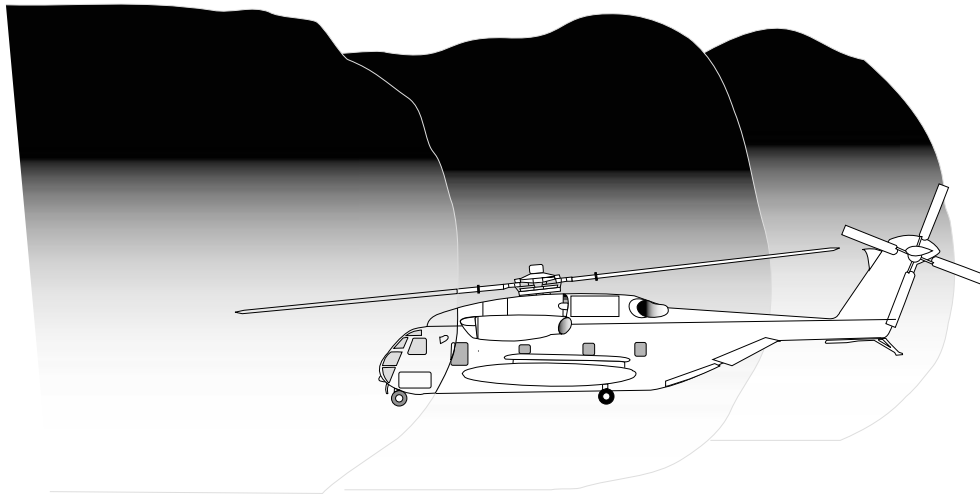


## 5.3 Erosion

### 5.3.1 Erosionsmechanismen

### 5.3.2 Erosionsschäden

### 5.3.3 Maßnahmen gegen Erosionsschäden



Erosion ist eine tribologische Beanspruchung bei der ein Festkörper in Flüssigkeit oder Gas unter einem strömenden Vorgang, abrasiv, zerrüttend und tribochemisch Bauteile verschleißt. Alle diese Erosionsmechanismen können in Triebwerken auftreten. In diesem Kapitel wird schwerpunktmäßig Verschleiß durch Partikel im Gasstrom behandelt.

Weniger bekannt ist, dass nicht nur im Luft- bzw. Gasstrom Erosion auftritt die Triebwerke gefährden kann, sondern auch in Kraftstoffen. Kraftstofftröpfchen selbst können durch Tropfenschlag erosiv wirken (Bild 5.3.1-1 und 5.3.1-11.1). Dampfblasenbildung in der Kraftstoffströmung kann zu Kavitation führen (Bild 5.3.1-11.2). Überhitzte Kraftstoffe können mikroskopische Kokspartikel bilden, welche Komponenten des Kraftstoffsystems wie z.B. die Kraftstoffdüsen derart schädigen, daß ihre Funktion ausfällt.

Triebwerke haben durchaus die Eigenschaften eines großen Staubsaugers, wenn man ihre Fähigkeit betrachtet mit dem Eintrittsluftstrom Partikel anzusaugen. Auch andere erosiv wirkende triebwerkseigene Partikel (Bild 5.3.1-2), können Erosionsschäden hervorrufen. Diese Partikel können auf vielfältige Weise, insbesondere durch ihre abrasive Wirkung Bauteile des Triebwerks schädigen. Überall dort wo ein ungefilterter Luftstrom vorhanden ist, können Erosionsschäden auftreten. Eine besonders erosionsbeanspruchte Komponente ist der Verdichter mit seiner Beschauelung (Bild 5.3.2-2).

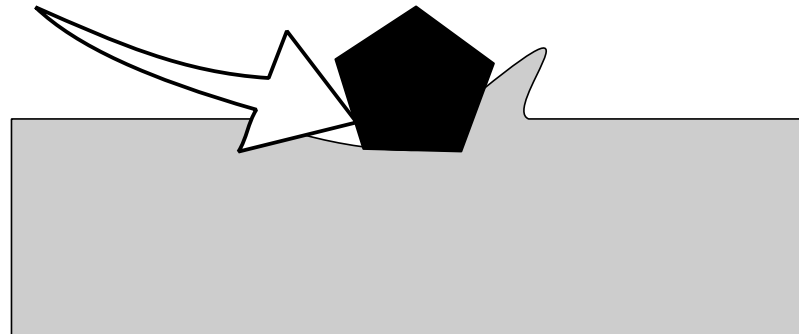
## Erosion

Als angesaugte erosive Partikel für die Beschau felung kommen in erster Linie Staub, Regentropfen (siehe Kapitel 5.1.1) und Hagelkörner (Kapitel 5.1.2) in Frage. Dabei sind Stauberosionschäden am häufigsten. Sie treten in allen Stufen, gewöhnlich nach hinten abnehmend, auf. Regen- und Hageleinwirkung sind nur in den vorderen Stufen zu erwarten. In erster Linie an Fantriebwerken mit großem Bypassverhältnis, die üblicherweise keinen langen Luftführungs kanal vor dem Fan aufweisen. Intensive Erosionsbedingungen bestehen für Triebwerke an Transportflugzeugen bei Schubumkehrerbetätigung durch den von der Landebahn aufgewirbelten Staub. Ein kritisches Erosionsproblem dürfte bei Fanschaufeln besonders dann auftreten, wenn faserverstärkte Werkstoffe mit Kunststoffmatrix zum Serieneinsatz kommen. Hier sind geeignete Schutzschichten eine Voraussetzung für den erfolgreichen langzeitigen Serieneinsatz.

Besonders gefährdet sind Triebwerke von Fluggeräten, die häufig in niedrigen Höhen betrieben werden, wie z.B. von Hubschraubern. An senkrecht startenden Flugzeugen ist starker Staubanfall infolge aufgewirbelter Bodenpartikel in der Start- und Landephase möglich. Mit starker Staub- und Regenerosion ist auch an Triebwerken militärischer Flugzeuge zu rechnen, die häufig mit hohen Geschwindigkeiten in Bodennähe fliegen.

Wie bereits erwähnt nimmt die Erosionswirkung angesaugter Partikel zu den hinteren Verdichterstufen ab. Dies kann mit dem Zersplittern der Partikel beim Auftreffen auf die Schaufeln der vorderen Stufen erklärt werden. Im Turbinenbereich dürfte demzufolge mit keiner merklichen Erosion gerechnet werden. Dies ist nicht der Fall, wenn Erosionspartikel erst im hinteren Teil des Triebwerk entstehen. Häufig handelt es sich bei solchen Partikeln um Ausbrüche von keramischen Thermobarrieren oder um Rußpartikel aus der Brennkammer.

### 5.3.1 Erosionsmechanismen



Die Erosionsmechanismen in einem Triebwerk können sowohl im Mikrobereich als auch makroskopisch in charakteristischer Weise von den örtlich wirksamen Parametern beeinflusst sein. Ein Erosionsabtrag kann z.B. in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel der Partikel bevorzugt über schneidende Vorgänge oder durch Zersplittern ablaufen (Bild 5.3.1-3).

Das Schadensbild hängt verständlicherweise von den vielen Parametern des Erosionsvorgangs ab. Hierzu gehören die Partikelgröße und -art, die Auftreffgeschwindigkeit, der Auftreffwinkel, die Partikelzahl und -größe und die Einwirkzeit. Von großer Bedeutung für den Schädigungsgrad sind darüber hinaus die Eigenschaften des erosionsbeanspruchten Bauteils wie die Werkstoffeigenschaften (z.B. Festigkeit, Duktilität, Oxidationsverhalten), die Oberflächentopografie (Rauheitsgröße und -geometrie) und die Geometrie (z.B. Eintrittskantenradius bei Schaufeln) um hier nur einige wichtige Einflüsse zu nennen.

Es ist leicht zu erkennen, dass es sich bei einem Erosionsvorgang um eine Kombination äußerst komplexer Einzelvorgänge handelt, die das Verständnis der Einzelvorgänge erforderlich macht.

Die dominierende Erosionsform in Triebwerken ist die Abrasion durch auftreffende Partikel. Dieser Abrasionsvorgang kann je nach Beschaffenheit der Bauteiloberfläche und der Partikelenergie äußerst unterschiedlich ablaufen. Bei zähen Werkstoffen ist ein Zerspannungsvorgang im Mikrobereich zu erwarten. Harte spröde Werkstoffe können durch Ermüdungsprozess im Mikrobereich Ausbrüche erleiden und spröde Werkstoffe sowie spröde Beschichtungen können spontan ausplittern.

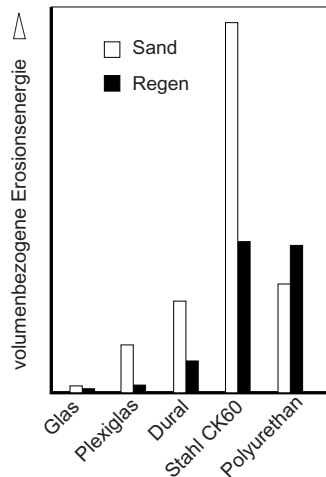
Weitere Verschleißformen, bei denen der Verschleißmechanismus durch Oberflächenzerrüttung dominiert wird wie Tropfenschlag (Regenerosion) oder Kavitation (Erosion in Flüssigkeiten durch Blasenimplosion), werden hier nur gestreift (Bild 5.3.1-1). Eine bisher nicht als schädigend aufgefallene Erosionsform (hier als „Feinerosion“ bezeichnet) soll ebenfalls erwähnt werden. Sie wird meist auf der Schaufelrückseite im Mikrobereich beobachtet und legt die Gefügestruktur (insbesondere bei Titanlegierungen) ähnlich einer Ätzung frei (Sputtereffekt der Luftmoleküle?).

Bei Erosionsvorgängen in Heißeilen kommen weitere Mechanismen hinzu, die auf der verstärkten Oxidation metallischer blanker Flächen (Erosionsflächen) oder auf Reaktionen mit dem Grundmaterial oder den Oxidschichten beruhen (z.B. mit Schwefelbestandteilen von Gipsstaub). Dadurch kann eine relativ schwache abrasive Erosionswirkung in ihrer Abtragswirkung und Schädigung deutlich verstärkt werden.

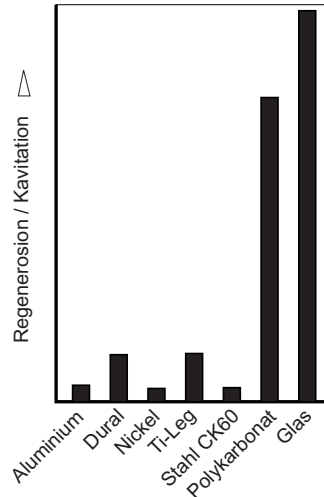
## Erosion: Mechanismen

Werkstoffe können sich gegenüber verschiedenen Erosionsmechanismen unterschiedlich verhalten.

Vergleich der Erosionsfestigkeiten verschiedener Werkstoffe gegen Sand- und Regenerosion bei Einbringung gleicher Erosionsenergie (nach W.Kayser)



Verhältnis der Erosionsraten von Regenerosion und Kavitation (nach H.Rieger)



Verschleißart	Tribologische Beanspruchung	Mechanismen	Beispiele erosionsbeanspruchter Triebwerksteile
Strahlverschleiß - Gleitstrahlverschleiß - Schrägstrahlverschleiß - Prallstrahlverschleiß Sand- und Stauberrosion Mineralverschleiß Abrasionsverschleiß		Schnittvorgang Zersplittern der Oberflächenzone Ermüdungsrißbildung	Verdichterschaufeln
Tropfenschlag (Regenerosion)		Schockwellen: Deformation und Ermüdung mit Rissbildung	Fanschaufeln
Kavitation Strömungskavitation Schwingungskavitation		implodierende Dampfblase erzeugt Schockwellen: Deformation und Ermüdung mit Rissbildung	Reglerteile Gleitlager Einspritzdüsen Kraftstoffpumpen
Erosion durch einen Gasstrahl		Ausbröckeln spröder und poröser Schichten durch Gaskräfte in der Strömung	Spritzschichten in Gehäusen und Labyrinth

Eine Kombination mehrerer Verschleißarten ist möglich

Bild 5.3.1-1

**Bild 5.3.1-1:** Versteht man unter Erosion den Oberflächenabtrag durch die mechanische Einwirkung eines Mediums, so gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Mechanismen welche dieser Definition genügen (Skizze unten). Bei einer Erosion durch feste Partikel spricht man übergeordnet von **Strahlverschleiß**. Weitere Begriffe die besonders in älterer Literatur zu finden sind, die jedoch nicht in der DIN 50320 erscheinen, sind **Mineralverschleiß**,

**Sand- und Stauberrosion und Abrasivverschleiß**. Meist erfährt der erosionsbeanspruchte Werkstoff durch auftreffende harte Partikel eine schnitt- / furchenartige Zerspannung. Bei harten Werkstoffen, insbesondere bei harten Schichten auf weicheren Werkstoffen, kann der Abtrag vorzugsweise durch ein Zersplittern und/oder durch Ermüdungsrißbildung sowie dem Ausbrechen von Partikeln ablaufen. Derartige Erosionsvorgänge treten in erster Linie

an den aerodynamisch wirksamen Flächen der Beschauflungen von Verdichter und Turbine auf. Abrasivverschleiß entsteht jedoch nicht nur im Luftstrom, sondern kann auch durch in Flüssigkeiten mitgeführte harte Partikel erzeugt werden. Ein typisches Beispiel sind Koks-partikel in einem überhitzten Kraftstoffstrom die zu umfangreichen Erosionsschäden am Einspritzsystem führen können.

**Tropfenschlag** tritt immer dann als Erosionsbeanspruchung auf wenn Flüssigkeitstropfen unter hoher Geschwindigkeit auf eine Oberfläche prallen. Wenn es sich um Regen handelt spricht man von **Regenerosion**. Bei diesem Erosionsvorgang entstehen im Werkstoff Schockwellen und Deformationen, die bei einem häufig sich wiederholenden Vorgang zu Ermüdung und Ausbrüchen des Werkstoffes führen. Derartige Beanspruchungen können bei Rotorschauflern und Austrittsleitschauflern eines Fans auftreten.

**Regenerosion kann für Verdichterschauflern (Fanschauflern) aus FVK zu einem ernststen Problem werden** (Lit 5.3.1-19).

Bei **Kavitation** findet der Erosionsvorgang in einem Flüssigkeitsstrom statt. Treten auf Grund des Bernoulli'schen Gesetzes ausgeprägte Unterdruckzonen in einem Flüssigkeitsstrom auf, die zur Bildung von Dampfblasen führen, so können diese Dampfblasen wenn sie durch die Strömung in Bereiche erhöhten Drucks gelangen implodieren. Es entsteht entsprechend dem Schadensmodell in der implodierenden Dampfblase ein „Flüssigkeitsstachel“ der mit hoher Geschwindigkeit die Bauteiloberfläche trifft und dort einen Tropfenschlag ähnlichen Schadensmechanismus auslöst (Bild 5.3.1-11.1 und 5.3.1-11.2). Bei diesem Verschleiß, der bevorzugt auf einer Ermüdung der Oberfläche beruht, spricht man auch von „Kavitationserosion“. Nicht selten wird in wässerigen Medien der Kavitationsvorgang durch gleichzeitige Korrosion verstärkt („Kavitationskorrosion“).

Kavitationsschäden wurden bei **Komponenten des Kraftstoffsystems** wie Einspritzdüsen und

Reglern sowie den Förderrädern von Turbopumpen bekannt.

Kavitation wird auch mit Schäden an **Zahnradpumpen im Ölkreislauf** (Bild 5.3.1-11.2, Lit 5.3.1-21) und **Getriebezahnrädern** bei Flügen in großen Höhen (leichtere Dampfblasenbildung wegen niedrigem Luftdruck) in Zusammenhang gebracht. Es kann deshalb notwendig werden die Drehzahl von Zahnradpumpen zu begrenzen.

In Gleitringdichtungen kann sich auf den Gleitflächen Kavitation ausbilden und diese schädigen (Lit. 5.3.1-22).

Regenerosion kann deutlich stärkere Erosionsschädigung bewirken als Kavitation (Diagramm oben rechts). Besonders auffällig ist die große Empfindlichkeit von Polycarbonat und Glas gegenüber Tropfenschlag.

Wie ein starker Wind Sand aufwirbelt, kann der extrem intensive **Gasstrom**, besonders in den hinteren Verdichterbereichen, bei weichen Schichten, wie sie für die Einlaufschichten in Verdichtergehäusen (z.B. poröse Nickel-Grafit Spritzschichten) zur Anwendung kommen, zum Abtrennen von Partikeln führen. Dieser Vorgang kann selbstverstärkend ablaufen, da diese Partikel wiederum erosiv wirken.

Das Diagramm oben links zeigt, dass Werkstoffe sich gegenüber Erosion durch feste Partikel deutlich anders verhalten können als gegenüber Erosion durch Flüssigkeitstropfen (Lit. 5.3.1-1 und 5.3.1-2). So ist z.B. zu erkennen, dass das weiche und elastische sehr zähe Polyurethan gegenüber Sand und Regen eine vergleichsweise (z.B. gegenüber Plexiglas oder Aluminium) hohe Erosionsfestigkeit besitzt, was die Anwendung als Erosionsschutzlack bei Fanbauteilen (z.B. rotierender Nasenconus und Austrittsleitschauflern aus faserverstärkten Kunststoffen) verständlich macht. Der größere Widerstand gegenüber Regenerosion im Vergleich zur Erosion durch Sand ist bei allen anderen (härteren) Werkstoffen nicht zu beobachten.



## Erosion: Mechanismen

**Bild 5.3.1-2:** In Triebwerken können eine Vielzahl unterschiedlicher Partikel erosiv wirken. Diese können sowohl mit der Ansaugluft in das Triebwerk gelangen, als auch indirekt als Folge der Erosion entstehen oder sich auf andere Art im Triebwerk gebildet haben.

**Erosionspartikel in der Ansaugluft „E1“:** Meist handelt es sich um Staub aus der Umgebung. Entsprechend vielfältig ist Größe, Konsistenz und Zusammensetzung der Staubkörner.

**Abrieb von Gehäusebeschichtungen „E2“ und „E3“:**

Im Fan- und Verdichterbereich wird die Spitzenspaltminimierung mit Hilfe von Anstreifsystemen erreicht. Um die Schaufelspitzen nicht unzulässig zu beschädigen oder abzureiben werden auf der Gehäuseseite relativ weiche Einlaufbeläge verwendet. Dieses makroskopisch weiche Verhalten beim Anstreifen der Schaufelspitzen muss nicht bedeuten, dass alle Partikel des Belages weich sind. Nicht selten handelt es sich um harte Partikel, die in einer weichen Matrix gebunden sind, wobei das gute Einlaufverhalten durch ein Ausbrechen dieser Partikel im Mikrobereich erzielt wird. Die hier konzentriert vorbeistreichenden angesaugten Partikel können diese weichen Beläge „auserodieren“ wobei der Erosionsabrieb den gesamten Vorgang in den nachfolgenden Stufen weiter verstärkt.

**Abrieb von der Beschau felung „E4“:** Bei Verdichterschaufeln mit harten Belägen (z.B. TiN-Erosionsschutz) kann es zum aussplittern dieser dünnen Schichten bei zu großer kinetischer Energie der Partikel kommen. Diese extrem harten Schichtpartikel können wiederum abrasiv wirken. Werden Schaufeln mit einer Spitzenpanzerung verwendet können ausbrechende Partikel der Panzerung die Erosionsbelastung ebenfalls erhöhen.

**Abrieb von Rotorzwischenstufenringen (Spacer) „E5“:** Um den Spitzenspalt zwischen Leit-

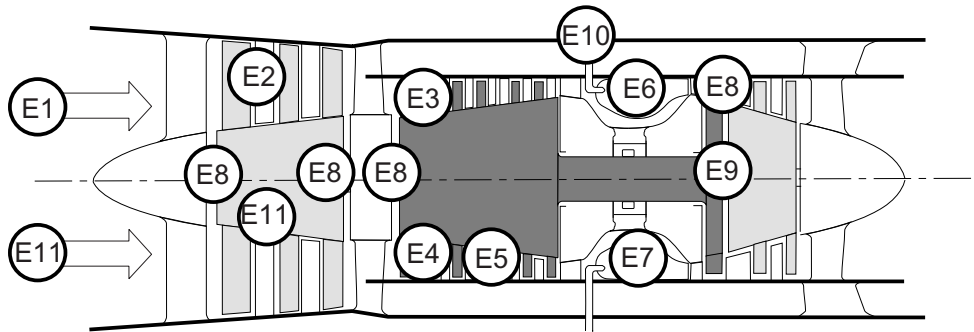
schau feln und Rotor zu minimieren werden auf den Spacern (Bild 5.3.2-10) harte keramische Anstreifschichten aufgebracht. Falls diese ausbrechen können diese Partikel die Beschau felung auch in Rotornähe schädigen.

**Ruß- und Kokspartikel aus der Brennkammer „E6“:** Gefühlsmäßig erscheinen Koks und Ruß derart weich, dass mit einer gefährlichen Erosionswirkung nicht gerechnet wird. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass diese Partikel im Heißteilm Bereich in relativ kurzer Zeit einen unzulässigen Erosionsabtrag erzeugen können (Beispiel 5.3.1-1, Bild 5.3.2-12). In der Brennkammer kann sich Koks an den Oberflächen der Wandungen und des Einspritzsystem ansammeln und als erosive Partikel abplatzen. Die Bildung von Ruß beim Verbrennungsvorgang im Gasstrom kann ebenfalls zu starker Erosion der Turbinenbeschau felung führen. Erosionsvorgänge an Heißteilen erzeugen frische Metalloberflächen und beschleunigen wechselseitig die Oxidation.

**Partikel von Brennkammerbeschichtungen „E7“:** Die Wandungen moderner Brennkammern werden in zunehmendem Maße auf der Innenseite mit keramischen Wärmedämmschichten bzw. Thermobarrieren versehen, um den Külluftbedarf zu minimieren. Diese Beschichtungen können oberflächlich „ausbröseln“ oder abplatzen, wobei die abrasiven Partikel in erster Linie die Turbinenbeschau felung gefährden.

**Partikel der Anstreifschicht des äußeren Dichtrings der HDT „E8“:** Zur Minimierung des Spitzenspalts zu den Hochdruckturbinenrotorschau feln werden auf der Gehäuseseite Dichtsegmente angebracht, die eine harte keramische Anstreifschicht tragen (meist Zirkonoxid) in die sich die Schaufelspitzen „einschleifen“ können. Aus diesen Schichten können sowohl kurzzeitig beim Anstreifvorgang als auch über längere Zeit durch „ausbröseln“ abrasiv wirkende Partikel entstehen, welche die hinteren Heißteile schädigen.

Typische Erosionspartikel und ihre Quellen  
in einem Triebwerk.



E1 Erosionspartikel in der Ansaugluft

E2 Abrieb von Gehäusebeschichtungen im Fan bzw. NDV (Einlaufschichten)

E3 Abrieb von Gehäusebeschichtungen im HDV (Einlaufschichten)

E4 Abrieb von Spacern

E5 Abrieb und Beschichtungspartikel der Beschaukelung

E6 Ruß und Kokspartikel aus der Brennkammer

E7 Partikel von Brennkammerbeschichtungen (Thermobarriere)

E8 Partikel des äußeren Dichtrings der HDT (Thermobarriere)

E9 Labyrinthabrieb

E10 Kokspartikel im Kraftstoff

E11 Eis und Eispartikel

**Bild 5.3.1-2**

**Labyrinthabrieb „E9“:** Bei Labyrinthen können Anstreifschichten während des Anstreichens oder durch Erosion Partikel freisetzen. Auch Panzerungen von Labyrinthspitzen können ausplatzen und es kann Abrieb des Grundwerkstoffs entstehen. Diese Partikel können im Labyrinth selbst oder in anderen Triebwerksbereichen erosiv wirken (Bild 5.3.1-8)

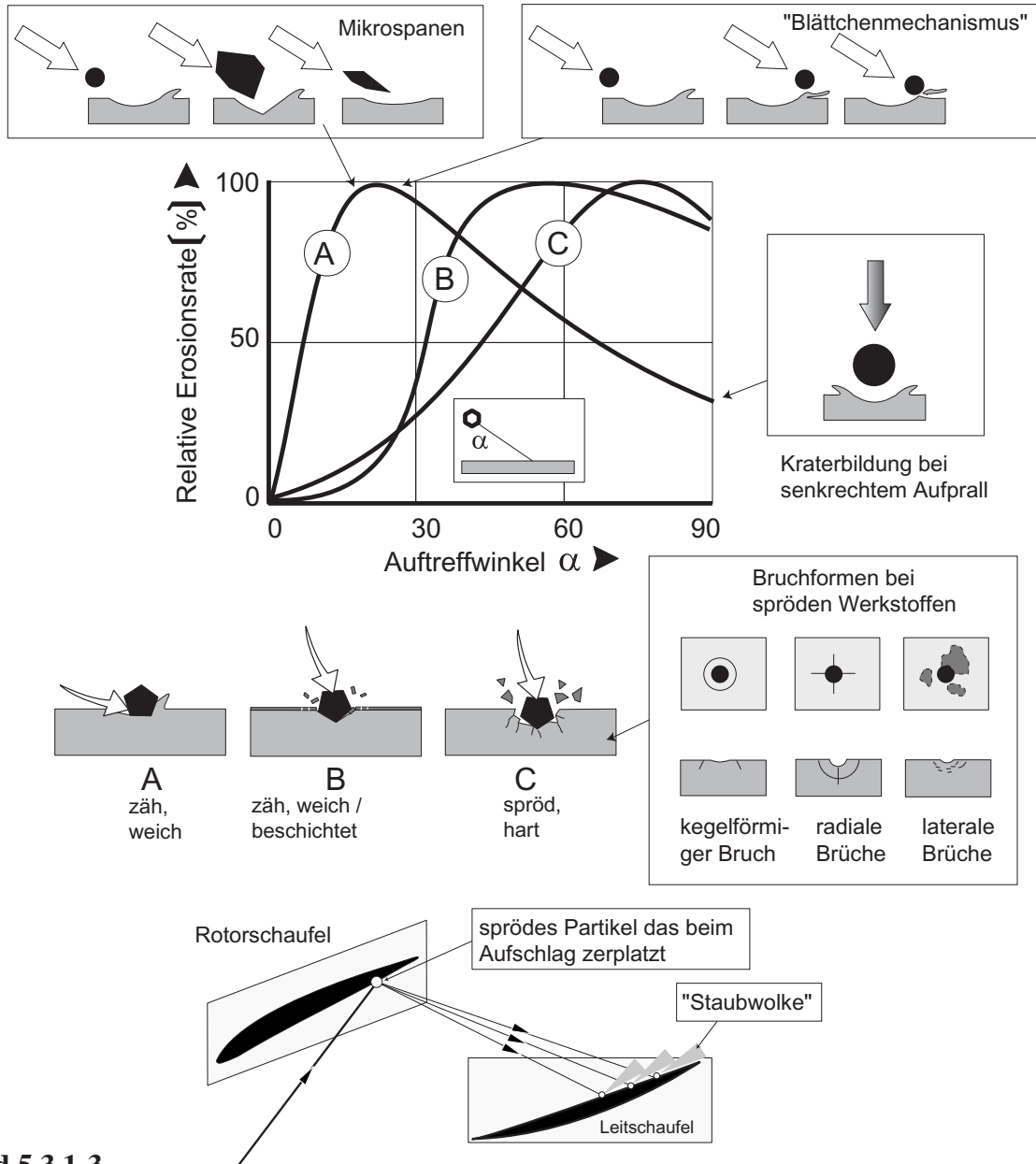
**Kokspartikel im Kraftstoff „E10“:** Bei zu hohen Kraftstofftemperaturen kann es zur **Zersetzung des Kraftstoffs** mit der Bildung erosiver feiner **Kohlenstoffpartikel** kommen. Die-

se Partikel sind in der Lage Kraftstoffdüsen derart zu schädigen, dass ein schräg austretender Kraftstoffstrahl die Brennkammer und den Brennkammermantel durchbrennt.

**Eis/Eispartikel „E11“:** Es wird vermutet, dass Eis an Elastomerbelägen von Zwischenstufendichtungen Erosion hervorrufen kann (Bild 5.3.2-1). Ob es sich um angesaugte Eispartikel oder bei Stillstand im Dichtspalt gefrorenes Wasser handeln könnte ist nicht bekannt.

## Erosion: Mechanismen

Das Verständnis der wirkenden Mechanismen bei einem Erosionsvorgang erleichtert Abhilfen gegen Schäden.



**Bild 5.3.1-3**

Zu den hinteren Verdichterstufen fällt die Aufschlagenergie der einzelnen Partikel wegen der Zerkleinerung deutlich ab.



**Bild 5.3.1-3** : Von besonderer Bedeutung für die Verschleißwirkung beim Strahlverschleiß ist der Auftreffwinkel. Das Ausmaß des Schadens hängt deutlich vom Auftreffwinkel und vom zähen oder spröden Verhalten des Werkstoffes ab (obere Skizze). Spröde Werkstoffe wie Glas (Kurve „C“) weisen eine mit dem Auftreffwinkel nahezu linear zunehmende Verschleißempfindlichkeit auf. Auf Grund des hohen Energieeintrages (Schockwellen) versagen diese Werkstoffe durch Zersplittern bei steilem Auftreffwinkel der Erosionspartikel. Der Verschleißvorgang läuft mit Mikrorissbildung ab (Detail mitte). Bei flachem Auftreffwinkel und großer Härte setzen sie einem Schnittvorgang einen hohen Widerstand entgegen. Zähe Werkstoffe (Kurve „A“) wie Titanlegierungen, martensitische Vergütungsstähle und Aluminiumlegierungen zeigen bei einem Auftreffwinkel bis zu  $25^\circ$  einen starken Verschleißanstieg, danach fällt die Verschleißrate bis ca.  $90^\circ$  Auftreffwinkel nahezu kontinuierlich ab. Dies ist aus einem spanenden Verschleißmechanismus (Skizzen oben) im Mikrobereich durchaus verständlich: Bei flachem Auftreffwinkel wird der Schneidvorgang bei den relativ weichen Werkstoffen besonders wirksam, während bei senkrechtem Aufprall ein Rückprallen ohne Schnittvorgang zu erwarten ist. Dieses Verhalten wird z.B. beim Auskleiden von Strahlkabinen mit Gummibelägen genutzt. Weiche Erosionsschutzschichten, wie z.B. PU-Beläge am rotierenden Nasenconus, sind deshalb als Schutz für Flächen mit relativ steilem Auftreffwinkel besonders geeignet.

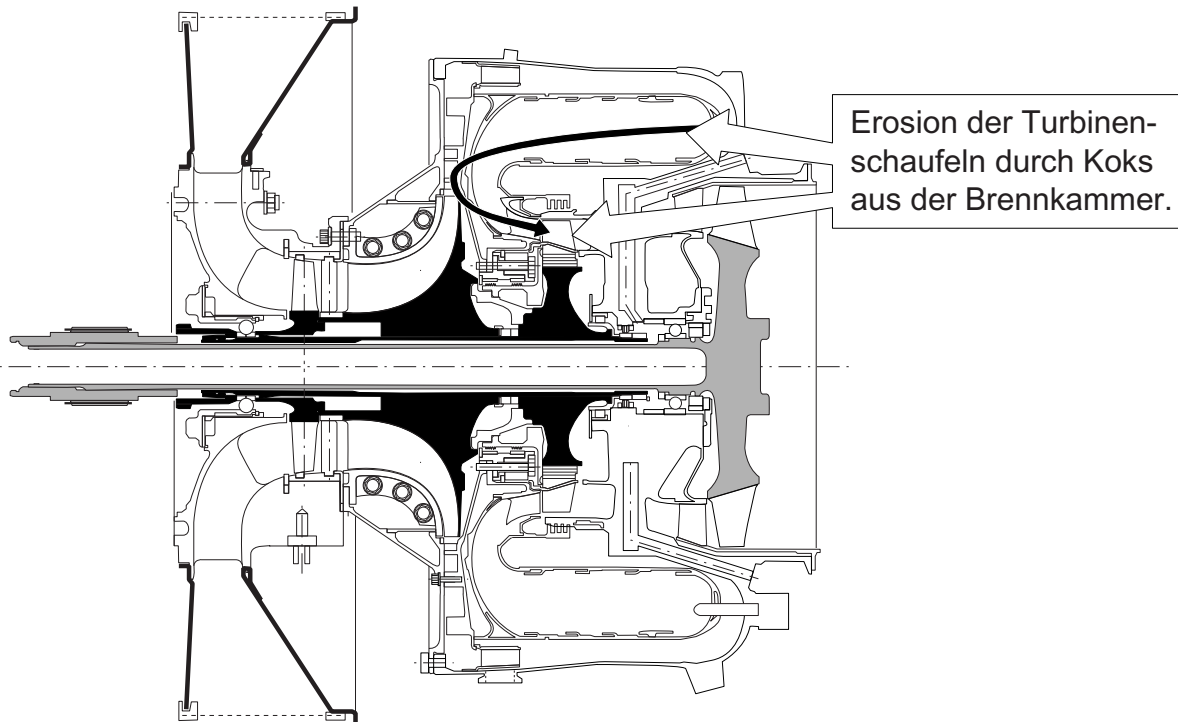
Im Fall der Kurve „B“ handelt es sich um ein Werkstoffsystem bei dem sich eine harte spröde Schicht (z.B. TiN, siehe Lit. 5.3.1-3) auf einem relativ weichen Werkstoff (z.B. Titanlegierung) befindet. In diesem Fall wird bei ausreichend großem Energieaustausch zwischen Partikel und Oberfläche die spröde Oberfläche zersplittert bzw. durchschlagen. Damit entsteht ein verstärkter Erosionsabtrag. Weil der Energieaustausch bei einer extrem harten Oberflächenschicht (kein Schnittvor-

gang) mit steilerem Auftreffwinkel zunimmt, tritt im Bereich eines diskreten Schwellwerts (steiler Kurvenanstieg) der erwähnte Zerstörungsprozeß relativ plötzlich ein.

Da der Erosionsvorgang vom Energieeintrag beeinflusst wird, ist davon auszugehen, dass die Kurve „B“ auch von der Größe der Erosionspartikel und deren Auftreffgeschwindigkeit bestimmt wird.

Treffen spröde mineralische Partikel (über  $0.010\text{ mm}$ , Bild 5.3.1-9) auf eine Oberfläche, können sie zersplittern. Die so entstandenen kleinen Bruchpartikel können auf Grund ihrer niedrigen Energie (wegen der geringen Masse) im hinteren Bereich eines Verdichters den erfolgreichen Einsatz harter dünne Schichten als Erosionsschutz ermöglichen. Solche Schichten werden von den niedrig energetischen Bruchpartikeln nicht mehr durchschlagen.

## Erosion: Mechanismen



**Beispiel 5.3.1-1** (Lit 5.3.1-16, Bild 5.3.2-12.2):

**Zitat:** „...To further reduce the... unscheduled removal rate,... engineers are examining at least two additional improvements- a **low coke combustor** and...

Officials expect the new **combustion liner** to eliminate blade erosion caused by carbon buildup, increasing blade longevity. The new liner also will cut visible smoke and increase liner life, since the effusion cooled liner eliminates hot spots and improves the distribution of temperatures in the component.

Company engineers have not yet fully quantified the improvement in component lives, but they believe blade life will be doubled or tripled.“

**Kommentar:** Es handelt sich um ein Hubschraubertriebwerk mit Umkehrbrennkammer. Interessant ist die deutliche Lebensdauererminderung der Rotorbeschaufelung der ersten Turbinenstufe durch die Partikel der Koksablagerungen (Band 3 Bild 11.2.2.2-6.2).

Das Erosionsverhalten bei Abrasion hängt verständlicherweise besonders von der Härte der Partikel und der Bauteiloberfläche ab.

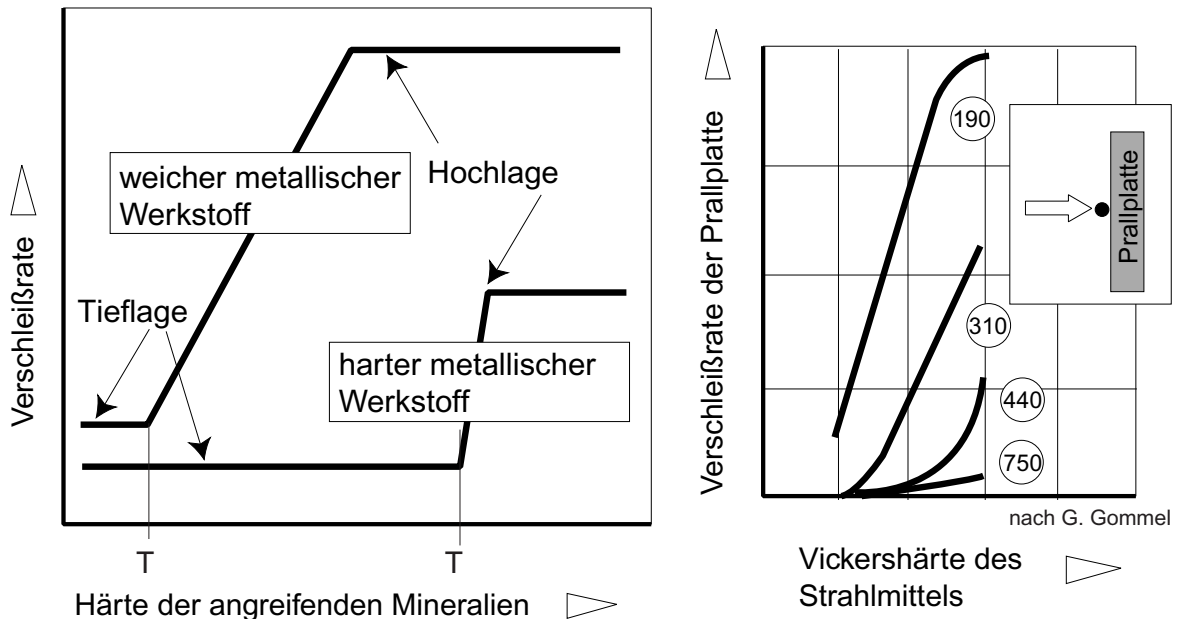


Bild 5.3.1-4

**Bild 5.3.1-4:** Die Festigkeit und Härte vom Teilchenmaterial und die des verschleißbeanspruchten metallischen Bauteils sowie das Verhältnis der Bauteiloberflächenhärte zur Härte der Partikel beeinflussen die Verschleißrate entscheidend (obere Skizze, schematische Darstellung). Bis zu einer gewissen Härte der auftreffenden Partikel erfolgt abhängig von der Härte des beaufschlagten Bauteils ein relativ geringer Erosionsverschleiß (Tief- und Hochlage). Wird diese Härte im Punkt „T“ überschritten, steigt die Erosionsrate steil an (Hochlage). Dieses Verhalten erklärt, warum scheinbar kleine Unterschiede in der Härte der angreifenden Mineralien und/oder des erosionsbeanspruchten Werkstoffs zu großen Unterschieden im Erosionsverhalten führen können. Befindet man sich dagegen in einem mittleren Bereich der Tief- oder Hochlage können relativ große Härteunterschiede lediglich geringen Einfluss auf die Verschleißraten zeigen.

Danach bleibt sie relativ konstant auf diesem Niveau.

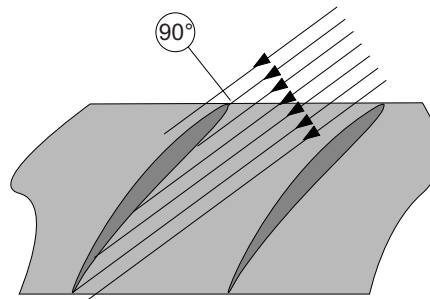
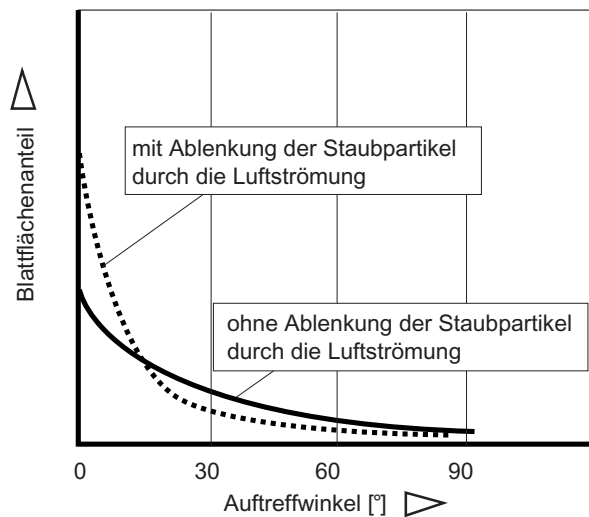
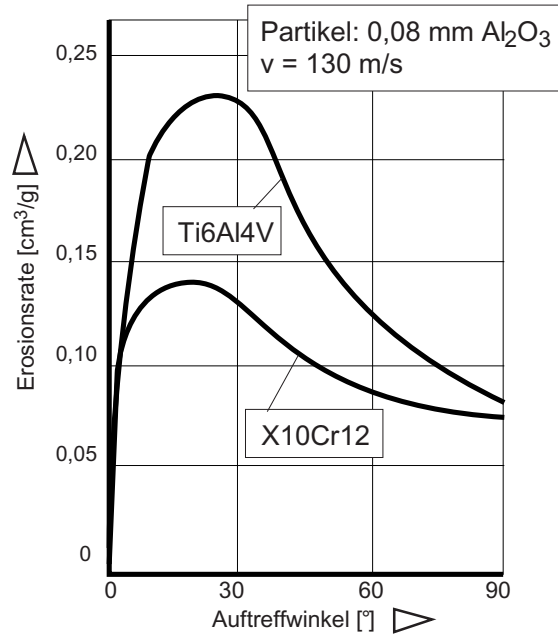
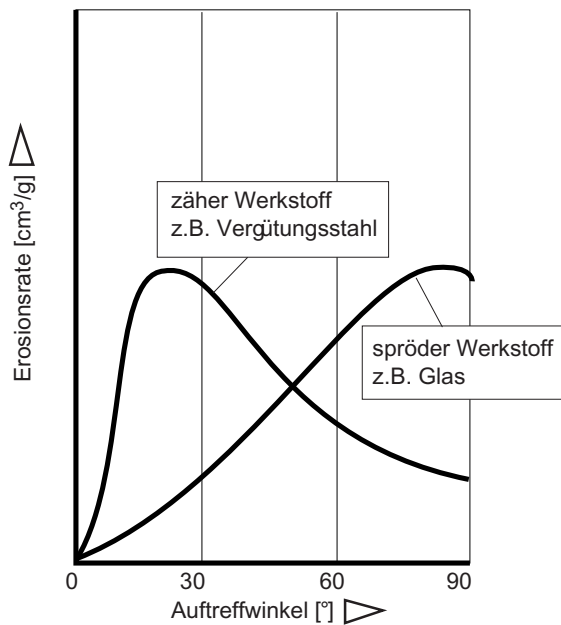
Relativ geringe Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung des angesaugten Staubes (z.B.  $\text{SiO}_2$ -,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Anteile) beeinflussen durch den Anteil harter Partikel stark die Verschleißrate. Dieses Verhalten ist bei der Auswahl der Erosionspartikel für Versuche besonders zu beachten.

Bei weichen zähen Werkstoffen wie Gummi oder PU-Lack ist der beschriebene Effekt nicht gegeben, da hier die Verschleißrate sogar mit der Partikelhärte abnehmen kann.

Im unteren Diagramm ist das beschriebene Erosionsverhalten von Stahlplatten unterschiedlicher Härte (Zahlen in Kreisen geben die Vickershärte der Prallplatte an) bei senkrechtem Aufprall (reinem Stoß) eines metallischen Strahlmittels dargestellt. Deutlich ist die Verschiebung der Steilanstiege in Abhängigkeit von der Prallplattenhärte zu erkennen.

## Erosion: Mechanismen

Die abrasive Erosion ist werkstoffspezifisch unterschiedlich winkelabhängig



Schematische Darstellung von Auftreffwinkeln nicht von der Strömung abgelenkter Partikel auf ein Leitschaufelprofil

Bild 5.3.1-5

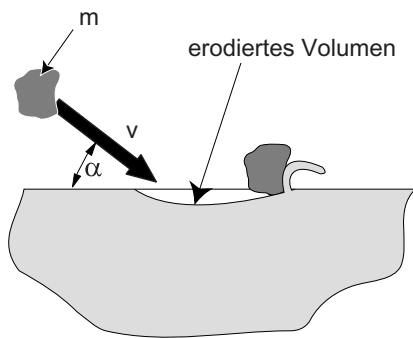
**Bild 5.3.1-5:** (Bild 5.3.1-3) Das Erosionsverhalten eines Bauteils unterscheidet sich mit dem Auftreffwinkel der Partikel bei weichen und zähen Werkstoffen deutlich und charakteristisch von dem Verschleißverhalten spröder und harter Werkstoffe. Typische „weiche“ Schaufelwerkstoffe des Verdichters (Diagramm links oben) sind Vergütungsstähle (Typ 13% Cr-Stähle älterer Triebwerke) und Titanlegierungen. Titanwerkstoffe sind nahezu doppelt so empfindlich gegen abrasive Erosion wie Stähle. Das Erosionsmaximum scheint leicht zu höheren Auftreffwinkeln hin verschoben zu sein. Wenn man davon ausgeht, dass die Schaufelprofile moderner Verdichter deutlich schärfere Kanten aufweisen als die Stahlschaufeln früherer Triebwerke, so muss davon ausgegangen werden, dass die Erosionsempfindlichkeit entsprechend angestiegen ist. Da die Auftreffwinkel der Partikel am Schaufelprofil stark unterschiedlich sind (Skizzen unten), ist ein unterschiedliches Erosionsbild zwischen Schaufeln gleichen Profils aber unterschiedlichen Werkstoffen zu erwarten. Insbesondere bei Schaufeln aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) oder mit Lackschichten ist ein deutlich anderes Erosionsverhalten zu erwarten als bei Titanlegierungen und mit spröden Hartstoffen (z.B. TiN) beschichteten Titanlegierungen. Dieses unterschiedliche Verhalten ist bei entsprechenden Entwicklungen und dem Nachweis der Betriebseigenschaften von Beschaukelungen zu berücksichtigen. Natürlich hat auch der Partikel mitführende Luft- bzw. Gasstrom einen wichtigen Einfluss auf die Partikelbahnen und damit auf die Auftreffwinkel. Üblicherweise geht man davon aus, daß Partikel unter 0,010 mm Größe dem Luftstrom weitgehend folgen. Entsprechend dürfte die Eintrittskante in einem engen Bereich große Auftreffwinkel aufweisen, während die Blattflächen sehr flach beaufschlagt werden (gestrichelte Kurve in Diagramm unten links). Größere Staubpartikel werden jedoch von der Strömung immer weniger abgelenkt und dürf-

ten so verstärkt den Austrittskantenbereich beschädigen (Skizze unten rechts). Im hinteren Verdichterbereich, in dem nur kleinere, bereits zersplitterte Partikel auftreten, sind harte dünne Schichten gegen Erosion erfolgversprechend.

Nach dem dargestellten Erosionsmodell ist zu erwarten, dass die Schaufelhinterkante und die Saugseite des Blattes keiner Erosionsbeanspruchung ausgesetzt sind. Dies ist jedoch nicht immer der Fall. So kann es durchaus vorkommen, dass besonders Leitschaufelhinterkanten deutliche Partikeleinschläge aufweisen oder die Saugseite merkliche Erosion zeigt. Dies ist durch Abpraller zu erklären, d.h. z.B. Sandkörnern, die auf Nachbarschaufeln und/oder Schaufeln der nachfolgenden Stufen auftreffen und zurückgeworfen werden (Bild 5.3.1-9).

## Erosion: Mechanismen

Erosionsverhalten eines modernen (Titanlegierung) und eines älteren (Cr-Stahl) Verdichterschaufelwerkstoffs.



Begriffsdefinitionen:

Erosionsrate  $E = C \cdot f(\alpha) \cdot m \cdot v^2 / \sigma$  duktile Werkstoffe  
 Erosionsrate  $E = C \cdot f(\alpha) \cdot m \cdot v^{3-7} / \sigma$  spröde Werkstoffe

$C$  = Konstante des Erosionssystems  
 $f(\alpha)$  = Funktion des Aufprallwinkels  
 $m$  = Masse des Staubpartikels  
 $v$  = Geschwindigkeit des Staubpartikels  
 $\sigma$  = Mindestfließgrenze des verschleißbeanspruchten Werkstoffes bei Betriebstemperatur

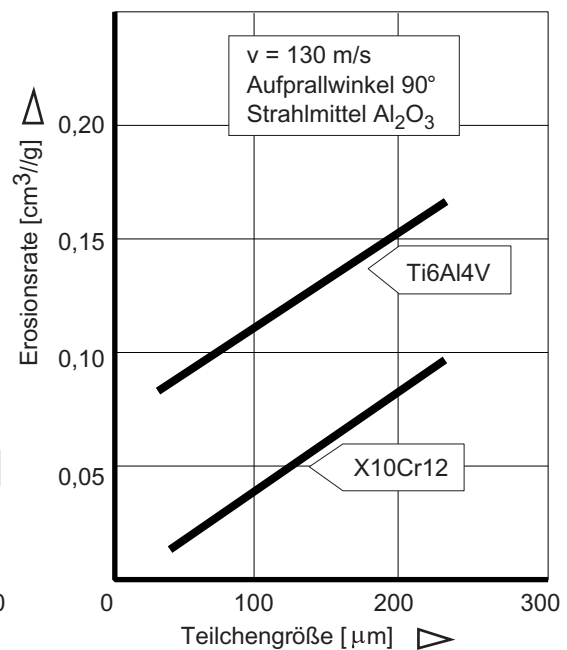
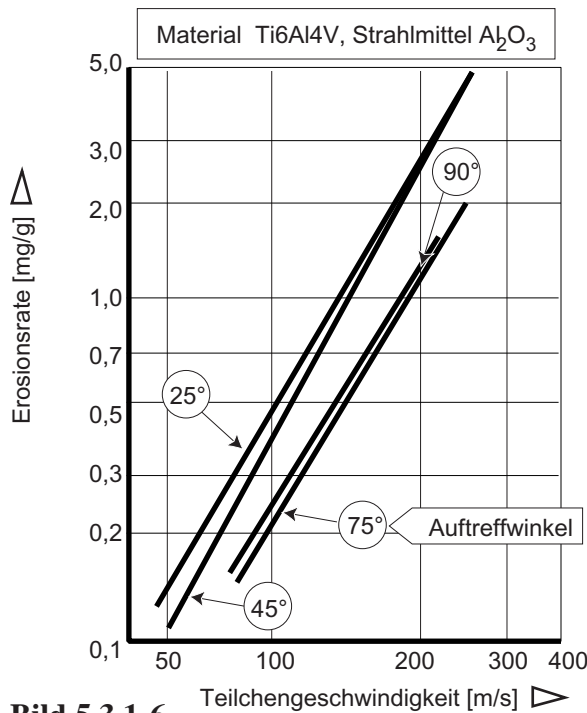


Bild 5.3.1-6



**Bild 5.3.1-6** (Lit. 5.3.1-4): Die **Teilchengröße** ist für die Verschleißrate und die Schädigung der Schaufeln aus mehreren Gründen von Bedeutung (z.B. Kerbwirkung, Schwingfestigkeit, geometrische Veränderung der Kanten):

abhängigkeit.

- bei gleicher Aufprallgeschwindigkeit ist die wirksame Energie des schwereren Teilchens entsprechend höher

- das Teilchen wird von der Strömung weniger abgelenkt und hat damit andere Auftreffwinkel als ein kleineres Teilchen (Bild 5.3.1-5).

- die Relativgeschwindigkeit senkrecht zur Schaufelblattfläche (Umfangsgeschwindigkeit des Blattes) und damit die Auftreffgeschwindigkeit der Partikel dürfte höher sein als bei kleineren Partikeln

- die Einschlagkrater sind deutlich größer und verändern damit das Schaufelprofil (Gratbildung, Krater), insbesondere an der Eintrittskante stärker (Bild 5.3.2-2).

Die Auftreffgeschwindigkeit der Partikel auf Teile im Verdichter dürften etwa in der Größenordnung der Gas- und Umfangsgeschwindigkeiten liegen, d.h. zwischen 100 m/s und über 300 m/s.

Nach dem Diagramm unten rechts und der oben angegebenen Beziehung nimmt die Erosionsrate bei gleicher Auftreffgeschwindigkeit und 90° Auftreffwinkel für die typischen Verdichterschaufelwerkstoffe mit der Teilchengröße (Teilchenwerkstoff  $Al_2O_3$ ) exponentiell zu.

Die **Teilchengeschwindigkeit** geht exponentiell (siehe Skizze oben und Diagramm unten links) in den Erosionsabtrag ein. Bei spröden Werkstoffen kann diese Abhängigkeit sehr viel gravierender sein als bei duktilen Werkstoffen. Der Anstieg der Verschleißrate infolge zunehmender Auftreffgeschwindigkeit der Partikel ist unabhängig vom Auftreffwinkel. Die absoluten Erosionsraten zeigen dagegen deutlich die in Bild 5.3.1-3 und 5.3.1-5 beschriebene Winkel-

## Erosion: Mechanismen

### Einige Werkstoffe zeigen ein unerwartetes Erosionsverhalten

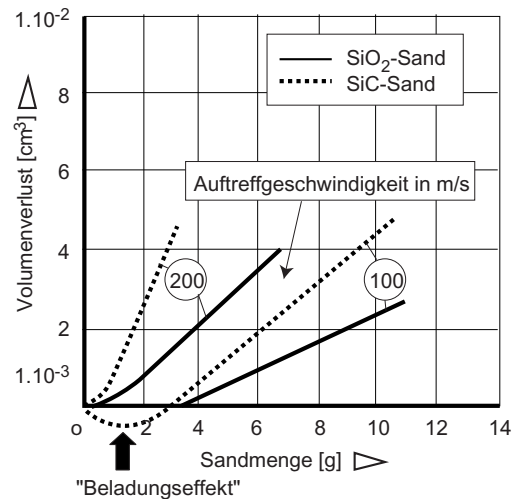
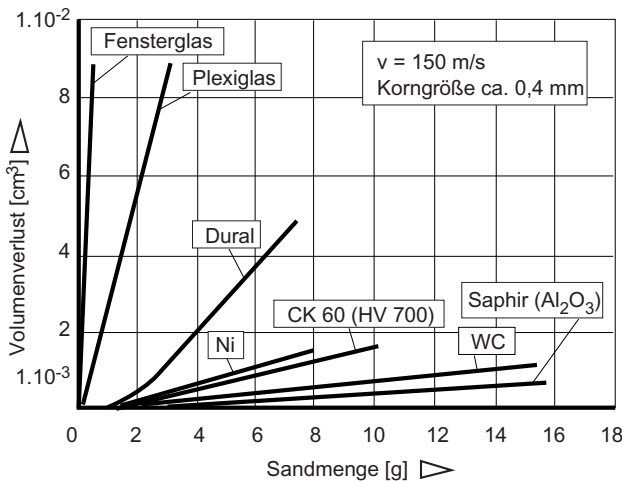


Bild 5.3.1-7

**Bild 5.3.1-7** (Lit. 5.3.1-1): Werkstoffe die scheinbar sehr ähnliche Werkstoffkenngrößen (z.B. Festigkeit, Härte, Zähigkeit) aufweisen, können ein sehr unterschiedliches Erosionsverhalten zeigen. So ist Fensterglas für die im Diagramm oben links angegebenen Erosionsbedingungen extrem viel schlechter als Saphir und immer noch merklich schlechter als Plexiglas. So ist verständlich, dass sich **Email- und Glasschichten auf Verdichterschaufeln nicht bewährten** (Lit. 5.3.1-20). Dies verhinderte einen Einsatz solcher Schichten als Dämpfung von Verdichterschaufeln. Reines Nickel erweist sich gegenüber Erosion als erstaunlich gut, was auch die Anwendung als Erosionsschutzkanten bei Fanrotorschaukeln aus faserverstärkten Kunststoffen erklärt. Am Beginn eines Erosionsvorgangs kann in bestimmten Aufprallgeschwindigkeitsbereichen sogar anfangs eine leichte Gewichtszunahme bzw. Volumenzunahme des erosionsbeanspruchten Bauteils beobachtet werden (rechtes Diagramm). Dieser „Beladungseffekt“ wird durch das Steckenbleiben von Erosionspartikeln erklärt und scheint bei höheren Auftreffgeschwindigkeiten weniger ausgeprägt zu sein.

**Bild 5.3.1-8:** Weniger bekannt doch durchaus schadensträchtig sind **Erosionsvorgänge in und um Labyrinth**.

Erosiver Labyrinthtrieb von Spitzenpanzerungen oder Einlaufschichten kann aus dem Labyrinth ausgeblasen werden („C2“) und sich in benachbarten Gehäusebereichen fangen („A“). Der dort herumgewirbelte Staubfilm kann mehrere Millimeter dicke Querschnitte durcherodieren.

Labyrinthtrieb oder staubbelastete Sperrluft kann zwischen den Labyrinthspitzen „gefangen“ und umhergewirbelt werden („C1“). Dabei können die relativ weichen Anstreifbeläge gegenüber den Labyrinthspitzen stark auserodiert werden („B“).

# Äußere Einflüsse

## Erosion: Mechanismen

Erosion ist ein wichtiger Schädigungsmechanismus im Zusammenhang mit Labyrinth.

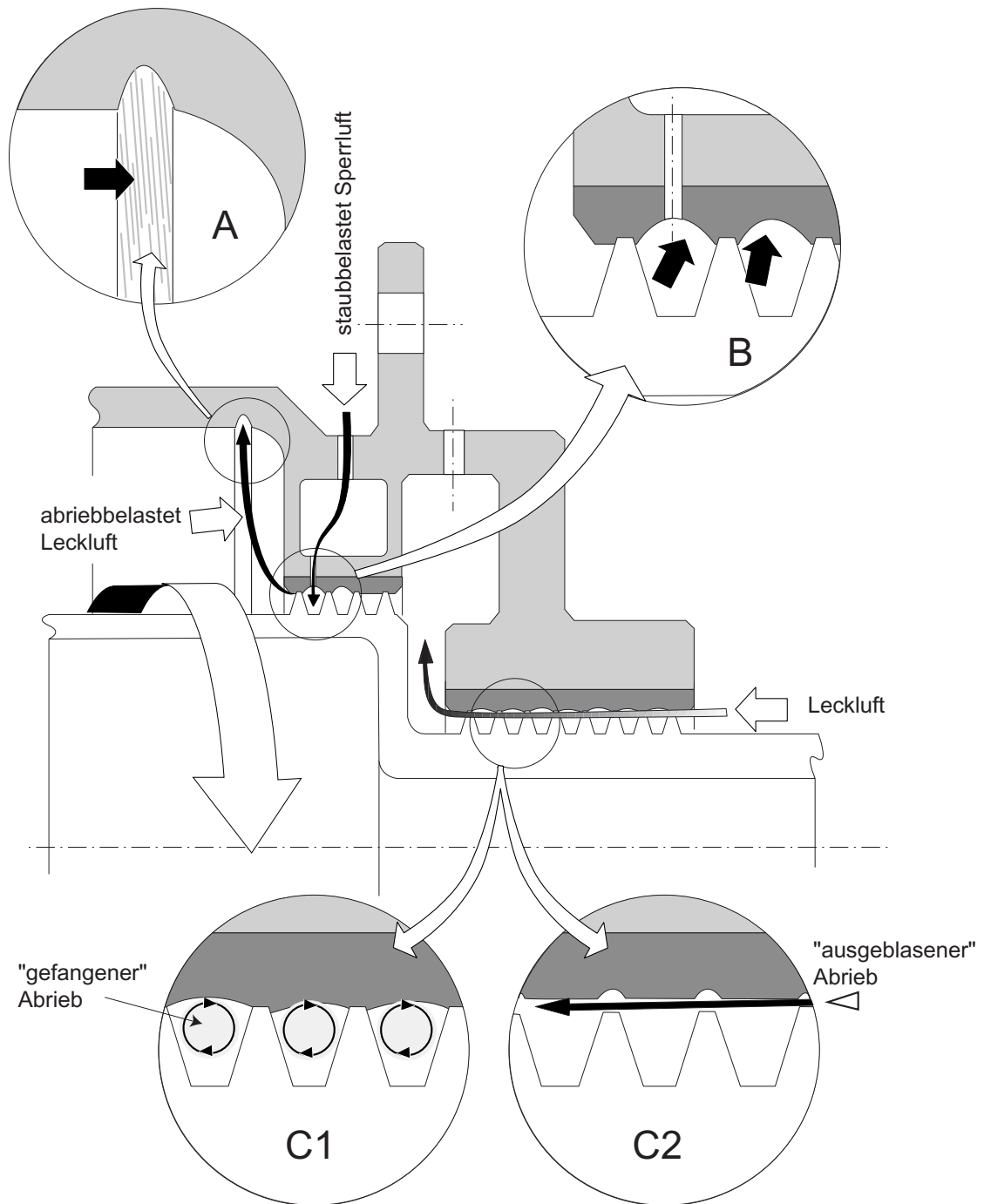
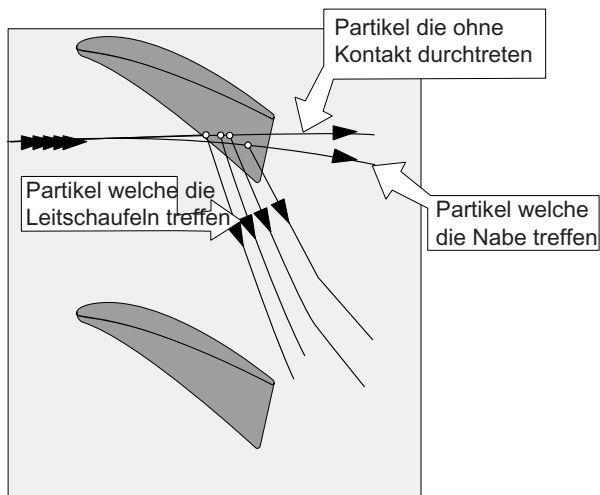
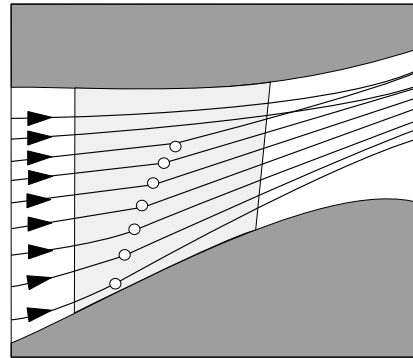
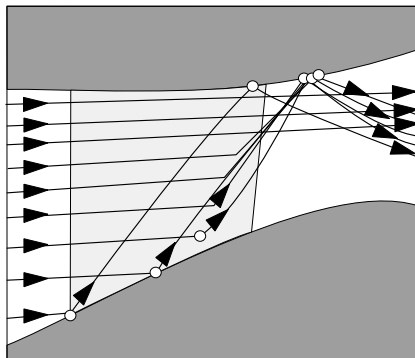


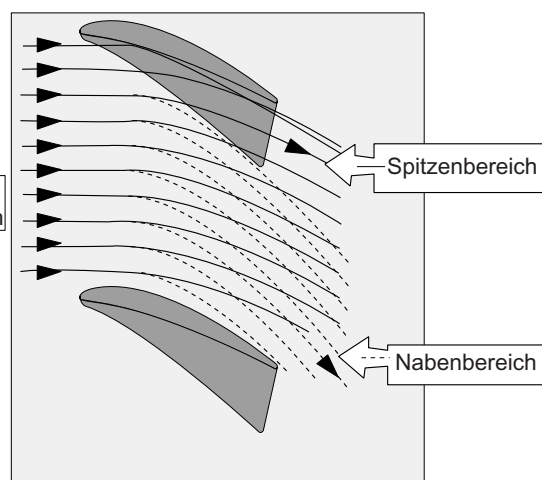
Bild 5.3.1-8

## Erosion: Mechanismen

Partikel unter  $10\mu$  Durchmesser folgen weitgehend der Strömung.



Repräsentative Bahnen von Partikeln mit 1 mm Durchmesser



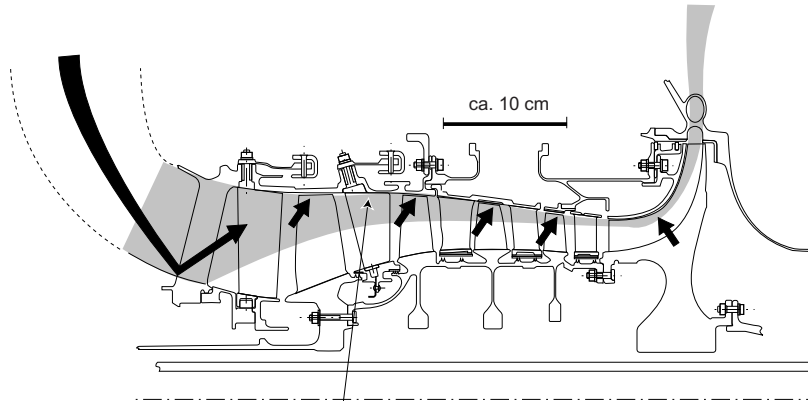
Repräsentative Bahnen von Partikeln mit  $10\mu$  Durchmesser

**Bild 5.3.1-9**

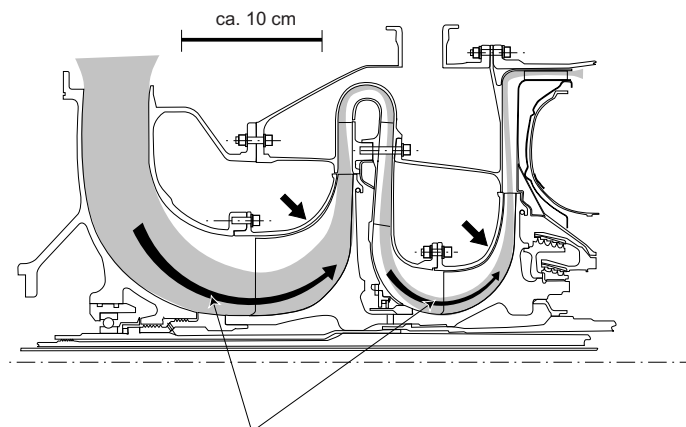
**Bild 5.3.1-9** (Lit. 5.3.1-14): Die Untersuchungen mit mineralischen Partikeln im Luftstrom haben gezeigt, dass Partikel unter  $0,010\text{ mm}$  weitgehend dem Luftstrom folgen und damit die Beschauflung relativ wenig erosiv beanspruchen. Größere Partikel können dagegen im Strömungskanal mehrfach abprallen und reflektiert werden. Aus diesem Grund können Erosionsschäden triebwerksspezifisch auch an durchaus unerwarteten Bereichen auftreten,

z.B. an den Hinterkanten von Leiterschauflern. Typische Anzeichen für solche Abpraller sind Hinterkanteneinschläge, die auf eine Bewegungsrichtung der Partikel gegen die Strömungsrichtung schließen lassen. Zu bedenken ist, dass größere mineralische Partikel beim Aufschlag zersplittern und dann im hinteren Verdichterbereich die Erosionsbeanspruchung entsprechend nachlässt.

Die verschiedenen Verdichterkonzepte sind unterschiedlich erosionsempfindlich.



Anreicherung der Partikel durch die auszentrifugierende Wirkung der Rotorschaukeln



Anreicherung der Partikel durch die auszentrifugierende Wirkung der Strömungsumlenkung

**Bild 5.3.1-10**

**Bild 5.3.1-10** (Lit. 5.3.1-5, 5.3.1-6, 5.3.1-7): Je nach der Konfiguration eines Verdichters sind charakteristische Zonen im Gasstrom besonders erosionsgefährdet. In der oberen Skizze ist ein Axial-Radialverdichter dargestellt (Lit. 5.3.1-18), wie er für kleinere Hubschraubertriebwerke typisch ist. Der Staub wird nach außen zentrifugiert und belastet so insbesondere die Spitzen der Rotorschaukeln und die Gehäusewandung durch Erosion. Damit werden die entsprechenden Spitzenspiele vergrößert (Pfeile). Der so nach **außen im Luftstrom konzentrierte Staub** erodiert auch die Radial-

verdichterbeschaufelung im Außenbereich (Bild 5.3.2-8).

Die untere Skizze zeigt einen zweistufigen Radialverdichter. Hier überwiegen die Fliehkräfte durch die Luftstromumlenkung gegenüber der Auszentrifugation und führen zu einer **Staubkonzentration im Nabenbereich**. Damit werden die Schaufeln der Radialverdichter im weniger empfindlichen Nabenbereich besonders erosionsbeansprucht. Von einem solchen Verdichter ist ein robusteres Erosionsverhalten zu erwarten.

## Verschleiß unter der Einwirkung von Flüssigkeiten Tropfenschlag/Regenerosion

Regenerosion (Bild 5.3.1-1) ist eine Schädigungsart die seit langem von Hubschrauberrotorblättern her bekannt ist. Bereits in den 70 er Jahren wurden deshalb umfangreiche Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt. Darüberhinaus beschäftigte man sich mit der Regenerosion an Cockpitverglasungen militärischer Flugzeuge, die für Hochgeschwindigkeitsflüge in Bodennähe vorgesehen sind. Die vorliegenden Literaturdaten befassen sich deshalb mit den typischen Werkstoffen und Erosionsparametern aus diesem Anwendungsbereich.

Eine erosiv schädigende Regeneinwirkung ist bei Triebwerken in den vorderen Verdichterstufen bzw. im Fan insbesondere dann zu erwarten, wenn kein langer Luftführungskanal vorhanden ist. Beim Einsatz faserverstärkter Kunststoffe (FVK, insbesondere C-Faser und Aramid-Faser, siehe Lit 5.3.1-19) in der Verdichterbeschaufelung ist eine solche Beanspruchung zu berücksichtigen. Bedingungen für Regenerosion dürften häufiger in Triebwerken von Fluggeräten auftreten, die in niedrigen Höhen betrieben werden, z.B. Hubschrauber.

Der Verschleißmechanismus beruht bei weichen Werkstoffen besonders auf plastischer Verformung, Einschnürung und Abreißen kleiner Oberflächenbereiche (Bild 5.3.1-11.1). Bei harten Werkstoffen entstehen Materialausbrüche infolge Verfestigung und Rißbildung (Erschöpfung der Verformungsfähigkeit) oder Ermüdung. Häufig ist eine Gewichtsabnahme erst nach einer gewissen Inkubationszeit zu beobachten. Bei Regenerosion erfolgt Materialabtrag. Die geometrische Veränderung, z.B. eines Schaufelblattes, ist jedoch nicht unbedingt die wichtigste Schädigung. Durch die Mikrorissbildung und/oder grubchenförmigen Abtragungen, kann die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils merklich abfallen.

Das folgende Beispiel soll den zu erwartenden Erosionsabtrag bei Regeneinwirkung verdeutlichen. Wenn z.B. Regentropfen von 1,2 mm Durchmesser (Tropfendichte von 0,01 Tropfen pro  $\text{cm}^3$ , Temperatur 25 °C) mit annähernd Schallgeschwindigkeit senkrecht auf eine Werkstoffoberfläche auftreffen, ergibt sich für Aluminium ein Abtrag von ca. 0,01 mm/s, bei Titanlegierungen jedoch weitaus weniger (0,01mm/10<sup>1</sup>-10<sup>2</sup>h). Typische Regendichten wurden mit 0,001 bis 0,1 Tropfen pro  $\text{cm}^3$  gemessen (siehe Kapitel 5.1.1, Bild 5.1.1.-6).

Tropfenschlagschäden müssen nicht immer im Zusammenhang mit Regen stehen. Treffen z.B. schädigende Flüssigkeitströpfchen im Zuge einer Wassereinspritzung in den Verdichter auf die Beschaufelung oder bei Wassereinspritzung im Brennkammerbereich (z.B. bei Industrieanwendung) auf die Turbinenbeschaufelung, so kann dies durchaus zu Erosionsschäden an Beschichtungen führen. Im Temperaturbereich von 10°C bis 50°C ist die Regenerosion nahezu temperaturunbeeinflusst. Über 50°C nimmt die Erosionswirkung ab.

### Kavitation

Kavitation (5.3.1-11.2) ist eine dem Tropfenschlag verwandte Schadensart. Hier erfolgt die Werkstoffbeanspruchung ebenfalls durch Aufprall einer „Flüssigkeit“. Bei Kavitation bildet sich jedoch ein „Flüssigkeitsstachel“ aus einer implodierenden Dampfblase in einem Flüssigkeitsstrom. Kavitationsschäden können insbesondere an Komponenten des Kraftstoffsystems auftreten.



## Der Schädigungsmechanismus des Tropfenschlags.

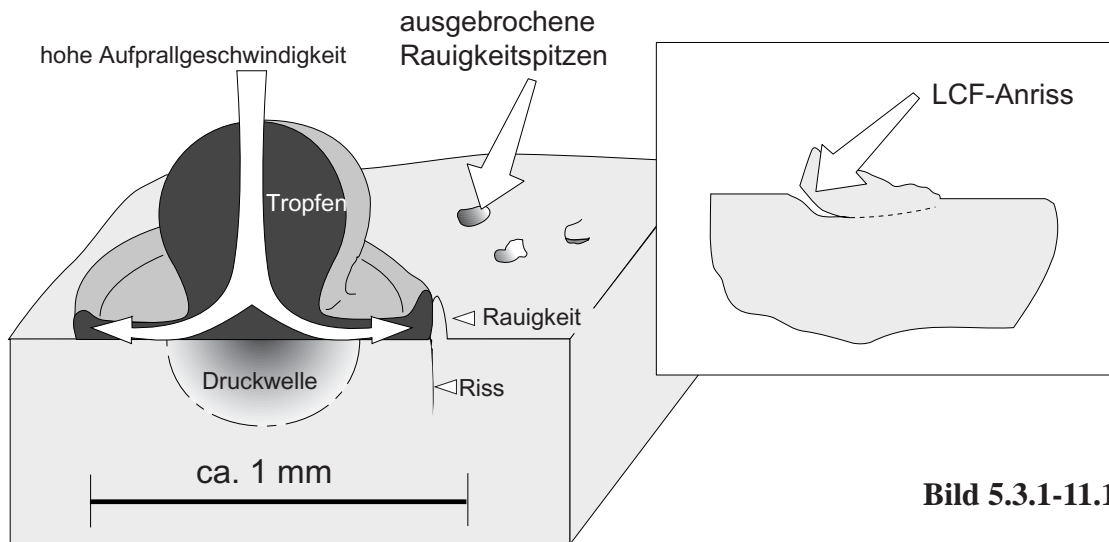


Bild 5.3.1-11.1

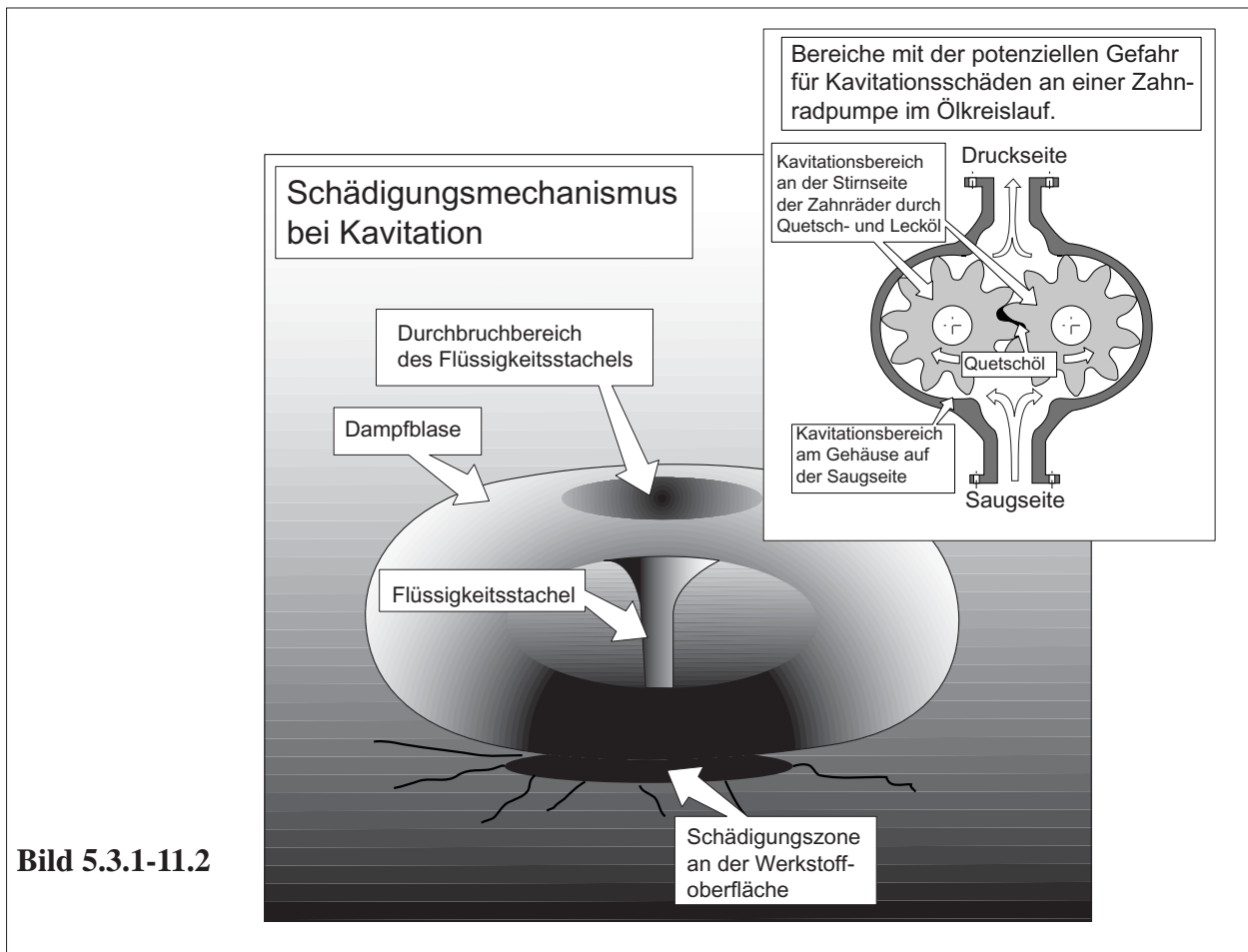
**Bild 5.3.1-11.1** (Lit. 5.3.1-8): Ein Flüssigkeitstropfen der mit hoher Geschwindigkeit auf eine feste Oberfläche prallt, erzeugt im Auftreffbereich Schockwellen, die je nach Werkstoff große örtliche elastische und/oder plastische Verformungen hervorrufen. Dadurch können schützende Oxidschichten entfernt und so ein verstärkter Korrosionsangriff ermöglicht werden.

Bei vielen aufeinanderfolgenden Impulsen mit elastischen Verformungen kann es zu Schwingermüdung im Mikrobereich kommen. Dies führt zu kleinen Ausbrüchen die sich zu einem makroskopischen Verschleiß akkumulieren.

Bei plastischen Verformungen können in der Aufschlagzone Krater und in diesem durch Überdehnung konzentrische Mikrorisse entstehen, die beim Auftreffen weiterer Tropfen zu Ausbrüchen führen. Liegen erst einmal Mikroausbrüche vor, kann sich von dem Tropfen, ähnlich wie beim Kavitationsvorgang (Bild 5.3.1-11.2), ein „Flüssigkeitsstachel“ in diesem Hohlraum ausbilden was den Erosionsvorgang beschleunigt.

An der Oberfläche verteilt sich die Flüssigkeit konzentrisch zum Tropfen. Diese Flüssigkeits-scheibe kann sich an Oberflächenrauigkeiten aufstauen und auch hier Mikrorisse auslösen. Die **Schwingrisse** (LCF) führen an der Oberfläche von **Titanbauteilen** zu bis 0,1 mm tiefen grubchenartigen Ausbrüchen. Diese Schadensform wurde an Bauteiloberflächen beobachtet, an denen Schichtreste nach einem Oxidstrahlen (führt zu relativ hoher Rauigkeit) mit einem **Hochdruck-Wasserstrahl** entfernt wurden.

## Erosion: Mechanismen



**Bild 5.3.1-11.2**

**Bild 5.3.1-11.2** (Lit 5.3.1-15): Dieses Bild nach einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme zeigt die Implosion einer Dampfblase in einer Flüssigkeit bei Ultraschallschwingungen. Deutlich ist der Flüssigkeitsstachel zu erkennen der sich während des Implosionsvorgangs bildet. Ähnlich dem Schadensmechanismus des Tropfenschlags (Bild 5.3.1-11.1) wird die Werkstoffoberfläche von den vielen, aufeinanderfolgenden Vorgängen geschädigt. Bei weiterer Beanspruchung entsteht eine Ermüdung der Oberfläche. Eskommt zum erosiven Materialabtrag (**Erosionskavitation**, Lit. 5.3.1-25). Mit einer Zerstörung schützender Oberflächen, kann zusätzlich Korrosion auftreten. Diese Schadens- bzw. Verschleißart wird **kavitations Korrosion** genannt.

Schadensauslösende **Dampfblasen** bilden sich in Unterdruckzonen, wie sie in schnell strömenden oder schwingenden Flüssigkeiten entstehen können (Gesetz von Bernoulli).

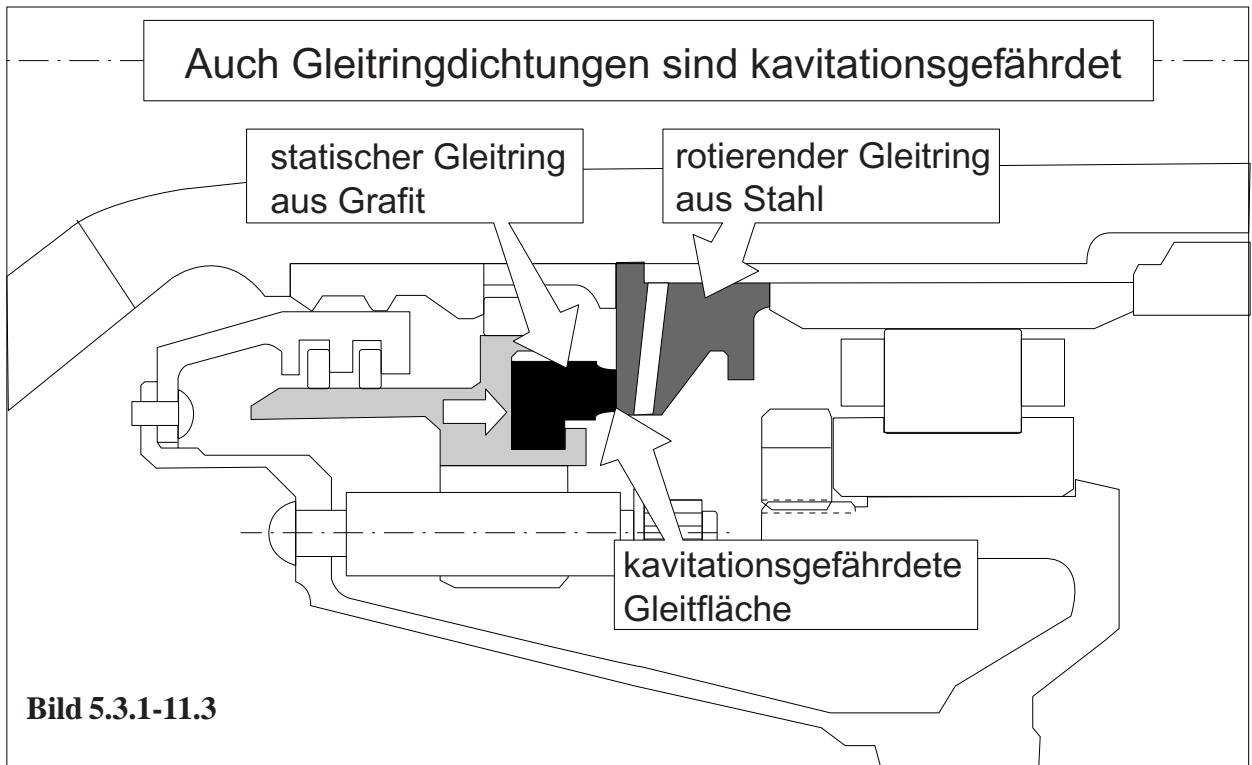
Dabei muss es sich nicht unbedingt um Dampfblasen der strömenden Flüssigkeit selbst handeln. Auch darin gelöste Gase und/oder früher verdampfenden Flüssigkeiten wie Wasser (z.B. Schwitzwasser das bei ungeeigneter Lagerung in das Öl eingebracht wurde) können bei erhöhter Temperatur und/oder Druckabfall, ähnlich wie in einer Sprudelflasche, Blasenbildung und damit Kavitation auslösen.

Interessant ist, dass sich mit dem **Anstieg der Rauigkeit**, anders als bei Regenerosion (Bild 5.3.1-14), der Erosionsabtrag verlangsamt (Lit. 5.3.1-25).

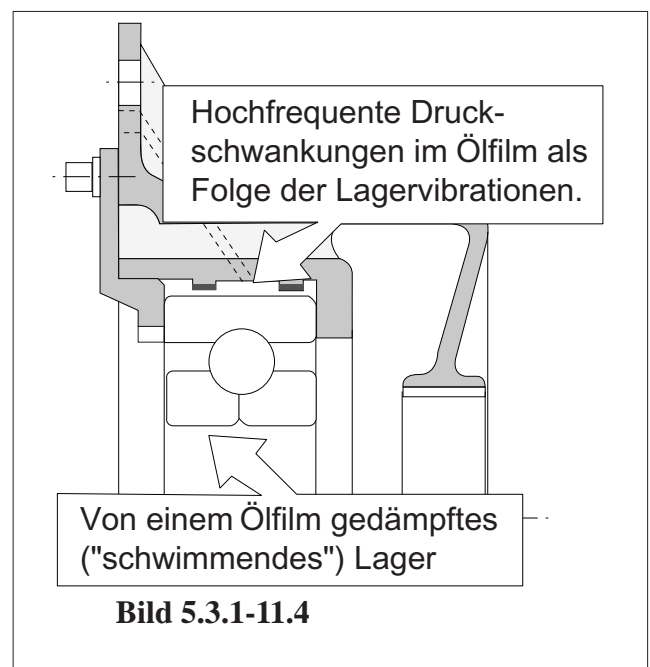
Die Skizze rechts oben zeigt Bereiche von **Zahnradpumpen** im Ölkreislauf in denen Kavitationsschäden beobachtet wurden (Skizze oben rechts, Bild 5.3.2-1, Lit. 3.3.1-21; Band 5 Bild 23.2.1-18). Besonders betroffen sind der Ansaugbereich von Rückölpumpen und die Stirnseiten der Zahnräder als Folge einer Expansion des Quetschöls.

# Äußere Einflüsse

## Erosion: Mechanismen



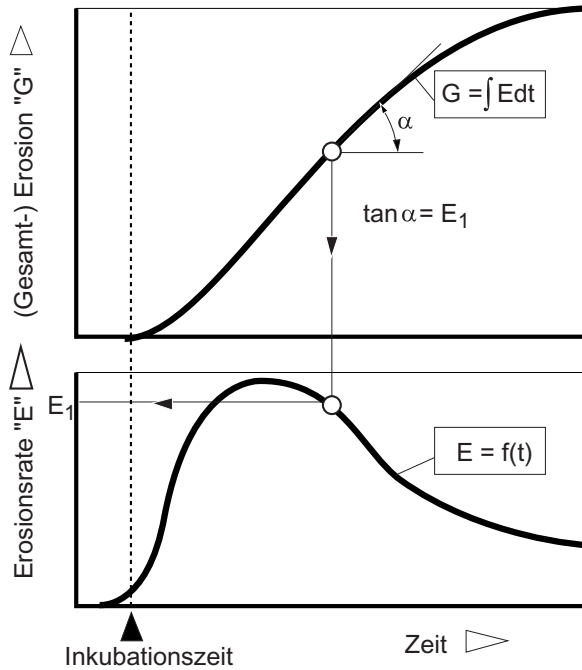
**Bild 5.3.1-11.3** (Lit 5.3.1-22): Auch **Gleitringdichtungen** (Band 5 Bild 23.4.2.2-1), wie sie besonders im Bereich von Lagerkammern zum Einsatz kommen sind von Kavitationsschäden bedroht (Band 5 Bild 23.4.2.2-2 und Bild 23.4.2.2-3).



**Bild 5.3.1-11.4** (Lit. 5.3.1-24): Im Bereich der **Anlageflächen ölgedämpfter Wälzlager** wurde ebenfalls Kavitation beobachtet (Band 5 Bild 23.1.1-2). Die typischen hochfrequenten Vibrationen der Wälzlager können bei nicht ausreichendem Öldruck und/oder hoher Öltemperatur eine Dampfblasenbildung begünstigen.

## Erosion: Mechanismen

### Erosionskenngrößen



Statt der Zeit kann auch zur Angabe der Erosionsrate ein zeitlich abhängiger Erosionsparameter verwendet werden:

- aufsummierte Masse der einwirkenden Erosionspartikel
- aufsummiertes Volumen der einwirkenden Erosionspartikel
- aufsummierte Erosionsenergie

Die Erosionsschädigung kann angegeben werden in:

- erodiertes Gesamtvolumen
- erodierte Gesamtmasse
- Abtragtiefe
- Festigkeitsabfall (z.B. Ermüdungsfestigkeit)

Die Gesamterosion "G" (Erosionssumme, kumulative Erosion) ist die gesamte Erosion während der Erosionsbeanspruchung

Die Erosionsrate "E" ist die momentane Erosion (Erosionsgeschwindigkeit), d.h. die Erosion pro Zeiteinheit oder bezogen auf einen entsprechenden Erosionsparameter.

**Bild 5.3.1-12**

**Bild 5.3.1-12:** Versteht man unter der Erosionsrate „E“ das Volumen des erodierten Materials bezogen auf eine bestimmte Zeit und Oberfläche, dividiert durch das aufgeschlagene Flüssigkeitsvolumen, so läßt sich für Regen-erosion allgemein ein typisch ausgeprägtes Erosionsverhalten feststellen:

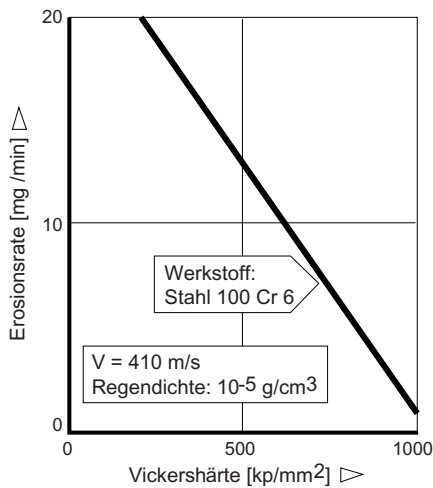
Die Erosionsrate steigt mit einer bestimmten Inkubationszeit (entsprechend einer „Inkubationsmenge“ an Tropfen) anfangs stark an, erreicht ein Maximum und fällt dann ab. Nach längerer Zeit wird eine nahezu konstante Erosionsrate erreicht. Die Inkubationszeit ist sowohl vom Werkstoff als auch von der kinetischen Energie der Tropfen beim Aufschlag abhängig. Während der Inkubationszeit treten mikrorissbildende Ermüdungsvorgänge ein, die nach der Inkubationszeit zum Abreißen bzw. Ausbrechen des Oberflächenmaterials führen. Der steile Erosionsanstieg am Anfang geht mit einem deutlichen Rauigkeitsanstieg einher.

# Äußere Einflüsse

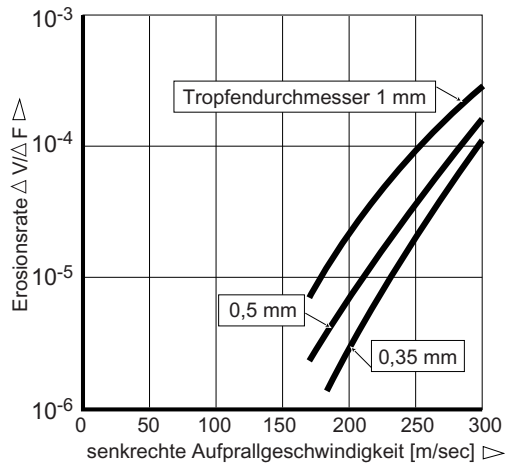
## Erosion: Mechanismen

Regentropfen können bei hoher Aufprallgeschwindigkeit Verdichterwerkstoffe schädigen.

Einfluss der Werkstoffhärte auf die Regenerosion (nach W. Herbert)



Einfluss des Tropfendurchmessers auf die Erosionsrate (nach Baker, Jolliffe, Pearson)



Einfluss der Laufzeit der Regen-erosion auf unterschiedliche Werkstoffe (nach W. Herbert)

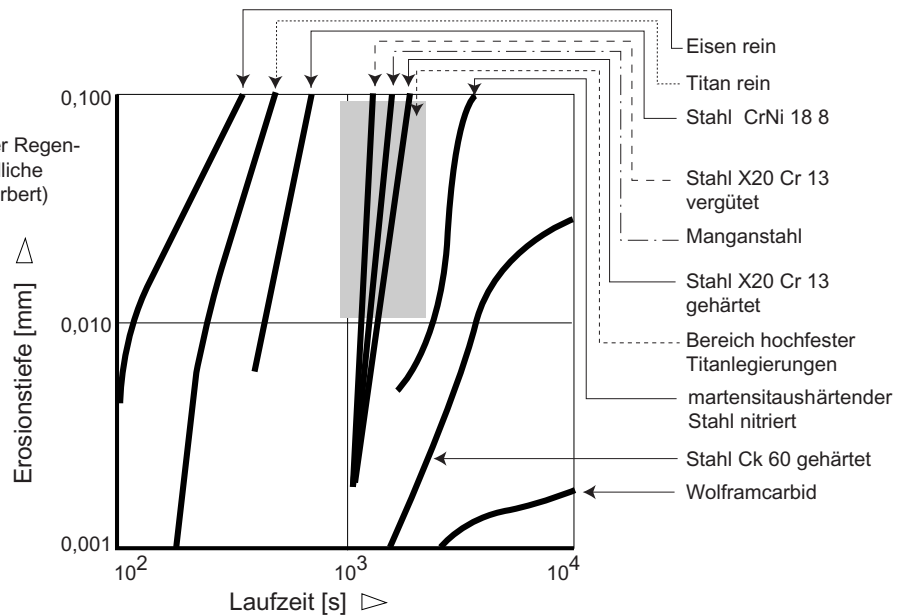


Bild 5.3.1-13

Bild 5.3.1-13 (Lit. 5.3.1-9 und 5.3.1-10):

### Werkstoffeinfluß auf die Regenerosion:

Bei deutlich kaltverfestigenden Metallen (Anstieg der Fließgrenze bei plastischer Verformung) kann sich durch die mechanische Beanspruchung während der Erosion die Erosionsbeständigkeit erhöhen. Im allgemeinen steigt die Erosionsbeständigkeit von Me-

tallen mit der Härte (Diagramm oben links), während für Mineralien und Kunststoffe diese Abhängigkeit häufig nicht besteht. Wichtig ist neben der Makrohärte auch die Mikrohärt, d.h. ob weiche oder harte Phasen vorhanden sind. Im Bereich großer Härteschwankungen, häufig entlang von Korngrenzen (z.B. Karbidanreicherungen), erfolgt ein verstärkter Erosionsangriff. Da feinkörnige Metalle mehr Korngrenzen als grobkörnige aufweisen, ist

## Erosion: Mechanismen

*feinkörniges Material empfindlicher gegenüber Regenerosion. Abhängig von der kinetischen Energie der Regentropfen, kann sich die Reihenfolge der Erosionsbeständigkeit verschiedener Werkstoffe verändern. So verhalten sich z.B. weiche elastische PU-Lacke bei Tropfen mit niedrigen Aufprallgeschwindigkeiten, d.h. mit kinetischen Energien, die noch elastisch aufgenommen werden können, sehr günstig. Wird jedoch die Aufprallgeschwindigkeit über einen bestimmten Grenzwert gesteigert, kommt es zu schneller Zerstörung der Schicht. Festzuhalten ist, daß sich **Werkstoffe sehr unterschiedlich gegenüber Regenerosion und Sanderosion verhalten** und nicht vom Verhalten eines Werkstoffes auf das eines anderen geschlossen werden kann.*

*Einfluß der Tropfengröße auf die Regenerosion:*

*Der Einfluß der Tropfengröße auf das Erosionsverhalten kann sich bei den Werkstoffen stark unterscheiden. Es werden sogar gegenläufige Abhängigkeiten beobachtet: Die Erosionsrate von Reinaluminium fällt z.B. mit dem Tropfendurchmesser ab während sie bei PU mit der Tropfengröße ansteigt. Dies wird mit der Überlagerung mehrerer Einflüsse wie Werkstoffeigenschaften, Impulszahl, und Flächentopografie erklärt.*

*Die häufigste Tropfengröße bei Regen liegt zwischen ca. 1 mm und 3 mm Durchmesser (siehe Bild 5.1.1-6), was einer Masse von ca. 1 mg bis 10 mg entspricht. Sowohl das Tropfenvolumen als auch die Tropfenform beeinflussen die Erosionsrate. Die kritische Tropfengeschwindigkeit ( $v$ ) ab der erstmals merkliche Erosion nach längerer Zeit eintritt, ist von der Tropfengröße abhängig (Diagramm oben rechts). Der Einfluß der Tropfengröße ist im Bereich der kritischen Geschwindigkeit deutlich und nimmt bei höheren Aufprallgeschwindigkeiten ab (Bild 5.3.1-12). Diese „Schwellenbedingung“, ab der merklich Erosion einsetzt, ist für Metalle näherungsweise*

*durch die Beziehung  $v_c^2 \cdot d = 10^7$  ( $v_c$  in m/s,  $d$  in 0,001 mm ) gegeben.*

**Bild 5.3.1-14** (Lit. 5.3.1-9, 5.3.1-10, 5.3.1-11):

**Einfluß der Auftreffgeschwindigkeit der Tropfen bei der Regenerosion:**

*Die Auftreffgeschwindigkeit  $v$  (m/s) ist bestimmend für die freiwerdende kinetische Energie des Tropfens und damit für dessen Erosionswirkung (Diagramm unten rechts). Ist  $v_c$  die kritische Tropfengeschwindigkeit (Bild 5.3.1-13), unter der bei beliebig langen Einwirkzeiten keine merkliche Erosion eintritt, so läßt sich für die Erosionsrate folgende Beziehung angeben:*

*$E = a (v - v_c)^n$ . „ $a$ “, „ $n$ “ und „ $v_c$ “ sind abhängig vom Material und Erosionsparametern wie Tropfendurchmesser und -form. Für Stähle ergab sich z.B.  $E = a (v - 125)^2$  bis  $2,16$ .*



# Äußere Einflüsse

## Erosion: Mechanismen

Die Schädigung durch Regenerosion hängt vom Werkstoff und der Oberflächenbeschaffenheit eines Bauteils ab.

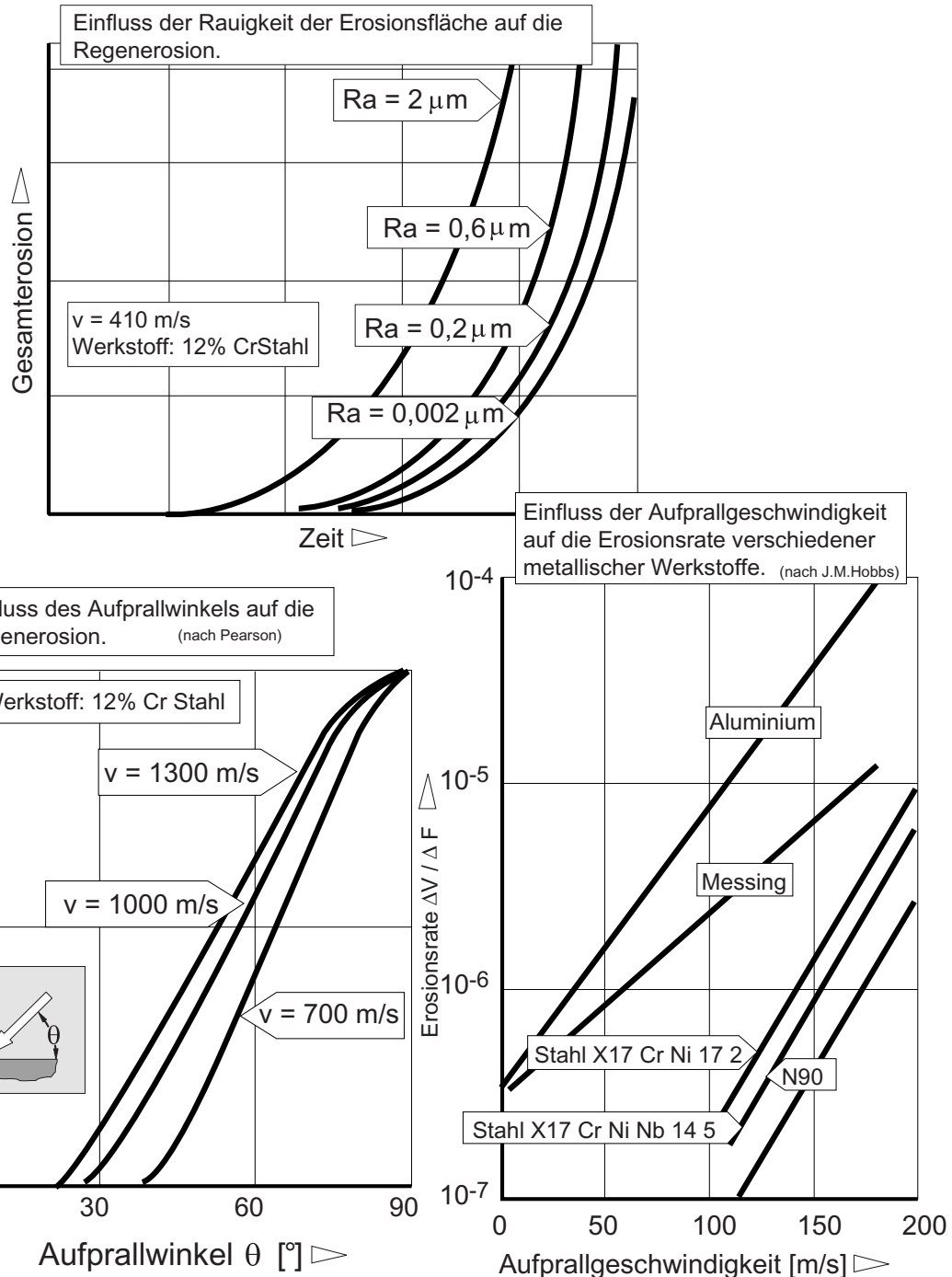


Bild 5.3.1-14

**Einfluß des Aufprallwinkels auf die Regenerosion:**

Die Erosionsrate nimmt mit der Größe des Aufprallwinkels stark zu (Diagramm unten

links). Daraus ist zu erkennen, dass (bei glatten Flächen) die Normalkomponente der Aufschlaggeschwindigkeit entscheidend ist. Die Tangentialkomponente spielt bei Tropfenschlag auf glatten Flächen nur eine untergeordnete

## Erosion: Mechanismen

*Rolle. Je rauher aber die Oberfläche wird, um so größer dürfte der Effekt der Tangentialkomponente sein. Aus diesem Grund sind an Verdichterschaufeln nur die Eintrittskanten durch Regenerosion merklich belastet. Schaufeln mit scharfen Eintrittskanten sind dabei als günstiger zu bewerten, da der Tropfen zerteilt wird und eine belastende Druckwelle nicht ausbilden kann.*

### **Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf die Regenerosion:**

*Aus dem oberen Diagramm ist zu erkennen, dass bei sinkender Rauigkeit der Verschleiß durch Regenerosion deutlich abnimmt. Einen hohen Erosionswiderstand in Form einer deutlich größeren Inkubationszeit ist deshalb von möglichst glatten Flächen zu erwarten. Sobald nach überschreiten der Inkubationszeit die Rauigkeit der Erosionsfläche zunimmt steigt der Erosionsangriff entsprechend an.*

*Auch bei **Kavitation** (Kavitationserosion) erhöht eine größere Anfangsrauigkeit den Abtrag. Bei fortschreitender Schädigung ist jedoch **mit der Zerklüftung** eine langsamere Abtragsgeschwindigkeit zu beobachten. (Lit. 5.3.1-25).*

## Literatur zu Kapitel 5.3.1

- 5.3.1-1** W. Kayser, „Erosion durch Festkörper“, Proceedings der „2. Forschungskonferenz Regenerosion“, 16.-18. August 1967, Meersburg Germany, Seite 278-290.
- 5.3.1-2** H.Rieger, „Vergleichende Untersuchungen zur Werkstoffzerstörung beim Tropfenschlag und bei der Kavitation“, Proceedings der „2. Forschungskonferenz Regenerosion“, 16.-18. August 1967, Meersburg Germany, Seite 260-277.
- 5.3.1-3** D.R. Nagy, V.R. Parameswaran, J.D. MacLeod, J.P. Immarigeon, „Protective Coatings for Compressor Gas Path Components“, Proceedings AGARD-CP558 der Konferenz „Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines“, Rotterdam, The Netherlands, 25-28 April 1994, Kapitel 27.
- 5.3.1-4** R. Ball, W. Tabakoff, „An experimental Investigation of the erosive Characteristic of 410 Stainless Steel and 6-Al-4V Titanium“, Report No. 73-40, Department Aerospace Engineering- University of Cincinnati, US-Army Research Office Nr. DA-ARO-D-124-G-154, 1973.
- 5.3.1-5** D.L. Mann, G.D. Warnes, „Future Directions in Helicopter Engine Protection System Configuration“, Proceedings AGARD-CP558 der Konferenz „Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines“, Rotterdam, The Netherlands, 25-28 April 1994, Kapitel 4, Seite 4-6.
- 5.3.1-6** S.C. Tan, R.L. Elder, P.K. Harris, „Particle Trajectories in Gas Turbine Engines“, Proceedings AGARD-CP558 der Konferenz „Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines“, Rotterdam, The Netherlands, 25-28 April 1994, Kapitel 14, Seite 14-12.
- 5.3.1-7** C.G. Horton, H. Vignau, G. Leroy, „The Calculation of Erosion in a Gas Turbine Compressor Rotor“, Proceedings AGARD-CP558 der Konferenz „Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines“, Rotterdam, The Netherlands, 25-28 April 1994, Kapitel 15, Seite 15-14.
- 5.3.1-8** „Failure Analysis and Prevention“, Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11, American Society for Metals, Metals Park, Ohio 44073, Seite 164.
- 5.3.1-9** W. Herbst, „Tropfenschlagverhalten von Eisen und Vergütungsstählen“, Proceedings der „2. Forschungskonferenz Regenerosion“, 16.-18. August 1967, Meersburg Germany.
- 5.3.1-10** Baker, Jolliffe, Pearson, Beitrag in den Proceedings der „2. Forschungskonferenz Regenerosion“, 16.-18. August 1967, Meersburg Germany.
- 5.3.1-11** J.M. Hobbs, Beitrag in den Proceedings der „2. Forschungskonferenz Regenerosion“, 16.-18. August 1967, Meersburg Germany.
- 5.3.1-12** „V2500 designed for maximum core protection“, Abbildung, Zeitschrift „Aircraft Engineering“, May 1993, Seite 3.

## Erosion: Mechanismen

- 5.3.1-13** „Delta Weighs Changes to CFM56-2“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, December 20, 1982, Seite 31.
- 5.3.1-14** A.Hamel, „Solid Particle Dynamic Behaviour Through Twisted Blade Rows“, Proceedings der „2. Forschungskonferenz Regenerosion“, 16.-18. August 1967, Meersburg Germany.
- 5.3.1-15** J. Hancock, „Ultrasonic Cleaning“, ASM Handbook Volume 5 Surface Engineering.
- 5.3.1-16** S.W.Kandebo, „Alliedsignal Commits to LT101 Improvements“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, March 11, 1996, Seite 70.
- 5.3.1-18** J. Pugnale, „Dual Centrifugal Compressor: The Helicopter Solution to Sand and Ice Ingestion“, „American Helicopter Society“, Washington DC, 44th Annual Forum Proceedings, June 16-18, 1988, Seite 673-681.
- 5.3.1-19** J.M.S. Keen, „Development of the Rolls-Royce RB.211 turbofan for airline operation“, Proceeding Paper 700292 des ASE „National Transportation Meeting“ New York, N.Y., April 20-23, 1970.
- 5.3.1-20** D.I.G. Jones, C.M. Cannon, „Control of Gas Turbine Stator Blade Vibrations by Means of Enamel Coatings“, Zeitschrift „Journal of Aircraft“, Vol. 12, No. 4, April 1975, Seite 226 - 230. (2497)
- 5.3.1-21** Z.S. Palley, I.M. Korolev, E.V. Rovinsky, „Structure and Strength of Aircraft Gas-Turbine Engines“, Übersetzung FTD-HT-23-903-68 aus dem Russischen von „Foreign Technology Division“, 1968, Seite 372.
- 5.3.1-22** B.S. Nau, „Film Cavitation Observation in Face Seals“, Proceeding der „Fourth International Conference on Fluid Sealing“, Philadelphia, Pa., 1969, Seite 190-198.
- 5.3.1-23** K. Steffens, „Technik der Luftfahrtantriebe“, Vorlesung an der TU- Aachen, März 2003.
- 5.3.1-24** H.R.Carr, G.J.Ives, P.Jenkins, „A Joint Study on the Computerisation of In-field Aero Engine Vibration Diagnosis“, Proceedings AGARD-CP448 der Konferenz „Engine Condition Monitoring-Technology and Experience“, Quebec, Canada, 30May-3.June 1988, Kapitel 31, Seite 31-5.
- 5.3.1-25** „Kavitation von Stellventilen“, Technische Information V74 / Schulung der Fa. SAMSON AG Seite 3-58.