

# Zur Rolle des Wasserstoffs bei Strahlverschleißbeanspruchung unter Elektrolyteinwirkung

E. WANDKE, B. LIPPMANN, M. MÖSER  
Schmierungstechnik, Berlin, 17 (1986) S. 174-178

## **0. Einleitung**

Es ist bekannt, dass beim Verschleiß komplizierte Wechselwirkungen zwischen den Reibpartnern und den Zwischenstoffen bzw. dem umgebenden Medium stattfinden [1] bis [3]. Bei Strahlverschleißbeanspruchung unter Elektrolyteinwirkung zeigen sowohl Laborversuche als auch praktische Erfahrungen [4] bis [7], dass diese komplexe Beanspruchung in vielen Fällen zu erhöhten Werkstoffverlusten und damit zu einer geringeren Lebensdauer der Bauteile führt. Um die Ursachen und die dabei ablaufenden Mechanismen aufzuklären, wurden zunächst die Beanspruchungsbedingungen in einem speziell dafür gebauten Versuchsstand [8], die allgemeine Wirkung des Abrasives auf die Werkstoffoberfläche [9] und die Rolle der elektrochemischen Korrosion [10] untersucht. Die systematische Abgrenzung der möglichen Wirkmechanismen deutet darauf hin, dass die bei den Untersuchungen erhaltenen Tendenzen teilweise nur mit der Wirkung von Wasserstoff während des Strahlverschleißprozesses zu erklären sind. In diesem Beitrag soll deshalb die Rolle des Wasserstoffs beim mediumbeeinflussten Strahlverschleiß untersucht werden.

## **1. Allgemeine Wirkung des Wasserstoffs auf metallische Werkstoffe**

Wasserstoff ist bekanntlich das leichteste Element und hat als solches auch den kleinsten Atomdurchmesser. Als Folge kann Wasserstoff auch bei Raumtemperatur leicht in das

Metallgitter eindringen und ist dort sehr beweglich. Das gilt besonders für die ferritischen Stähle. Im dichter gepackten kubisch-flächenzentrierten Gitter der austenitischen (CrNi-)Stähle liegt der Diffusionskoeffizient um etwa vier Größenordnungen niedriger, woraus eine geringere Anfälligkeit gegenüber Wasserstoffbruch im unteren Temperaturbereich ( $< 80^\circ\text{C}$ ) resultiert. Bei den ferritischen Stählen sind wiederum die hochfesten, d. h. die von Natur aus spröderen Stähle, besonders empfindlich. So wurde die relativ geringe Wasserstoffmenge, die beim elektrolytischen Plattieren eingetragen wird, im Flugzeugbau erst zum Problem, als man aus Gründen des Leichtbaus Gewindeteile auf höhere Festigkeiten als 1250 MPa vergütete [11].

Die auffälligste Erscheinung des Wasserstoffbruchs sind die von Schweißproben her bekannten Fischaugen: Von einem größeren Hohlraum (Pore, Schlackeneinschluss, Bindefehler) ausgehend, hat sich ein Bruchhof gebildet, der sich mit seinem feinschimmernden Bruchgefüge deutlich vom umliegenden Gewaltbruch abhebt. Üblicherweise findet man die Fischaugenbildung nur auf mikroskopischem Niveau mit dem Rasterelektronenmikroskop [12] bis [17].

Der in Hohlräumen angesammelte Wasserstoff kann Drücke bis zu schätzungsweise 100 MPa entfalten [15]. Damit ist er in der Lage, in der Walzebene auch ohne äußere Lasteinwirkung Risse zu bilden.

Von besonderem Interesse ist grundsätzlich die Art, wie der Wasserstoff in das Metall eingebracht und dort transportiert wird. Einmal ist der Wasserstoff sicherlich nur im atomaren Zustand transportfähig, d. h., der Wasserstoff muss also dissoziiert werden. Zum anderen kann die zur Bruchauslösung erforderliche Schnelligkeit des Wasserstofftransportes nicht durch Diffusion als relativ langsamer Prozess gewährleistet werden. Vielmehr wird dazu eine Art Pumpeffekt benötigt, wofür sich der in der Tribochemie geprägte Begriff „Tribosorption“ (HEINICKE und HENNIG [18] [1]) anbietet.

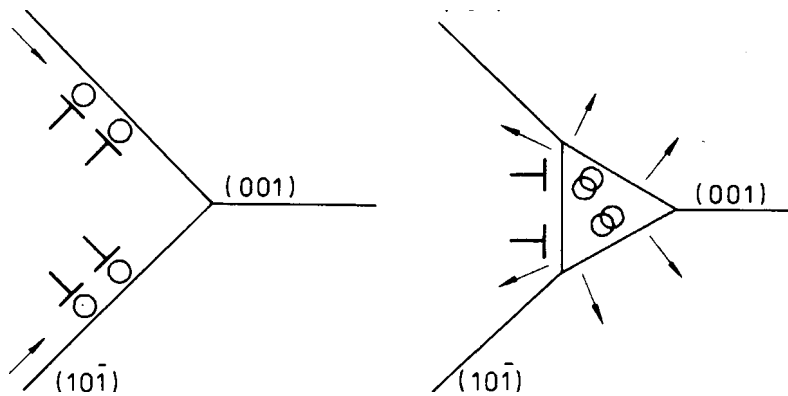
Diese Tribosorption kann in Bereichen erfolgen, in denen momentan eine plastische Verformung (Fließen) abläuft. In Metallen lokalisiert sich das Fließen bekanntlich in Gleitbändern, die damit zu Orten der Wasserstoffanreicherung werden [20].

Um die Gleitung blockieren zu können, muss der Wasserstoff wieder rekombinieren, wofür er Raum benötigt. Diesen dürfte er in deformationsinduzierten Hohlräumen finden. Solche Hohlräume (die Leerstelle als kleinste Form) können sich als Folge der Wechselwirkung von Versetzungen untereinander (Cottrell-Defekte) oder durch Aufstau von Versetzungen an Korngrenzen oder Teilchen bilden. Als Hochdruckbläschen sollte der Wasserstoff in gleicher Weise wie eine Ausscheidung wirksam sein [12] [14] [16] [17].

Ein Nachweis der Tribosorption bzw. Tribodesorption wurde bereits in den dreißiger Jahren von BARDENHEUER und PLOUM [21] geführt. Ein elektrolytisch mit Wasserstoff beladener Stahl gab diesen bei Torsion bis zu etwa zwei Drittel wieder ab. ZAPFFE [22] hat mit Wasserstoff beladene Proben aus Stahl und Armcoeisen mit Immersionsöl überzogen und in einem Schraubstock zusammengepresst. Er beobachtete einen abrupten Wasserstoffaustritt an Gleitbändern. Dieser Versuch wurde später von ERDMANN-JESNITZER [23] unter definierteren Bedingungen wiederholt.

Dass umgekehrt Eisen bzw. Stahl unter Zugverformung (Reckung) Wasserstoff ansaugt, ist von LOUTHAN [20] radiografisch gezeigt worden.

Stahl verhält sich also gegenüber Wasserstoff wie ein Schwamm. Allgemein wird für diesen schnell ablaufenden Wasserstofftransport nach [24] angenommen, dass er über Versetzung erfolgt, wie es auch hier im Bild 1 schematisch gezeigt wird.



*Bild 1.  
Hohlraumbildung durch  
Vereinigung von Versetzungen  
(Cottrell-Defekt) und  
Druckblasenbildung durch  
transportierten Wasserstoff*

Laufende Versetzungen lassen sich, abweichend von den üblichen Vorstellungen, als Bereiche sehr hoher Temperatur auffassen, d. h., in Gleitlinien kann durchaus lokal der Schmelzpunkt überschritten werden (SPÄTH [25]). Entsprechend folgerte RÖSSLER [26], dass die Wasserstoffaufnahme über eine thermische Dissoziation abläuft.

Man kann also zusammenfassend vermuten, dass der Tribosorption des Wasserstoffs die Tatsache zugrunde liegt, dass es bei der Verformung lokal zu starken Temperaturerhöhungen bis über den Schmelzpunkt kommt, der Wasserstoff also thermisch dissoziiert und in feinsten Volumina von Schmelze oder Plasma („Magma-Plasma“-Modell von THIESEN [1] [27]) transportiert wird.

## **2. Vorstellungen zur Wirkung des Wasserstoffs bei Strahlverschleißbeanspruchung**

Im Folgenden soll auf Erscheinungen der Tribo(de)sorption von Wasserstoff eingegangen werden, wie sie bei Bruch- und Bearbeitungsvorgängen auftreten, die dem Verschleiß im Allgemeinen und dem Strahlverschleiß im Besonderen zumindest ähnlich sind. Bei Strahlverschleiß ergibt sich eine enge Verwandtschaft zum Ermüdungsbruch [28], und zwar in der Hinsicht, dass sich die Lastaufbringung ständig wiederholt. Bis zum endgültigen Bruch durch Ermüdung wird eine beträchtliche Verformungsarbeit geleistet. Diese Verformungsarbeit ist außerdem fast ausschließlich auf die Riss-Spitze beschränkt (sehr kleine Fließzone). Folglich sind die Bedingungen für eine Tribosorption des

Wasserstoffs sehr günstig [16]. Der Stahl „atmet“ den Wasserstoff in der Zugphase ein und in der Druckphase aus. Wird nur im Zug-Spannungs-Bereich belastet (Schwelllast), dann wird sogar eine gewisse Übersättigung mit Wasserstoff erreicht. Ermüdung in einem wässrigen Medium wird allgemein als Schwingungsrisskorrosion interpretiert und folglich als Auflösungsprozess verstanden. Von extrem aggressiven Medien bei geringer mechanischer Beanspruchung abgesehen, lässt sich allgemein annehmen, dass im unteren Temperaturbereich die Tribosorption des Wasserstoffs den treibenden Vorgang darstellt. Man müsste demnach eher von Wasserstoffermüdung sprechen, was auch für den Fall der Wasserstoffaufnahme aus der Luftfeuchtigkeit gilt.

In der Flugzeugindustrie wurde festgestellt [33], dass während des Schleifens von Stahl dieser aus dem Kühlmittel so viel Wasserstoff aufnimmt, dass Schrauben und Gewindebolzen brechen können (hochfester Stahl). Dass beim Schleifen sehr hohe Temperaturen auftreten, ist augenscheinlich (Funken). Der direkte Beweis, dass bei Verschleißbeanspruchung Wasserstoff schon aus der Luftfeuchtigkeit vom Stahl aufgenommen wird, wurde bereits in den fünfziger Jahren von FRANK und SWEETS [29] massenspektrometrisch erbracht: Beim Beschleifen eines Stahlrohres mit Sandpapier unter normalen Bedingungen konnte im Rohr Wasserstoff nachgewiesen werden. Wurde mit nassem Sandpapier gearbeitet, stieg die Wasserstoffaufnahme um 2 Größenordnungen.

FRISCH und THIELE [30] haben später die Wasserstoffaufnahme aus der Luftfeuchtigkeit für den Fall Stahlkugeln in Rotationsmühle eingehend untersucht. Während der Bearbeitung dringt Wasserstoff einerseits in den Stahl ein (also Tribosorption), andererseits tritt er auch verstärkt aus (Tribodesorption), wie sich speziell bei nachfolgenden Verschleißzyklen im Edelgas zeigte. Es wird aber nur der Wasserstoff von der Tribodesorption erfasst, der sich in der äußeren, kaltverformten Schicht befindet. Dem tiefer in den Stahl eingedrungenen Wasserstoff musste Zeit (24 Stunden) zur Rückdiffusion gegeben werden, erst dann konnte durch die Bearbeitung wieder jeweils ein starker Wasserstoffaustritt erzwungen werden.

Die bisherigen Ausführungen lassen es als notwendig erscheinen zu überprüfen, inwieweit Strahlverschleiß in Anwesenheit eines wässrigen Elektrolyten durch Wasserstoff beeinflusst wird. Konkret gilt es zu klären, ob Wasserstoff über die lokalen Bruchvorgänge (als Wasserstoffbruch) den Abtrag beschleunigt.

Der auf der Werkstoffoberfläche erzielte hohe Verformungsgrad, die hohe Versetzungs-, Riss- und Hohlraumdichte, die sich beim Kontakt mit dem Abrasivkorn auf kleinstem Raum in Betrag und Richtung (Druck und Zug) ändernden Spannungsparameter und die Tatsache, dass die Verschleißteilchen unmittelbar in der Oberflächengrenzschicht ( $< 5 \mu\text{m}$ ) entstehen, bilden auch bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten sehr gute Möglichkeiten für die Ionisation, den Transport und die Rekombination des Wasserstoffs im Gitter.

Die bisherigen Erkenntnisse zur Wirkung des Wasserstoffs bei Strahlverschleißbeanspruchung unter Elektrolyteinwirkung lassen folgendes Werkstoffverhalten im Experiment erwarten:

- Der Wasserstoffeintrag dürfte zunehmen, wenn zusätzlich zur tribosorptiven Abspaltung von Wasser atomarer Wasserstoff (im status nascendi) aus chemischen oder elektrolytischen Reaktionen angeboten wird. Das betrifft einerseits die Einwirkung durch Säuren, andererseits die kathodische (Über-) Polarisation.
- Wirksam ist nur der Wasserstoff, der sich am Ort des Werkstoffabtrages und damit der lokalen Rissbildung befindet. Diese Zone ist nicht tiefer als etwa  $5 \mu\text{m}$ . Tiefer gelegener Wasserstoff muss erst heran diffundieren, ein relativ langsamer Vorgang [30]. Die Menge des insgesamt in der Probe vorhandenen Wasserstoffs, der z. B. aus einer vorhergegangenen elektrolytischen Beladung stammt, ist nur bedingt unter den dargestellten Gesichtspunkten wirksam.
- Analog zum normalen Wasserstoffbruch macht sich erst ein bestimmtes Wasserstoffangebot im Abtrag bemerkbar. Gleichzeitig dürfte eine obere Grenze

existieren, die möglicherweise durch die Aufnahmefähigkeit des Werkstoffs in der Riss-Spitze gegeben ist, oberhalb derer der Abtrag nicht mehr mit dem Wasserstoffangebot steigt.

- Für die Empfindlichkeit gegenüber wasserstoffbedingtem Verschleiß ist vorerst anzunehmen, dass ferritischer Stahl sich nicht anders verhält als sonst bei Wasserstoffbruch; bei einer höheren Festigkeit bzw. Härte ist Stahl verstärkt anfällig.
- Die relative Unempfindlichkeit der austenitischen (CrNi-)Stähle gilt streng nur für den Fall, dass die Beladung mit Wasserstoff über Diffusion erfolgt, da, wie eingangs erwähnt, der Wasserstoff bei Normaltemperaturen im kfz-Gitter kaum diffusionsfähig ist. Im Fall der tribosorptiven Beladung ist diese Einschränkung zumindest teilweise aufgehoben.
- Für kleine Strahlwinkel kommt es nach dem Abrasivkorndurchgang zu starken Zugspannungen, die für eine Wasserstoffaufnahme besonders günstig sind, während bei senkrechtem Aufprall Druckspannungen dominieren dürften. Es ist also eine Winkelabhängigkeit für den wasserstoffbedingten Verschleiß anzunehmen.
- Wie theoretisch zu erwarten und experimentell nachgewiesen wurde, kann der Wasserstoff unter entsprechenden Bedingungen sehr schnell wirksam werden, so dass der wasserstoffbedingte Verschleißanteil in weiten Grenzen zeitlich nahezu unabhängig sein wird.
- Angesichts der Beanspruchungsart und der hohen Abtragsintensitäten ist beim Strahlverschleiß nicht zu erwarten, dass sich die Wirkung des Wasserstoffs in den bekannten Erscheinungen, z. B. Fischaugenbildung, nachweisen lässt.

### 3. Versuchsdurchführung

Aus den theoretischen Betrachtungen und den Literaturerkenntnissen abgeleiteten Zusammenhängen für das Werkstoffverhalten ergeben sich zwei Versuchsabschnitte:

Im ersten, für die Zielstellung wichtigsten Versuchsabschnitt werden Proben aus St38 und X8CrNiTi18-10

- unmittelbar vor der Strahlbeanspruchung mit Wasserstoff elektrolytisch beladen,
- während der Strahlbeanspruchung so stark kathodisch polarisiert, dass an den Oberflächen eine starke Wasserstoffentwicklung einsetzte und während der Strahlbeanspruchung im Bereich des kathodischen Schutzes polarisiert, um die möglicherweise aus elektrochemischen Reaktionen resultierende Wasserstoffentwicklung zu minimieren.

Der zweite Versuchsabschnitt beinhaltet vergleichende Untersuchungen zu verschiedenen Werkstoffen und Gefügestrukturen. Dabei werden die Art des Elektrolyten, die Strahlgeschwindigkeit und der Strahlwinkel variiert. Die Versuche werden auf der bereits mehrfach beschriebenen zentrifugierenden Strahlverschleißmaschine [4] [8] [9] durchgeführt.



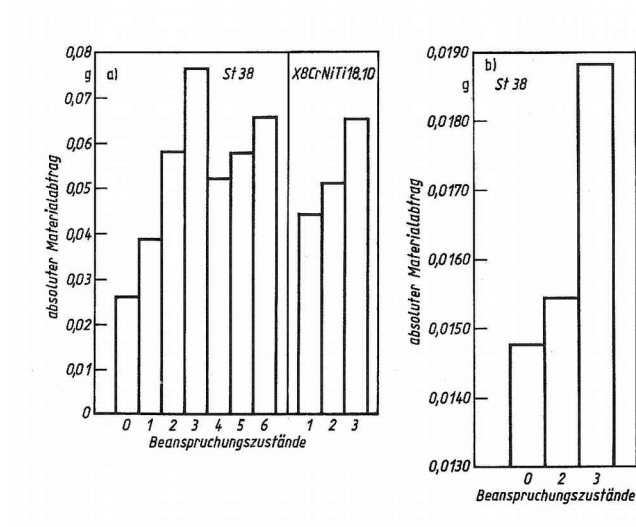


Bild 2.

Einfluss von Polarisationsversuchen auf das Abtragsverhalten von St 38 und X8CrNiTi18-10

a) bei 90 m/s Strahlgeschwindigkeit

b) bei 30 m/s Strahlgeschwindigkeit

#### Beanspruchungszustände

0 Sand/trocken;

1 Sand/0,1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>;

2 Polarisation vor Bearb. in 0,1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  
anschl. Sand/0,1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ohne  
Polarisation);

3 Polarisation vor Bearb. in 0,1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
anschl. Sand/0,1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und Polarisation  
bei -1850mV, GKE während Bearb.;

4 Sand/H<sub>2</sub>O;

5 Polarisation vor Bearb. in H<sub>2</sub>O anschl.  
Sand/H<sub>2</sub>O;

6 Sand/H<sub>2</sub>O u. Polarisation bei -1850 mV,  
GKE während Bearb.

Für die Versuchsauswertung sind detaillierte Kenntnisse zu den Beanspruchungsbedingungen der Proben in der Verschleißmaschine erforderlich. Diese sollen deshalb noch einmal kurz dargestellt werden [8].

Die Strahlgeschwindigkeit lässt sich in den Grenzen von 10 bis 130 m/s stufenlos einstellen, die Strahlwinkel sind zwischen 15° und 90° in 15°-Stufen frei wählbar und die Probengröße beträgt 15 mm \* 20 mm \* 4 mm. Aus rechnerischen Analysen und Untersuchungen mittels Kurzzeitfotografie ergab sich, dass das Abrasiv als Einzelkörner mit einem mittleren Abstand von 4 mm zum nachfolgenden Korn auf die Probe auftrifft und eine gegenseitige Beeinflussung kaum möglich ist. Je nach Strahlwinkel schlagen 10 bis 50 Teilchen mm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> auf die Probe auf. Das bedeutet etwa eine Trefferdichte von 1 bis 2 Abrasivkörnern je Sekunde auf die gleiche Stelle. Der Elektrolyt (Wasser) wird ebenfalls wie das Abrasiv beschleunigt, verlässt die Rotorkanäle tröpfchenförmig und schlägt mit entsprechender Energie auf die Probenoberfläche auf. So ist eine ständige

Benetzung der Oberfläche, auch angesichts des zerklüfteten Oberflächenprofils und der ständigen Abrasiveinwirkung gegeben.

Die strahlverschleißbedingten Veränderungen im oberflächennahen Bereich der beanspruchten Proben wurden ausführlich in [9] beschrieben. Charakteristisch sind die stark plastische Verformung (Kraterbildung), die Riss- und Hohlrumbaueung sowie die Verfestigung der Randzone.

Die Versuchsauswertung erfolgt vorzugsweise gravimetrisch [8]. Licht- und elektronenoptische sowie Verfahren der Röntgenfeinstrukturanalyse werden zur Erweiterung der Aussage herangezogen.

#### **4. Versuchsergebnisse**

Die wesentlichsten Ergebnisse zum ersten Teil der Versuchsdurchführung zeigen die Bilder 2a) und b). Daraus ist für die Werkstoffe St38 und X8CrNiTi18.10 ersichtlich:

- Die Zugabe von Wasser bzw. 0,1 N Schwefelsäure erhöht in jedem Fall den Abtrag im Vergleich zum Strahlverschleiß in Luft, wobei für diese Geschwindigkeit die Wasserwerte über den Säurewerten liegen (Zustand 1 und 4).
- Die elektrolytische Beladung der Probe mit Wasserstoff vor dem Strahlversuch bringt eine weitere bedeutende Steigerung des Materialverlustes, wobei die Steigerung unter Schwefelsäureeinwirkung am größten ist (Zustände 2 und 5).
- Eine weitere Zunahme des Abtrags wird erreicht, wenn an wasserstoffbeladenen Proben noch zusätzlich durch entsprechende kathodische Polarisation an der Oberfläche während der Bearbeitung Wasserstoff angeboten wird (Zustand 3).
- Zu einer Steigerung kommt es aber auch, wenn die Proben im Walzzustand (ohne Wasserstoffbeladung) während der Bearbeitung kathodisch überpolarisiert werden.

Prinzipiell lassen sich die gleichen Aussagen, wie sie aus den Ergebnissen für 90 m/s Strahlgeschwindigkeit formuliert wurden (Bild 2a), auch auf 30 m/s übertragen (Bild 2b), jedoch liegen hier die Säurewerte meist über den Wasserwerten und die Versuchsdurchführung selbst ist wesentlich aufwendiger.

Das Aufbringen eines kathodischen Schutzpotentials führt zu keiner Veränderung der Abtragswerte.

Ebenfalls von großer Aussagekraft für die Lösung der Problemstellung sind die im Bild 3 dargestellten Ergebnisse. Es wird für drei typische Werkstoffe die Abhängigkeit des Materialverlustes von der Art des Elektrolyten, dem Strahlwinkel und der Strahlgeschwindigkeit dargestellt, wobei die Trockenwerte zum Vergleich eingetragen wurden.

Aus der Gesamtheit der untersuchten Werkstoffe [4] zeichnen sich nach ihrem Verhalten zwei Extreme ab.

Auf der einen Seite steht C60-813 HV. Hier führt der Übergang von trockener Beanspruchung zur zusätzlichen Elektrolyteinwirkung mit steigender Normalität zu deutlich steigenden Materialverlusten. Typisch ist auch, dass die Zunahme des Abtrags besonders deutlich für sehr kleine Strahlwinkel wird. Die Abtragssteigerung ist bei allen Geschwindigkeitsstufen deutlich zu erkennen. Werkstoffe mit ähnlichem Verhalten wie C60-813 HV sind z. B. andere harte Eisenwerkstoffe, aber auch verschiedene Keramiken und Glas.

Ein teilweise völlig anderes Verhalten zeigt z. B. Kupfer. Der Übergang von trockener Strahlbeanspruchung zur Beanspruchung unter Wassereinwirkung führt zu wesentlich größeren Steigerungsraten im Abtrag als bei C60-813 HV.

Die Materialverluste sinken aber bereits bei Säurezugabe geringer Konzentration für alle Versuchsvarianten unter die Trockenwerte ab und erreichen im Untersuchungsbereich für 0,1 N Schwefelsäure die kleinsten Werte.

Zwischen der Abtragscharakteristik von C60-813 HV und Kupfer lässt sich das Verhalten aller anderen untersuchten Werkstoffe einordnen. St38, Bild 3, nimmt hierbei etwa eine mittlere Stellung ein. In der Regel weisen alle Werkstoffe, bezogen auf die Trockenwerte, unter zusätzlicher Wassereinwirkung eine deutliche Zunahme des Werkstoffverlustes auf. Dagegen ist das Verhalten bei der Einwirkung verdünnter Säuren unterschiedlich und reicht von einer starken Abnahme des Materialverlustes für duktile Werkstoffe, über nur geringen Auswirkungen bis zur wesentlichen Abtragssteigerung für harte und spröde Werkstoffe. Eine Winkel- und Geschwindigkeitsabhängigkeit im Verhalten ist meist gegeben.

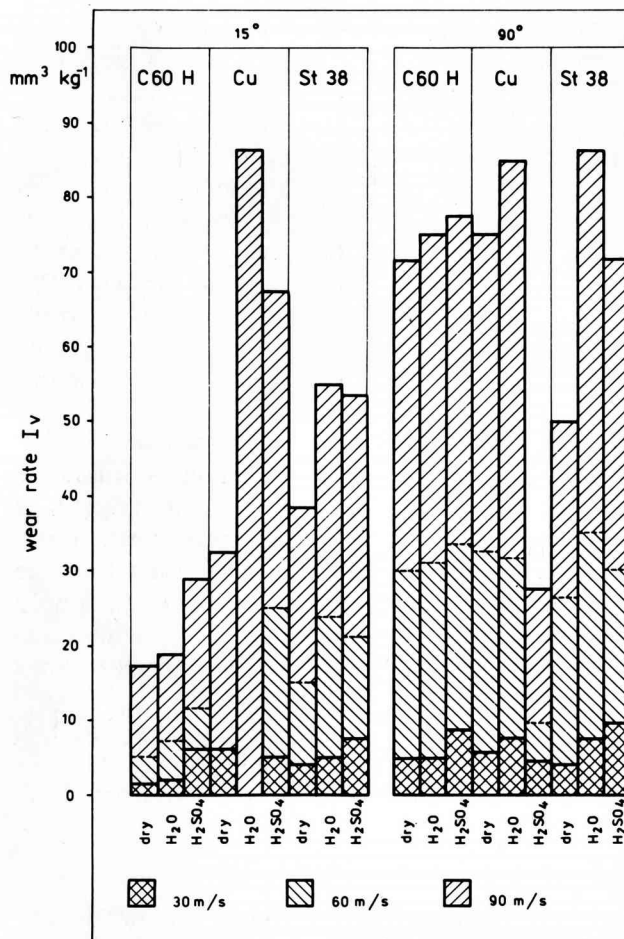


Bild 3.  
Darstellung der Werkstoffverluste bei Strahlbeanspruchung in Abhängigkeit von der Art des Elektrolyten für verschiedene Strahlgeschwindigkeiten und Winkel

Andere Versuchsergebnisse und ihre veränderte Darstellungsweise, z. B. die Darstellung des Abtrags als Quotient, bezogen auf die Trockenwerte in Abhängigkeit von der Strahlgeschwindigkeit und dem Strahlwinkel, erhärten die dargestellten Tendenzen [4]. Über sie soll später detailliert berichtet werden.

## **5. Diskussion der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlicher Wasserstoffbeladung der Proben vor und während der Strahlbeanspruchung weisen eindeutig den Einfluss des Wasserstoffs auf den Werkstoffabtrag unter den in der Strahlverschleißmaschine realisierten Beanspruchungsbedingungen nach. Wobei auch die Schlussfolgerung zulässig ist, dass der Wasserstoff ebenfalls dann wirkt, wenn er nicht ausdrücklich in die Probe eingebracht oder durch Überpolarisation auf der Probenoberfläche erzeugt wird. Dass ein kathodischer Schutz unwirksam, d. h. auf die Abtragshöhe keinen Einfluss hat, beweist einmal mehr die geringe Bedeutung der elektrochemischen Korrosion für den Gesamtprozess [4] [10]. Dass der Werkstoff X8CrNiTi18.10 ebenfalls bedeutende Änderungen im Abtragsverhalten unter Wasserstoffeinfluss zeigt, unterstreicht – wie bereits erwähnt –, dass die unter quasistatischen Verhältnissen ermittelten Eigenschaften nicht ohne Vorbehalt auf Strahlverschleiß unter Elektrolyteinwirkung zu übertragen sind.

Die Versuchsergebnisse, Bild 2, zeigen auch, dass offensichtlich der vor der Verschleißbeanspruchung elektrolytisch in die Probe eingetragene Wasserstoff am Abtragsmechanismus beteiligt ist.

Die Untersuchungen zu den verschiedensten Werkstoffen (Versuchsabschnitt 2) führen zu einer ganzen Reihe von neuen Erkenntnissen. Zunächst wird bewiesen, dass für die untersuchten Werkstoffe bei den eingestellten Beanspruchungsbedingungen die Wasserzugabe zum Abrasiv zu einer Erhöhung des Materialverlustes führt. Dieses Verhalten wird mit der tribosorptiven Wirkung von Wasserstoff, erzeugt durch

Wasserzerlegung, erklärt. Die Einwirkung verdünnter Säuren führt zu sehr unterschiedlichem Werkstoffverhalten.

Gehärtete Stähle, aber auch Keramik und Glas [4] bestätigen die formulierten Erwartungen. Der Abtrag steigt im Vergleich zu den Wasserwerten deutlich an. Es wird infolge des höheren Dissoziationsgrades mehr Wasserstoff wirksam als durch die tribosorptive Wasserzerlegung. Die Ergebnisse zu den weicheren Stählen und besonders das Verhalten von Kupfer sind nicht allein mit der Wirkung von Wasserstoff zu erklären. Es existiert offensichtlich mindestens ein Effekt, der bei der Einwirkung von verdünnten Säuren dem Wasserstoffeffekt entgegenwirkt. Dieser Effekt hat entsprechend den vorliegenden Versuchsergebnissen folgende Eigenschaften:

- Bei gehärteten bzw. spröden Werkstoffen sowie bei Wassereinwirkung ist seine Wirkung nicht vorhanden oder zunächst nicht erkennbar.
- Die Wirkung ist winkel-, werkstoff- und geschwindigkeitsabhängig, ohne dass derzeit in jedem Fall verallgemeinerungsfähige Tendenzen zu erkennen sind.
- Es hat keinen prinzipiellen Einfluss, ob als Elektrolyt 0,1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oder 0,1 N HCl verwendet wird. Der Effekt ist unabhängig vom Korrosionsverhalten des Werkstoffs.

Es gibt derzeit noch keine endgültige Erklärung für diesen Effekt.

Werden die Ergebnisse vom Bild 2 für St38 in Bild 3 übertragen, so ist zu erkennen, dass keineswegs mit der Beanspruchung durch 0,1 N Säure die vermutete obere Grenze der wirksamen Wasserstoffmenge erreicht wird. Die kathodische Überpolarisation führt für St38 sowohl beim Einsatz von Wasser als auch von verdünnter Säure zu deutlich höheren wasserstoffbedingten Abtragsraten. Die Untersuchungen von UETZ [19] zum Einfluss der Luftfeuchte auf das Verschleißverhalten deuten an, dass die untere Grenze der wirksamen Wasserstoffmenge bei wesentlich geringeren Flüssigkeitsmengen liegt als bisher im Experiment verwendet.

Die Erkenntnis, dass Wasserstoff eine wesentliche Rolle beim Strahlverschleiß unter Elektrolyteinwirkung spielt, ist z. B. für die werkstofftechnische Auslegung von Nassentstaubungs- und Mischanlagen und ihrem zuverlässigen Einsatz von außerordentlicher Bedeutung. Eine zielgerichtete Anwendung des bei vielen Konstruktionswerkstoffen darüber hinaus noch wirksamen verschleißmindernden Effekts könnte die technisch-ökonomische Wirkung weiter verstärken.

## **6. Zusammenfassung**

Auf der Basis einer umfangreichen Literaturrecherche wird zunächst die Wirkung des Wasserstoffs auf metallische Werkstoffe allgemein und daran anschließend für mechanisch hochangeregte Zustände diskutiert. Die sich bei Reibungsvorgängen einstellenden strukturellen und energetischen Verhältnisse an der Werkstückoberfläche bieten gute Voraussetzung für die tribosorptive Abspaltung, den Transport und die Rekombination des Wasserstoffs.

Daraus abgeleitet werden Erwartungen über das Verhalten metallischer Werkstoffe bei Strahlverschleißbeanspruchung unter gleichzeitiger Einwirkung wässriger Elektrolyte formuliert, deren experimentelle Überprüfung mit Hilfe einer zentrifugierenden Strahlverschleißmaschine erfolgt.

Durch Polarisations- und Beladungsversuche sowie vergleichende Untersuchungen an verschiedensten Werkstoffen kann gezeigt werden, dass Wasserstoff einen wesentlichen Einfluss auf das Abtragsverhalten der Werkstoffe hat. Wasser führt in Verbindung mit dem Abrasiv zu einer Steigerung des Materialverlustes infolge tribosorptiver Abspaltung von Wasserstoff, während die Einwirkung von verdünnten Säuren unterschiedliche Auswirkungen hat. Für gehärtete Stähle führt das Mehrangebot an Wasserstoff zu einer Zunahme des wasserstoffbedingten Verschleißes. Bei duktilen Werkstoffen wie St38 und Cu verbessert sich das Materialverhalten. Der Abtrag sinkt teilweise unter die Trockenwerte.

Die zielgerichtete Beeinflussung bzw. Nutzung der gefundenen Verhaltensweisen lassen hohe technisch-ökonomische Auswirkungen erwarten.

## Literatur

- [1] HEINICKE, G. u. a.: Tribochemistry. Berlin: Akademie-Verlag 1982
- [2] LAZAREV, G.-H.: Besonderheiten der Reibung und des Verschleißes von Werkstoffen in aggressiven Medien (russ.). *Trenie i iznos*, Kiev 2 (1981) 1, S. 43-52
- [3] NAKAYAMA, K.; OGALVA, H.; SAKURAI, T.: Some aspects of the mechanism of chemical wear: a correlation between dynamic wear rate and static corrosion rate (Einige Aspekte zum Mechanismus des chemischen Verschleißes: ein Zusammenhang zwischen dynamischer Verschleißrate und statischer Korrosionsrate). *Wear*, Lausanne 68 (1981) S. 259-262
- [4] Ergebnisbericht Strahlverschleiß. 2. Auflage, Brennstoffinstitut Freiberg 1985 (unveröffentlicht)
- [5] ÜKSTI, L. A.: Über die Rolle der Adsorptionsfestigkeitsverminderung beim Erosionsprozess in korrosiven Medien (russ.) Forschungsheft des Polytechnischen Institutes Tallinn Nr. 381 (1975)
- [6] SJARGAVA, P.; VALDMA, L.: Der Zentrifugalbeschleuniger ZUK-3M – ein Gerät zur Untersuchung von Werkstoffen auf Abriebverschleiß unter Zugabe von Wasser (russ.). Forschungsheft des Polytechnischen Institutes Tallinn Nr. 347 (1972)
- [7] ÜKSTIL, A.: Physiko-chemische Aspekte des Verschleißmechanismus von Metallen in einem feuchten Schleifmittelstrahl (russ.). Forschungsheft des Polytechnischen Institutes Tallinn Nr. 560 (1983)
- [8] WANDKE, E.; FRÖHNER, U.: Ein vielseitig nutzbarer Strahlverschleißprüfstand. *Schmierungs-technik*, Berlin 16 (1985) 5, S. 138-47
- [9] WANDKE, E.; FRÖHNER, U.; BAUM, H.: Strukturuntersuchungen an Strahlverschleißproben. *Schmierungs-technik*, Berlin 15 (1984) 6, S. 164 bis 169
- [10] LIPPMANN, B.; WANDKE, E.: Zur Rolle der elektrochemischen Korrosion bei Strahlverschleißbeanspruchung unter Elektrolyteinwirkung. *BI-Mitteilungen*, Freiberg 16 (1985) 6, S. 254-269
- [11] STEINHAUSER, W.: Die Gefahr des verzögerten Sprödbruches bei hochfesten Stählen. *Luftfahrttechnik - Raumfahrttechnik* 10 (1964) 4, S. 93-100
- [12] MÖSER, M., SCHMIDT, V.: Fractography and mechanism of hydrogen cracking – the fisheye concept (Fraktographie und Mechanismus des Wasserstoffbruchs – Fischaugenkonzept). In:



- Advances in fracture research, Proceedings of the 6th International Conference on Fracture (ICF 6), New Delhi 1984. Ed. S. R. VALLURI u. a., Vol. 4, S. 2459-2466. Oxford: Pergamon Press 1984
- [13] MÖSER, M.: Bruch durch Wasserstoff – Kaltrissigkeit ; Nebennahtrisse. Schweißtechnik, Berlin 35 (1985) 3, S. 140-143
- [14] MÖSER, M.: Bruch durch Wasserstoff – Kaltrissigkeit; Mechanismus des Wasserstoffbruchs: Fischeugen(-Effekt). Schweißtechnik, Berlin 34 (1984) 11, S. 521-524
- [15] MÖSER, M.: Zum Wasserstoffbruch niedrigfester Stähle – Fischeugen und Blasenrisse. Neue Hütte, Leipzig 29 (1984) 6, S. 229-234
- [16] MÖSER, M.: Ermüdung in wasserstoffhaltiger Umgebung. In: Proceedings of the 7th International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals. Miskolc (Hung.) 1983: Publications of the Technical University, Series C (Machinery), Vol. 39, S. 57-80, Miskolc 1983
- [17] MÖSER, M.: Wasserstoff und Ermüdung (Bruch von Hüftgelenkprothesen). 11. Tagung Elektronenmikroskopie Dresden 1984, Bd. 1, S. 173/174 + A 58
- [18] HEINICKE, G.; HENNIG, H.-P.: Sorption und Diffusion in mechanisch bearbeiteten Festkörpern. Wissenschaft und Fortschritt 32 (1982) 1, S. 29-34
- [19] UETZ, H.: Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf den Gleitverschleiß metallischer Werkstoffe. Werkstoffe und Korrosion, Weinheim 19 (1968) 8, S. 665 -676
- [20] LOUTHAN, M. R. u. a.: Hydrogen embrittlement of metals (Wasserstoffsprödigkeit von Metallen). Materials Science and Engineering 10 (1972) S. 357-368
- [21] BARDENHEUPER, P.; PLOUM, H.: Die Wasserstoffbrüchigkeit des Stahles in Abhängigkeit von der aufgenommenen Wasserstoffmenge. Mitteilung des Kaiser-Wilhelm-Institutes für Eisenforschung 14 (1934) S. 129-138
- [22] ZAPFFE, C. A.: Neumann bands and the planar-pressure theory of hydrogen embrittlement (Neumann-Bänder und die Planardrucktheorie der Wasserstoffversprödung). Journal of the Iron and Steel Institute 154 (1946) S. 122-131 U. Tafel X-XI1
- [23] ERDMANN-JESNITZER, F.: Plastische Verformung und Wasserstoffverhalten bei der Fleckenbildung von unlegiertem Stahl. Archiv Eisenhüttenwesen, Düsseldorf 28 (1957) 516, S. 355-365
- [24] BASTIEN, P.; AZOU, P.: Effect of hydrogen on the deformation and fracture of iron and steel in simple tension (Der Wasserstoffeinfluss auf die Deformation und den Bruch von Eisen und Stahl bei einfachem Zug). Proc. of the First World Metallurgical Congr.: American Society for Metals, Cleveland, OH (1951) S. 535-552; auch in: Hydrogen damage, ed. C. D. Beachem, Ohio: American Society for Metals 1977, S. 76-92
- [25] SPÄTH, W.: Gleitlinienbildung beim plastischen Verformen von Metallen. VDI-Zeitschrift, Düsseldorf 97 (1955) 25, S. 882-884

- [26] RÖSSLER, K.: Fischaugenbildung in unlegierten Baustählen. Neue Hütte, Leipzig 12 (1962) 2, S. 91-94
- [27] THIESSEN, P. A.; MEYER, K.; HEINICKE, G.: Grundlagen der Tribochemie. Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse Chemie, Geologie, Biologie Nr. 1, 1966
- [28] WUTTKE, W.: Metallphysikalische Grundlagen des Ermüdungsverschleißes. Dissertation Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt 1981
- [29] FRANK, R. C.; SWEETS, D. E.: Hydrogen permeation through steel during abrasion (Wasserstoffdurchtritt bei Stahl während der Abrasion). Journal Applied Physics 28 (1957) S. 380
- [30] FRISCH, B.; THIELE, W.-R. : The tribologically induced effect of hydrogen effusion and penetration in steels (Der tribologisch induzierte Effekt des Wasserstoffaus- und Wasserstoffdurchtritts von Stählen). Wear, Lausanne 95 (1984) S. 213-227.
- [31] WANDKE, E.; LIPPMANN, B.; TSCHERNY, S.: Das Verhalten des Stahles C60 mit verschiedenen Härtestufen bei Beanspruchung durch Strahlverschleiß. Neue Hütte, Leipzig (im Druck)
- [32] GOTZMANN, G.; WANDKE, E.: Theoretische und experimentelle Strahlverschleißuntersuchungen mit typischen Abrasiven der Braunkohlenveredlung. Schmierungstechnik, Berlin 14 (1983) 12, S. 356- 362
- [33] DAS, K. B.: Hydrogen embrittlement in grinding of metals (Wasserstoffversprödung beim Schleifen von Metallen). Proc. 1st Intern. Conf.: Lubrication challenges in metalworking and processing: IIT Research Institute Chicago, Illin. 1978