsprachen. Damit konnte der Zusammenhang zwischen Realität und Modell gezeigt werden.

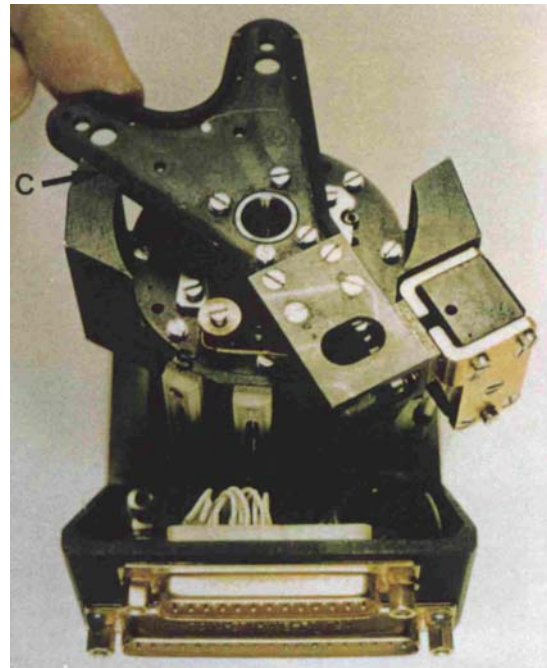


Abb. 1 Satelliten-Mechanismus: der Anker wird durch Elektromagnet hin- und her bewegt. Nach einigen tausend Zyklen blieb er am linken Anschlag (C) haften: Ausfall durch „Kaltverschweißung“.

In der Folge wurde begonnen, systematisch die Einflüsse verschiedener Parameter zu untersuchen. Vor allem die verschiedenen Kontaktarten - statisch, mit Aufschlag (Impact) oder mit Mikrovibrationen (Fretting) – kombiniert mit Vakuum können zu hohen Adhäsionskräften führen. Im Zuge der letzten Jahre wurden verschiedene grundlegende Werkstoffpaarungen auf Ihre Tendenz zum Kaltverschweißen untersucht. Erweitert wird dieses Wissen durch Einbeziehung von Schichten, die als Schutz gegen Kaltverschweißung in Betracht kommen können. Womit der Status der „Entwicklung“ erreicht ist: basierend auf dem Basiswissen können neue „Anti-Kaltverschweißungs-Werkstoffe“ entwickelt werden: z.B. zeigen Quasikristalle praktisch keine Adhäsion (Benetzung). Im Rahmen des EU-Projektes „Smart Quasicrystals“ werden derzeit Beschichtungsverfahren für diese Werkstoffgruppe entwickelt.

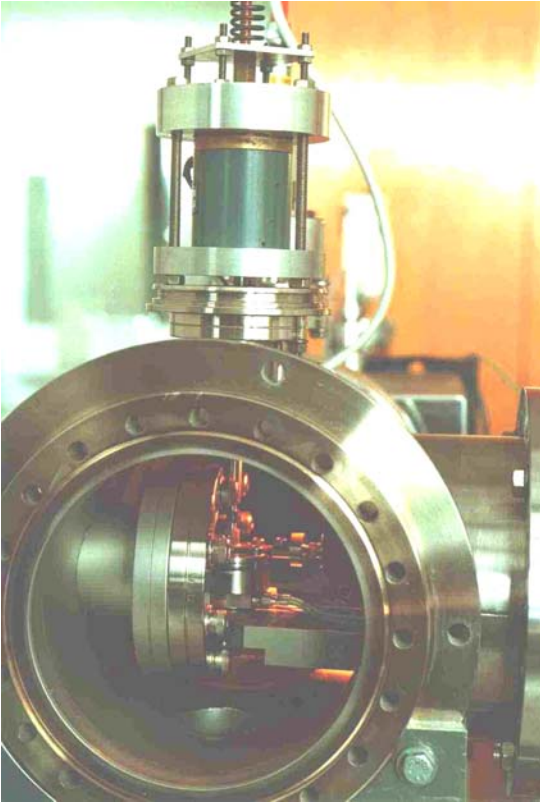


Abb. 2 Prüfanlage zur Untersuchung von „Kaltverschweißung unter Fretting“. Eigenentwicklung des ARC/WP im Einsatz für die European Space Agency (ESA).

Zielorientierte Werkstoff-Optimierung

Die Kombination des Werkstoffwissens und der Erkenntnisse um das Reib-, bzw. Kaltverschweißungsverhalten der Werkstoffe, ermöglicht, diese für bestimmte Anwendungen zu optimieren. Antriebssysteme erfordern niedrige Reibung. In Kugellagern dienen „Lagerkäfige“ zur Haltung der Distanz zwischen den Kugeln. Zur Schmierung sind diese Lagerkäfige (oft poröse Kunststoffe oder Metalle) mit Ölen oder Fetten getränkt. In manchen Umgebungen ist eine Schmierung mit Fetten oder Ölen nicht möglich, unerwünscht oder sogar verboten. Beispiele dafür sind in der Medizintechnik, der Lebensmittelproduktion oder der Raumfahrt zu finden.

Selbst-Schmierende Werkstoffe

Nun kann die Werkstofftechnik zielorientiertes Design anbieten: „Verbundwerkstoffe“ sind Werkstoffe, die aus mehreren Komponenten bestehen, deren separate Eigenschaften „verbunden“ werden. Im Falle der Tribologie sind selbstschmierende Werkstoffe von Interesse: in einer Basis-Werkstoff (genannt „Matrix“), wird ein weiterer eingebracht (Pulver, Fasern, ..), der zur Schmierung dient: z.B. Bronze ist als Gleitlagerwerkstoff weithin bekannt, zur Reduktion der Reibung kann Grafitpulver eingebracht werden: Herstellung erfolgt im Bereich ARC/WP auf pulvermetallurgischem Wege: nach Mischung von Bronze- und Grafitpulver, erhält man durch Heißpressen, d.h. Pressen unter hoher Temperatur, einen Verbundwerkstoff, der einer Bronze ähnlich sieht. Der Vorteil ist aber, dass er sich durch

seinen Grafitgehalt selbst schmiert: durch das Drehen einer Welle wird etwas Grafit freigesetzt und verteilt sich in der Lauffläche.

Durch normales Mischen der Pulver kann man nicht über etwa 20 Prozent Schmierstoffanteil hinausgehen. Durch „Verklumpen“ des Pulvers entsteht keine homogene Metallmatrix, der Werkstoff könnte im schlimmsten Fall einfach zerfallen. Mit einem speziellen Verfahren „coated particles“ wurde durch ARC/WP gezeigt, dass besonders hohe Grafitanteile (bis über 50v%) möglich sind [Pambaguian et al 2001]. Damit ließen sich Lagerkäfige verbessern: mehr Schmierstoff pro Volumen ermöglicht höhere Standzeit. Ein Problem des Grafits ist, dass er nur in feuchter Luft gut schmiert. Für Anwendungen in trockenen Gasen oder Vakuum (Weltraum) musste ein neuer Verbundwerkstoff entwickelt werden, der statt Grafit Molybdändisulfid (MoS_2) enthält. (Grafit schmiert nur unter Anwesenheit von Luftfeuchtigkeit, MoS_2 nur bei dessen Abwesenheit.) Dazu war eine Adaptierung des Herstellprozesses notwendig, weil in der gängigen Kompaktierung das MoS_2 mit dem Kupfer zu Kupfersulfid reagiert, welches nicht die gewünschten Schmiereigenschaften aufweist. Basierend auf „coated particles“ und unter Einhaltung bestimmter Herstellungsparameter konnte ein Verbundwerkstoff aus Kupfer und MoS_2 erfolgreich hergestellt werden. Erste Reib-Versuche unter Vakuum zeigten Reibwerte unter 0,05 ohne zusätzliche Schmierung. Damit konnte gezeigt werden, dass der Mechanismus „Entstehung eines Schmierfilmes aus MoS_2 Pulver, das in einer Metallmatrix eingebettet“ ist, auch unter Vakuum funktioniert. Der konkurrierende Effekt wäre starker adhäsiver Verschleiß, da die Metallmatrix mit dem ebenfalls metallischem Gegenwerkstoff in Kontakt steht.

Ein gerade anlaufendes Projekt, das durch die ESA finanziert wird, umfasst eine detaillierte Charakterisierung aller Eigenschaften, die für den Einsatz als Gleitlagerwerkstoff im Weltraum notwendig sind. Dieses Projekt umfasst neben dem soeben beschriebenen Verbundwerkstoff auf Basis von Metall, auch einen auf Basis eines Hochleistungskunststoffes (Polyimid). Auch hier wird ein Pulver (Polyimid) mit verschiedenen Zusätzen unter hoher Temperatur zu einem Verbundwerkstoff („Sintimid“) verpresst. Vorstudien seitens ARC/WP haben niedrige Reibwerte und günstiges Ausgasverhalten unter Vakuum gezeigt. Endziel dieses Projektes ist die Qualifizierung dieses Werkstoffes bis zu höheren Temperaturen (300°C) unter Vakuum.

Ergänzend zu dieser anwendungsorientierten Optimierung des Werkstoffes soll im Rahmen des Kplus „Industrielle Tribologie AC²T“, ein Projekt durchgeführt werden, das die grundlegenden Einflüsse des Umgebungsmediums auf das Reib- und Verschleißverhalten von „Sintimid“ näher untersucht. Die Kooperation mit der TU-Wien ermöglicht unter anderem detaillierte Analysen der Oberfläche in Bezug auf Materialtransfer bis in wenige Atomlagen mittels „Scanning Auger Analyse“. Eine Erweiterung des Vakuumtribometers um einen Auger Detektor könnte die Oberflächenzusammensetzung während des Reibversuches zeigen. Daraus werden Erkenntnisse über die tribologischen und chemischen Prozesse während des Reibvorganges erwartet. Auf diesem Wissen ist letztendlich eine Optimierung

des Verbundwerkstoffes als auch des Basis-Polyimidis geplant.

Neben dem experimentellen Erfassen der Reibzahlen, und der Analyse der tribologischen Mechanismen beim Reibvorgang, wird die Frage nach der Vorhersage gestellt. Kann man aus der Kenntnis der Zusammensetzung der Werkstoffe auf die Reibzahl schließen? In einem ersten Schritt wurde ein selbst-schmierender Verbundwerkstoff (z.B. Kupfer-Grafit) untersucht, der in Kontakt zu einem harten Gegenkörper (Stahl) steht. Auf Basis der Finiten Elemente Methode wurde die Verformung des Verbundwerkstoffes in Oberflächennähe unter der Reibbeanspruchung modelliert. Besonders aufschlussreich war die getrennte Betrachtung der Mikro-Spannungsfelder für Matrix und Graphit-Partikel. Erste Ergebnisse [Segurado et al. 2001] zeigen, dass sowohl Matrix als auch Festschmierstoff (Grafit) bestimmte mechanische Anforderungen erfüllen müssen, damit der Grafit in Kontakt zum Gegenkörper kommen kann. Durch Integration über alle einzelnen Mikro-Spannungsfelder konnte eine „makroskopische theoretische Reibzahl“ ermittelt werden, welche der experimentellen Erfahrung nahe kommt. Um Aussagen über Verschleiß und Ausbrechen der Partikel treffen zu können, sind weitere Studien notwendig. Vision ist hierbei das „zielgerichtete Design des Werkstoffes“.

Anti-Adhäsions-Werkstoffe

Auf Raumfahrzeugen (Satelliten, Sonden) oder in vakuumtechnischen Produktionsanlagen arbeiten eine Reihe von Mechanismen unter Vakuum, die einem sich zyklisch schließendem Kugel-Scheibe-Kontakt ähnlich sind. Diese Kontakte werden oft als statisch betrachtet und mittels Hertz Theorie berechnet. In Realität tritt aber häufig ein Aufprall (Impact) oder Mikrovibrationen (Fretting) hinzu. Beispiele für ersteren Fall sind Relais, aber vor allem durch Elektromagnete bewegte Teile die einen Anschlag besitzen, siehe z.B. Abb. 1. Durch Körperschall kann es auch in scheinbar statischen Kontakten zu Mikrovibrationen kommen. Beide Effekte führen zu unkontrollierbar hohen Adhäsionskräften, die sich aus vielfältigen Gründen nicht theoretisch herleiten lassen [Merstallinger 1995]. Andererseits sind Lebensdauern von einigen zehntausend Zyklen Voraussetzung für den Einsatz auf Satelliten, deren Mindestlebensdauer von 7 auf mittlerweile bis zu 15 Jahren gestiegen ist. Ergänzend sei noch hinzugefügt, dass die kritische Adhäsionskraft, die gerade noch überwunden werden kann, oft sehr klein ist (<1 N). Dies ist durch energiesparende und leichte Bauweise bedingt.

Hauptgrund der „Kaltverschweißung“ ist die Kombination von Vakuum und Zerstörung der Oberflächenschichten (Oxide) bei Metallen. Unter irdischen Bedingungen (Sauerstoff) würde bei jedem Öffnen die zerstörte Oxid-Oberfläche wieder entstehen, was sich im Falle von Fretting als Passungsrost zeigt. Unter Vakuum findet keine „Wiederoxidation“ statt. Durch wiederholtes Aufprallen oder Gleitbewegungen (Fretting) wird bei beiden Kontaktpartnern immer mehr blankes Metall freigelegt, womit die Adhäsionskräfte zwischen ihnen zunehmen.

Mithilfe der eigens entwickelten „Kaltverschweißungs-prüfstände“ konnte eine „allgemeine Erfahrung“ bewiesen

werden: dass die Stärke der Adhäsion von der Art des Kontaktes abhängt. Sie steigt in der Reihenfolge Static – Impact – Fretting [Merstallinger et al 1997]. Ein Beispiel ist in Abb. 3 zu sehen. Die drei Kurven zeigen die maximale Adhäsionskraft als Funktion der Zyklenanzahl für drei verschiedene Kontaktarten (Static, Impact, Fretting) an einer Titan-Stahl-Kombination. Ohne beide Effekte (Impact, Fretting), also bei rein statischem Kontakt, wurden nur geringe Adhäsionskräfte von 0.02 – 0.03 N gefunden. Im Falle eines Aufschlages - der plastische Deformation zur Folge hatte - betrug die maximal Adhäsionskraft schon 0.96 N. Fretting unter Vakuum führte schließlich zu maximalen Adhäsionskräften (9.5 N), die die Schließkraft (4 N) deutlich überschritten.

Ohne dieser experimentellen Expertise, würde ein Designer eine Rückstellfeder „ausreichend überdimensionieren“: sie würde z.B. das zehnfache der Adhäsionskräfte im statischen Kontakt überwinden können. Trotzdem würde die Kraft der Rückstellfeder (0,3 N) nicht ausreichen um die Adhäsion im Falle eines Aufschlages (0,9N) zu überwinden. Ein ähnliches Vorgehen hat letztendlich zum Ausfall des in Abb.1 gezeigten Satelliten-Mechanismus geführt.

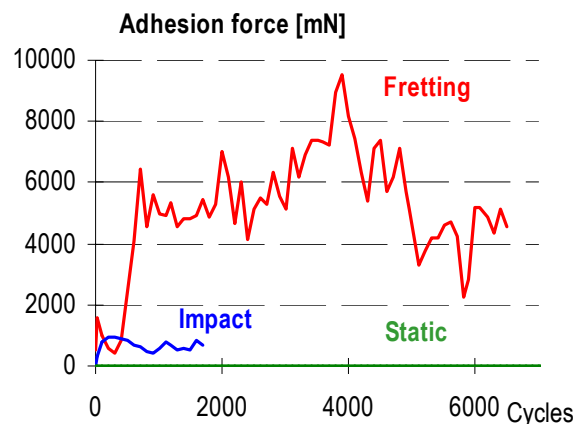


Abb. 3 Adhäsionskräfte zwischen Titan und Stahl unter Vakuum als Funktion der Kontaktzyklen. Adhäsion steigt mit der Art des Kontaktes: statisch (vernachlässigbar) – Impact – Fretting.

Auf Basis dieser Parameter-Studien wurde ein Prüfstandard [Cold welding standard 1999] erstellt und von der ESA anerkannt, mit dem Ziel eine Landkarte der „guten und schlechten Werkstoff- und Beschichtungspaarungen“, also eine Datenbank, zu schaffen. Studien der letzten Jahre haben unter anderem gezeigt, dass Aluminium durch Anodisieren geschützt werden kann, dies sowohl unter Impact als auch unter Fretting. Rostfreier Stahl (austenitisch) zeigt ebenfalls hohe Adhäsionsneigung. Durch Hartstoffschichten (Titankarbid) konnte die Neigung unter Impact nur reduziert werden, vernachlässigbar gering wurde sie durch Beschichtungen mit MoS₂ [Merstallinger et al 1999]. Unter Fretting ist aber auch MoS₂ nur ein zeitlich begrenzter Schutz. Nach wenigen Minuten Vibrationen verliert die Schicht ihre Schmierwirkung und hohe Adhäsion tritt auf. Verbundwerkstoffe basierend auf Kunststoff (Polyimid) zeigten wie erwartet keine Adhäsion, jedoch unter Fretting erheblichen Verschleiß [Merstallinger et al. 2001].

Gegenwärtige Studien haben das Ziel, den Einfluss der Mikrostruktur verschiedener Stahllarten (Martensit, Austenit, Ferrit) auf die Adhäsionsneigung zu untersuchen. Ausschlaggebend dafür war unter anderem eine Studie, die das Adhäsionsverhalten verschiedener Stähle und Nickellegierungen zu Werkzeugstahl untersuchte. Mit steigendem Anteil an Nickel bzw. austenitischer Mikrostruktur stieg auch die Adhäsionskraft. Das Ziel war hierbei eine Beschichtung für Wendeschneidplättchen zu finden, die in der spangebenden Bearbeitung die Adhäsion der Späne am Plättchen verhindern soll [Persson et al. 2001].

Obwohl Anodisieren des Aluminiums Kaltverschweißung verhindert, sind die entstehenden Verschleißpartikel im schwerelosen Raum ein Problem: sie schweben davon und können andere Teile des Raumfahrzeuges beeinträchtigen. Untersuchungen an neuartigen, deutlich dickeren (mehr als 30 μm) und keramikähnlichen Beschichtungen wurden kürzlich begonnen.

Ein Werkstoff der besonderen Art sind die sogenannten „Quasikristalle“. Obwohl sie nur aus Metallatomen bestehen, haben sie Eigenschaften, die eher einer Keramik als einem Metall entsprechen. Woher kommt der Begriff „Quasikristall“, d.h. Kristall und doch keiner? Als Bedingungen für eine Einordnung als „Kristall“ werden das Vorfinden von Punktmustern im Röntgenbeugungsbild und „Translationssymmetrie“ vorgegeben. Letztere bedeutet, dass man den ganzen Raum lückenfrei mit sogenannten „Einheitszellen“ ausfüllen kann. Das funktioniert z.B. mit der Einheitszelle „Würfel“ im Raum, oder mit Drei-, Vier- und Sechsecken in der Ebene. Aber mit Fünfecken kann man den Tisch nicht lückenfrei bedecken! Also gibt es auch keine Kristalle, die eine „fünzfähige“ Symmetrie aufweisen. Zumindest bis 1982, als Beugungsbilder entdeckt wurden, deren Punktmuster eine solche fünfzählige Symmetrie aufwiesen. Diese Materialien waren also Kristalle, denn sie hatten punktförmige Beugungsbilder. Andererseits waren sie auch wieder keine Kristalle, weil man sie nicht durch Aneinanderreihen von einer „Einheitszelle“ darstellen konnte. Lösung des Dilemmas: man benannte diese Materialien „Quasikristalle“. Abb. 4 zeigt Einkristalle in ihrer Form als Rombendodekaeder, und Abb. 5 eine eindeutig nicht „translations-symmetrische“ Struktur, die aber fünfzählige Strukturen erkennen lässt.

Mittlerweile können Probekörper nicht nur durch Züchten von Einkristallen, sondern auch durch Sintern von kommerziell erhältlichen Pulvern hergestellt werden. Die folgenden Beispiele für gesinterte Quasikristalle zeigen auch den kritischen Punkt bei der Produktion: die exakte Einhaltung der Stöchiometrie: $\text{Al}_{71}\text{Fe}_{9,7}\text{Cr}_{10,6}\text{Cu}_{9,7}$, $\text{Al}_{59}\text{Fe}_{12,4}\text{Cu}_{25,5}\text{B}_3$ oder $\text{Al}_{71,3}\text{Fe}_{8,1}\text{Co}_{12,8}\text{Cr}_{7,8}$. Mit dem Sinterprozess lässt sich mehr Material für Erforschung der Eigenschaften herstellen. Verblüffend ist, dass diese Werkstoffe nur aus Metallatomen bestehen, aber trotzdem keramisches Verhalten zeigen: hohe Härte, teilweise spröde, niedrige thermische und elektrische Leitfähigkeit. Dies ist verbunden mit der dominierenden elektronischen Bindung der Atome: kovalent wie in Keramiken. Weitere Besonderheiten der Quasikristalle sind niedrige Reibwerte an Luft [Dubois et al. 1991], sowie deren geringe Benetzbarkeit [Dubois et al. 1997]. Für erste Studien

zum Kontakt zu Festkörpern wurden selektierte Kaltverschweißungstests unter Fretting und Vakuum durchgeführt. Die ersten Ergebnisse zeigen vernachlässigbare Adhäsion zwischen Quasikristall und Kugellagerstahl (100Cr6) [Brunet et al. 2002].



Abb. 4 Quasikristall: mit dieser Form (Rhombendodekaeder) kann kein Raum lückenlos ausgefüllt werden (vgl. Würfel).

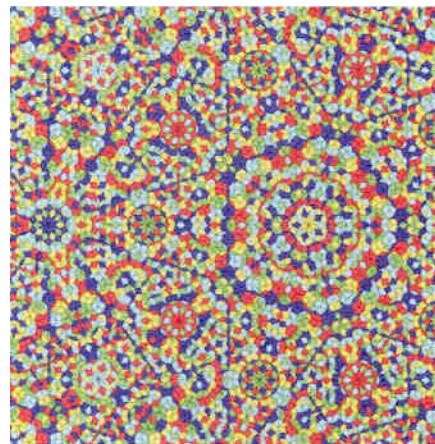


Abb. 5 Quasikristall: Trotz fehlender Translationssymmetrie, (durch Verschieben des Bildes deckt es sich nicht mehr mit sich selbst) erzeugt ein Quasikristall ein punktförmiges Röntgenbeugungsbild.

Die keramikähnlichen Quasikristalle bieten eine einmalige Gelegenheit für die Grundlagenforschung: der Übergang von Keramik zu Metall wird durch eine nur geringfügige Änderung der Zusammensetzung erreicht. Chemisch ausgedrückt, bedeutet das, dass praktisch die gleichen Atome vorhanden sind, nur dass sie nicht kovalent (wie Keramiken) gebunden sind, sondern metallisch. In Keramiken, also bei kovalenter Bindung sind die Elektronen an die Partneratome gebunden, während in metallischer Bindung die Elektronen frei zwischen Atomrümpfen beweglich sind. Von der Elektronenbindung hängen auch wesentliche Werkstoffeigenschaften ab. Freie Elektronen bedeuten unter anderem hohe elektrische und Wärmeleitfähigkeit. Die Möglichkeit, die Bindung unter „Beibehaltung“ der Zusammensetzung zu variieren, ermöglicht grundlegende Forschung: wie hängt die Reibkraft mit der (elektronischen) Bindung der Atome zusammen? Die Erkenntnisse daraus können völlig neue Anwendungsmöglichkeiten für Quasikristalle zeigen, aber auch Optimierungspotential für alle Festkörperkontakte, die auf metallischen und keramischen Werkstoffen basieren.

Conclusio – Tribologie und Werkstoff

Ein Erfolg in der Optimierung eines Werkstoffes für tribologische Anwendungen ist nur in Zusammenhang mit der Betrachtung des ganzen Tribosystems erreichbar in dem er eingesetzt werden soll: was nützt ein besonders verschleißfester Werkstoff, wenn der Gegenkörper umso schneller verschleißt. Das Gesamtsystem könnte dann sogar in kürzerer Zeit ausfallen, was nicht im Sinne des Anwenders liegt.

Am Beispiel Kaltverschweißung wurde dieser enge Zusammenhang zwischen Anwendung, Simulation und Werkstoffoptimierung dargestellt. Die Beispiele selbstschmierende Werkstoffe und Quasikristalle zeigen aber auch die Punkte, wo die Grundlagenforschung ansetzen kann. Deren Resultate erlauben einerseits neue Blickwinkel auf bestehende Anwendungen. Andererseits, wird nach dem „Heureka der Wissenschaft“ - hier ist etwas ganz Neues – die Evaluierung der Anwendbarkeit stehen, und hier ist wieder der Blick auf das ganze tribologische System zu erweitern.

Als Schlusssatz möge ein bildlicher Vergleich angeführt werden: Gerade in der Tribologie muss der Werkstoff als buchstäbliches Rädchen im Getriebe betrachtet werden.

Literatur

Brunet, P. (2002), Merstallinger A., Dubois, J.M., Friction and fretting on quasicrystals under vacuum, to be published, (AMTT)

Cold welding standard (1999), Merstallinger A., Semerad E., Test Method to Evaluate Cold Welding under Static and Impact Loading, In-home-Standard der ARC Seibersdorf research, Issue 2, 1999.

Dubois, J. M. (1997), Sordelet D., Thiel P., A Survey of the potential applications of quasicrystals, Proceedings Conf. New horizons in quasicrystals, edited by A. Goldmann, World Scientific, Singapore (1997).

Dubois, J.M. (1991), et al., Quasicrystalline low friction coatings, J. Mat. Sc. Lett. 10 (1991).

Merstallinger, A. (1995) Adhesion under UHV during cyclic loading, Doctor-Thesis, TU Vienna, 1995.

Merstallinger, A. (1997), Semerad E., Dunn B.D., Cold welding due to fretting under vacuum, Helium and air, Proc. 7h European Space Mechanisms and Tribology Symposium, ESTEC Noordwijk (NL), Oct. 1997. (ESA)

Merstallinger, A. (1999), Semerad E., Dunn B.D., Influence of impact parameters and coatings on cold welding due to impact under high vacuum, Proc. 8th European Space

Mechanisms and Tribology Symposium, Toulouse (F), Oct. 1999. (ESA)

Merstallinger, A. (2001), Semerad E., Dunn B.D., „Simulation of Cold Welding Effects in cyclic close contacts“, Tribology Forum 2001, ESTEC/Noordwijk (NL), Jan. 2001. (ESA)

Pambaguian, L. (2001), Merstallinger A., Self-Lubricating Copper matrix composites with high contents of lubricants, Proc. World Tribology Congress 2001, Vienna, Sept. 2001.

Persson, U. (2001), Chandrasekaran H., Merstallinger A., Adhesion between some tool and work materials in fretting and relation to metal cutting, WEAR 249 (2001), p. 293-301. (AMTT)

Segurado J. (2001), Pettermann H., Merstallinger A., Numerical simulations in tribology – A Micro-mechanics of materials approach, Proc. World Tribology Congress 2001, Vienna, Sept. 2001.

Acknowledgement

Die mit „AMTT“ indizierten Literaturstellen basieren zum Teil auf Projekten, die im „Aerospace Material Technology Testhouse AMTT (HPRI-CT-1999-00024)“ des Bereiches ARC/WP durchgeführt und durch das EU-TMR-Programm „Improving Human Potential“ der European Commission finanziert wurden.

Dieses EU-Programm ermöglicht europäischen Gastwissenschaftlern den kostenlosen Aufenthalt und die kostenlose Nutzung aller im Bereich Werkstofftechnik verfügbaren Geräte für Entwicklungen auf den Gebieten der Luft- und Raumfahrt zu nutzen.

Die mit „ESA“ indizierten Literaturstellen basieren zum Teil auf Projekten, die im Rahmen des „Testhauses für Weltraummaterialien“ des Bereiches ARC/WP durchgeführt, und von der ESA (Europ. Raumfahrtbehörde) finanziert wurden.

Andreas Merstallinger

andreas.merstallinger@arcs.ac.at

wiss. Mitarbeiter der ARC seibersdorf research im Geschäftsfeld Aerospace Technologies,

Forschungsschwerpunkte: Tribologie, Kaltverschweißung, beinhaltend Entwicklung neuer Messmethoden als

auch „tribologisch relevanter“ Werkstoffe, „Tribologie-Training“ von Gastwissenschaftlern im Rahmen des AMTT

