Inhalt

1 Tropfenschlagerosion 2
1.1 Entstehung 2
1.2 Lage der Schadenbereiche 3
1.3 Schadenstufen E 4
1.4 Erosionsbereich Eintrittseite 5
1.5 Verlauf der Erosion über der Schaufellänge 6
1.6 Erosionsbereich Austrittsseite 7
2 Darstellung der Schadenstufen 8
2.1 Ungenügender Bereich des Erosionsschutzes 11
2.2 Überlagerung Tropfenschlagerosion mit Erosionskorrosion 14
3 Primäre Tropfenschlagerosion 15
3.1 Stadien der Schadenentwicklung: 15
3.2 Berechnung 16
3.3 Soll man die beschädigten Oberflächen glätten? 17
3.4 Soll man einzelne Schaufeln tauschen 18
4 Sekundäre Tropfenschlagerosion 19
5 Beurteilungskriterien – Erosion der Eintrittskante 22
5.1 Wirkungsgrad 22
5.2 Schaufelschwingung 22
5.3 Festigkeit 23
5.4 Abfliegende Teile 23
6 Beurteilungskriterien – Erosion der Austrittskante 24
7 Reparaturmöglichkeiten 25

1 Tropfenschlagerosion

1.1 Entstehung

1.2 Lage der Schadenbereiche

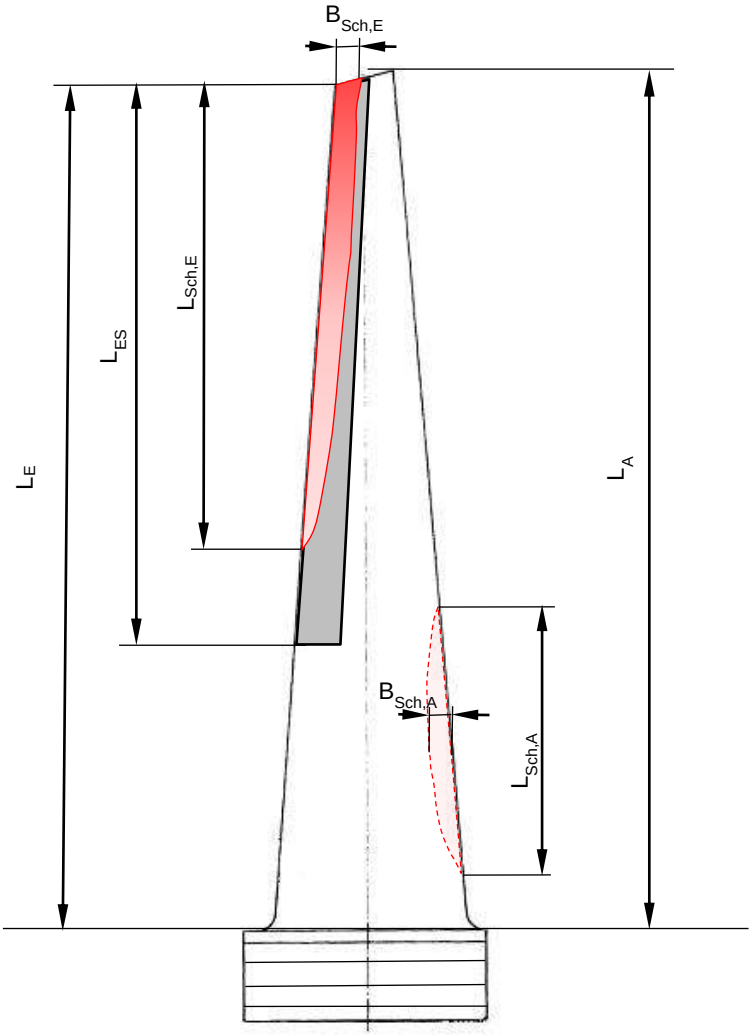
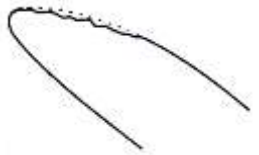
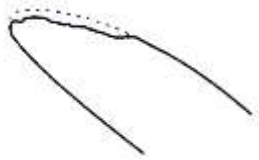
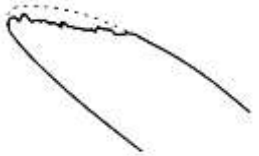
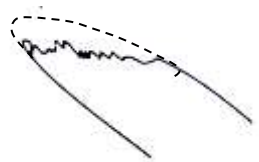


Abb. 1 Skizze freistehende Endstufenschaufel mit axialem Tannenbaumfuß

L_E	Schaufellänge Eintritt
L_A	Schaufellänge Austritt
L_{ES}	Länge der Eintrittskante mit Erosionsschutz
$L_{Sch,E}$	Länge des Schadenbereiches, Eintritt
$L_{Sch,A}$	Länge des Schadenbereiches, Austritt
$B_{Sch,E}$	Breite des Schadenbereiches, Eintritt
$B_{Sch,A}$	Breite des Schadenbereiches, Austritt

1.3 Schadenstufen E

E	Beschädi-gung	Abtragung [µm]	Skizze	Beschreibung
0	neu new	0		neue Oberfläche, gefräst, geschliffen, poliert strahlgeläppt oder gescheuert, 75% der Originaloberfläche erhalten
1	mattiert frosting	0 – 130		Minimale Aufrauhungen, kein merklicher Materialverlust
2	leicht light	130 – 400		Geringer Grad der Einwirkung, Originaloberfläche noch vorhanden, Krater nicht größer als 400 µm.Schadenbereich reicht nicht auf die Druckseite des Profiles und ist von dort nicht zu sehen
3	mittelleicht medium-Light	400 – 650		Originaloberfläche noch vorhanden aber zum Großteil abgetragen. Krater sind größer, kleine Partikel des Schaufelmateriales sind wegerodiert, Schadenbereich eventuell bereits von der Druckseite sichtbar.
4	mittel medium	650 -1000		Größere Krater von 650 – 1000 µm Größe, Schadenbereich reicht gering in die Druckseite des Profils. Teilchen von 650 µm fehlen
5	mittelschwer medium-Heavy	1000 - 2000		Größere Oberflächenverluste, Druckseite des Profils stärker angegriffen. Teilchen von 1000 µm fehlen. Profilform auf der Saugseite komplett verloren.
6	schwer heavy	2000 – 3000		Sehr starker Materialverlust auf der Saugseite. 2000 µm Teilchen fehlen. Keine Reste der Profilform an der Eintrittskante oder an der Saugseite erhalten. Krater durchdringen Schutzschichten, Gehärtete Schichten und Schutzschilde bis in das Grundmaterial
7	sehr schwer severe	> 3000		Massiver Materialverlust; keine Anzeichen des Profiles auf der Eintrittskante oder der Saugseite. Materialverlust auch auf der Druckseite. Bei Schutzschichten ist der Grundwerkstoff großflächig freigelegt. Teilchen größer als 3500 µm fehlen.

1.4 Erosionsbereich Eintrittseite

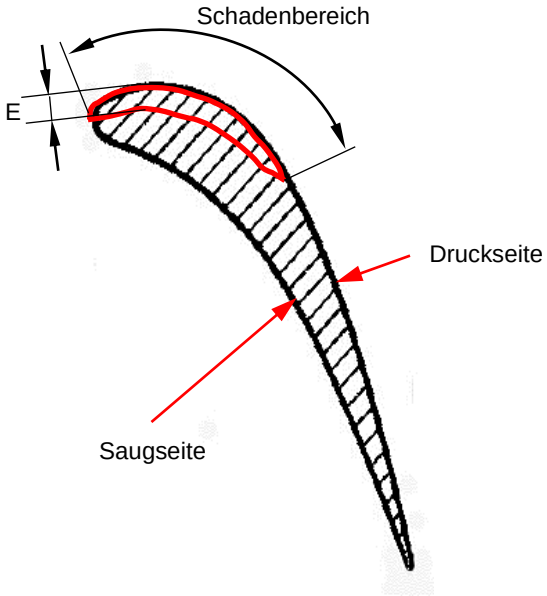


Abb. 2 Erosionsbereich Eintrittsseite

1.5 Verlauf der Erosion über der Schaufellänge

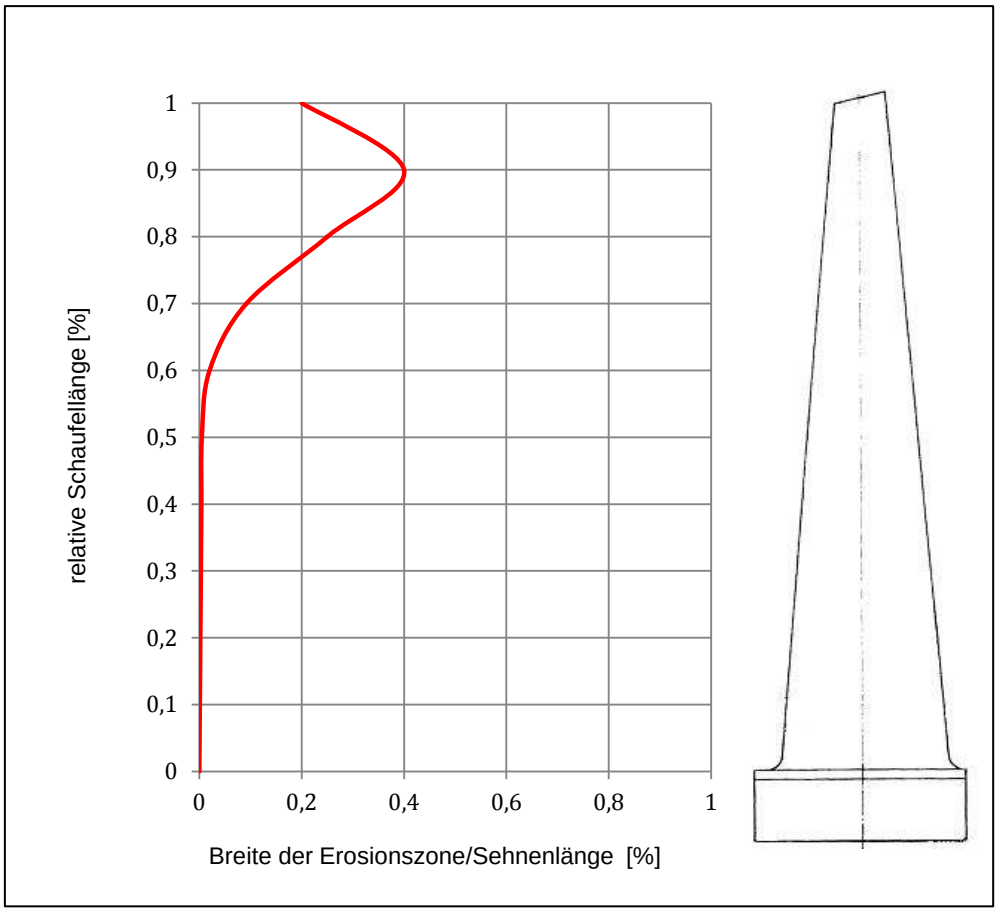


Abb. 3 Verlauf der Erosion über der Schaufellänge

1.6 Erosionsbereich Austrittsseite

Bei extremer Teillast bildet sich am Schaufelaustritt ein Wirbel wie in Abb. **4** Stromlinienverlauf bei extremer Teilllast dargestellt der zu einem Rückströmen von Dampf im Nabenbereich führt. Wird dieser Betrieb über längere Zeit gefahren (Heizdampfturbinen) kann es zu Erosionen an der Austrittskante der Endstufe im Fußbereich kommen.

Drastisch verstärkt wird dies wenn eine Abdampfstutzen Einspritzkühlung (Haubeneinspritzung) die nur für den Anfahrbetrieb (Leerlauf) geplant ist weiter in Betrieb bleibt.

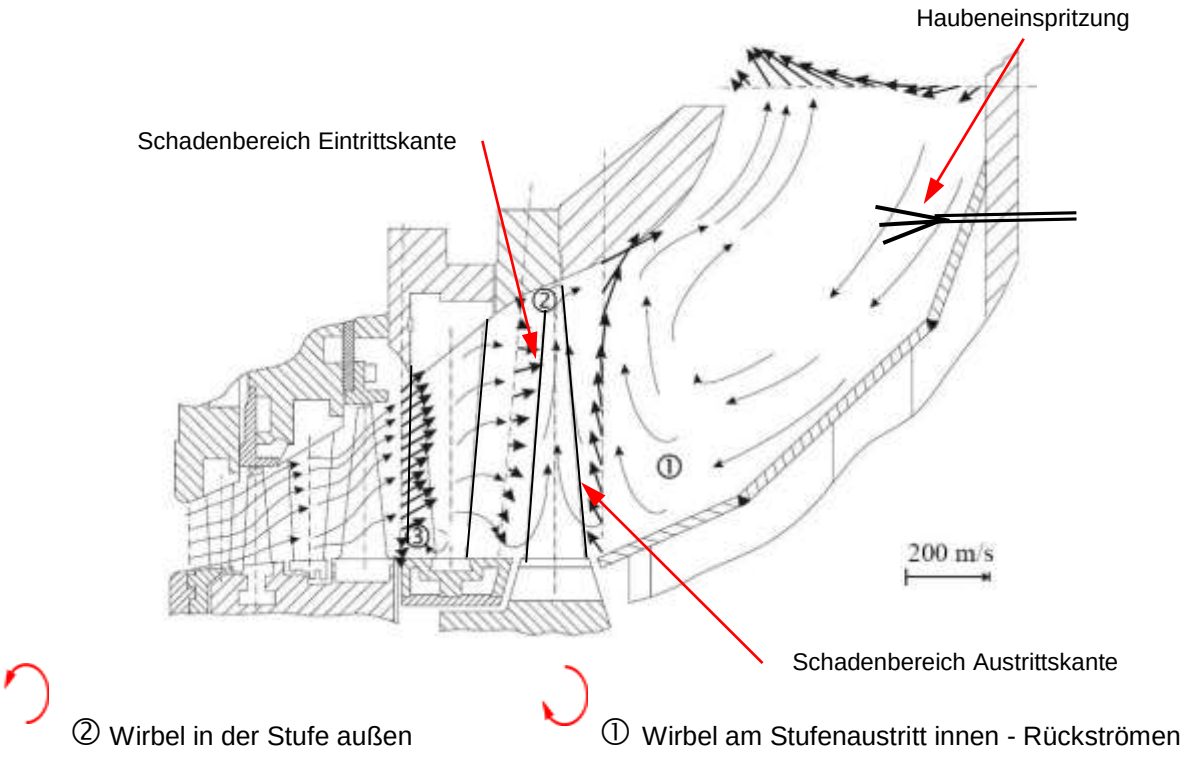


Abb. 4 Stromlinienverlauf bei extremer Teilllast

2 Darstellung der Schadenstufen

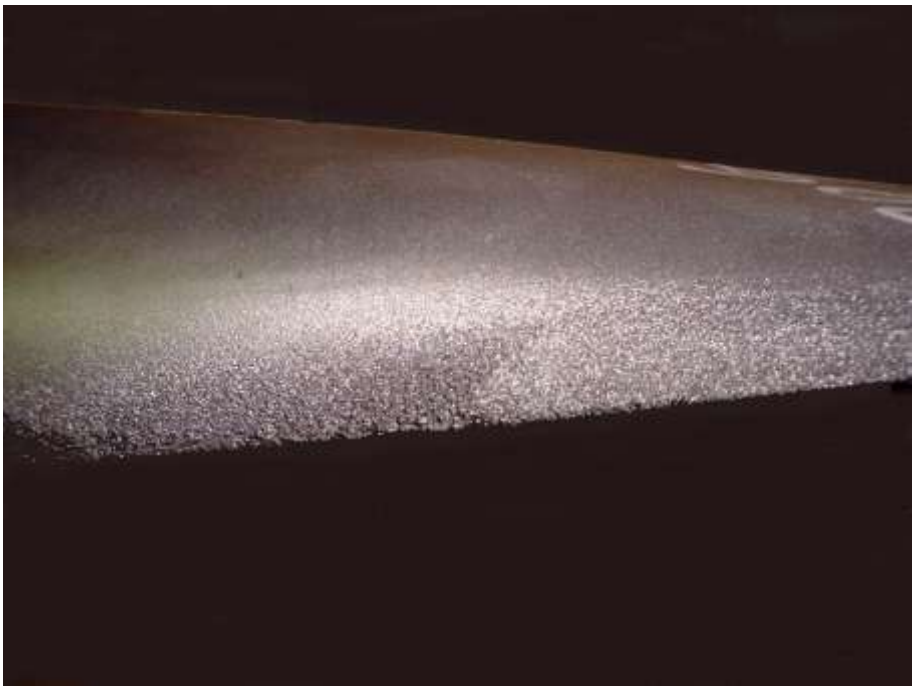


Abb. 5 Schadenstufe 2 über weite Teile der Schaufellänge (Voest DT3, DSC03661)

Abb. 6 Schadenstufe 2 (Voest DT3, DSC02991)

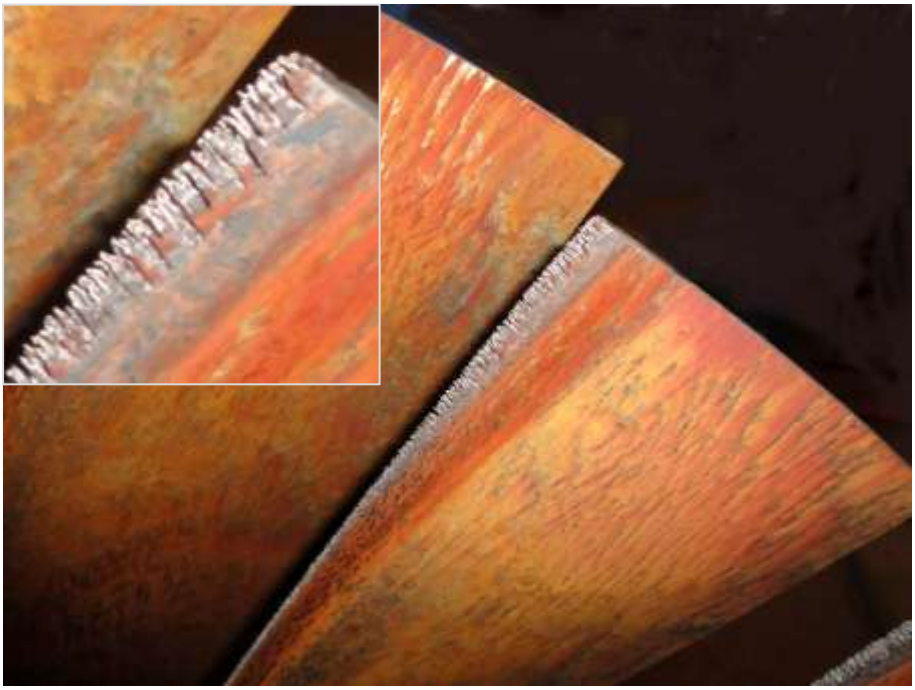


Abb. 7 Schadenstufe 3 (Voest DT3, DSC02994)

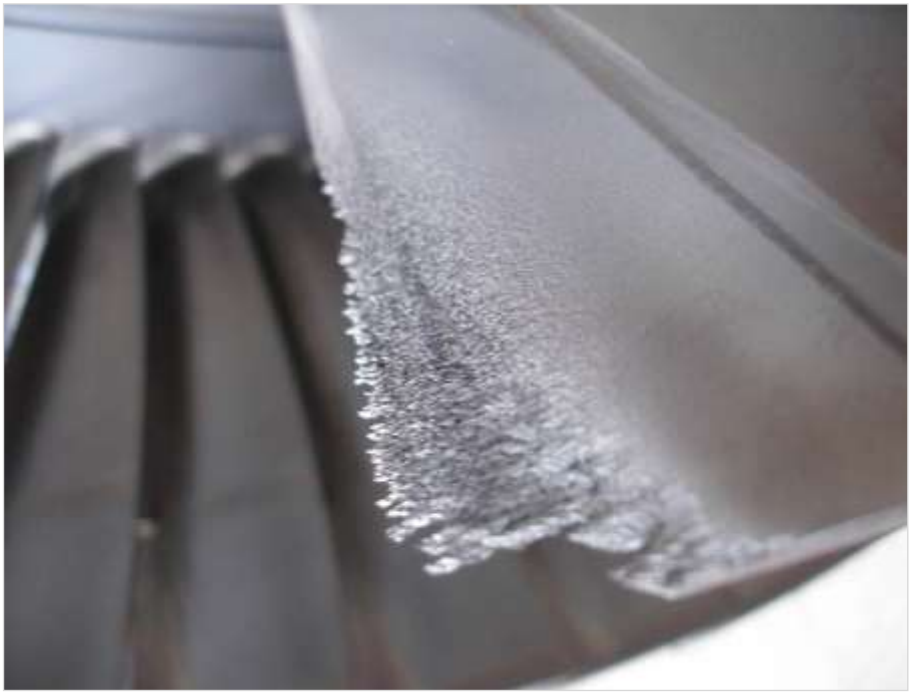


Abb. 8 Schadenstufe 7 an der Schaufelspitze (Timelkam DT4, DSC00021)

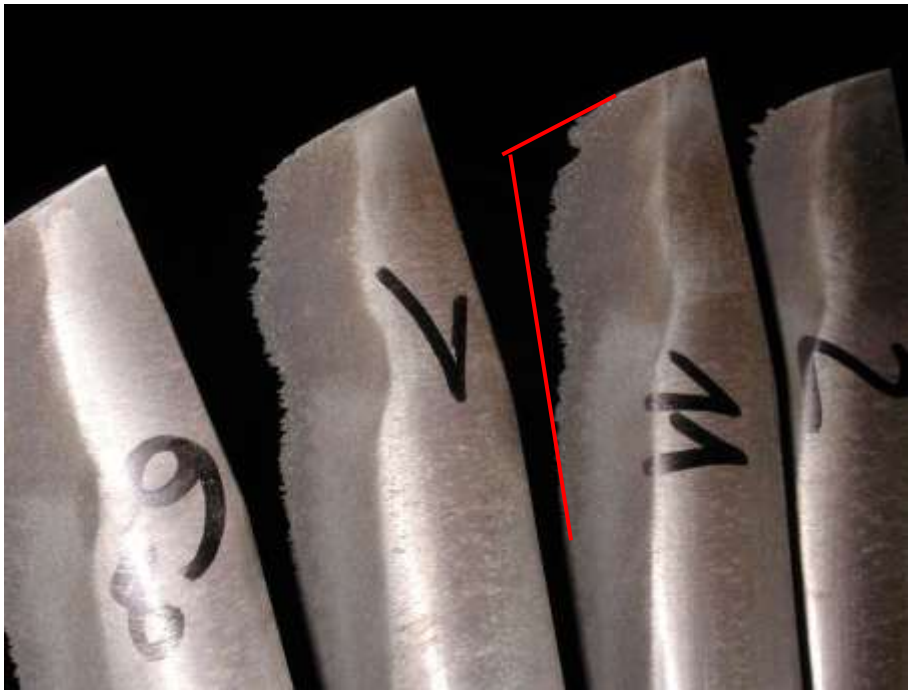


Abb. 9 Schadenstufe 7 - Eintrittskante weit zurückversetzt (Avira)

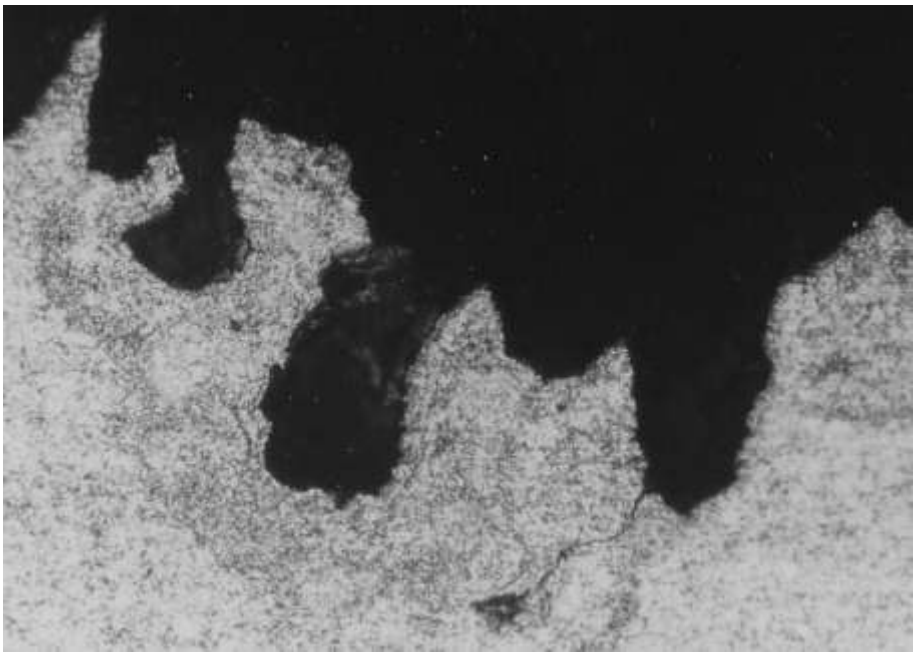


Abb. 10 Tropfenschlagerosion - Zerrüttetes Gefüge

Anmerkung: die Austrittskante ist bei der Schaufel in Abb. 6 im Spitzenbereich gekürzt

2.1 Ungenügender Bereich des Erosionsschutzes

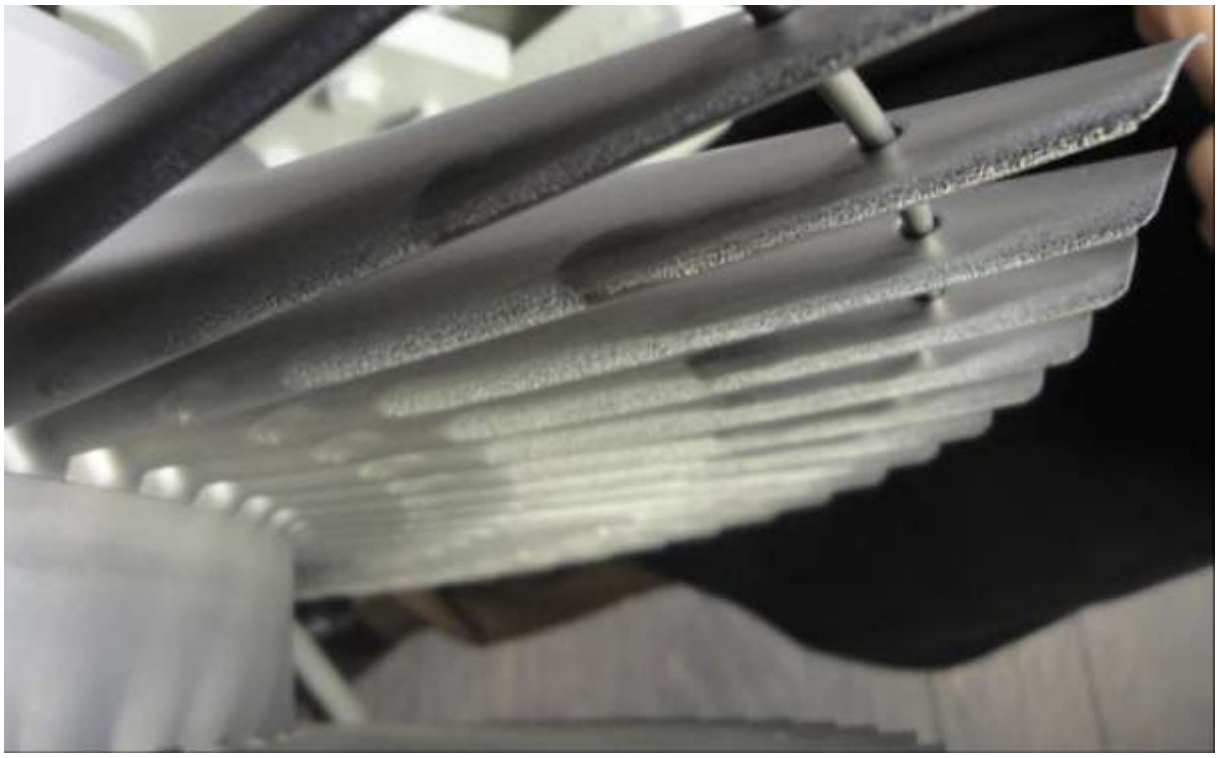


Abb. 11 Schadenstufe 1 bis 2 (Oberpullendorf, DCS01311)

An der Schaufelspitze Schadenstufe 2 – die Beschädigung nimmt nach innen deutlich ab bis auf Schadenstufe 1. An der Grenze zwischen gehärtetem und naturhartem Grundwerkstoff steigt die Schadenstufe wieder an. Im untersten Viertel der Schaufellänge ein kleiner isolierter Bereich mit Schadenstufe 1. Die Wirkung der Eintrittskantenhärtung ist hier auch deutlich quantitativ zu sehen. Allerdings ist auch hier der durch Tropfenschlag geschädigte Bereich deutlich länger als der gehärtete Bereich.

Abb. 12 Schadenstufe 1 bis 2 (Oberpullendorf, DCS01311, Ausschnitt)

Der Bereich der Tropfenschlagerosion reicht in Abb. 6 bis knapp über der Blattwurzel. Der oberflächengehärtete Bereich umfasst nur die obere Hälfte der Schaufellänge. Auch in Abb. 13 reicht der geschädigte Bereich über die Härtezone hinaus. An der Grenze kommt es zu verstärkten Erosionen.

Abb. 13 Schadenstufe 5 (Timelkam DT3, DSC00020 Ausschnitt)

Abb. 14 Riss in der Übergangszone

Fehler beim Oberflächenhärten (Flammhärten). Die Schaufeleintrittskante weist kreisrunde Flecken auf die nicht gehärtet sind. In diesen Bereichen kommt es zu verstärktem Angriff durch die aufprallenden Tropfen.

Abb. 15 Fehler Oberflächenhärtung (Timelkam, DT3 DSC00009 Ausschnitt)

Abb. 16 Fehler Oberflächenhärtung (Timelkam, DT3 DSC00XXX) Ausschnitt)

2.2 Überlagerung Tropfenschlagerosion mit Erosionskorrosion

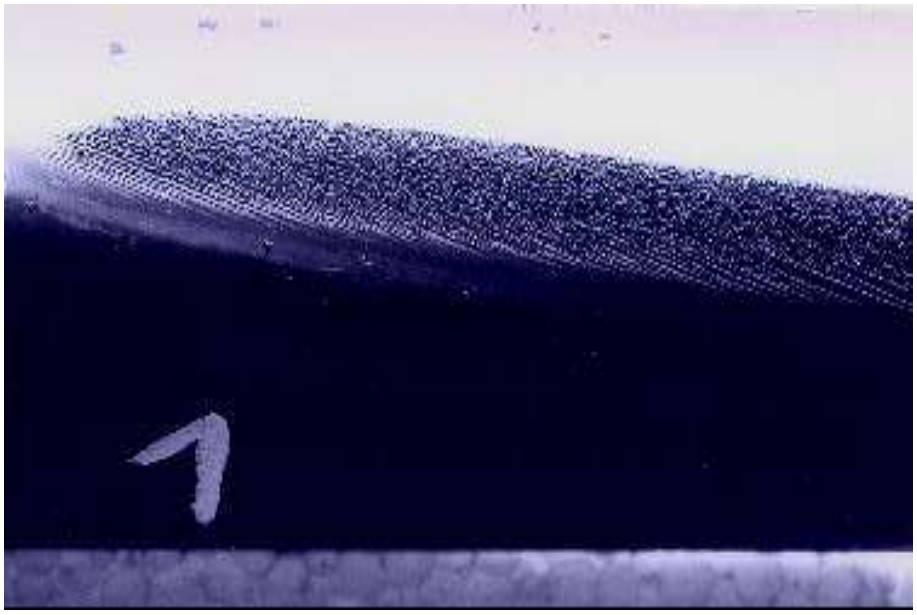


Abb. 17 Überlagerung Tropfenschlagerosion und Erosionskorrosion (OMV-Äthylen)

In seltenen Fällen tritt Tropfenschlagerosion gemeinsam mit Erosionskorrosion auf. Die Schaufelstähle sind grundsätzlich beständig gegen Erosionskorrosion. Da aber in dem Bereich der Tropfenschlagerosion keine Schutzschichtbildung erfolgen kann (sie wird permanent zerstört) kann sich Erosionskorrosion ausbilden. Erkennbar ist dies an Furchen in jene Richtung in der das Kondensat auf der Saugseite der Laufschaufel durch die Fliehkraft abgeschleudert wird.

3 Primäre Tropfenschlagerosion

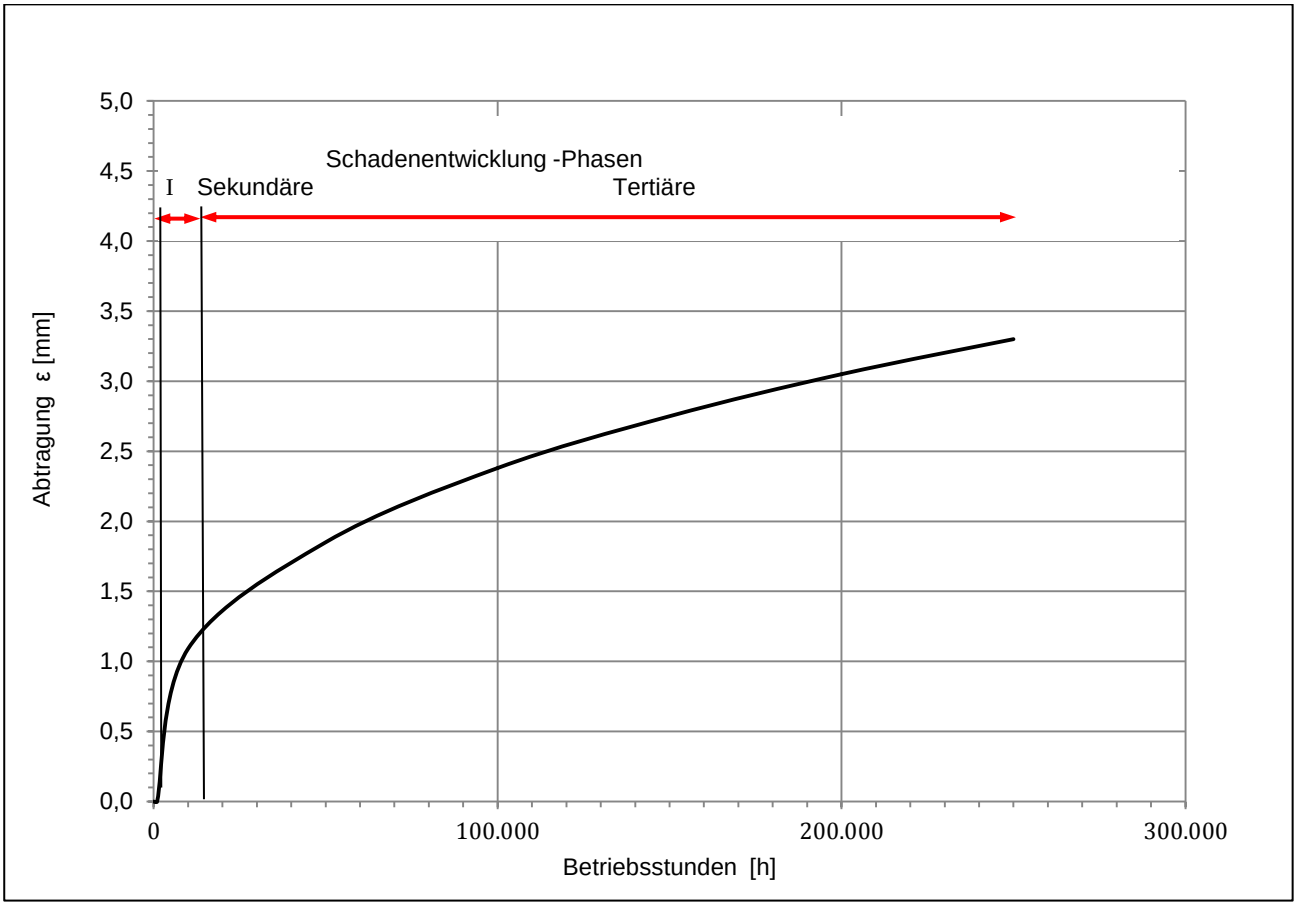


Diagramm 1 Tropfenschlagerosion - Zeitlicher Verlauf

3.1 Stadien der Schadenentwicklung:

- Inkubationszeit
  sehr kurz, abhängig vom Schaufelmaterial. U.U. nur wenige Stunden

- Sekundäre Phase
  Etwa bis 10.000 Betriebsstunden. In dieser Zeit entwickelt sich das typische Schadenbild

- Tertiäre Phase
  Bis 250.000 Betriebsstunden. Langsames Fortschreiten der Abtragung

3.2 Berechnung

Einflussgrößen

Maschinen- und Schaufelauslegungen für eine Abtragungsrate die eine Schaufellebensdauer“ von 200.000 Betriebsstunden erlauben sind möglich.

Diese Berechnungen basieren auf den Auslegungsdaten der Endstufe. Da über lange Zeiträume auch wesentlich abweichende Betriebsbedingungen auftreten kann das aber nur ein Richtwert sein. Die Berechnung kann weiters nur die primäre Tropfenschlagerosion erfassen.

3.3 Soll man die beschädigten Oberflächen glätten?

Wird die Schaufeleintrittskante z.B. anlässlich einer Revision bei 100.000 Betriebsstunden geglättet beginnt die Schadenentwicklung mit der sekundären Phase von neuem und die Gesamtabtragung wird drastisch höher.

Daraus folgt die Empfehlung:

Eintrittskanten nicht glätten!

Diese Empfehlung gilt für die ungestörte Entwicklung des Schadens. In der amerikanischen Literatur wird das als Primäre Tropfenschlagerosion bezeichnet.
Die als sekundäre Erosion bezeichnete lokale Verstärkung der Abtragung muss differenziert betrachtet werden.
Sie tritt auf wenn Kanten von Erosionsschilden (aufgelötet oder aufgeschweißt) freigelegt werden oder wenn die Erosion in einzelnen lokalen Bereichen auftritt. Das ist i.A. bedingt durch Störungen in der Strömung, ausgehend von Bindedrähten an Leitschaufeln oder sogar von Bindedrähten der Laufschaufel der vorhergehenden Stufe, Kanten in der Kontur von Leitschaufelträgern u. ähnlichem.

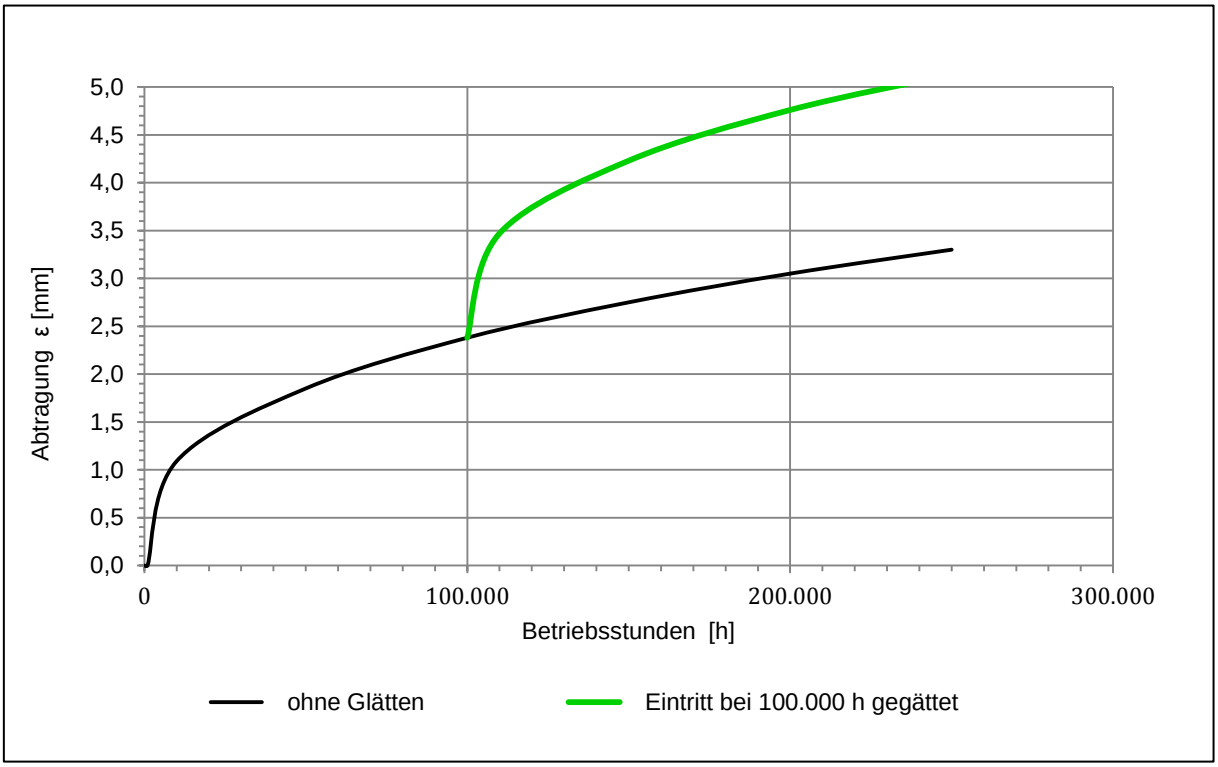


Diagramm 2 Eintrittskanten glätten

3.4 Soll man einzelne Schaufeln tauschen

Gibt man ein Kriterium für den Tausch der Schaufeln vor (Abtrag z.B. 2,5 mm) führt das i.A. zu folgender Situation:

Die Bandbreite der Abtragung ist innerhalb einer Stufe nicht sehr groß. Ersetzt man nur die Schaufeln welche das Kriterium überschritten haben erreichen die übrigen Schaufeln innerhalb des nächsten Revisionsintervalle dieses Kriterium. In dem dargestellten Beispiel erreicht der Großteil der Schaufeln bei 120.000 Betriebsstunden diese Grenze. Bei 150.000 wären dann alle Schaufeln zu tauschen.

Daher wird empfohlen:

Einzelne Schaufeln welche das Kriterium zum Tausch erreicht haben, sollte man nur dann tauschen wenn weitere Gründe (Schäden) dafür sprechen

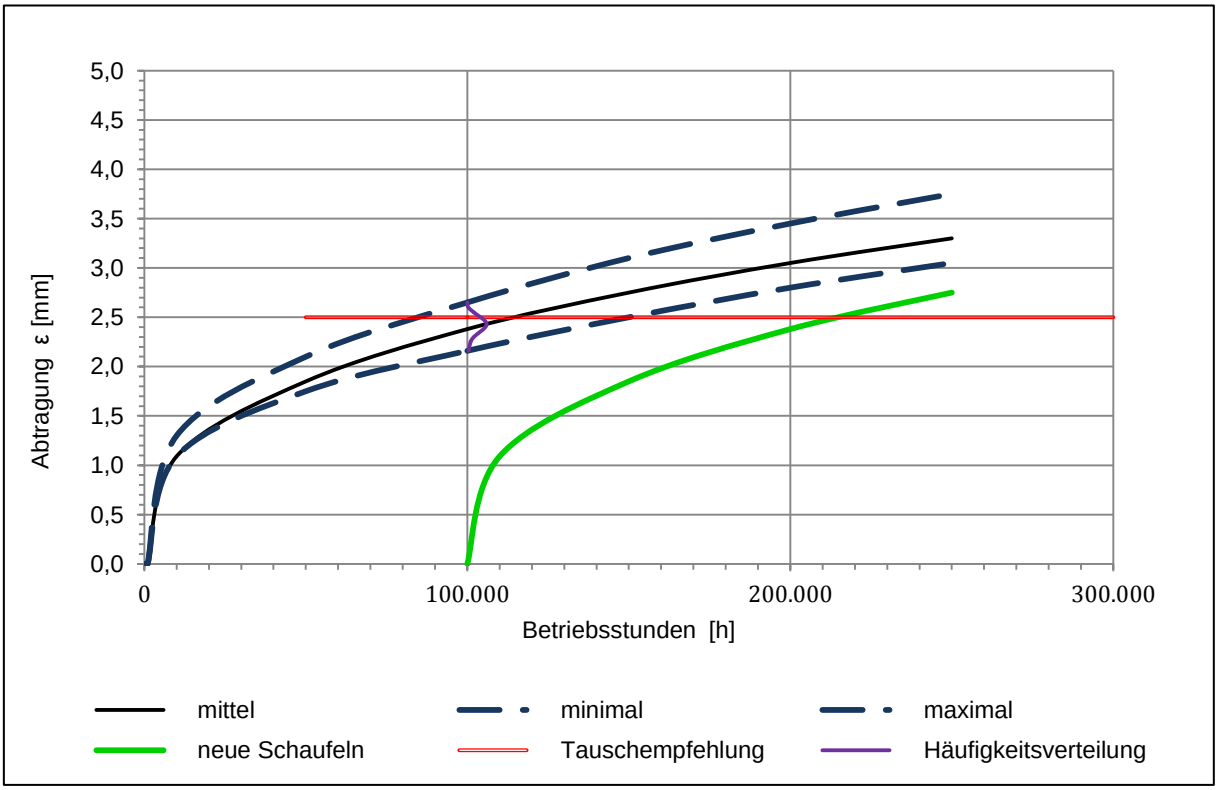


Diagramm 3 Tausch einzelner Schaufeln

4 Sekundäre Tropfenschlagerosion

Störungen im Strömungsfeld des Meridiankanales führen zu Ansammlungen von Tropfen von Kondensat an Bindedrähten, Fins oder an Kanten der Meridianbegrenzung im Leitschaufelträger. Erreichen diese Tropfen eine kritische Größe werden sie von der Strömung mitgetragen und wandern als Strähne durch die Beschaufelung.

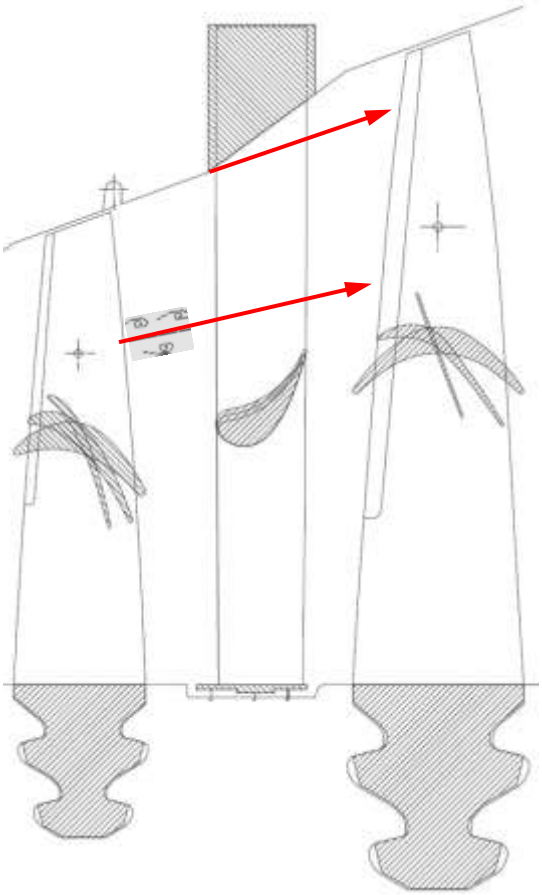


Abb. 18 Störungen im Strömungsfeld als Ursache der sekundären Erosion

Die sekundäre Tropfenschlagerosion kann zu lokal stark ausgeprägten Schäden führen die maßgebend für den Austausch (oder ein Versagen) der Schaufel sind.

Weisen die Schaufeln sehr weit abstehende Teile auf können diese getrimmt werden.

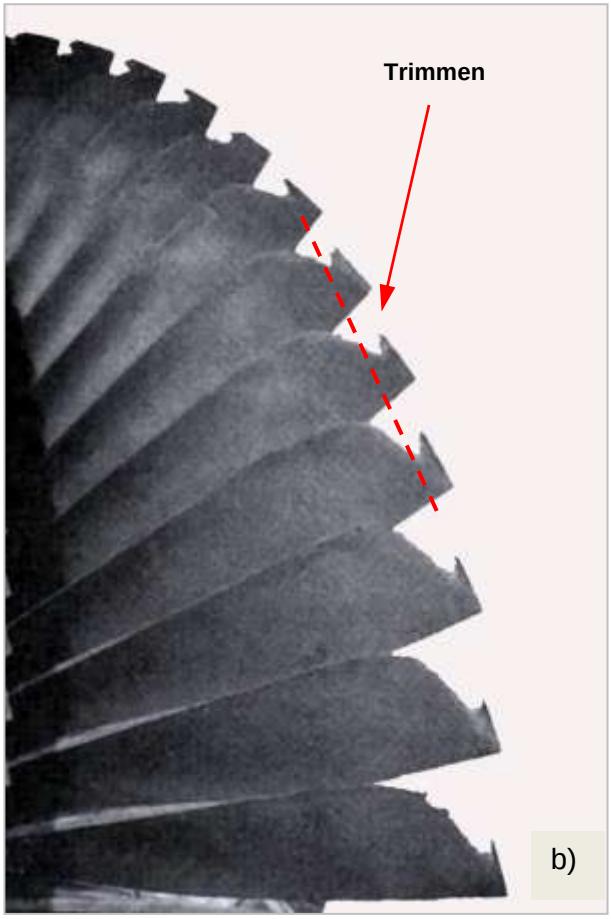


Abb. 19 Sekundäre Erosion, die Spitzen in der Abb. b) können „getrimmt“ werden

Bei den Erosionen im Spitzenbereich der Schaufel kann oft nicht entschieden werden ob es sich um eine erhöhte Erosion durch die unterschiedliche Strömung über die Schaufellänge Abb. 19 a) oder um eine sekundäre Erosion handelt.

Abb. 20 Sekundärerosion (Bremen)

5 Beurteilungskriterien – Erosion der Eintrittskante

5.1 Wirkungsgrad

Die Beurteilung nach dem Wirkungsgradabfall erfordert eine Nachrechnung der Leistungseinbuße durch die veränderte Profilform und die raue Oberfläche

Bei der Beurteilung ist eine eventuelle Änderung des Betriebsregimes in der Zukunft, das erwartete Lastkollektiv und die zu erwartende oder geplante Lebensdauer zu berücksichtigen

5.2 Schaufelschwingung

Zulässige Grenzen der Verstimmung Beurteilung im Campbell-Diagramm. Messung der Stand- Eigenfrequenzen mit Bump-Test und Vergleich der Frequenzen der Schaufeln der Reihe untereinander. Durch den Masseverlust an der Schaufelspitze steigen die Eigenfrequenzen an, das Streuband wird breiter.

Die in Abb**.** 20 dargestellte Schaufel weist z.B. eine um ca. 2 Hz erhöhte 1. Eigenfrequenz auf.
Im Campbell-Diagramm Abb. 21 ist das eingetragen. Man erkennt, dass die 2. Grundschwingung durch die Erhöhung mit der 5. Harmonischen in Resonanz gerät.

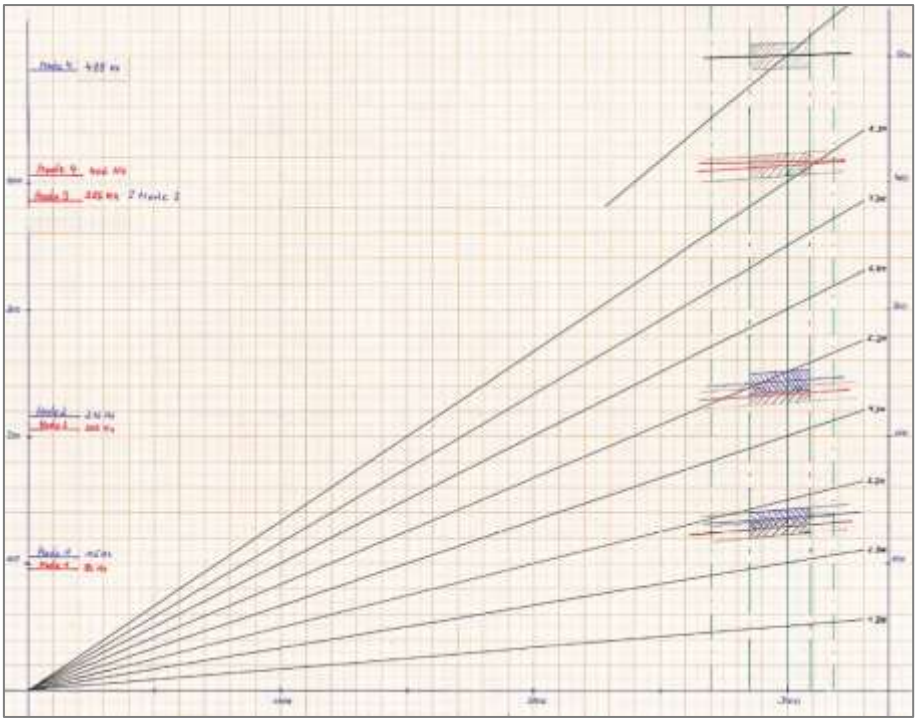


Abb. 21 Campbell-Diagramm

Schwierig wird die Beurteilung wenn weder das Campbell-Diagramm noch gemessene Standfrequenzen der neuen Schaufeln (Originalprotokolle der Fertigung) vorliegen. Dann muss aus der gemessenen Standfrequenz die Eigenfrequenz der Schaufel bei Betriebsdrehzahl hochgerechnet werden (nach Traupel). Die Ergebnisse sind wegen der damit verbundenen Unsicherheit kritischer zu beurteilen.

5.3 Festigkeit

Der erodierte Bereich liegt i.A. in einem Bereich der Schaufel in dem sowohl die Fliehkraftspannungen als auch die Dampfbiegespannungen nicht sehr hoch sind. Höchstbeanspruchte Stelle des Schaufelblattes ist die Blattwurzel.

Maßgebend für einen kritischen Zustand ist nur, wenn eine Zone besonders hoher Abtragungsrate mit eine „Schwingungsbauch“ der niedrigen Ordnungen der Schaufeleigenfrequenzen (siehe zusammenfällt- und natürlich an der Einspannstelle.

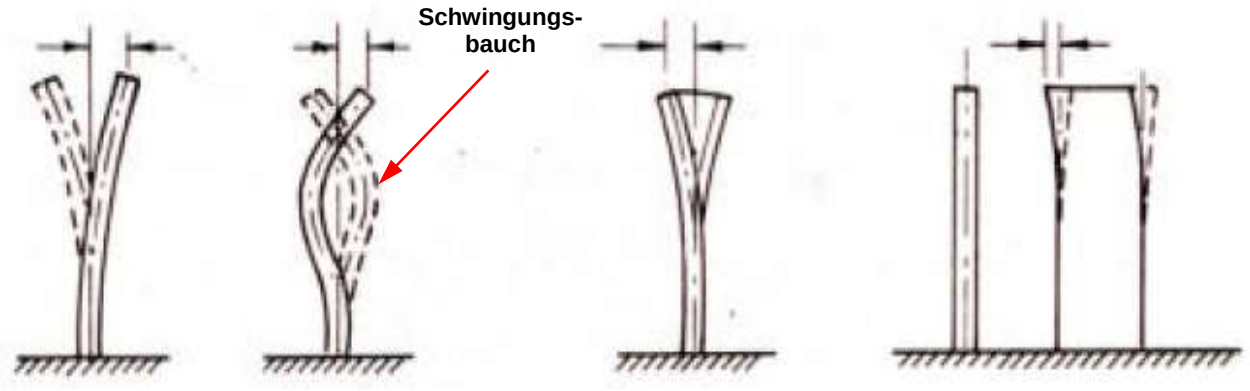


Abb. 22 Grund-Schwingungsformen der freistehenden Schaufel

5.4 Abfliegende Teile

Wenn die Gefahr von abfliegenden Teilen besteht können diese schonend entfernt werden (trimmen) wie in Abb. 19 dargestellt.

Abfliegende Teile können im Kondensator auf die Kondensatorrohre auftreffen und diese Beschädigen. Ob dies realistisch zutrifft muss eine kritische Beurteilung des Austrittsdiffusors, des Abdampfstutzens und des Kondensators ergeben. Das ist unkritisch bei nicht gehärteten oder gehärteten Schaufeln.
Kritisch ist das zu bewerten bei Schaufeln mit aufgelöteten oder aufgeschweißten Schutzschilden.

6 Beurteilungskriterien – Erosion der Austrittskante

Die Wirkung der Erosion an der Austrittskante muss wesentlich strenger beurteilt werden als gleich große Schäden an der Eintrittskante. Der Schadenbereich liegt im Bereich hoher Beanspruchung. Die Fliehkraft- und Biegespannungen sind im unteren Bereich wesentlich höher als an der Blattspitze. Die Schwächung des Querschnittes und der Einfluss auf die Schaufeleigenfrequenzen sind wesentlich höher weil der tragende Querschnitt und die (meist sehr dünn ausgeführte) Hinterkante des Profils geschwächt werden.

Die Ursache der Erosion an der Hinterkante muss daher geklärt und wenn möglich abgestellt werden.

- Betrieb im Schwachlast- oder Leerlaufbetrieb (Heizturbinen!)
- Nicht richtig ausgelegte Einspritzung von Kondensat in das Abdampfgehäuse (Haubeneinspritzung) (Menge, Einspritzrichtung, Betrieb nur bei Ventilationsgefahr)
- Überlagerung der beiden Ursachen führt zu einer progressiven Verstärkung

Nach W. Sanders (Turbine Steam Path Vol. II Maintenance and Repair) wird ein Tausch der Schaufeln empfohlen wenn die Abtragung 1,6 mm erreicht hat oder (wenn die Hinterkantendicke kleiner als 3,1 mm ist) wenn die Abtragung die Hälfte der Hinterkantendicke erreicht hat.

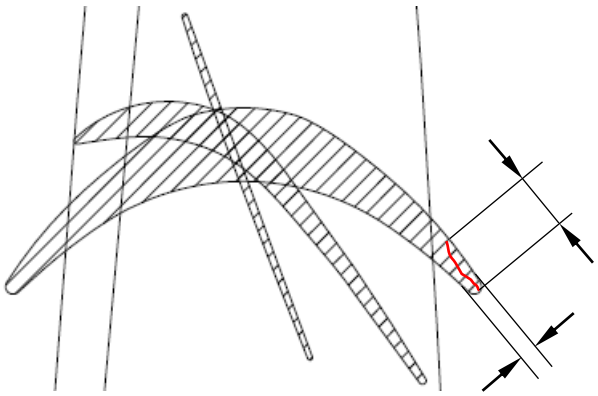


Abb. 23 Erosionsbereich Hinterkante

7 Reparaturmöglichkeiten

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1 Skizze freistehende Endstufenschaufel mit axialem Tannenbaumfuß 3
Abb. 2 Erosionsbereich Eintrittsseite 5
Abb. 3 Verlauf der Erosion über der Schaufellänge 6
Abb. 4 Stromlinienverlauf bei extremer Teilllast 7
Abb. 5 Schadenstufe 2 über weite Teile der Schaufellänge (Voest DT3, DSC03661) 8
Abb. 6 Schadenstufe 2 (Voest DT3, DSC02991) 8
Abb. 7 Schadenstufe 3 (Voest DT3, DSC02994) 9
Abb. 8 Schadenstufe 7 an der Schaufelspitze (Timelkam DT4, DSC00021) 9
Abb. 9 Schadenstufe 7 - Eintrittskante weit zurückversetzt (Avira) 10
Abb. 10 Tropfenschlagerosion - Zerrüttetes Gefüge 10
Abb. 11 Schadenstufe 1 bis 2 (Oberpullendorf, DCS01311) 11
Abb. 12 Schadenstufe 1 bis 2 (Oberpullendorf, DCS01311, Ausschnitt) 11
Abb. 13 Schadenstufe 5 (Timelkam DT3, DSC00020 Ausschnitt) 12
Abb. 14 Riss in der Übergangszone 12
Abb. 15 Fehler Oberflächenhärtung (Timelkam, DT3 DSC00009 Ausschnitt) 13
Abb. 16 Fehler Oberflächenhärtung (Timelkam, DT3 DSC00XXX) Ausschnitt) 13
Abb. 17 Überlagerung Tropfenschlagerosion und Erosionskorrosion (OMV-Äthylen) 14
Abb. 18 Störungen im Strömungsfeld als Ursache der sekundären Erosion 19
Abb. 19 Sekundäre Erosion, die Spitzen in der Abb. b) können „getrimmt“ werden 20
Abb. 20 Sekundärerosion (Bremen) 21
Abb. 21 Campbell-Diagramm 22
Abb. 22 Grund-Schwingungsformen der freistehenden Schaufel 23
Abb. 23 Erosionsbereich Hinterkante 24

Anmerkung:

Dieses Papier erhebt keinen Anspruch auf umfassende wissenschaftliche Darstellung. Es ist als Hilfsmittel für Befundung und Beurteilung von Laufschaufeln mit Erosionsschäden konzipiert.

Erstausgabe: AE&E 1998/Har
Überarbeitet: 2012 für Wien Energie

Alle Fotos wenn nicht anders angegeben A. Harrer

© Harrer Turbine Consult

Für dieses Dokument behalten wir uns alle Rechte vor. Vervielfältigung, Bekanntgabe und Weitergabe an Dritte oder Verwendung seines Inhaltes sind ohne unsere ausdrückliche Zustimmung nicht gestattet..