

VERGLEICHENDE MESSUNGEN ZUM EINFLUSS VON VULKANASCHEN UND SAND AUF VERDICHTERWERKSTOFFE

Thomas J. Uihlein, U. Großmann MTU Aero Engines GmbH, 80995 München, Dachauer Str. 665, Deutschland

Zusammenfassung

Im April 2010 brach auf Island der Vulkan Eyjafjallajökull aus und verursachte mit seiner Aschewolke einen wiederholten und längeren Ausfall von größeren Teilen des europäischen Luftverkehrs. Während im europäischen Bereich aufgrund relativ seltener Vulkanausbrüche wenig Erfahrung zum Einfluss von Vulkanasche auf Flugtriebwerke vorlag, gab es im asiatisch/amerikanischen Raum nach Vorfällen mit Flugzeugen in Indonesien (1982 Mt. Galunggung) und in Alaska (Mt. Redoubt 1989 und Mt. Spurr 1992) deutlich mehr Untersuchungen [1]. Eine dieser [2] sagte aus, dass Vulkanasche (VA) viermal so abrasiv wie normaler Sand im Verdichter wirken soll. Die Verdichterbeschaukelung wird durch Sand oder Vulkanasche abrasiv abgetragen und verändert sich in ihren geometrischen Abmaßen und in der Oberflächenrauheit. Beide Effekte führen zu einer Verminderung der aerodynamischen Effizienz, zu höheren Treibstoffverbräuchen und letztendlich bei nicht rechtzeitigem Austausch der Beschaukelung zu mechanischen Beschädigungen des Verdichters. In der Turbine kommt es dagegen aufgrund der hohen Temperaturen zum Aufschmelzen der Vulkanasche, die an der Oberfläche der Beschaukelung haften bleibt und zu einer Verblockung der aerodynamischen Querschnitte führt. Ein weiterer Effekt ist, dass bei gekühlten Turbinenschaufeln, die Kühlluftbohrungen verstopft werden können, und es damit zu Überhitzung der Schaufeln und Ausfall der Turbine kommen kann.

Um speziell die Auswirkungen von VA im Verdichterbereich zu untersuchen, wurde von MTU ein Erosionsrig adaptiert und Erosionsuntersuchungen mit verschiedenen Testsanden und VA an verschiedenen Verdichterwerkstoffen und einer Schutzschicht vergleichend durchgeführt. Dazu wurden die Parameter Auftreffwinkel, Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur systematisch variiert. Die VA stammte aus Island und wurde kurze Zeit nach dem Ausbruch von der Universität in Reykjavik und Mitarbeitern einer isländischen Fluglinie eingesammelt.

Die Erosions-Ergebnisse zeigten, dass diese VA je nach Versuchsbedingungen wesentlich abrasiver oder auch weniger abtragend als Sand wirken kann. Die unterschiedlichen Befunde können mit der Morphologie der VA korreliert werden. Die Versuche stellen einen ersten Schritt für ein besseres Verständnis des Einflusses von VA auf den Verdichter dar und müssen noch auf das Gesamttriebwerk skaliert werden. Schutzschichten können den Erosionsangriff im Verdichter deutlich reduzieren.

1. ERFAHRUNGEN VON FRÜHEREN VULKANAUSBRÜCHEN

Im April 2010 brach auf Island der Vulkan Eyjafjallajökull aus und verursachte mit seiner Aschewolke einen wiederholten und längeren Ausfall von größeren Teilen des europäischen Luftverkehrs. Während im europäischen Bereich aufgrund relativ seltener Vulkanausbrüche wenig Erfahrung zum Einfluss von Vulkanasche (VA) auf Flugtriebwerke vorlag, gab es im asiatisch/amerikanischen Raum nach Vorfällen mit Flugzeugen in Indonesien (1982 Mt. Galunggung) und in Alaska (Mt. Redoubt 1989 und Mt. Spurr 1992) deutlich mehr Untersuchungen [1].

Der Vulkanausbruch in Indonesien hatte dazu geführt, dass beim Durchflug durch die Aschewolke in 11.300 m Höhe alle 4 Triebwerke einer B747 von British Airways am 24. Juni 1982 verlöschten und 3 davon erst in einer Höhe von 3.650 m wieder gezündet werden konnten. Die Nachuntersuchungen zeigten, dass die Verdichterbeschaukelung durch Sand oder Vulkanasche erosiv abgetragen wird und sich entsprechend in ihren geometrischen Abmaßen und in der Oberflächenrauheit verändert (BILD 1). Beide Effekte führen zu einer Verminderung des Verdichtereffizienzgrades, zu einer Verringerung des Pumpgrenzabstandes, zu höheren

Treibstoffverbräuchen bei Langzeiteinwirkung und letztendlich bei nicht rechtzeitigem Austausch der Beschaukelung zu mechanischen Beschädigungen des Verdichters.



BILD 1. Erosion Laufschaufelspitzen in einem Mitteldruckverdichter [1]

In der Turbine kommt es dagegen aufgrund der hohen Temperaturen zum Aufschmelzen der Vulkanasche, die an der Oberfläche der Beschaukelung haften bleibt (BILD 2) und zu einer Verblockung der aerodynamischen Querschnitte führt mit der Folge, dass Triebwerke verlöschen können. Ein weiterer Effekt ist, dass bei gekühlten Turbinenschaufeln, die Kühlluftbohrungen verstopft werden können, und es damit zu Überhitzung der Schaufeln und Ausfall der Turbine kommen kann.



BILD 2. Turbinenschaufeln mit Krusten von anhaftender glasartiger Vulkanascheschmelze [2]

An der Universität in Cincinnati wurden Tests mit Vulkanasche durchgeführt [2], die zeigten, dass Vulkanasche unter den geprüften Randbedingungen viermal so abrasiv wie normaler Quarzsand (gemäß militärischer Spezifikation MIL E 5007D) im Verdichter wirkt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Einwirkung von VA auf das Triebwerk von Konzentration, Konsistenz, Dauer der Einwirkung, Partikelform und -größe, chemischer Zusammensetzung der Partikel und evtl. Gase, dem Triebwerksdesign und dem Missionsprofil abhängt. All dies legt nahe, dass es je nach Randbedingungen große Unterschiede in dem Ausmaß der Schädigung eines Triebwerkes durch VA geben wird.

2. VULKANAUSBRUCH EYJAFJALLAJÖKULL

Der Vulkanausbruch produzierte im April 2010 in den ersten 3 Tagen ca. 140 Mio. m³ Material [3]. Davon der größte Teil mit 100 Mio. m³ als feine Flugasche, die in Höhen von 6.000 bis 9.000 m transportiert wurden.

MODIS photo taken 17 April at 13:17. - Ingibjörg Jónsdóttir

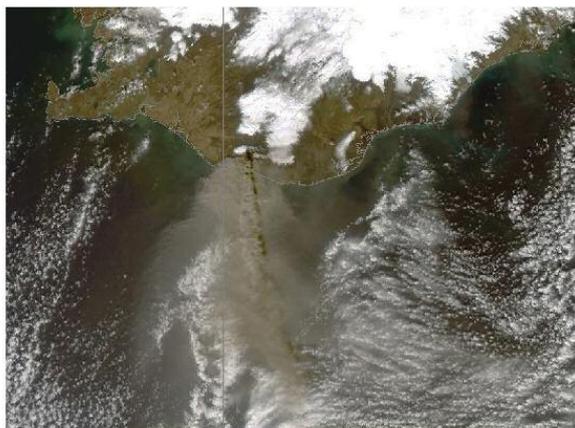


BILD 3. Blick von oben auf den Vulkan mit abziehender Aschewolke

Vulkanasche und nicht schmelzflüssige Lava wird immer dann produziert, wenn der Ausbruch in Gegenwart großer Gasmengen stattfindet oder ein Vulkan unter einem Gletscher wie in Island liegt und die heiße Lava das Eis schmilzt und das Wasser verdampfen lässt. Bei derartigen Randbedingungen wurden vom Eyjafjallajökull 30 bis 40 t Asche/s erzeugt, wovon ca. 3 t/s nach Mitteleuropa verfrachtet wurden (BILD 3). Aufgrund der Entstehungsbedingungen handelt es sich bei der Vulkanasche zu einem großen Anteil um poröses glasartiges Material niedriger Dichte. Je nach Vulkan werden Dichtewerte zwischen 1,1 und 1,3 g/cm³ [4] und bis zu 2,8 g/cm³ [5] gefunden. Nimmt man die Partikel als ideale sphärische Kugeln an, die allein aufgrund der Schwerkraft aus verschiedenen Höhen auf die Erde zurück fallen [1] ergeben sich je nach Größe der Partikel Verweildauern im Minutenbereich bis über 1 Jahr.

Height m <i>10⁴</i> (<i>10⁵</i>)	<i>r</i> = 1.0 μ m		<i>r</i> = 2.0 μ m		<i>r</i> = 5.0 μ m		<i>r</i> = 10 μ m		<i>r</i> = 50 μ m		<i>r</i> = 100 μ m	
	weeks	days	weeks	days	days	hours	hours	minutes	minutes	minutes	minutes	
3 (7)	8	15	2	2	14	0.6	9					
5 (16)	21	37	6	6	36	1.4	21					
8 (26)	34	59	10	10	57	2.3	34					
10 (33)	42	74	12	12	71	2.9	43					
12 (39)	51	89	14	14	86	3.4	51					
15 (49)	64	111	18	18	107	4.3	64					
20 (66)	85	149	24	24	143	5.7	86					

TAB 1. Fallzeiten von sphärischen Partikeln aus verschiedenen Höhen allein unter Schwerkrafteinfluss (von Prata [1])

Dies lässt jedoch unberücksichtigt, dass Windströmungen oder Feuchtigkeit diese Werte signifikant beeinflussen können.

Um realistischere Angaben für die in der Luft vorhandenen Partikel zu bekommen, wurden vom DLR im Zeitraum des Vulkanausbruchs in Island Messflüge zwischen Deutschland und Island durchgeführt [5]. Die maximal gefundenen Partikeldurchmesser lagen bei ca. 20 μ m und die minimalen bei 0,2 μ m. Der Großteil der Partikel war kleiner als 2 μ m im Durchmesser.

3. PROGRAMM EROSIONSVERSUCHE

Aufgrund der in der Literatur nur sehr allgemeinen Angaben zur Auswirkung von Vulkanasche auf den

Verdichter eines Triebwerkes wurden eigene Versuche durchgeführt, um quantitative Angaben zum abrasiven Verschleiß typischer Verdichterwerkstoffe zu erhalten.

3.1. Erosionsmedien

Zur Einordnung des Erosionsangriffs durch Vulkanasche wurden vergleichende Messungen mit Sand herangezogen. Während Vulkanasche als Naturprodukt großen Schwankungen in Zusammensetzung, Größe und Form unterliegen kann, sind bei Sanden spezifizierte Testsande verfügbar, die auch für militärische Sand- und Staubtests zur Anwendung kommen. Als Erosionsmedien wurden daher Vulkanasche aus Island vom aktuellen Vulkanausbruch, standardisierter Testsand (MIL E 5007) und nicht standardisierter Flugsand aus dem Mittleren Osten verwendet. Letzterer wurde hinzugezogen, da er aufgrund seiner Entstehung und ariden Verwitterung eine andere Morphologie als in humider Umgebung entstandene Sande aufweist.

3.1.1. Vulkanasche

Die Vulkanasche wurde während des Vulkanausbruchs des Eyjafjallajökull von Mitarbeitern der University of Iceland, Institute of Earth Sciences, Nordic Volcanological Center und von Mitarbeitern der Fluggesellschaft Air Atlanta Icelandic gesammelt.

Eigene Analysen dieser Proben (TAB 2) zeigten, dass chemische Zusammensetzung und Korngrößen recht gut mit den Angaben der obigen Universität übereinstimmen [3].

	Gewichts%
Na2O:	4,9
MgO:	1,8
Al2O3:	14,6
SiO2:	57,8
P2O5:	0,4
S:	0,1
Cl:	0,2
K2O:	2,4
CaO:	5,3
TiO2:	1,7
MnO:	0,2
Fe2O3:	10,5

TAB 2. Chemische Zusammensetzung der für Testzwecke verwendeten Vulkanasche aus Island [MTU]

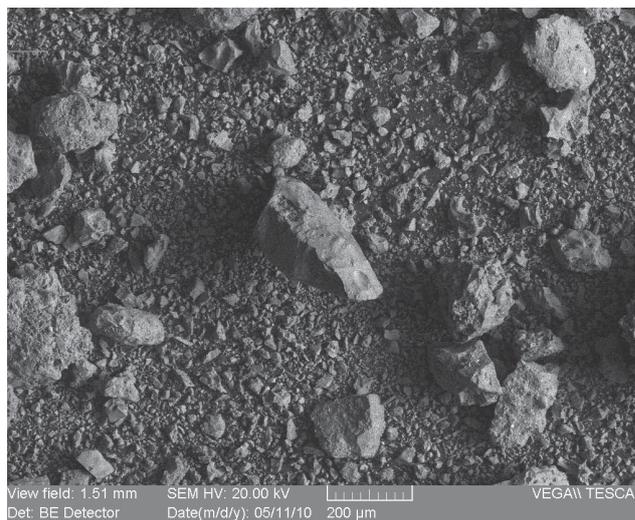


BILD 4. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der verwendeten Vulkanasche aus Island, die einen Überblick über die verschiedenen Partikelgrößen gibt [MTU]

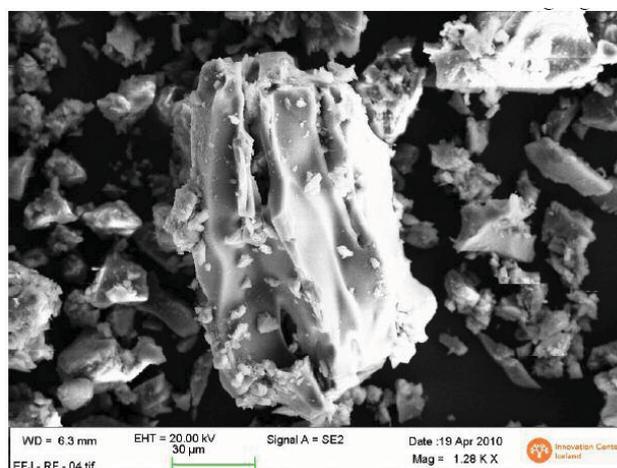


BILD 5. Morphologie eines einzelnen typischen Vulkanaschepartikels [3]

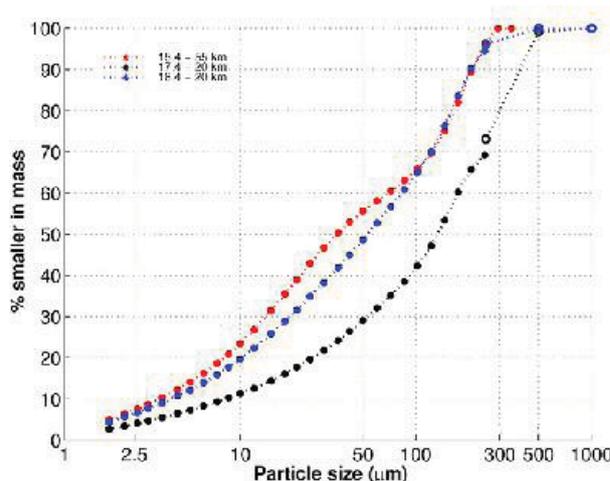


BILD 6. Korngrößenverteilung der an verschiedenen Tagen im April 2010 gesammelten Vulkanaschen [3]

Die Vulkanasche (BILD 4 und BILD 5) mit einer mittleren Korngröße von 40 bis 100 µm (BILD 6) wurde bei 300 µm abgesiebt, um Verunreinigungen organischer Natur zu

entfernen. Sie entspricht damit vom Korngrößenspektrum in etwa dem des abgeseibten Testsandes MIL E 5007 (s. Kapitel 3.1.2.) und kann daher für vergleichende Erosionsmessungen verwendet werden. Der direkte Vergleich mit den aus den DLR-Messungen erhaltenen Korngrößen ist damit nicht möglich. Hierfür wären wesentlich größere Mengen an Vulkanasche nötig gewesen, um den benötigten Feinanteil durch Aussieben in ausreichender Menge bereit zu stellen. Dennoch sind die Messungen relevant, da die Abhängigkeit der Erosionsrate von der VA-Korngröße, wie in der Diskussion in Kapitel 5.4 ausgeführt, offenbar nicht sehr hoch ist.

3.1.2. Testsand MIL E 5007

Der Testsand besteht zu über 98% aus SiO₂ mit Verunreinigungen wie Fe₂O₃, Al₂O₃ und Alkalioxiden. Er weist eine Dichte von 2,6 bis 2,7 g/cm³ auf und eine Korngröße von maximal 1.000 µm (Mittelwert ca. 200 µm). Die Form kann als eher abgerundet und kugelig beschrieben werden (BILD 7), wie sie typisch für humide Gebiete ist. Das Schleifen und Reiben der Sandkörner untereinander führt zu eher sphärischen Morphologien unter diesen Bedingungen.

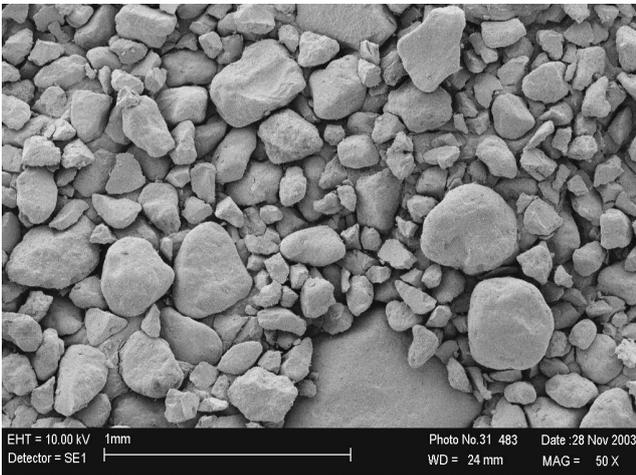


BILD 7. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Testsand MIL E 5007 [MTU]

Der Sand wurde für die Tests auf 200 µm abgeseibt, da diese Kornfraktion typischerweise im Verdichtereingang gefunden wird [6].

3.1.3. Flugsand

Um einen Vergleich für besonders erosive Umgebungsbedingungen wie im Mittleren Osten ziehen zu können, in dem durch Sandstürme teilweise auch sehr hohe Partikelkonzentrationen in der Luft vorliegen, wurde zusätzlich Flugsand beschafft. Dieser wurde nach Absetzen auf dem Boden der Rollbahn eingesammelt und auf eine maximale Korngröße von 300 µm abgeseibt, um organische Verunreinigungen zu entfernen. Dabei verblieb kein Sandrückstand im Sieb.

Die chemische Zusammensetzung (TAB 3) ähnelt zwar in den Hauptbestandteilen der von der Vulkanasche, ist aber aufgrund des unterschiedlichen Entstehungsprozesses aus anderen Mineralien und Phasenbestandteilen aufgebaut.

Gewichts%	
Na ₂ O:	4,81
MgO:	4,13
Al ₂ O ₃ :	15,49
SiO ₂ :	53,16
P ₂ O ₅ :	0,218
S ₂ O ₃ :	0,743
Cl:	2,68
K ₂ O:	1,47
CaO:	7,59
TiO ₂ :	1,4
MnO:	0,145
Fe ₂ O ₃ :	7,87

TAB 3. Chemische Zusammensetzung des für Testzwecke verwendeten Flugsandes [MTU]

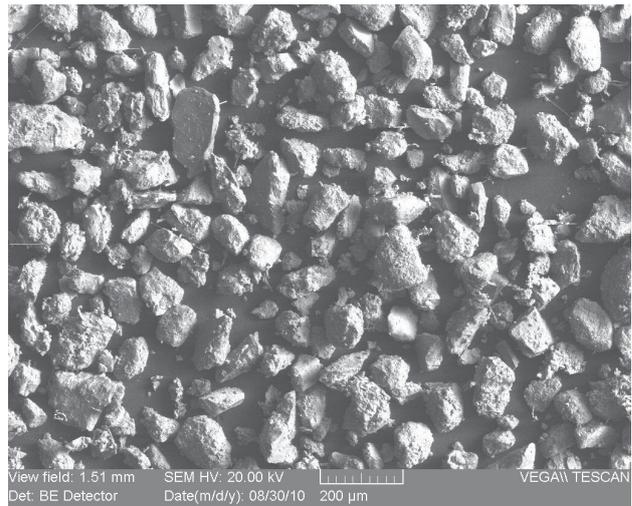


BILD 8. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Flugsand [MTU]

BILD 8 lässt den wesentlich höheren Feinanteil des Flugsandes im Vergleich zum Testsand (BILD 7) erkennen. Des weiteren weisen diese Partikel ein deutlich weniger rundes Aussehen auf, da die Windverfrachtung eher zum Brechen der Partikel führt. Infolge des kristallographischen Aufbaus aus meist Feldspäten brechen die Partikel in Spaltebenen auseinander und zeigen dann ein eher blockiges und kantiges Aussehen.

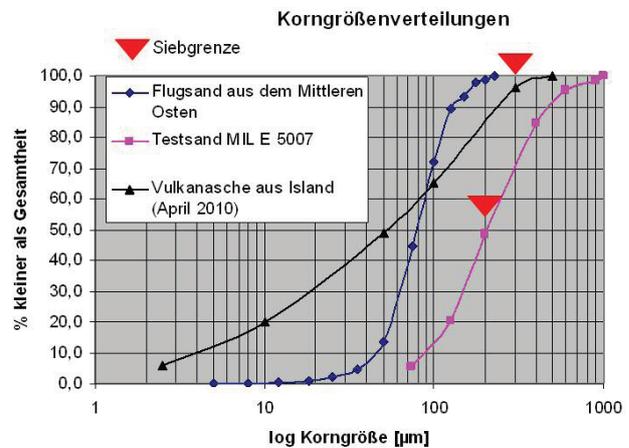


BILD 9. Korngrößenverteilung von Flugsand [MTU] im Vergleich zu Testsand MIL E 5007 und Vulkanasche aus Island (Mittlere Kurve aus BILD 6)

Die Korngröße reicht von ca. 5 bis 225 µm mit einem Mittelwert von ca. 80 µm (BILD 9).

3.2. Werkstoffe und Schutzschicht

Typischerweise werden in Verdichtern entsprechend der thermischen und mechanischen Belastungen Titan-, Stahl- und Nickel-Basislegierungen eingesetzt. Um den Erosionsschutz dieser Metalle zu erhöhen werden teilweise auch Schutzschichten verwendet [7]. Für das Versuchsprogramm wurden TiAl6V4 (3.7164.1) mit einer Oberflächenhärte von ca. 330 HV, A286 (1.4980) mit ca. 170 HV, Inconel 718 (2.4668.1) mit ca. 220 HV und als Schutzschicht ERCoat^{nt} (PVD Multilayer-Schutzschicht) von MTU Aero Engines GmbH mit ca. 2.100 bis 2.300 HV ausgewählt.

3.3. Erosionsprüfstand

Die Erosionsversuche wurden in einem Windkanal durchgeführt, der für diese mit einer Partikelfördereinrichtung und Staubabscheider ausgerüstet war (BILD 10). Für die Versuche mit der Vulkanasche wurde eine spezielle Vorrichtung verwendet, die in der Lage war auch mehrlartige Pulver kontinuierlich zu fördern. Der Prüfstand kann für Geschwindigkeiten bis 480 m/s, Temperaturen bis 600°C, Partikeldichten bis 50 g/h und Auftreffwinkel von 0 bis 90° eingesetzt werden. Die Partikelgeschwindigkeiten wurden mittels Lasermessverfahren kalibriert, da diese sich je nach Strömungsgeschwindigkeit sowie Partikelgröße und -form von der Luftgeschwindigkeit unterscheiden können. Vor jeder neuen Versuchsserie wurde der Prüfstand zusätzlich mit einer Standardprobe kalibriert.

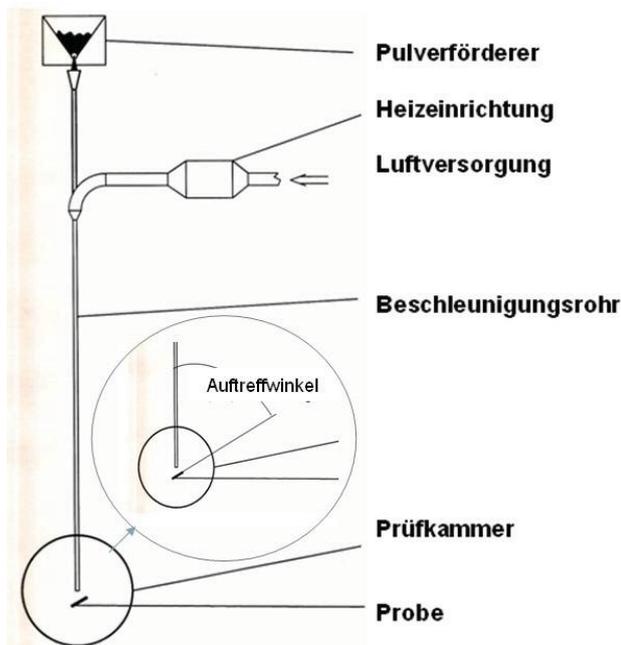


BILD 10. Schematischer Aufbau des MTU Erosions-Prüfstandes

Die Prüfzeiten wurden so gewählt, dass im Falle von Grundwerkstoffen nach einer vom Oberflächenzustand bestimmten Übergangszeit ein eindeutig lineares Abtragsverhalten vorlag, bzw. im Falle von

Beschichtungen der Durchbruchpunkt der Schicht erkennbar war.

3.4. Versuchsbedingungen

Mit den verschiedenen Erosionsmedien wurden als erstes Versuche bei verschiedenen Auftreffwinkeln im Bereich zwischen 20° und 90° durchgeführt, um das Maximum und den Verlauf des Abtrags als Funktion des Winkels zu ermitteln. Die Erosionsbelastung wurde mit 10 g Erosionsmedium / h bei Raumtemperatur (RT) und 250 m/s in allen Versuchen konstant gehalten.

Im zweiten Schritt wurden Versuche bei RT, 320 °C und 450°C durchgeführt, um evtl. thermisch bedingte Veränderungen in den Eigenschaften der Grundwerkstoffe zu erfassen. Eine Eigenschaftsänderung der keramischen bzw. glasartigen Erosionsmedien ist in diesem Temperaturbereich nicht zu erwarten.

Zuletzt wurde der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit bei 150, 250, 370 und 450 m/s gemessen.

4. VERSUCHSERGEBNISSE

Der Erosionsabtrag wird üblicherweise durch Messen des Gewichtsabtrags der Probe nach bestimmten Zeitinkrementen ermittelt und mit der Masse der aufgetroffenen Partikel normiert. Will man stattdessen den Volumenabtrag für unterschiedliche Materialien darstellen ist zusätzlich eine Dichtenormierung vorzunehmen. Um Einflüsse von Oberflächenbearbeitungen der Proben auszuschließen, können die Messwerte erst nach einer gewissen Versuchszeit verwendet werden, ab der ein konstanter gleichmäßiger Abtrag zu beobachten ist.

4.1. Abhängigkeit vom Auftreffwinkel

Der Einfallswinkel charakterisiert unterschiedliche Auftrefforte auf dem Schaufelblatt. Während kleine Winkel vor allem den Abtrag an Druck- und Saugseite durch Erosionspartikel beschreiben, bedeuten große Winkel z.B. das senkrechte Auftreffen auf die Eintrittskante.

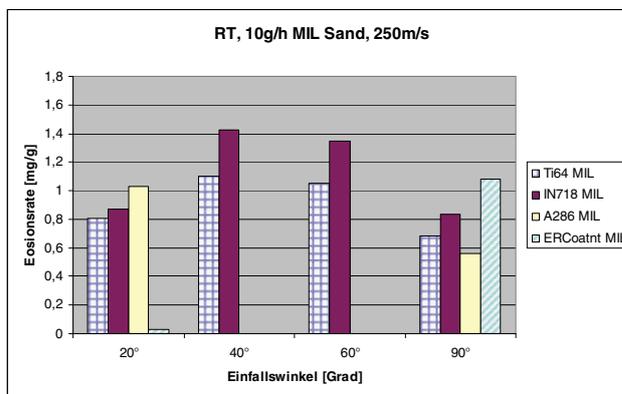


BILD 11. Erosionsraten für unterschiedliche Verdichterswerkstoffe und eine Schutzschicht (dort nur bei 20° und 90° gemessen) in Abhängigkeit des Auftreffwinkels für MIL Sand

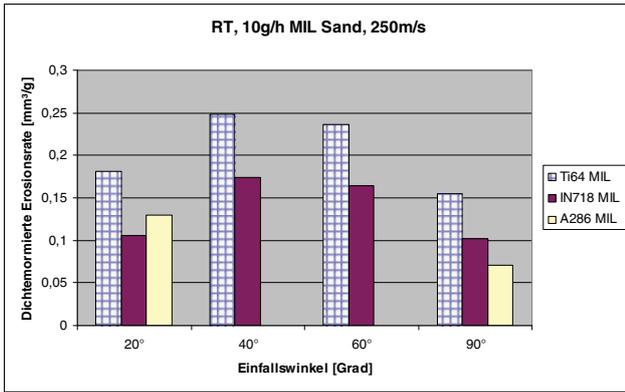


BILD 12. wie BILD 11 aber mit Dichtenormierung

BILD 11 und BILD 12 lassen erkennen, dass bei den ausgewählten Werkstoffen bei ca. 40° Einfallswinkel der höchste Abtrag durch MIL Sand vorliegt. Die PVD-Schutzschicht ERCoat^{nt} zeigt bei 90° den maximalen Abtrag. Dies bedeutet, dass die Schutzschicht unter diesen Randbedingungen im Vergleich zu den Grundwerkstoffen rascher abgetragen wird (Diskussion der Ursachen in Kapitel 5.1). Bei kleinen Winkeln ist der Abtrag der Schutzschicht um mehr als eine Größenordnung verringert im Vergleich zu den Grundwerkstoffen. TiAl6V4 zeigt entsprechend seiner niedrigen Dichte bei allen Auftreffwinkeln einen höheren Volumenabtrag als die Nickelbasis- (Inconel 718) und die Stahlliegierung (A286).

Der Vergleich der MIL Sand Erosionsergebnisse mit denen der Vulkanasche (BILD 13 und BILD 14) zeigt, dass bei letzteren bei Winkeln bis ca. 40° höhere Erosionsraten vorliegen; bei 20° um gut 50% und bei 40° um 16% höher. Bei Winkeln >40° liegen die Erosionswerte mit VA im gleichen Bereich wie die mit MIL Sand.

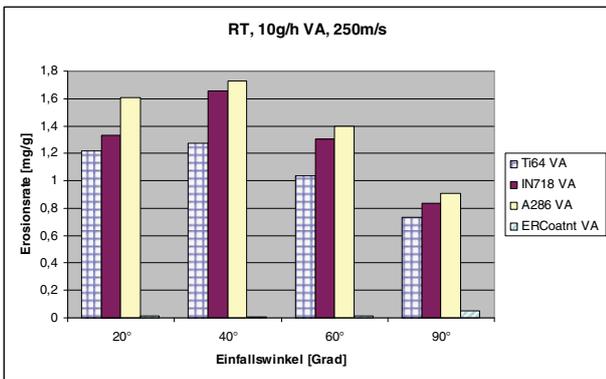


BILD 13. Erosionsraten für unterschiedliche Verdichterwerkstoffe und eine Schutzschicht in Abhängigkeit des Auftreffwinkels für VA

Die Erosionsraten für die Schutzschicht (BILD 13) demonstrieren im Falle der VA insbesondere auch für 90° Auftreffwinkel deutlich niedrigere Werte im Vergleich zu den Werten mit MIL Sand (BILD 11).

BILD 15 zeigt, dass der Wechsel von MIL Sand zu Flugsand im Rahmen der Streuung zu keinen signifikanten Unterschieden in der Erosionsrate führt.

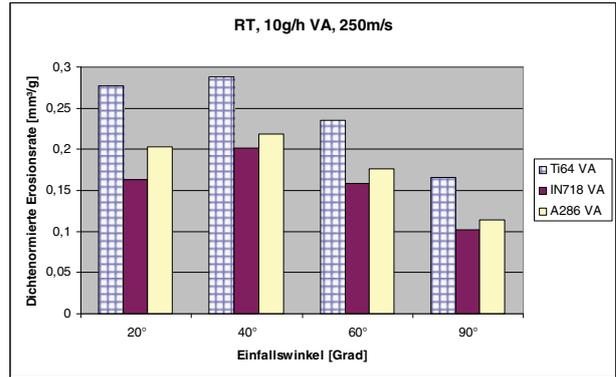


BILD 14. wie BILD 13 aber mit Dichtenormierung

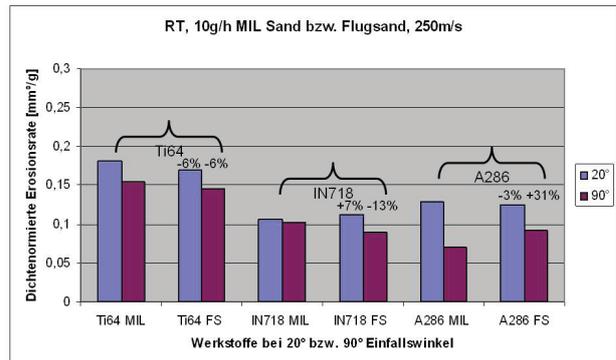


BILD 15. Vergleich der Erosionsraten für MIL Sand und Flugsand bei 20° und 90° Einfallswinkel für Ti64, IN718 und A286. %-Angaben zeigen Unterschied Flugsand zu MIL Sand.

Im Fall der PVD-Schutzschicht zeigten Vergleichsmessungen von MIL Sand gegen Flugsand, dass Flugsand insbesondere bei 90° Auftreffwinkel deutlich weniger abrasiv als MIL Sand wirkt. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen für die Grundwerkstoffe (BILD 15).

4.2. Abhängigkeit von der Betriebstemperatur

Die Versuche wurden mit Ti64 bei RT, 320°C und 450°C bei 250m/s und 10g/h VA gefahren.

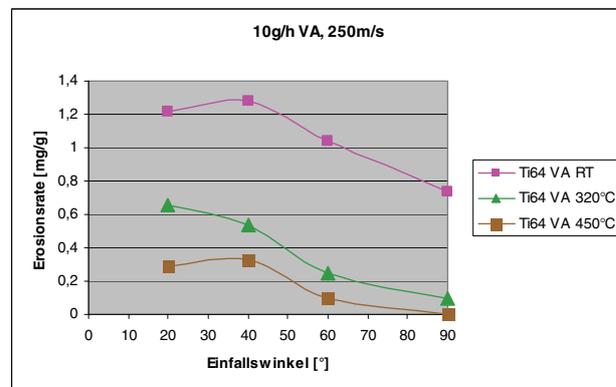


BILD 16. Erosionsraten von Ti64 bei unterschiedlichen Temperaturen mit VA

BILD 16 zeigt, dass die Erosionsrate mit zunehmender Temperatur für alle Einfallswinkel abnimmt. Greift man beispielhaft den Winkel 40° heraus, lauten die auf RT-Erosionsrate (=100%) normierten Werte für 320°C 42% und für 450°C 26%. Die Ursachen dafür werden in Kapitel 5.2 als Funktion des Grundwerkstoffs und des Erosionsmediums diskutiert.

4.3. Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit

Die Versuche wurden an Ti64 mit einer Partikelbeladung von 10g/h VA vorgenommen. Da die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 150 und 450 m/s nicht mit einer einzigen Temperatur erreichbar waren, wurden diese Versuche bei 2 unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt (BILD 17).

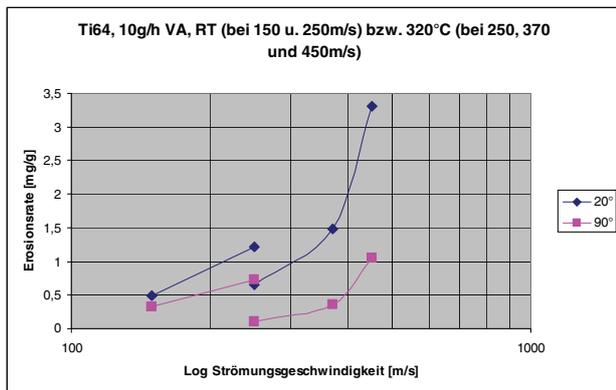


BILD 17. Abhängigkeit der Erosionsrate von Ti64 von der Strömungsgeschwindigkeit

Der Wechsel von RT auf 320°C führt in Bestätigung zu BILD 16 zu einer Abnahme der Erosionsrate. Bei 450m/s und 20° nimmt der Abtrag exponentiell zu. Die Nachuntersuchung der Ti64-Probe zeigte, dass das Material unter diesen Bedingungen förmlich herausgefräst wird und eine sehr raue Oberfläche hinterließ.

4.4. Auswertung Proben und Partikel

Die Auswertung erfolgte beispielhaft an den Ti64 Proben und von ERCoat^{nt}. Alle Proben wurden im Zentrum des maximalen Erosionsgeschehens mittels rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen und energiedispersiver Spektren analysiert.

4.4.1. Auswertung Proben

4.4.1.1. Winkelabhängigkeit der Erosion von Ti64

Die Versuche wurden bei RT und 250m/s mit einer Partikelbeladung von 10g/h VA durchgeführt. Bei 20° Einfallswinkel (BILD 18) ist ein furchender Abtrag durch die VA erkennbar. Dunkle Flächen im Bild (Nur wenige Rückstreuerelektronen von nichtmetallischem Material) stellen bis zu ca. 20 µm große eingebettete VA-Partikel dar (Durch weiße Pfeile gekennzeichnet). Deren Anzahl ist jedoch sehr gering.



BILD 18. Rasterelektronenmikroskopische Oberflächenaufnahme von Ti64 nach Beschuss mit VA unter 20°

Bei 40° wird das Verschleißbild vor allem von Einschlägen und dem Einbau großer VA-Partikel geprägt (BILD 19), die die Furchungsspuren überdecken.

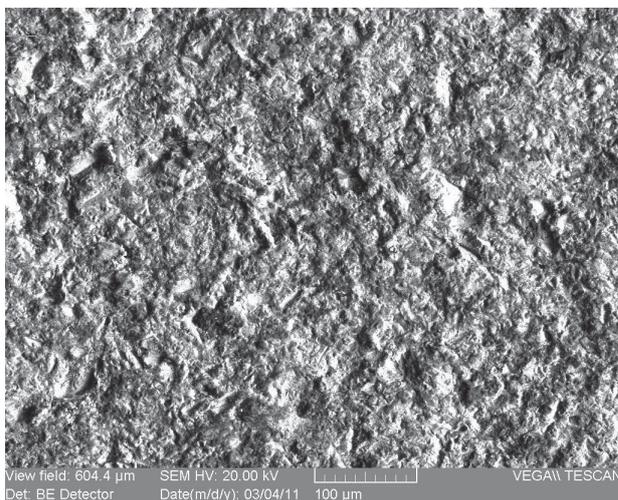


BILD 19. Oberfläche von Ti64 nach Beschuss mit VA unter 40°

Bei 60° sind nur noch einige wenige Furchungsspuren erkennbar. Der Rest besteht aus Eindrücken von VA-Partikeln.

Die 90° Oberfläche ist vorwiegend von Einschlägen und Einlagerungen gekennzeichnet (BILD 20).

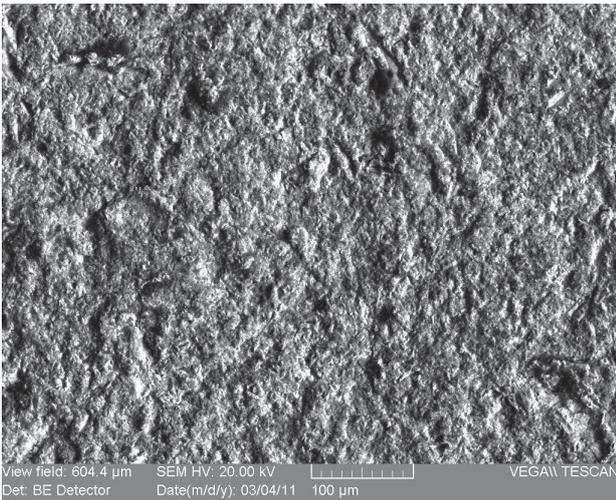


BILD 20. Oberfläche von Ti64 nach Beschuss mit VA unter 90°

4.4.1.2. Winkelabhängigkeit der Erosion von ERCoat^{nt}

Die Versuche wurden bei RT und 250m/s mit einer Partikelbeladung von 10g/h VA durchgeführt. Durch den Erosionsangriff mit VA wird im Vergleich zum Ausgangszustand (BILD 21) die Oberfläche bei 20° Auftreffwinkel (BILD 22) poliert.

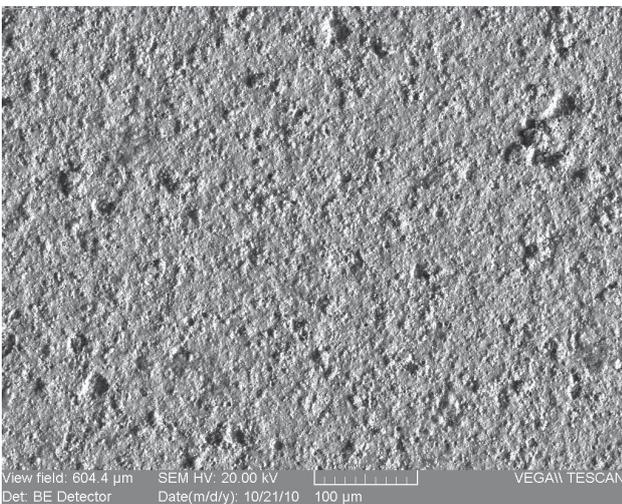


BILD 21. Oberfläche von ERCoat^{nt} im Ausgangszustand

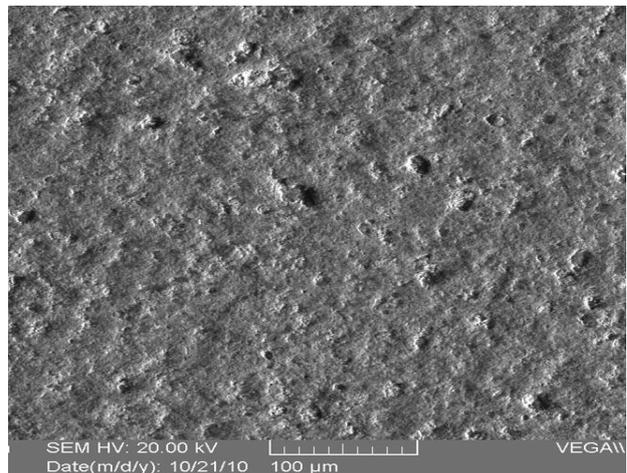


BILD 22. Oberfläche von ERCoat^{nt} nach Beschuss mit VA unter 20°

Bei 40° und 60° setzt sich dieser Trend fort, wobei zusätzlich auch lokal Fehlstellen der Schicht lagenweise entsprechend dem Multilayeraufbau abgetragen werden. Bei 90° vergrößern sich diese Erosionsabträge.

4.4.1.3. Unterschied Erosion durch Flugsand zu MIL Sand für Ti64

Die Versuche wurden bei RT und 250m/s mit einer Partikelbeladung von 10g/h durchgeführt. Flugsand führt bei 20° (BILD 23) zu vor allem furchendem Abtrag der Oberfläche (Eindruck wie „gebürstet“). Aber in geringerem Ausmaß als bei VA aufgrund der weniger kantigen Partikel.

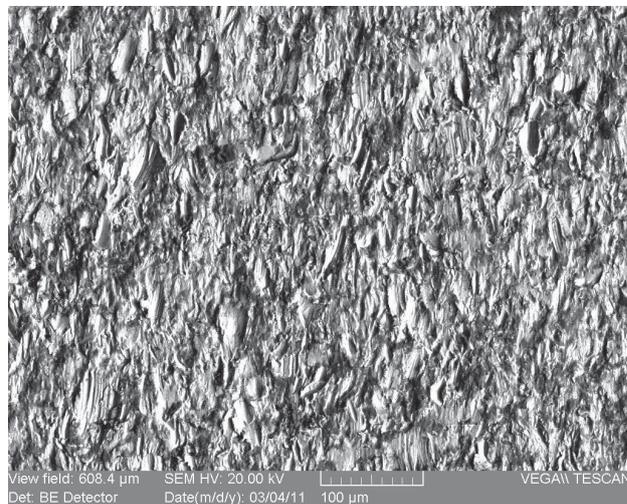


BILD 23. Oberfläche von Ti64 nach Beschuss mit Flugsand unter 20°

Flugsand bei 90° hinterließ fast nur Einschläge (BILD 24).

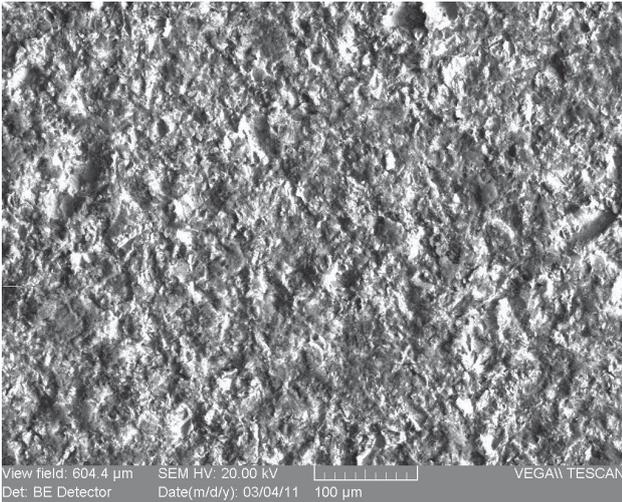


BILD 24. Oberfläche von Ti64 nach Beschuss mit Flugsand unter 90°

MIL Sand weist dagegen bei 90° deutlich größere Eindrücke und sogar furchenden Abtrag auf (BILD 25)

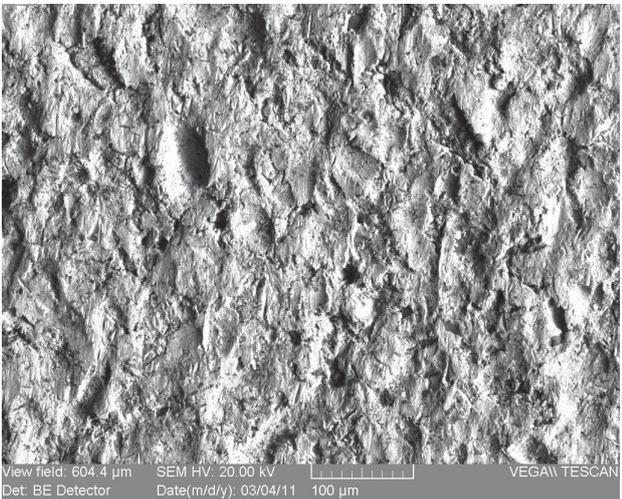


BILD 25. Oberfläche von Ti64 nach Beschuss mit MIL Sand unter 90°

4.4.1.4. Unterschiedliches Verhalten von Flugsand und MIL Sand an Proben mit Schutzschicht

Die Versuche wurden bei RT und 250m/s mit einer Partikelbelastung von 10g/h durchgeführt. Flugsand führt bei 20° an beschichteten Oberflächen zu feinem „Bürsten“ der Oberfläche, sowie Glätten bzw. Verschmieren (BILD 26). Bei 90° werden bevorzugt Fehlstellen in der Schutzschicht herausgearbeitet (BILD 27).

Der monomineralische MIL Sand zeigt bei 20° ebenfalls sehr wenig Abtrag an der Oberfläche (BILD 28) und eine deutlich geringere Rauheit im Vergleich nach Einwirkung von Flugsand (BILD 26). Bei 90° war bereits die Schicht entfernt und der Grundwerkstoff zu erkennen.

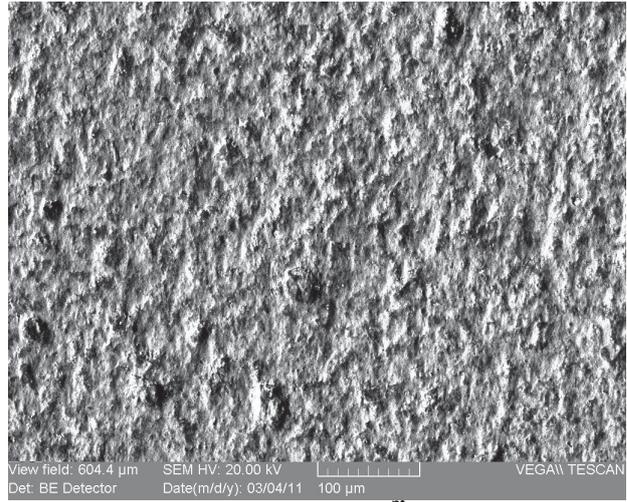


BILD 26. Oberfläche von ERCoat^{nt} nach Beschuss mit Flugsand unter 20°

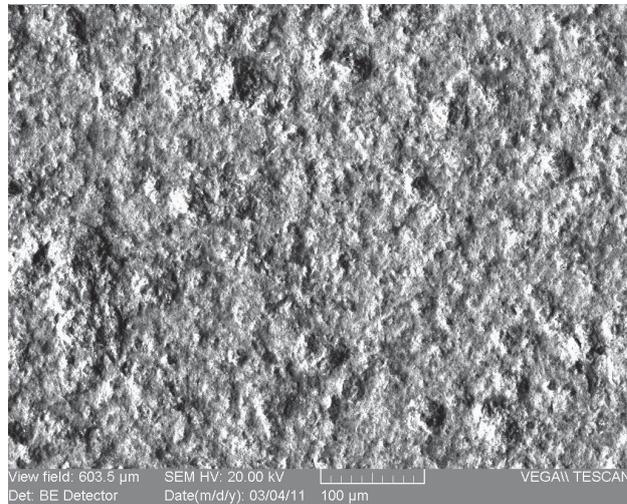


BILD 27. Oberfläche von ERCoat^{nt} nach Beschuss mit Flugsand unter 90°

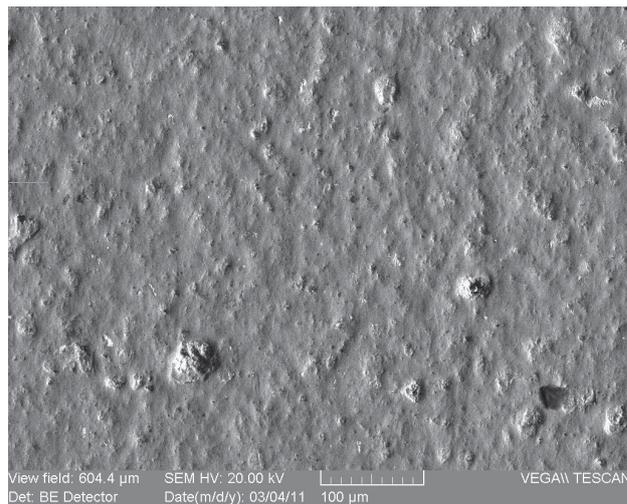


BILD 28. Oberfläche von ERCoat^{nt} nach Beschuss mit MIL Sand unter 20°

4.4.1.5. Einfluss der Temperatur

Stellvertretend wurden Ti64-Proben nach Erosion mit 10g/h VA unter verschiedenen Winkeln bei 450°C und 250m/s nachuntersucht. Die 20°-Probe weist massives Furchen der Oberfläche auf, was ein „gebürstetes“ Aussehen erzeugt (BILD 29). Die tiefen Gräben stellen einen Hinweis auf einen bei diesen Temperaturen relativ weichen Grundwerkstoff dar.

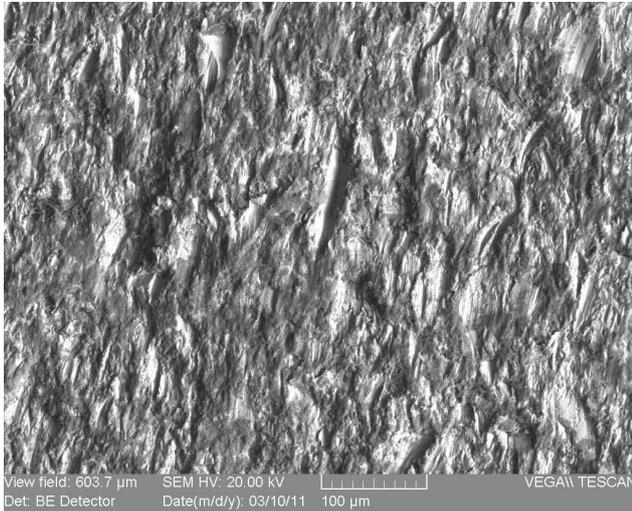


BILD 29. Oberfläche von Ti64 nach Beschuss mit VA unter 20° bei 450°C

Eine detailliertere Untersuchung der einzelnen Furchen zeigte, dass in vereinzelt Fällen auch Anschmelzungen von VA und Übertrag von VA auf das Grundmaterial erkennbar war. Typischerweise lag jedoch rein mechanischer Abtrag vor.

Unter einem Auftreffwinkel von 40° bzw. 60° nehmen die furchenden Anteile deutlich ab und der Einbau von VA-Partikeln zu. Bei 90° sind vor allem Einschläge und Einlagerungen (dunkle Stellen im Bild) von Partikeln zu erkennen (BILD 30). Die Oberflächen machen einen eher verrundeten Eindruck.

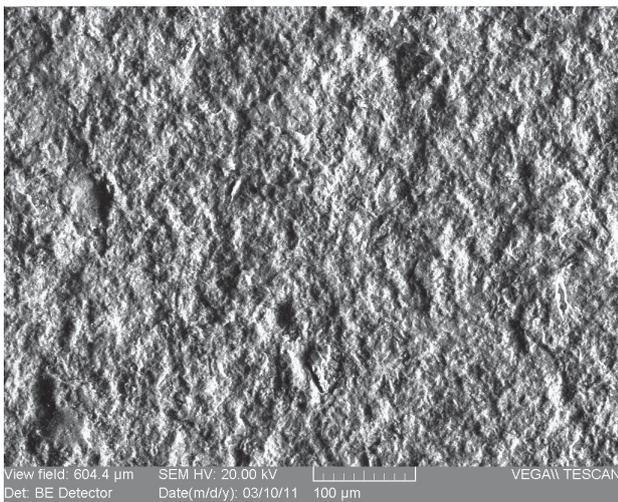


BILD 30. Oberfläche von Ti64 nach Beschuss mit VA unter 90° bei 450°C

4.4.2. Auswertung der Erosionspartikel

Um Rückschlüsse auf die Wechselwirkung der Erosionspartikel mit den Probenoberflächen ziehen zu können, wurde im Bereich nach der Erosionsprobe eine Auffangvorrichtung für die Erosionspartikel installiert.

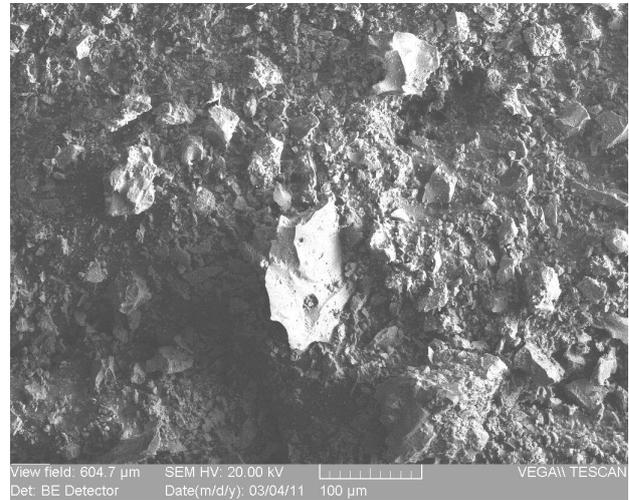


BILD 31. Ausgangszustand VA-Partikel ohne Passieren einer Probe

Im Falle der VA waren bei 20°-Versuchen (RT, 250m/s) scharfkantige Glassplitter aufgefangen worden (BILD 32). Bei den Partikeln, die nach einem 90°-Versuch (BILD 33) aufgefangen wurden scheint die mittlere Kornfraktion der VA im Vergleich zum Ausgangszustand (Nach Durchflug des Prüfstandes ohne Passieren einer Probe (BILD 31)) zu fehlen. Es ist ein höherer Feinanteil vorhanden.

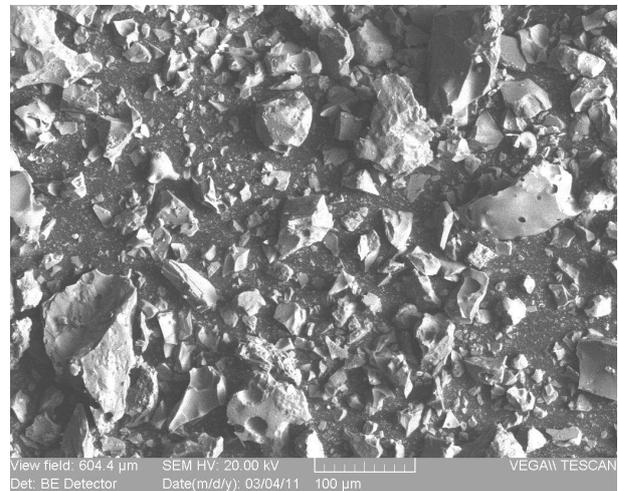


BILD 32. VA-Partikel nach Passieren einer Probe unter 20°

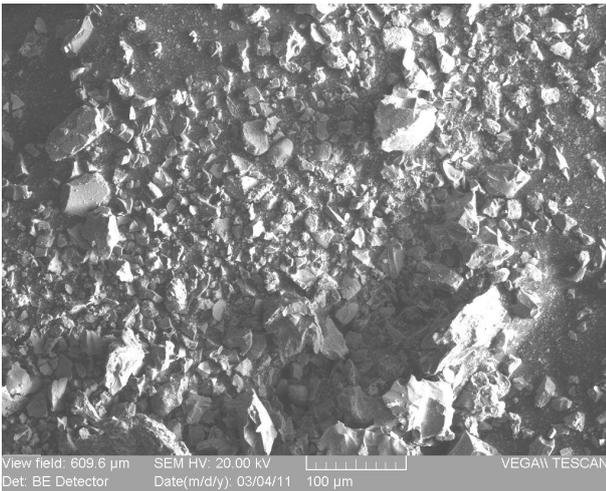


BILD 33. VA-Partikel nach Passieren einer Probe unter 90°

Der Flugsand ließ nach einem Versuch unter 20° Auftreffwinkel im Vergleich zum Ausgangszustand (BILD 8) Zertrümmerung der Partikel und einen daraus resultierenden hohen Feinanteil erkennen (BILD 34).



BILD 34. Flugsand-Partikel nach Passieren einer Probe unter 20°

5. DISKUSSION

5.1. Abhängigkeit vom Auftreffwinkel

Bei metallischen Grundwerkstoffen erfolgt die Erosion durch VA bei kleinen Auftreffwinkeln vor allem durch furchenden Abtrag und erreicht bei ca. 40° die maximale Erosionsrate (BILD 11 und BILD 19). Der zunehmende Abtrag bei 20° von Ti64 über IN718 zu A286 (BILD 11) korreliert gut mit der abnehmenden Härte der Grundwerkstoffe von ca. 330 HV über 220HV zu 170 HV. Dies würde nahe legen, dass Leichtmetalle wie Al-Legierungen durch Erosion mit VA besonders gefährdet sind. Bei Winkeln über 40° (bis 90°) nimmt der furchende Verschleiß wieder ab und es kommt verstärkt zu Kraterbildung und Einbau von Erosionspartikeln (BILD 20). Letzterer bedeutet Gewichtszunahme bei gleichzeitigem Abtrag und damit eine reduzierte

Gewichtszunahme. Auch vorstellbar ist, dass der Einbau von Partikeln u. U. eine Art „Schutzschicht“ für das Auftreffen weiterer Partikel und den dadurch resultierenden Metallabtrag darstellt.

Im Vergleich zu MIL Sand liegt die Erosionsrate für VA bei einem Winkel von 20° um 51 bis 56% höher und bei 40° um 16% höher (BILD 11 und BILD 13). Die Erklärung dafür liefern die Oberflächenaufnahmen (BILD 18 und BILD 19), die im Falle der VA eine deutlich zerfurchtere Oberfläche erkennen lassen; Das Resultat der scharfkantigen VA Partikel (BILD 5). Bei Winkeln von 60° und 90° liegt der Unterschied zwischen -4% und +7% in der Erosionsrate. Ursache dafür ist, dass unter diesen hohen Winkeln die porösen VA Partikel beim Auftreffen auf der Probe zertrümmert werden (BILD 32 bis BILD 34) und damit kinetische Energie verlieren, die nicht mehr zum Abtrag zur Verfügung steht. Aus diesem Rahmen fällt die Stahllegierung A286 (Legierung mit der geringsten Härte), die bei 90° mit VA eine 62% höhere Erosionsrate im Vergleich zu MIL Sand zeigt (BILD 11 und BILD 13).

Der Vergleich MIL Sand mit Flugsand (BILD 15) zeigt für Ti64 eine um 6% geringere Erosionsrate durch Flugsand, für IN718 eine um 7% höhere (bei 20°) bzw. um 13% niedrigere (bei 90°) und für A286 eine um 3% niedrigere (bei 20°) bzw. um 31% höhere Erosionsrate (bei 90°). D.h. sowohl bei Flugsand als auch bei VA fällt das Verschleißverhalten von A286 bei 90° aus dem Trend der anderen Werkstoffe heraus. Die im Durchschnitt geringeren Erosionsraten bei Flugsand im Vergleich zu MIL Sand können durch die leichtere Spaltbarkeit und geringere Korngröße der Flugsand Partikel (BILD 8 und BILD 9) erklärt werden.

Offenbar führen höhere Anteile von kleineren Partikeln bei VA bzw. FS im Vergleich zu MIL Sand bei einem Winkel von 90° zu höheren Abtragsraten, da diese Partikel nicht mehr gespalten werden können und damit keine kinetische Energie verlieren.

Die PVD Schutzschicht zeigt im Falle von VA bei Winkeln von 20° und 40° nur ca. 1% des Verschleißes im Vergleich zum unbeschichteten Werkstoff Ti64. Bei einem Winkel von 60° sind es 2% und bei 90° 7% (BILD 13). Bei Kontakt mit MIL Sand (BILD 11) unter 20° steigt die Erosionsrate der Schutzschicht auf 4% von der des unbeschichteten Grundwerkstoffs und bei 90° sogar auf über 100%, da die Schutzschicht unter diesen Bedingungen verbraucht ist. Ursache dafür sind die keramischen Lagen, die unter 90° Aufprall rascher als Metalle zerrüttet werden. Bei Kontakt mit Flugsand lauten die Werte unter ansonsten gleichen Randbedingungen jeweils 2% im Vergleich zum unbeschichteten Werkstoff mit Flugsand. D.h. die Reihenfolge mit abnehmender Abrasivität des Erosionsmediums lautet für die Schutzschicht: MIL Sand, VA und Flugsand.

Die Oberflächenaufnahmen (BILD 22) zeigen, dass die Schutzschicht durch die Partikel poliert wird und damit die Ausgangsrauigkeit (BILD 21) weiter sinkt. Mit zunehmendem Angriff kommt es auch zu lokalem Abtrag einzelner Lagen der Schutzschicht.

Das unterschiedliche Verhalten der Schutzschicht im Vergleich zu den Grundwerkstoffen (Härte 170 bis 330 HV) ist vor allem durch die hohe Härte der Schicht von

2.100 bis 2.300 HV zu erklären. Bei kleinen Einfallswinkeln bewirkt diese einen Faktor 10 bis 100 geringere Erosionsraten. Bei großen Winkeln werden die harten keramischen Lagen relativ schnell durch Mikrorissbildung und Ablösung kleiner Volumenbereiche zerstört und führen zu höheren Erosionsraten. Dies hängt vor allem auch von der kinetischen Energie der auftreffenden Partikel ab. Während MIL Sand aus großen einzelnen homogenen Körnern besteht, die ihre gesamte Energie zu einem großen Teil an die Schichtoberfläche abgeben, werden Flugsand und VA bei Auftreffen deutlich mehr zerstört. Dadurch wird der Materialabtrag unter 90° bei letzteren Erosionsmedien reduziert.

5.2. Abhängigkeit von der Betriebstemperatur

Die Abnahme der Erosionsrate (BILD 16) für Ti64 mit zunehmender Testtemperatur bei Beaufschlagung mit VA geht einher mit einer ca. 20% Abnahme des E-Moduls in diesem Temperaturbereich. D.h. der Werkstoff wird duktiler.

Die VA Partikel selbst sollten sich in diesem Temperaturbereich nicht verändern. In der Literatur [8,9] werden Schmelzpunkte T_s für die isländische VA von 1.050 bis 1.110°C berichtet. Da VA aufgrund ihrer Entstehungsbedingungen mit extrem rascher Abkühlung der Lavaschmelze glasartig gebildet wird, gibt es einen weiteren charakteristischen Temperaturwert, die sog. Transformationstemperatur oder Glastemperatur T_g , ab deren Überschreiten eine rasche Erweichung der unterkühlten Glasschmelze eintritt. Von [9] wurde ein Erweichungspunkt bei 700°C gemessen. Gemäß einer Regel von Tamman [10] verhalten sich die Temperaturen T_g/T_s [in K] wie 2/3 für Gläser. Mit Annahme obiger T_s -Werte erhält man 609 bzw. 642°C für T_g . Berücksichtigt man noch, dass die VA auch mineralische Bestandteile enthält, die T_g zu höheren Werten verschieben werden, stimmen Messung und Berechnung gut überein. Da die höchste Testtemperatur von 450°C deutlich niedriger als T_g liegt, sollten die Partikel im Messbereich ihre physikalischen Eigenschaften nicht verändern. Auch die Oberflächenaufnahmen von Partikeln nach Passieren der Probe ließen keine Erweichungen erkennen (BILD 32 und BILD 33). D.h. Eigenschaftsänderungen ergeben sich nur durch den Grundwerkstoff.

Die Oberflächenaufnahmen der bei 450°C erodierten Ti64-Proben (BILD 29) lassen im Vergleich zu denen bei RT (BILD 18) ein tieferes Eindringen der VA Partikel oder tieferes Verformen/Furchen durch diese erkennen. Dies bestätigt die Annahme eines duktileren Ti64 bei höheren Temperaturen. D.h. durch das weicher werdende Material wird mehr Energie in plastische Verformung umgewandelt, so dass weniger Energie übrig bleibt, um Material aus der Oberfläche zu schlagen/schneiden.

Der Abgleich mit der Literatur für Ti64 zeigt zum Vergleich für MIL Sand mit zunehmender Temperatur in widersprüchlicher Weise sowohl zunehmende [11] als auch abnehmende [12] Erosionsraten. Ein Erklärungsversuch könnte sein, dass VA bei Auftreffen auf die Oberfläche deutlich mehr als MIL Sand zertrümmert wird und damit weniger Energie zur Verfügung steht, um mit zunehmender Temperatur des

Grundwerkstoffs und dessen gleichzeitig abnehmendem E-Modul mehr vom duktiler werdenden Material abzutragen. D.h. im Fall von VA überwiegt Energievernichtung durch plastisches Erweichen des Grundwerkstoffs während im Fall von MIL Sand je nach Temperatur offenbar entweder Energievernichtung oder erleichtertes Abtragen überwiegt (BILD 35).

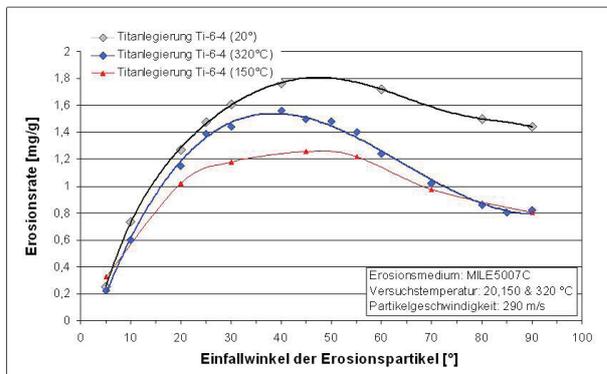


BILD 35. Abhängigkeit der Erosionsrate von Ti64 von der Temperatur und vom Auftreffwinkel der MIL Sand Partikel [MTU]

Die in einer Furche beobachteten Anschmelzspuren zeigen, dass bei entsprechenden Randbedingungen so viel Reibungswärme erzeugt werden kann, dass das VA-Partikel an der Oberfläche aufschmilzt. Auch dadurch kann Energie vernichtet werden, die für den eigentlichen Furchungs- und Abtragsvorgang fehlt. Da die Zahl dieser Beobachtungen jedoch sehr gering war, ist Schluss zu folgern, dass der Hauptmechanismus für den abnehmenden Verschleiß mit zunehmender Temperatur das oben beschriebene duktiler Werden des Grundwerkstoffs darstellt.

5.3. Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit

Die Messungen der Erosionsrate in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit zeigen, dass ab ca. 350 bis 375 m/s eine starke Beschleunigung des Materialabtrags von Ti64 auftritt (BILD 17).

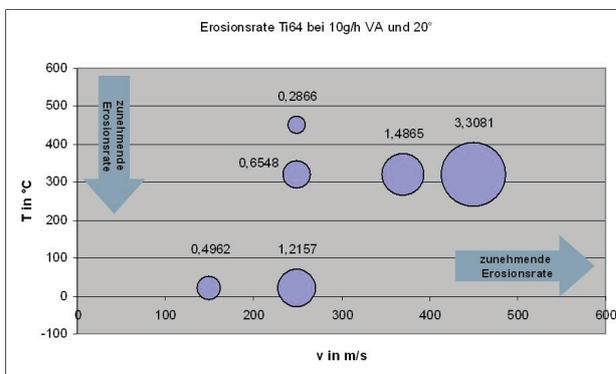


BILD 36. Erosionsraten für Ti64 bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen und 20° Auftreffwinkel der VA. Die Fläche der Blasen charakterisiert die Größe der Erosionsgeschwindigkeit.

BILD 36 zeigt am Beispiel für einen Auftreffwinkel von 20° den überlagerten Einfluss von Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur. Zunehmende Temperaturen führen zu abnehmender Erosionsrate während zunehmende Strömungsgeschwindigkeiten zu zunehmender Erosionsrate führen. Diese Trends treffen im Rahmen der vorhandenen Messwerte auch für 40° und 90° Auftreffwinkel zu.

5.4. Zusammenfassung und Bedeutung für das Triebwerk

Die in den vorherigen Kapiteln diskutierten Erosionsraten werden von den Grundwerkstoffen, den Betriebsbedingungen und der Morphologie der Erosionspartikel selbst bestimmt. VA wirkt vor allem bei Auftreffwinkeln von 0° bis 40° um einen Faktor 1,5 abrasiver als Quarzsand. Der von Tabakoff berichtete Faktor 4 [13] konnte nicht gefunden werden. Evtl. hängt dies mit anderen Eigenschaften der VA aus Island oder anderen Prüfbedingungen oder Werkstoffen zusammen. Dies ist leider nicht überprüfbar, da die Originalliteratur nicht beschaffbar ist. Standardisierte synthetische VA könnte hier wie MIL Sand zu vergleichbareren Testbedingungen führen.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten Erosionsraten um einen Faktor X zu kleineren Werten korrigiert werden müssen, um der geringeren kinetischen Energie der tatsächlich in der Luft vorhandenen kleineren Partikelgrößen (DLR-Messung) im Vergleich zu den im Prüfstand verwendeten Partikelgrößen Rechnung zu tragen. Bei Quarzsand existieren Messungen von Goodwin [14] an einem Stahl mit 11% Chrom zur Abhängigkeit der Erosionsrate von der Partikelgröße (BILD 37). Greift man dort die Messung für 305 m/s heraus und reduziert die Partikelgröße von 50 µm (mittlere Partikelgröße der getesteten VA) auf 10 µm (DLR-Messung) verringert sich die Erosionsrate um ca. einen Faktor 10; Bei Verringerung von 50 µm auf 5 µm um einen Faktor 20. Diese Skalierung wird jedoch nicht 1:1 auf die VA zu übertragen sein, da sich die chemische und auch strukturelle Zusammensetzung der VA mit der Partikelgröße ändert und sich damit durch verändertes Bruchverhalten beim Auftreffen auf die Oberfläche auch die für die Erosion verantwortliche kinetische Energie verändern wird.

Von Cranfield University durchgeführte Messungen mit 3 verschiedenen Fraktionen von VA ließen eine nur geringe und nicht unbedingt systematische Abhängigkeit von der Korngröße erkennen [8]. D.h. es ist, solange keine umfangreicheren Messungen zur Abhängigkeit von der Partikelgröße der VA vorliegen, nur die generelle Aussage möglich, dass unter Bedingungen mit sehr kleinen Partikelgrößen die Erosionsraten evtl. zu kleineren Werten korrigiert werden müssen.

Dieses Phänomen des unterschiedlichen Bruchverhaltens der verwendeten Erosionspartikel zeigt sich insbesondere auch bei Kontakt mit von sehr harten Erosionsschutzschichten geschützten Oberflächen, wo VA und Flugsand deutlich weniger Schäden als MIL Sand anrichten. Durch die Beschichtung mit PVD-

Schutzschichten wie ERCoat^{nt} kann die Lebensdauer des Verdichters bei Auftreten von VA auf Werte angehoben werden, die in etwa denen eines Triebwerks unter normalen Umgebungsbedingungen entspricht.

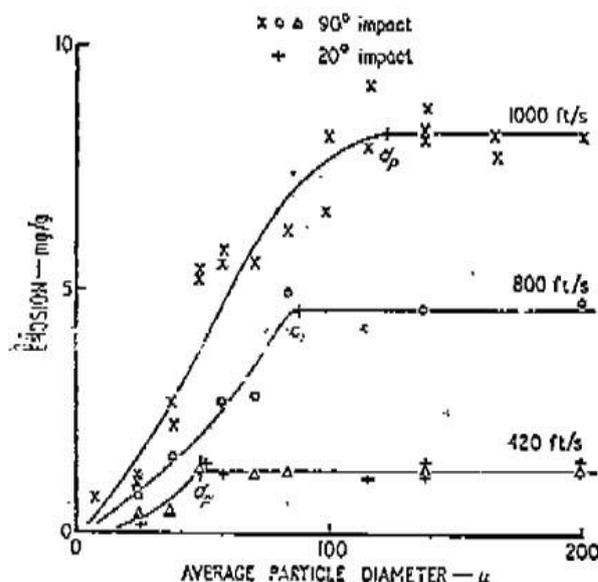


BILD 37. Messungen von Goodwin [14] zur Abhängigkeit der Erosionsrate vom Sand-Partikeldurchmesser.

VA führt jedoch nicht nur im Verdichter sondern auch z.B. in der Brennkammer oder in der Turbine zu Veränderungen des Betriebsverhaltens. D.h. erst in dieser Gesamtsicht können die Auswirkungen von VA auf das gesamte Triebwerk beurteilt werden.

6. DANKSAGUNG

Unser besonderer Dank gilt Lars-Dean Hutt von der Flugesellschaft Air Atlanta Icelandic in Island und Gudrun Larsen von der University of Iceland, Institute of Earth Sciences, Nordic Volcanological Center für die Sammlung und Bereitstellung der Vulkanasche. Für die Bereitstellung des Flugsandes gilt unser Dank den Mitarbeitern der MTU Maintenance in Hannover. Die Untersuchungen mit Vulkanasche wurden teilweise mit Forschungsmitteln aus dem Sechsten Rahmenprogramm der EU im Rahmen des Vorhabens NEWAC (AIP5-CT-2006-030876) durchgeführt. Das den MIL Sand Vergleichsmessungen zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 20T0601A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

- [1] IAVWOPSG website (Prata), Doc 9691, 2007
- [2] A. Hamed et al., Erosion and Deposition in Turbomachinery, J. of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 2, March-April 2006
- [3] Institute of Earth Sciences Nordic Volcanological

- Center, <http://www.evropusamvinna.is/page/>, 2010
- [4] J. Kim et al., Deposition of volcanic materials in the Hot Sections of Two Gas Turbine Engines, The American Society of Mechanical Engineers, 92-GT-219, 1992
 - [5] Ulrich Schumann, Volcanic ash cloud observations during air space closure in Europe April/May 2010, ICAS-2010-5.8.1, 2010
 - [6] AGARD, Erosion, corrosion and foreign object damage effects in gas turbines, AGARD-CP-558, November 1994
 - [7] T. Uihlein, T. Brendel, W. Eichmann, F. Heutling, Erosionsschutz in Triebwerksverdichtern – Ein Beitrag zur CO₂-Reduktion, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010, S. 617 - 622, DocumentID 161155, 2010
 - [8] P. Sellers, J. Nicholls, S. Colantuoni, Aero-Engine Volcanic Ash Related Research: An Overview of Work Carried Out In The NEWAC Work Package 1.4, ISABE-2011-1418
 - [9] U. Küppers et al., Thermal Stability of Volcanic Ash versus Turbine Ingestion Test Sands: an Experimental Investigation, „Atlantic Conference on Eyjafjallajökull and Aviation “ Island, September 2010
 - [10] G. Tammann: Der Glaszustand. Leipzig: L. Voß 1933
 - [11] T. Wakeman, W. Tabakoff, "Turbomachinery Affected by Environmental Solid Particles", 17th Aerospace Sciences Meeting, New Orleans, LA./January 15-16, 1979
 - [12] G.P. Tilly, "Erosion Caused by Airborne Particles", Wear, 14 (1969) 63-79
 - [13] W. Tabakoff, „Review of Material Erosion Exposed to Aerodynamic Conditions“, U.S. Dept. of Engineering, Rept. on Program Review, Oak Ridge, TN, April 1986
 - [14] J.E. Goodwin, W. Sage, G.P. Tilly, "Study of Erosion by Solid Particles", Proc. Inst. of Mech. Engrs., 1969