

2 Stand des Wissens

2.1 Riblets

Ein wesentlicher Untersuchungsaspekt dieses Vorhabens ist die Herstellung von Riblet-Strukturen. Daher werden im Folgenden die Definition der Riblets sowie deren Funktionsweise erarbeitet.

2.1.1 Grundlagen

Fluiddynamische Grenzschicht an einer glatten Platte

In der Grenzschicht einer turbulent überströmten, glatten Platte herrschen große Geschwindigkeitsschwankungen. Diese führen zur Ausbildung einer so genannten viskosen Unterschicht in der unmittelbaren Wandnähe sowie zu einer Strömungsbewegung in Form von Streifen (low-speed-streaks). Wie auf Abbildung 2.1 dargestellt wird zur Charakterisierung dieser Streifen zwischen „Sweeps“ und „Ejections“ differenziert. Während die „Sweeps“ sich in Strömungsrichtung zur Wand orientieren, bewegen sich die „Ejections“ weg von der Wand. Aus Kontinuitätsgründen verbreiten sich diese zweidimensionale Streifen in der dritten Raumrichtung und rufen dreidimensionale Strömungen mit zufallsbedingten Geschwindigkeiten hervor (Abbildung 2.1 rechts) [SEU12, MUL12, SCH06].

Die Beschreibung dieser Strömungstreifen sowie der viskosen Unterschicht gelingt durch die Einführung folgender dimensionsloser Kenngrößen:

$$x^+ = \frac{x \times u_{\tau 0}}{\vartheta}, y^+ = \frac{y \times u_{\tau 0}}{\vartheta}, z^+ = \frac{z \times u_{\tau 0}}{\vartheta} \quad (2.1)$$

Wobei ϑ die kinematische Viskosität und $u_{\tau 0}$ die Wandschubspannungsgeschwindigkeit darstellen. Letztere lässt sich wie folgt berechnen:

$$u_{\tau 0} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.2)$$

mit τ_0 die Wandschubspannung auf einer glatten Oberfläche und ρ die Fluideichte [SCH06].

Bisher durchgeführten Studien zeigen, dass ein Geschwindigkeitsstreifen über eine dimensionslose Länge von $x^+=1000$ und eine dimensionslose Breite von $z^+=50$ verfügen kann. Des Weiteren kann eine viskose Unterschicht eine dimensionslose Höhe von $y^+=5$ erreichen [SCH06].

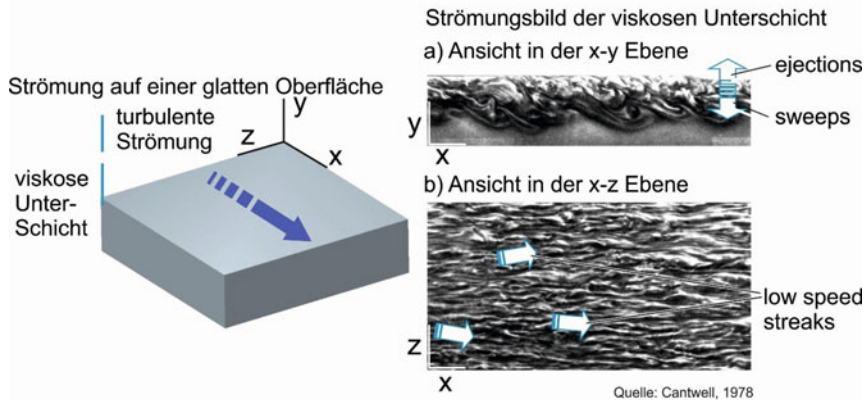


Abbildung 2.1 Mechanismen an überströmten, ebenen Platten [WAN10]

Historie und Definition

Bei der Beobachtung der Haut von schnell schwimmenden Haien, konnte der deutsche Wirbelpaläontologe Wolf-Ernst Reif Ende der siebziger Jahre Micro-Längsrillen, die sich in Strömungsrichtung orientieren, identifizieren [REI85]. Zu der gleichen Zeit wurde unabhängig von Reifs Studien am Langley Research Center der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA (Hampton, Virginia) Untersuchungsreihen vorangetrieben, mit dem Hintergrund Brennstoffkosten bei langen Flügen zu ersparen. Dies sollte durch feine, am Rumpf eines Flugzeugs angebrachte strömungswiderstandsmindernde Strukturen, auch Riblets genannt, ermöglicht werden. Hierzu wurden im Rahmen von Voruntersuchungsreihen in einem Windkanal recht- und dreieckige bis hin zu gekrümmte Strukturen, sowohl in symmetrischer als auch in unsymmetrischer Anordnung getestet [WAL83, WAL86, WAL89].

Das Funktionsprinzip dieser untersuchten Strukturen beruhte darauf, auf die Mechanismen in der Grenzschicht einer überströmten, glatten Fläche durch gezielte geometrische Änderungen einzuwirken. Durch das Anbringen paralleler, in Strömungsrichtung verlaufender Strukturen, die in Abbildung 2.2 links zu sehen sind, wurde die Bewegung der Geschwindigkeitsstreifen in z-Richtung verhindert (Vgl. Abbildung 2.1 links) [BRU98]. Aus Kontinuitätsgründen minderten diese Strukturen das Ausbilden zweidimensionaler „sweeps“ und „ejections“ und demzufolge die Wandschubspannungsverluste [SCH07].

Funktionsweise der Riblets

Anströmrichtung

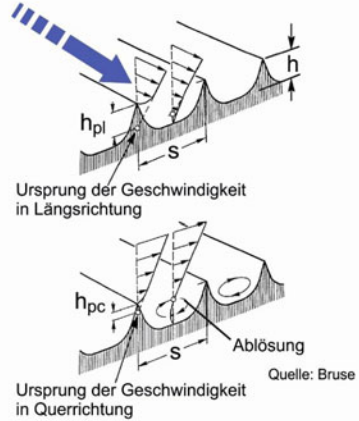
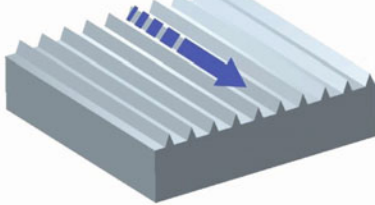


Abbildung 2.2 Funktionsprinzip von Riblets [WAN10]

Zur Beurteilung der Effizienz der Riblets η_{Riblets} wurden die Wandschubspannungen auf einer glatten Oberfläche τ_0 und einer strukturierten Oberfläche τ herangezogen. η_{Riblets} ließ sich wie folgt berechnen:

$$\eta_{\text{Riblets}} = \frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} = \frac{\Delta\tau}{\tau_0}. \quad (2.3)$$

Basierend auf den Ergebnissen vom „Langley Research Center“ wurde Ende der achtziger bis etwa Mitte der letzten Dekade in diesem Bereich angestrebt, Ansätze zur Ermittlung der Riblets-Dimensionen zu etablieren sowie deren optimale Geometrie herauszufinden [BRU98, BEC 90, HAG04].

Zur Auslegung der Riblets-Dimensionen machten sich Bruse und Hage den dimensionslosen Kenngrößen Seitenabstand s^+ , Höhe h^+ und Stegbreite t^+ sowie Aspektverhältnis a zur Nutze. Diese Größen sind auf der Abbildung 2.2 rechts abgebildet und werden wie folgt ermittelt:

$$s^+ = \frac{s \times u_{\tau 0}}{\vartheta}, h^+ = \frac{h \times u_{\tau 0}}{\vartheta}, t^+ = \frac{t \times u_{\tau 0}}{\vartheta}, a = \frac{h^+}{s^+} = \frac{h}{s} \quad (2.4)$$

In diesem Zusammenhang sollte der Seitenabstand s^+ kleiner als die Breite z^+ ausgewählt werden ($s^+ < z^+$), sodass die Bewegung der Geschwindigkeitsstreifen in z -Richtung verhindert wurde. Des Weiteren sollten die Riblets in der viskosen Unterschicht eingebettet sein, um der Entstehung dieser Schichtentgegen zu wirken.

Es hatte sich während mehrerer Versuchskampagnen an unterschiedlichen Riblets-Geometrien herausgestellt, dass bei einem seitlichen dimensionslosen Abstand von $s^+=17$ und einem Aspektverhältnis von $a=0,5$ die bandförmige Riblets-Geometrie bis zu 9,9% der Reibungsverluste im wandnahen Bereich reduzieren ließ [BRU98, HAG05]. Allerdings wies diese Geometrie im Vergleich zu den anderen eine deutlich geringere Beständigkeit im Hinblick auf die mechanischen sowie thermischen Belastungen auf. Daher war sie technisch irrelevant. Im Gegenteil dazu, wies die trapezförmige Geometrie, die den Rillen auf der Haut der Haie ähnelte, eine ausreichende Robustheit auf. Diese Alternative ermöglichte bei den gleichen dimensionslosen Kenngrößen bis zu 7,8% der Reibungsverluste zu reduzieren [BRU98].

Zwischenfazit

Die hier eingeführten Grundlagen schildern die Entwicklung der aus der Bionik inspirierten Rillen auf der Haut eines Haies bis hin zu den als heute bekannten trapezförmigen Riblets. Gegenstand aktueller Untersuchungen ist das Herstellen dieser vielversprechenden Strukturen auf Verdichterschaufeln um die Reibungsverluste, die in Flug- oder in Krafttriebwerksturbinen entstehen, zu reduzieren. Hierbei liegen die Seitenabstände, je nach Strömungsbedingungen bei einem Aspektverhältnis von $a=0,5$ zwischen $s=100\text{ }\mu\text{m}$ und $s=20\text{ }\mu\text{m}$. Zunächst wird auf die Verfahren, die sich für die Herstellung von Riblets eignen, eingegangen.

2.1.2 Verfahren zur Herstellung von Riblets

Die Herstellung von Riblets im Allgemeinen und insbesondere auf Verdichterschaufeln birgt mehrere technologische Herausforderungen. Aus einer konstruktionstechnischen Hinsicht wird vorausgesetzt, dass die Strukturen den hohen thermischen und mechanischen Belastungen innerhalb des Verdichters bestehen können. Daher sind die von Walsch am Ende der Achtziger Jahre getesteten Vinyl-Trägerfolien für diese Anwendung nicht geeignet [WAL86, WAL89, OEH07]. Alternativ bietet sich die Möglichkeit die Riblets direkt auf den Schaufeln herzustellen. Dadurch gelingt es die Verschleißbedingungen zu bewältigen. Jedoch entstehen hierbei fertigungstechnische Herausforderungen. Zum einen soll die Zerspantechnologie, neben der Einhaltung von Maß- und Formgenauigkeit der Mikrostrukturen, für den Einsatz auf gekrümmten Oberflächen geeignet sein. Zum anderen soll sie eine kostengünstige Fertigung ermöglichen [WAN10].

Bei der direkten Herstellung von Riblets werden die zum Einsatz kommenden Verfahren in nicht- und in spanhebende Verfahren unterteilt [WAN10]. Unter nicht

spanhebende Herstellverfahren werden beispielhaft das LIGA-Verfahren, das Mikrofunkenerosion, die Lasermaterialbearbeitung sowie das Walzverfahren klassifiziert [WAN10]. Aus der Tabelle 2.1 sind eine Gegenüberstellung der erzielbaren Abmessungen sowie die Einschränkungen dieser Verfahren zu entnehmen.

Tabelle 2.1 Gegenüberstellung nicht spanhebender Fertigungsverfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen

Verfahren	Abmessungen		Einschränkungen	Literatur
	s_{\min} [μm]	a		
LIGA	20	50	Polymeren und Metallen	VÖL06
Mikrofunkerosion	40	30	Einzelfertigung, Zeitaufwendig	UHL01
Laserbearbeitung	200	0,38	Begrenzte Abtragleistung	OEH07
Walzverfahren	200	0,38	große Dimensionen	KLO07

Unter spanhebenden Fertigungsverfahren zum Herstellen von Riblets werden das Mikrofräsen, -hobeln sowie die Mikrobearbeitung mit geometrisch unbestimmten Schneiden definiert. Die Tabelle 2.2 gibt eine Übersicht über die erzielbaren Dimensionen und über die Einschränkungen dieser Verfahren.

Zunächst ist aus den Tabellen 2.1 und 2.2 festzustellen, dass sich Mikrostrukturen durch mehrere Verfahren herstellen lassen. Jedoch entsprechen die erzielten Ergebnisse weder den technischen noch den wirtschaftlichen Erwartungen zum Herstellen von Riblets. Einerseits gelingt es durch die meisten Verfahren nicht, Seitenabstände von unter $s < 20 \mu\text{m}$ mit einem Aspektverhältnis von $a = 0,5$ zu bewerkstelligen (Lasermaterialbearbeitung, Walzverfahren). Andererseits eignen sich andere nicht zum Herstellen von Riblets auf gekrümmten Oberflächen (Hobeln). Darüber hinaus sind manche Verfahren für die Bearbeitung großflächiger Schaufeln wegen der zeitaufwändigen Bearbeitung und der kostenintensiven Werkzeuge nicht wirtschaftlich einsetzbar (Mikrofräsen, Laserbearbeitung).

Tabelle 2.2 Gegenüberstellung spanhebender Fertigungsverfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen

Verfahren	Abmessungen		Einschränkungen	Literatur
	s_{\min} [μm]	a		
Mikrofräsen	10	-	Werkzeugempfindlichkeit	KLO07
Mikrohobeln	5	-	Ebene Flächen	FIS00
Mikroschleifen	20	0,5	Abrichtbarkeit	WAN12

Aktuelle Studien zeigen, dass das Mikroschleifen anderen Verfahren gegenüber die erfordernten Bedingungen zur wirtschaftlichen Fertigung von Riblets auf Schaufeln erfüllen [WAN10, OEH07]. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt die unterschiedlichen Methoden zur Herstellung dieser Strukturen mittels des Schleifverfahrens näher betrachtet.

Schleifbearbeitung zum Herstellen von Riblets

Die schleiftechnische Herstellung von Mikrostrukturen kann durch Schleifstifte sowie ein- und mehrfach profilierten Schleifscheiben erfolgen. Beispielfhaft setzte Aurich galvanisch beschichtete Diamant-Mikroschleifstifte mit Durchmessern von 13 μm zum Herstellen von Mikro-Strukturen ein. Die Korngröße dieser Versuchswerkzeuge betrug 1-3 μm . Die hier erzielte Profiltiefe entsprach 30 μm bei einer Profiltiefe von 3 μm [AUR09, AUR09a]. Da solche Werkzeuge jedoch eine kurze Standzeit aufweisen, erhöhen sich die Bearbeitungskosten bei dem Herstellen von Riblets. Folglich sind die Mikro-Schleifstifte für diese Anwendung ungeeignet.

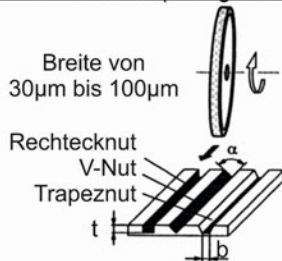
Wenda untersuchte die Realisierbarkeit von Mikrostrukturen auf verschiedenen Werkstoffen, wie Glas, Hartmetall und Silizium, anhand von dünnwandigen, kunstharzgebundenen Diamant-Schleifscheiben, auch „Dicing Blades“ genannt. Die Breite der Werkzeuge wurde zwischen 30 μm und 100 μm variiert. Um den Belastungskollektiven, die sich während des Zerspanprozesses entstanden, entgegenzuwirken, wurden diese Scheiben zwischen zwei Flansche gespannt. Anhand einer SiC-Abrichtrolle wurde ein V-förmiges Profil auf das Schleifblatt erzeugt. Die von Wenda erzielten Profiltiefen lagen mit einem Aspektverhältnis von 0,33 bei 100 μm [WEN02].

Wang untersuchte ebenfalls die Abrichtbarkeit von einfach profilierten, metallgebundenen cBN-Schleifscheiben und die Genauigkeit der damit erzeugten Riblets. Die Breite der eingesetzten Werkzeuge betrug 3 mm. Auf dem Schleifbelag wurde mit dem funkenerosiven Abrichtverfahren ein Dachprofil mit einem Winkel von 60° und einer Profilhöhe von 2,6 mm erzeugt. Die erwünschten Riblets-Dimensionen konnten durch Anpassung der Zustellung variiert werden. Es wurden während dieser Untersuchung Riblets mit einem Seitenabstand von $s=20\text{ }\mu\text{m}$ und einem Aspektverhältnis von $a=0,5$ erfolgreich erreicht [WAN10].

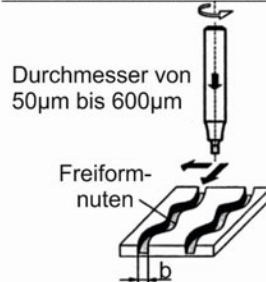
Mit Hilfe moderner CNC-gesteuerten Schleifmaschinen ist es heutzutage möglich, wie auf Abbildung 2.3 (oben) dargestellt, durch den Einsatz von einfach profilierten Werkzeugen Mikrostrukturen auf gekrümmten Oberflächen herzustellen. Jedoch entstehen beim Schleifen großer Oberflächen lange Prozesszeiten, die die Wirtschaftlichkeit erheblich verringern. Als Lösungsansatz hierfür werden neulich mehrfach profilierte Schleifwerkzeuge entwickelt und optimiert [WAN10].

Zum Herstellen von Riblets anhand mehrfach profilierter Schleifscheiben hatte Wang keramisch gebundene cBN- sowie SiC-Schleifscheiben eingesetzt. Die Korngröße der untersuchten Werkzeuge wurde zwischen $9\text{ }\mu\text{m}$ und $60\text{ }\mu\text{m}$ variiert. Hierbei wurden Profile mit einem Seitenabstand zwischen $s=120$ und $s=60\text{ }\mu\text{m}$ und einem Aspektverhältnis von $a=0,5$ erzeugt [WAN10].

Mikroschleifen mit dünnwandigen Schleifscheiben (Dicing Blades)



Mikroschleifen mit Schleifstiften



Mikroschleifen mit mehrfach profilierter Schleifscheiben

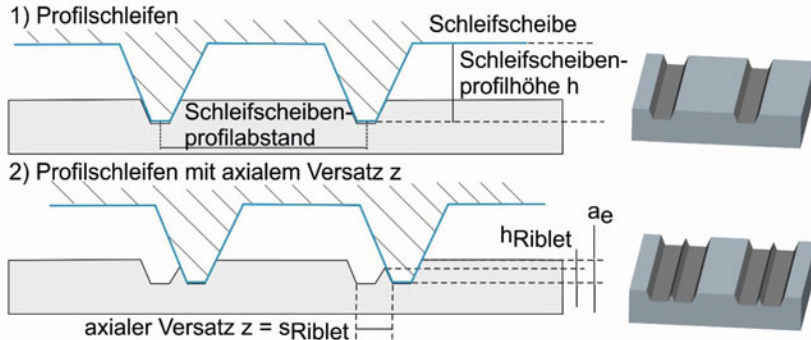


Abbildung 2.3 Schleifstrategien zur Erzeugung von Riblet-Strukturen [WAN10]

Die Abbildung 2.3 (unten) stellt das Funktionsprinzip des Schleifverfahrens mit mehrfach profilierterm Werkzeug schematisch dar. Zunächst ist zu erkennen, dass der Mindestabstand zwischen zwei Rillen auf der Schleifscheibe deutlich größer als der Abstand zwischen zwei hergestellten Riblets ist. Grund hierfür sind die Dimensionen der eingesetzten Diamantabtrichrolle, die aus fertigungstechnischen Einschränkungen nicht herabskalierbar sind. Um mit solchen Schleifwerkzeugen jedoch die erwünschten

Riblets-Dimensionen zu erzielen, hatte Wang eine Schift-Kinematik-Schleifmethode entwickelt. Hierbei wurden zwei benachbarte Rillen in zwei Schritten durch einen axialen Versatz der Schleifscheibe realisiert. Die angestrebte Riblets-Höhe wurde durch Anpassung der Zustellung bewerkstelligt [WAN10]

Zwischenfazit

Eine anforderungsgerechte Fertigungsqualität und Wirtschaftlichkeit bei der Herstellung von Riblets auf Verdichterschaufeln wird durch den Einsatz mehrfach profilierter Schleifscheiben gewährleistet. Hinzu kommt, dass am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover in diesem Bereich bereits intensiv geforscht wurde. Aus diesem Grund werden im Rahmen des nächsten Abschnitts die relevanten Prozessgrößen und die zwischen ihnen etablierten Korrelationen beim Schleifen von Riblets erarbeitet.

2.2 Ribletsherstellung mit Umfangsschleifscheiben

Zielgeometrie

Die Abbildung 2.4 (links) stellt die Spitze eines ideal scharfen Schleifscheibenprofils dar. Solche Geometrien lassen sich aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung der Schleifscheiben praktisch nicht abbilden, wobei stets eine Profilhöhenabweichung Δh zwischen Soll- und Ist-Schleifscheibenprofil nach dem Abrichten festzustellen ist (Abbildung 2.4, mitte). Die Verrundung, die aus der Profilhöhenabweichung Δh resultiert, wird zur Nutze gemacht, um kleinskalige Riblets-Dimensionen durch Versatz der Schleifscheibe herzustellen.

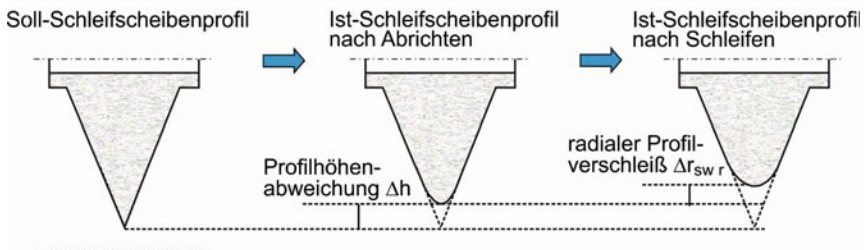


Abbildung 2.4 Soll- und Ist-Geometrie eines Schleifscheibendachprofils [WAN10]

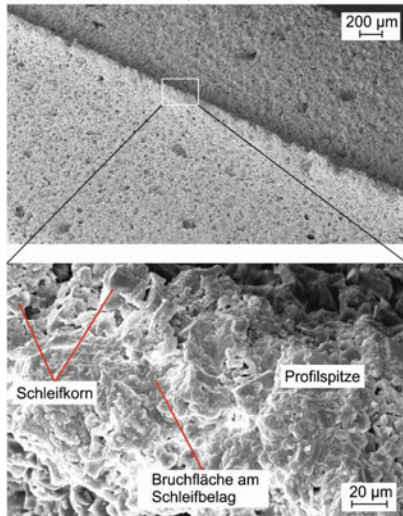
Beim Einsatz einer abgerichteten Schleifscheibe kommt auf die Profilhöhen-abweichung Δh ein radialer Profilverschleiß $\Delta r_{sw,r}$ hinzu, der in einem direkten Zusammenhang mit dem Prozess- sowie Systemgrößen steht (Abbildung 2.4, rechts). Chronologisch betrachtet, kann ein anfänglich instationärer und anschließend stationärer radialer Verschleiß definiert werden. Bei dem instationären Schritt tritt hauptsächlich, wie auf Abbildung 2.5 zu sehen ist, eine Bindungsausbrechung auf, die durch eine hohe Kantenscharfigkeit hervorgerufen wird [WAN10]. Nachdem der Prozess sich stabilisiert hat und die Spanräume zugesetzt sind, sind die zu beobachtenden Ausbrüche überwiegend auf die Körner beschränkt, wobei zwischen Kornabrasion und -absplitteln zu unterscheiden ist (Abbildung 2.5, rechts) [WAN10].

Einfluss der Prozess- und Systemgrößen auf die Riblet-Dimensionen

Zur Untersuchung des Einflusses der Prozessgrößen auf dem radialen Profilverschleiß wurde von Wang eine keramisch gebundene SiC-Schleifscheibe eingesetzt und sowohl die Schnittgeschwindigkeit v_c als auch die Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} variiert. Es hatte sich hierbei gezeigt, dass bei steigender Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe eine systematische Abnahme des radialen Profilverschleißes unterlag. Beispielfhaft betrug der radiale Profilverschleiß mit $\Delta r_{sw,r}=50 \mu\text{m}$ bei $v_c=5 \text{ m/s}$ und nach einer Schleiflänge von $L=60 \text{ mm}$ der fünffache Wert als bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c=30 \text{ m/s}$. Im Gegensatz hierzu stand die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} in einer umgekehrten Proportionalität mit dem Radialverschleiß, wobei $5 \mu\text{m}$ bzw. $25 \mu\text{m}$ Verschleiß nach einer Schleiflänge $L=240 \text{ mm}$ bei $v_{ft}=60 \text{ mm/min}$ bzw. 1200 mm/min festgestellt werden konnten [WAN10].

Die Untersuchung der Entwicklung des radialen Profilverschleißes im Zusammenhang mit den Systemgrößen erfolgte durch Variation der Schleifscheiben Spezifikation und der Rippenspitzenwinkel α . Hieraus geht hervor, dass die Erhöhung des letzteren Einflussfaktors eine bessere Abstützung der Körner an der Profilspitze bewirkte und folglich eine bessere Profilhaltigkeit sowie einen geringeren Radialverschleiß gewährleistete. Des Weiteren wiesen alle getesteten cBN-Schleifscheiben nach gleicher Schleiflänge einen deutlich geringeren radialen Verschleiß als die SiC-Schleifscheiben auf [WAN10].

REM-Bild des Dachprofils vor Schleifen



REM-Bild des Dachprofils nach Schleifen

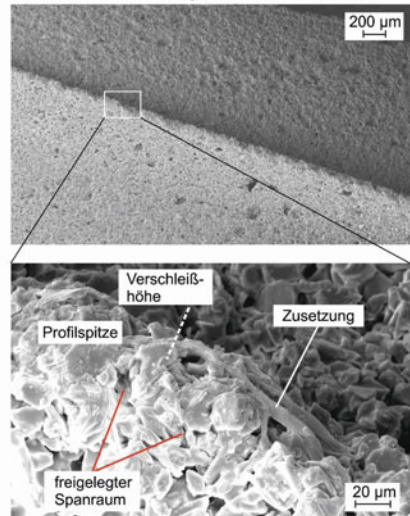


Abbildung 2.5 Profilverschleißmechanismen am Beispiel einer profilierten SiC keramisch gebundenen Schleifscheibe [WAN10]

Die Rollgratbildung

Zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen der Grate beim Planschleifen hatte Sudermann einen Cr-Mo-legierten Vergütungsstahl eingesetzt. Es hatte sich während dieser Studie gezeigt, dass auf dem Werkstück Grate im Eintritts-, Austrittsbereich der Schleifscheibe sowie entlang der Schleifrichtung zu beobachten waren. Grundsätzlich ließ sich das Ausbilden letzterer Art durch die Entwicklung hoher Prozesstemperatur, die in direkter Korrelation mit dem Kühlschmierstofffluss in der Kontaktzone stand, erklären [SUD10].

Geometrisch bedingt sind die Spalten zwischen Werkstück und Schleifscheibe beim Schleifen von Riblet-Strukturen sehr schmal. Folglich erschwert sich dort die Zufuhr einer ausreichenden Menge an Kühlschmierstoff, wodurch eine hohe thermische Belastung in der Kontaktzone resultiert. Analog zum Planschleifprozess kommt es beim Riblet-Schleifen durch die hohe Prozesstemperatur zur Ausbildung sogenannter Rollgrate [WAN10, DEN10]. Die Abbildung 2.6 (links, unten) veranschaulicht eine im Kunstharz eingebettete und anschließend polierte Probe, die mit Hilfe einer keramisch gebundenen Schleifscheibe strukturiert wurde. Hierbei sind an den Spitzen der her-

Herstellung metallisch gebundener Schleifscheiben für
das Schleifen von Riblets

Bouabid, A.

2015, XXIII, 122 S. 74 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-09908-4