

## *Abschlussbericht*

*zum Forschungsprojekt*

### *T-Dress*

*ein innovatives Diamantabrichtwerkzeug zur Erhöhung der  
Fertigungsqualität und -wirtschaftlichkeit bei der Feinbearbeitung*

*von*

*Prof. Dr.-Ing. T. Tawakoli*

*Kompetenzzentrum für Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung (KSF)  
Hochschule Furtwangen, Abt. VS, IAF*

*Tel.: 07720/307-4380*

*E-Mail: [ta@hs-furtwangen.de](mailto:ta@hs-furtwangen.de)*

*Juni 2011*

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1	Konventionelle Abrichtverfahren und -werkzeuge.....	5
2.2	Diamantprofilrollen .....	7
2.3	Diamantformrollen.....	11
<b>3</b>	<b>Problemdarstellung und Zielsetzung</b> .....	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Aufbau und Prinzip der T-Dress-Rolle</b> .....	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>Versuchsanordnung und Messtechnik</b> .....	<b>17</b>
5.1	Versuchsmaschine .....	17
5.2	Schleifscheiben.....	18
5.3	Diamantabrichtrolle .....	18
5.4	Versuchswerkstoff .....	19
5.5	Kühlschmierung .....	20
5.6	Mess- und Analysetechnik.....	21
5.6.1	Kraftmesssystem .....	21
5.6.2	Acoustic Emission System .....	21
5.6.3	Erfassung der Oberflächenstruktur.....	22
5.6.4	Ermittlung des Abrichtwerkzeugverschleißes.....	22
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b> .....	<b>24</b>
6.1	Versuchsbedingungen .....	24
6.2	Schleifkräfte beim CD-Schleifen mit der konventionellen und T-Dress-Rollen .....	24
6.3	Werkstückrauheit beim CD-Schleifen mit der konventionellen und T-Dress-Rollen .....	26
6.4	Schleifkräfte und Werkstückrauheit beim Tiefschleifen nach dem Abrichten mit der konventionellen und T-Dress-Rolle .....	28
6.5	Prozesskräfte und Werkzeugverschleiß beim Abrichten mit einer konventionellen und einer T-Dress-Rolle .....	30
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>31</b>

# 1 Einleitung

Der Schleifprozess wird meist als Endbearbeitungsverfahren in der Fertigung von Bauteilen mit hohen Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit und die Oberflächenqualität eingesetzt, wobei aufgrund der vorherigen Bearbeitungsstufen der Werkstücke qualitätsbeeinflussende Fehler besonders kritisch sind. Die Schleifprozesseffizienz wird in hohem Maße durch den Konditionier- bzw. Abrichtprozess beeinflusst. Einerseits wird die Schleifscheibentopographieausbildung sehr stark durch die Abrichtwerkzeugspezifikationen und Abrichtbedingungen bestimmt, andererseits aber wird die Effizienz des Schleifprozesses auch wesentlich durch die beim Abrichten anfallenden Kosten beeinflusst. Daher besteht immer noch ein hohes Interesse an der Optimierung des Abrichtprozesses durch neue Entwicklungen. Der Einsatz neuer Abrichtprozesse bzw. -werkzeugkonzepte, insbesondere bezüglich der hohen Beschaffungskosten teurer Diamantabrichtrollen, ist einer der Forschungsschwerpunkte zur Prozessverbesserung in der Schleiftechnologie. Zur Durchführung hochpräziser Schleifprozesse werden heutzutage fast ausschließlich Profilrollen oder Formrollen eingesetzt. Allerdings weist jedes dieser Abrichtwerkzeuge eigene Vor- und Nachteile auf, so dass ein Verbesserungsbedarf des Abrichtens durch neue innovative Abrichtwerkzeuge besteht.

Das innovative Abrichtwerkzeug „T-Dress“ ist eine neu entwickelte Abrichtrolle, die die Vorteile von Abrichtprofilrolle und Abrichtformrolle kombiniert und damit neue Wege zum Abrichten bei kurzen Abrichtzeiten mit niedrigeren Abrichtkräften und -temperaturen durch Punktkontakt ermöglicht. Die ersten Untersuchungen mit T-Dress stellten das gesteigerte Potential zur Erhöhung der Schleifprozesseffizienz durch diese neue Erfindung dar, so dass von Seiten der Industrie ein konkretes Interesse zur Einsetzung des T-Dress in der Praxis gezeigt wurde. Allerdings bestanden einige wichtige Fragen, die zu einer industriellen Einführung dieses neuen Abrichtwerkzeugkonzeptes bearbeitet werden sollten:

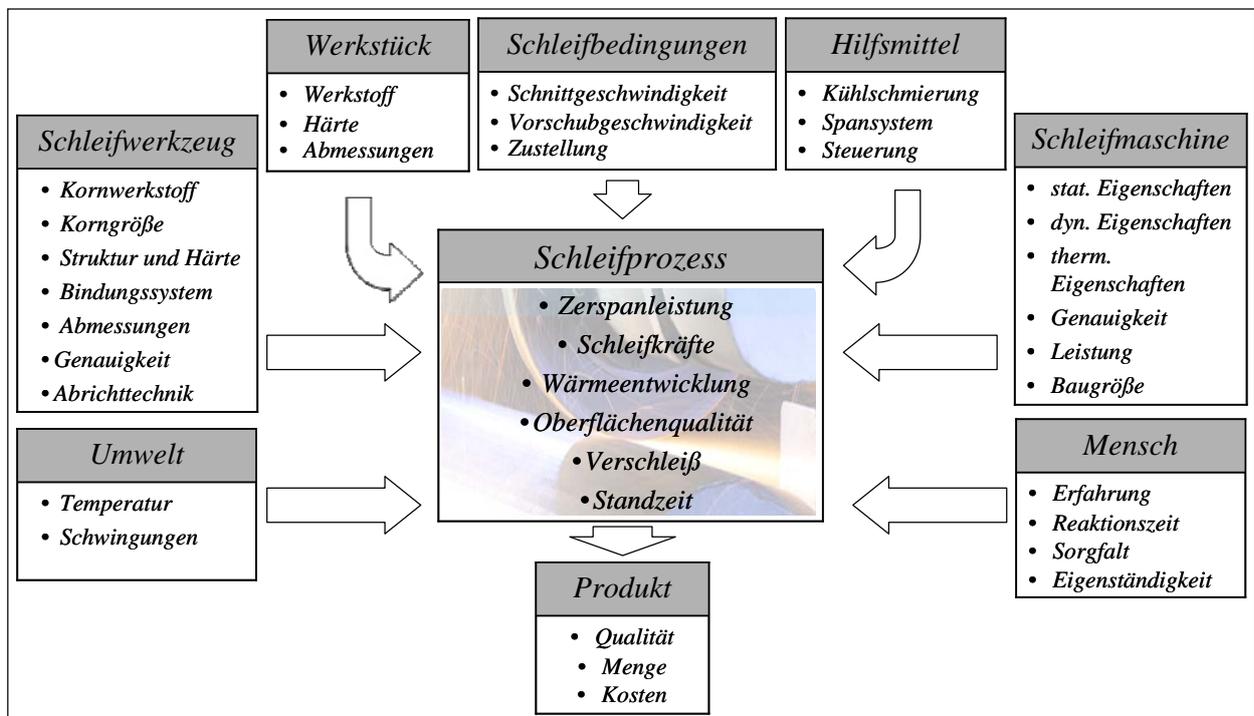
- Was sind die Vorteile des neuen Abrichtwerkzeugs für die praktische Anwendung?
- Was sind die wichtigsten Kriterien bei der Auslegung einer T-Dress-Rolle?
- Welches ist das effizienteste Fertigungsverfahren zur Herstellung einer T-Dress-Rolle?
- Was sind die optimalen Abrichtbedingungen beim Einsatz einer T-Dress-Rolle?
- Wie ist das Einsatzverhalten des T-Dress bei verschiedenen Schleifverfahren?
- Wie kann eine bestimmte Oberflächenstruktur auf der Werkstückoberfläche, welche z. B. zu einer Verbesserung der Schmierung dienen können, gezielt durch die Strukturierung der Schleifscheibe mit einer T-Dress-Rolle, erzeugt werden?

Das Ziel des Vorhabens bestand darin, durch systematische Untersuchungen möglichst die o. g. Fragen zu erklären und damit den industriellen Einsatz der neuen Erfindung anzunähern. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sollen nicht nur zur Optimierung des neuen Abrichtwerkzeuges eingesetzt werden, sondern potentiellen Anwendern zur Verfügung gestellt werden.

## 2 Stand der Technik

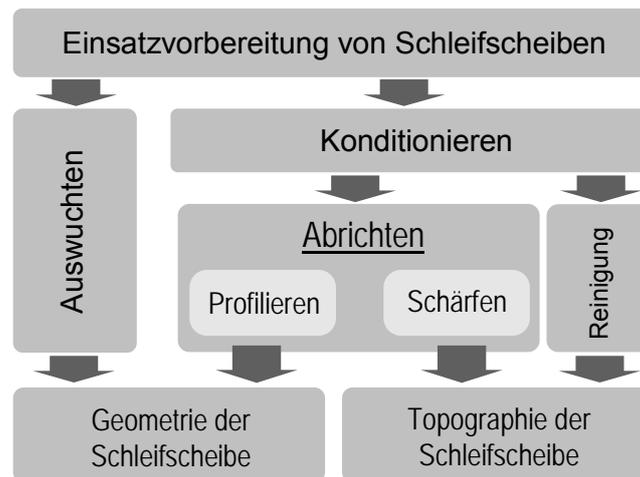
Das Schleifen gehört zu den Zerspanungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide. Es ist einer großen Zahl von Einflussgrößen unterworfen (**Bild 1**). Zu diesen zählt beispielsweise die Schleifscheibe, die das Schleifergebnis durch ihren Topographiezustand und ihr Verschleißverhalten beeinflusst, aber auch der Maschinenbediener, dessen Fähigkeiten und Erfahrungen in die Gestaltung der Prozessführung einfließen. Trotz Entwicklungen in den Gebieten Drehen und Fräsen und in der Hartbearbeitung zählt das Schleifen in der Präzisionstechnik noch immer zum Hauptprozess der Fertigung.

Der Schleifprozess wird meist am Ende der Fertigungskette von Bauteilen mit hohen Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit und die Oberflächenqualität eingesetzt, wobei das Einsatzverhalten der Schleifscheibe einen hohen Einfluss auf die Werkstückqualität und die Prozesswirtschaftlichkeit besitzt. Das Einsatzverhalten von Schleifwerkzeugen wird durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt. Dazu zählt unter anderem die Einsatzvorbereitung der Schleifscheibe. Die Einsatzvorbereitung dient der Herstellung der Formgenauigkeit und der Rundlaufgenauigkeit, sowie der Bildung einer prozessorientierten Schleifscheibentopographie. Jede Schleifscheibe wird während der Schleifbearbeitung durch die unterschiedlichen Korn- und Bindungsverschleißformen Makro- und Mikroverschleiß unterworfen. Durch den Makroverschleiß verliert die Schleifscheibe ihr der Werkstückgeometrie anpassendes Profil. Der Mikroverschleiß führt dagegen zu einer Änderung der Schleifscheibentopographie, wodurch die Schneidfläche der Schleifscheibe für die Schleifaufgabe entweder zu glatt oder zu rau wird.



**Bild 1:** Einflussfaktoren beim Schleifen

Die Einsatzvorbereitung einer Schleifscheibe beinhaltet nach Saljé [Salj90] zwei Schritte: Auswuchten und Konditionieren (**Bild 2**). Das Auswuchten dient dazu, die strukturbedingten Unwuchten und die formbedingten Restunwuchten einer rotierenden Schleifscheibe auszugleichen, damit an der Werkstückoberfläche hohe Maß- und Formfehler (z. B. Welligkeiten) vermieden werden können [Kloc05]. Die weiteren Maßnahmen zur Einsatzvorbereitung von Schleifscheiben, die zur Änderung der Makro- und/oder Mikrotopographie der Schleifscheibenwirkfläche führen, fallen unter den Oberbegriff Konditionieren.

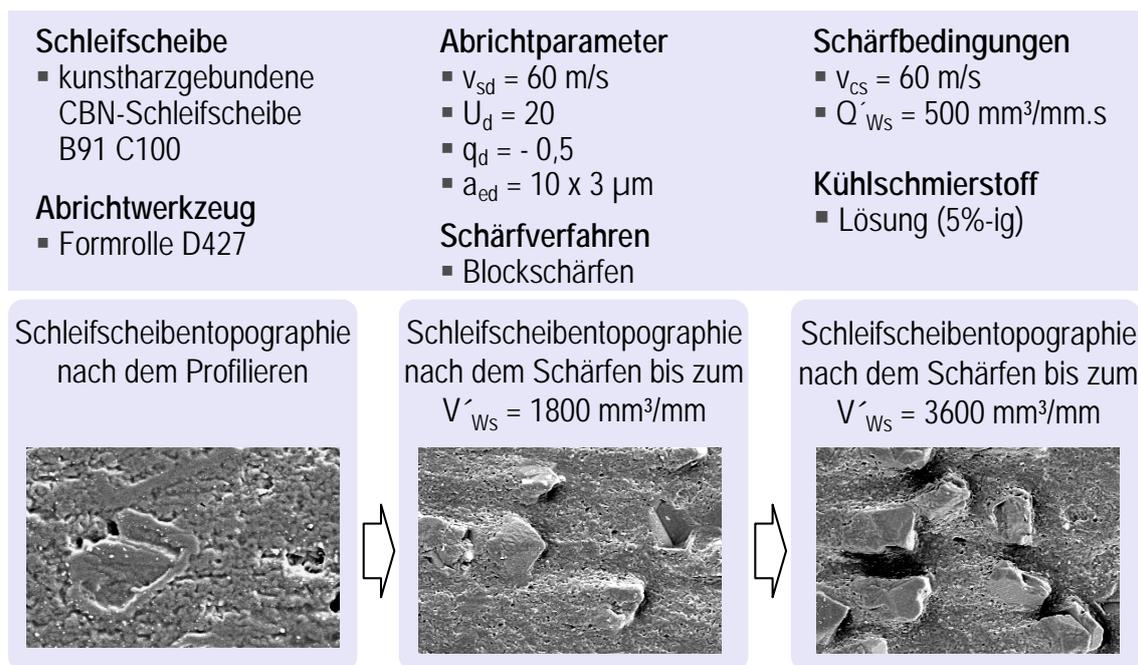


**Bild 2:** Begriffe der Einsatzvorbereitung von Schleifscheiben [Salj90]

Durch das Konditionieren muss eine der Bearbeitungsaufgabe angepasste Schleifscheibengeometrie und -topographie hergestellt bzw. wiederhergestellt werden. Der Begriff Konditionieren umfasst drei unterschiedliche Teilprozesse: das Reinigen, das Profilieren und das Schärfen, wobei die beiden Teilprozesse Profilieren und Schärfen unter den Oberbegriff des Abrichtens zusammengefasst werden [Sali90].

Durch das Profilieren wird die erforderliche Schleifscheibengeometrie hinsichtlich Form- und Maß-, sowie der Rundlaufgenauigkeit hergestellt. Nach dem Profilieren liegt jedoch aufgrund der gleichzeitigen Bindungs- und Kornzerspannung eine Topographie mit geringem bzw. keinem Kornüberstand, insbesondere nach dem Profilieren von kunstharz- und metallisch gebundenen hochharten Schleifscheiben, vor. Die Schleifscheibe ist in diesem Zustand nicht schneidfähig. Die für die Schleifbearbeitung erforderlichen Kornüberstände sowie die damit zusammenhängenden Spanräume müssen in einem Schärfprozess nach dem Profilieren der Schleifscheibe eingestellt werden, wobei prinzipiell nur die oberste Korngeneration durch Bindungszurücksetzung freigelegt und der für den Schleifprozess erforderliche Spanraum erzeugt wird (**Bild 3**). Bei der Reinigung werden die Schneidenräume von Spanresten und gelockerten Korn- und Bindungsmaterialien gereinigt. Der Schleifbelag bleibt dadurch schneidfähig [Schu96, Stuf96, Zitt99].

Industriell, insbesondere bei konventionellen Schleifscheiben mit ihrem porösen Aufbau, wird der Begriff „Abrichten“ oft als ein mit Diamantwerkzeugen durchgeführter Abtragprozess an Schleifscheiben verwendet, wobei die Schleifscheibe sowohl profiliert als auch geschärft wird.



**Bild 3:** Änderung der Schleifscheibentopographie durch das Schärfen [Tawa10]

## 2.1 Konventionelle Abrichtverfahren und -werkzeuge

Abrichtverfahren lassen sich nach kinematischen Gesichtspunkten in Verfahren mit stehenden und rotierenden Abrichtwerkzeugen unterscheiden. Die **Bilder 4 und 5** zeigen die herkömmlichen Abrichtprozesse und Abrichtwerkzeuge.

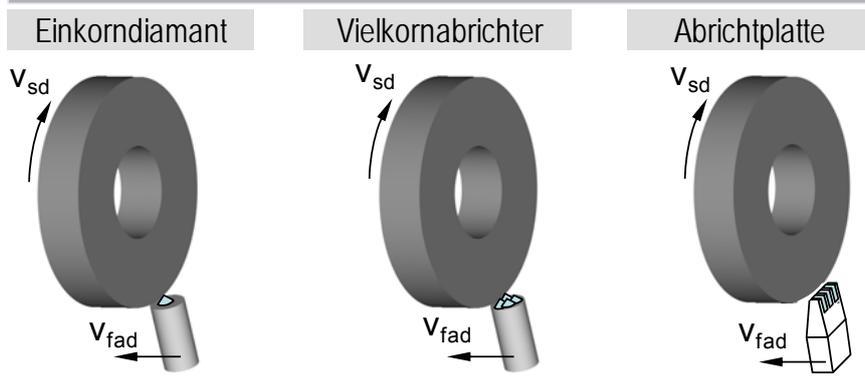
Stehende Diamantabrichtwerkzeuge unterliegen insbesondere beim Abrichten von hochharten Schleifscheiben aufgrund der quasi-punktuellen, kontinuierlichen Belastung des Abrichtdiamanten und der daraus resultierenden hohen Temperatur an der Abrichtkontaktstelle einem hohen Verschleiß. Hierdurch können mit den stehenden Diamantabrichtwerkzeugen hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit und den gleich zu bleibenden Topographiezustand des abzurichtenden Schleifscheibenprofils nicht realisiert werden. Daher kommen beim Schleifen von präzisen Bauteilen in der Regel rotierende Diamant-Abrichtwerkzeuge zum Einsatz [Gärt82, Salj90].

Wie Bild 4 zeigt, lassen sich die rotierenden Diamantabrichtwerkzeuge nach der Art der Profilerzeugung grundsätzlich in die drei folgenden Typen einteilen:

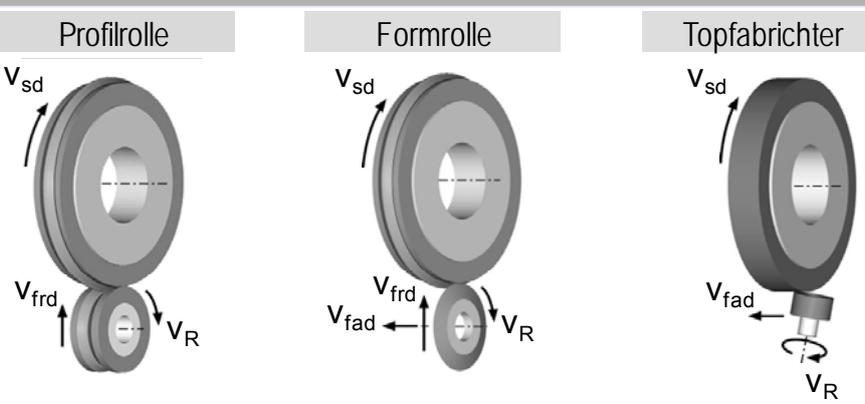
- Diamantprofilrollen
- Diamantformrollen
- Diamanttopfscheiben

Die Auswahl der Abrichtwerkzeuge hängt neben den maschinellen Möglichkeiten im Weiteren von den Kriterien Abrichtzeit und Werkzeugkosten, sowie von dem abzurichtenden Schleifscheibenprofil ab. Während sich das Einsatzgebiet der Diamanttopfscheibe auf das Abrichten von geradlinigen Schleifscheibenprofilen beschränkt, können mit Diamantprofilrollen und Diamantformrollen auch komplexe Schleifbelagkonturen abgerichtet werden.

**stehende Abrichtwerkzeuge**

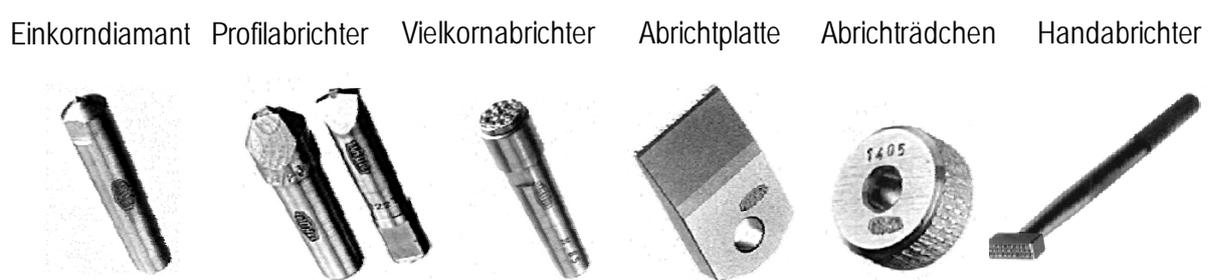


**rotierende Abrichtwerkzeuge**



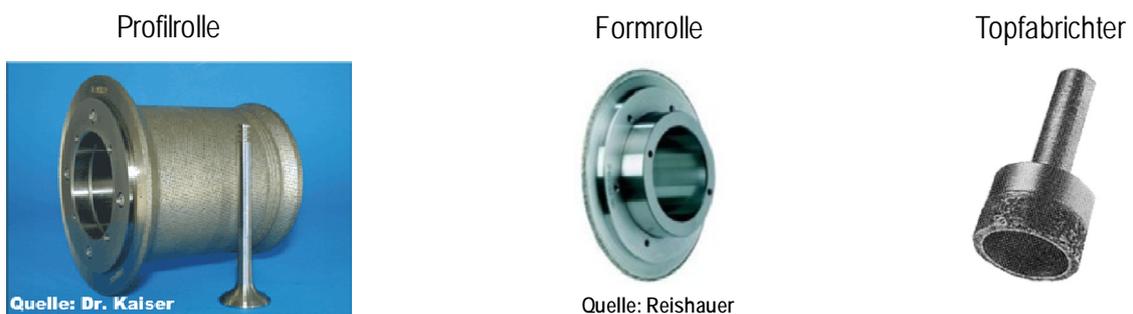
**Bild 4:** Üblicher Abrichtprozess für Schleifwerkzeuge

**stehende Abrichtwerkzeuge**



Quelle: Tyrolit

**rotierende Abrichtwerkzeuge**



Quelle: Dr. Kaiser

Quelle: Reishauer

**Bild 5:** Übliche stehende und rotierende Abrichtwerkzeuge

Das Abrichten mit Profilrollen ist ein abbildendes Profilierungsverfahren, wobei die Profilrolle die Negativform des Schleifscheibensollprofils besitzt. Das gesamte Schleifscheibenprofil wird durch das radiale Einstechen der rotierenden Profilrolle in die ebenfalls rotierende Schleifscheibe erzeugt. Diamantprofilrollen zeichnen sich durch sehr kurze Abrichtzeiten aus. Allerdings ist der Einsatz von einer Diamantprofilrolle erst ab einer gewissen Mindestlosgröße wirtschaftlich. Daher werden Diamantprofilrollen hauptsächlich in der Massenfertigung verwendet.

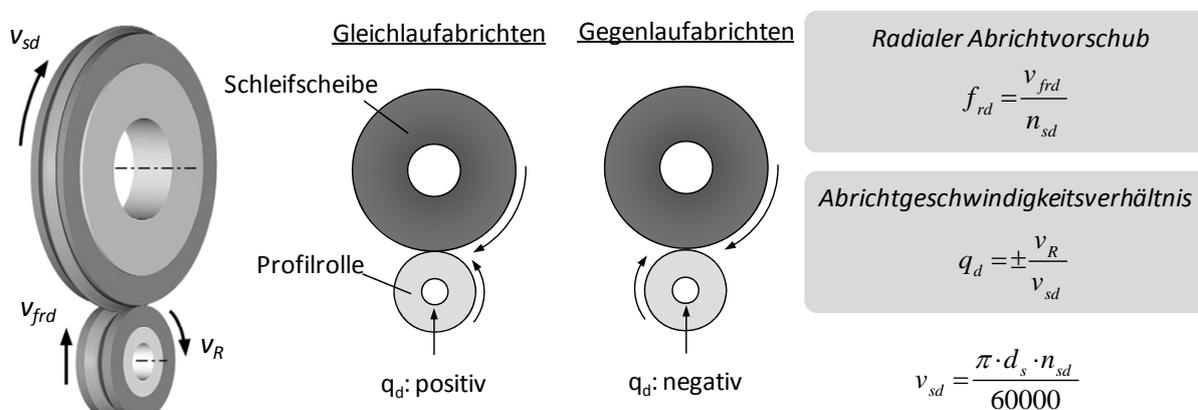
Das Abrichten mit Formrollen ist ein bahngestreutes Profilierungsverfahren, indem das Schleifscheibenprofil durch die bahngestreute Bewegung einer Formrolle mit einer kleinen Eingriffsbreite in radialer und axialer Richtung zur Rotationsachse der Schleifscheibe erzeugt wird. Diamantformrollen zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität aus. Charakteristisch für eine Formrolle ist der Rollenprofilradius, von dem abhängt, welche Formen in der Schleifscheibe erzeugt werden können. Die Einsatzmöglichkeit einer Diamantformrolle lässt sich durch eine zusätzliche Schwenkbewegung erhöhen [Graf99, Mink99]. Als problematisch gelten jedoch meist ein höherer Programmier- und Steuerungsaufwand, sowie Steifigkeitsverluste infolge einer zusätzlichen Bewegungsachse. Die Abrichtkräfte sind beim Abrichten mit Formrollen im Vergleich zu Profilrollen aufgrund der kleineren Eingriffsbreite gering, was sich positiv auf die erreichbaren Abrichtgenauigkeiten auswirken kann. Darüber hinaus lässt sich die Schleifscheibentopographie beim Abrichten mit Formrollen aufgrund der zusätzlichen axialen Bewegung der Formrolle im Vergleich zu Profilrollen über den Überdeckungsgrad in einem weiten Bereich beeinflussen.

Durch die kleine Eingriffsbreite ergeben sich beim Abrichten mit Formrollen im Gegensatz zu Profilrollen längere Abrichtzeiten. Andererseits aber sind die Beschaffungskosten der Diamantformrollen im Gegensatz zu Diamantprofilrollen unabhängig von der Schleifscheibenbreite, was insbesondere bei breiten Schleifscheiben Kostenvorteile für Diamantformrollen auch bei der Massenfertigung bringen kann [Schu96].

## 2.2 Diamantprofilrollen

Die Kinematik des Abrichtens mit Profilrollen ist in **Bild 6** dargestellt. Die wichtigsten Stellgrößen beim Abrichten mit Profilrollen sind:

- $f_{rd}$  : radialer Abrichtrollenvorschub pro Schleifscheibenumdrehung
- $q_d$  : Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis
- $n_{rd}$  : Ausrollumdrehungen



**Bild 6:** Kinematik des Abrichtens mit Profilrollen

Das Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis  $q_d$  ist das Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit der Abrichtrolle  $v_r$  zu der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe beim Abrichten  $v_{sd}$ . Das Vorzeichen des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses wird über die Geschwindigkeitsrichtungen der Wirkpartner im Abrichtkontaktpunkt definiert. Sind die Geschwindigkeitsrichtungen der Wirkpartner in der Kontaktzone gleich, so wird das Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis als positiv und das Abrichtverfahren als Gleichlauf bezeichnet. Sind die Geschwindigkeitsrichtungen der Wirkpartner in der Kontaktzone gegeneinander, so wird das Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis als negativ und das Abrichtverfahren als Gegenlauf bezeichnet.

Beim Abrichten mit Diamantabrichtrollen wird die Schleifscheibentopographie durch hintereinander liegende Eingriffe der Abrichtrolldiamanten erzeugt. Die Eingriffsbahnen der Abrichtdiamanten werden beim Abrichten mit Profilrollen durch  $f_{rd}$  und  $q_d$  bestimmt. Unter Annahme einer ideal rund laufenden Abrichtrolle lässt sich die Bahnkurve eines Peripheriepunktes der rotierenden Profilrolle im schleifscheibenfesten Koordinatensystem  $(x, y)$  nach Gleichungen 1 und 2 beschreiben. Der Winkel  $\varphi_{RO}$  beschreibt dabei den Ausgangswinkel des zu betrachteten Punktes [Harb97, Stuf96].

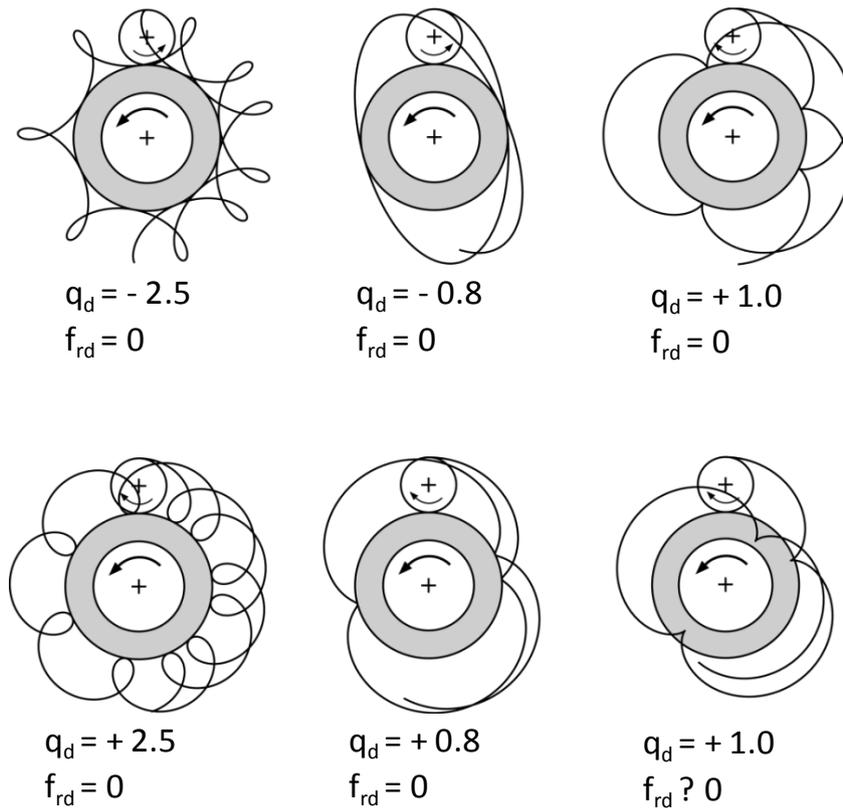
$$x = ((r_{SO} + r_{RO}) - f_{rd} \cdot \frac{\varphi_S}{2 \cdot \pi}) \cdot \cos \varphi_S - r_R \cdot \cos(\varphi_S \cdot (1 + q_d \cdot \frac{r_{SO}}{r_{RO}})) - \varphi_{RO} \quad \text{Gleichung 1}$$

$$y = ((r_{SO} + r_{RO}) - f_{rd} \cdot \frac{\varphi_S}{2 \cdot \pi}) \cdot \sin \varphi_S - r_R \cdot \sin(\varphi_S \cdot (1 + q_d \cdot \frac{r_{SO}}{r_{RO}})) - \varphi_{RO} \quad \text{Gleichung 2}$$

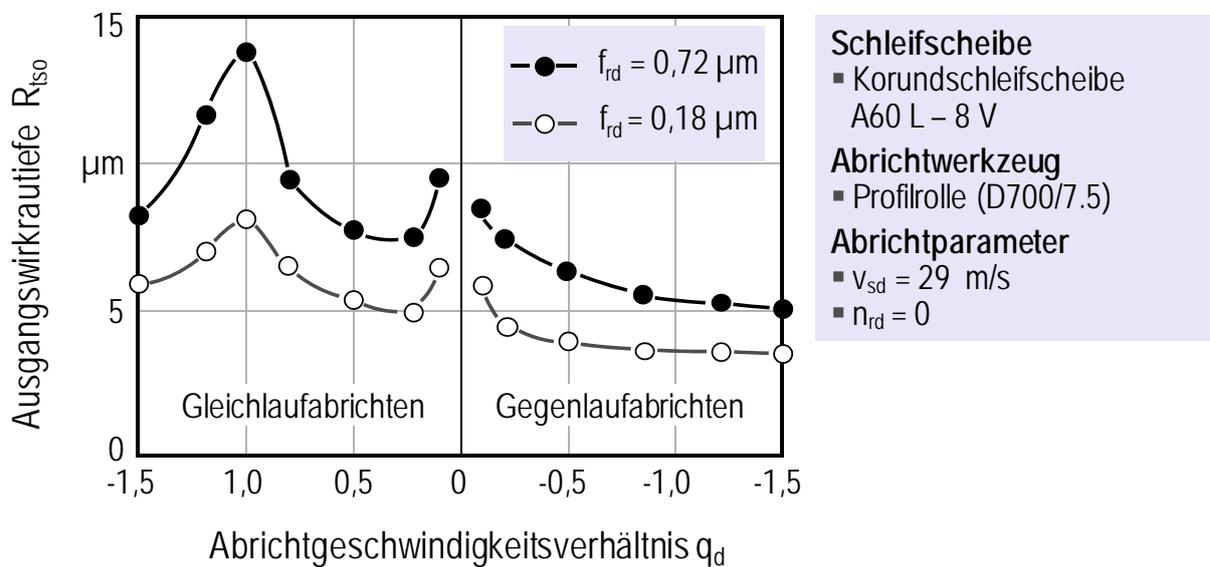
In **Bild 7** sind einige Beispiele für die Bahnkurve bei verschiedenen Werten von  $q_d$  und  $f_{rd}$  dargestellt. Wie aus diesem Bild hervorgeht, hat das Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis  $q_d$  einen dominanten Einfluss auf die Diamanteingriffsverhältnisse beim Abrichten mit Diamantabrichtrollen. Die Form der zyklidenähnlichen Eingriffbahnkurven, unter denen die Diamantkörner der Abrichtrolle auf die Schleifscheibenoberflächen treffen, ist abhängig vom Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis  $q_d$ . Für praxisübliche Werte von  $q_d$  ( $0,1 < |q_d| < 1$ ) sind die Eingriffsbahnen im Gleichlauf steiler als im Gegenlauf.

Die flacheren Diamanteingriffsbahnen und die daraus resultierende höhere Überdeckung der hintereinander folgenden Diamantkorneingriffe führen beim Gegenlaufabbrichten allgemein zu einer feineren Schleifscheibentopographie, welches sich in einer kleineren Anfangswirkrautiefe der Schleifscheibe niederschlägt (**Bild 8**). Eine Reduzierung des radialen Abrichtrollenvorschubs  $f_{rd}$  führt ebenfalls zu einer Reduzierung der Anfangswirkrautiefe [Sche73, Schm68, Stuf96].

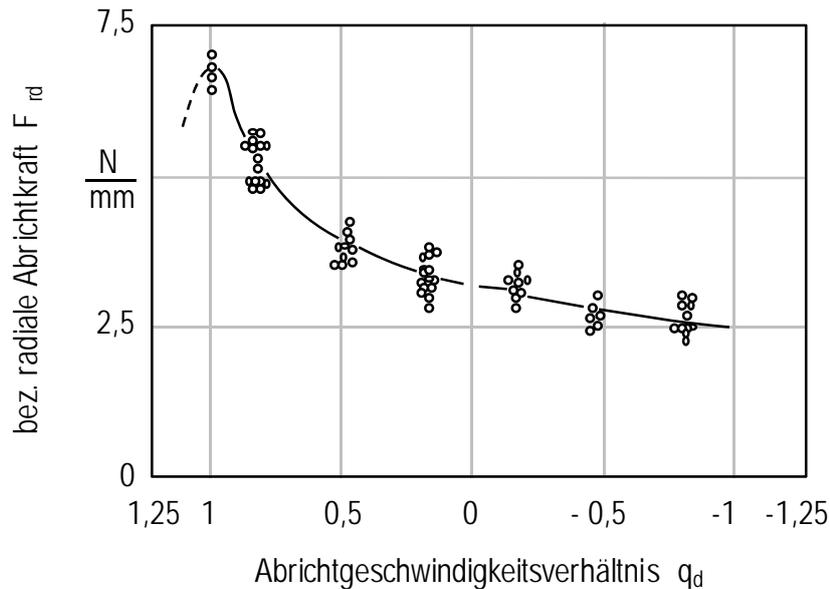
Wie aus Bild 8 hervorgeht, ermöglicht die Durchführung des Abrichtens im Gleichlauf, die Ausgangswirkrautiefe der Schleifscheibe in einem größeren Bereich zu variieren. Allerdings sind die Abrichtkräfte im Gleichlauf höher als im Gegenlauf (**Bild 9**), welche zu einem höheren Rollenverschleiß im Gleichlauf führen [Base08, Link07, Mink99, Schm68].



**Bild 7:** Beispiele für Eingriffsbahnen eines Peripheriepunktes einer Profilrolle [Harb97]



**Bild 8:** Einfluss der Stellgrößen  $q_d$  und  $f_{rd}$  auf die Anfangswirkrautiefe der Schleifscheibe beim Abrichten mit einer Profilrolle [Schm68]



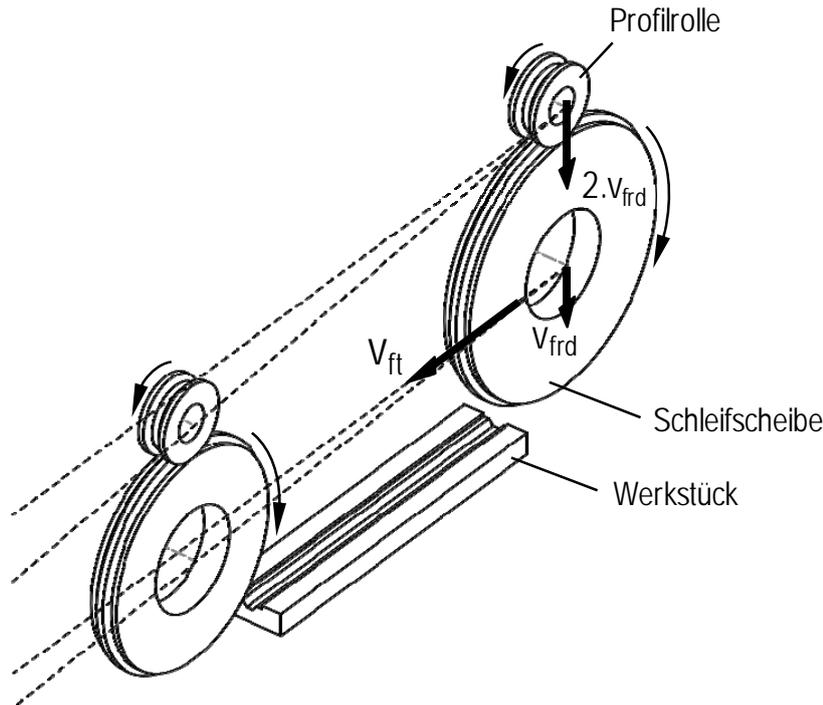
**Bild 9:** Bezogene radiale Abrichtkraft in Abhängigkeit von den Abrichtbedingungen beim Einsatz von Profilrollen [Sche73]

Beim Abrichten mit Profilrollen wird durch den Radial-Vorschub eine archimedische Spirale am Umfang der Schleifscheibe erzeugt, so dass nach dem sofortigen Abheben der Profilrolle ein Kreisformfehler etwa in der Größe des Vorschubbetrages zurückbleibt. Zur Vermeidung dieses Fehlers und zur Entspannung des Systems, sollte vor dem Abheben noch ein kurzes Ausrollen, das dem Ausfunken beim Schleifen entspricht, erfolgen. Darüber hinaus kann durch das Ausrollen der Rundlauffehler der Schleifscheibe, der sich durch den Rundlauffehler der Profilrolle ergibt, reduziert werden. Durch das Ausrollen nimmt dagegen die Ausgangsrautiefe der Schleifscheibe ab. Hierbei hängt die Veränderung der Schleifscheibentopographie von der Zahl der Ausrollumdrehungen  $n_{rd}$  ab. Wie aus dem Bild 8 hervorgeht, nimmt die Ausgangsrautiefe mit  $n_{rd}$ , insbesondere beim Gleichlaufabrichten, degressiv ab und nähert sich asymptotisch einem Grenzwert. Eine Anzahl der Ausrollumdrehungen über 100 ist nicht sinnvoll, da danach keine wesentliche Veränderung in der Ausgangsrautiefe der Schleifscheibe mehr erreicht wird [Schm68].

Die Ausbildung der Schleifscheibentopographie wird ebenfalls durch die Diamantkorngröße und -konzentration der Profilrolle beeinflusst. Eine Reduzierung der Diamantkorngröße bzw. eine Steigerung der Diamantkornkonzentration führt zu einer Reduzierung der Ausgangsrautiefe der Schleifscheibe.

Die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_{sd}$  gehört beim Abrichten mit Abrichtrollen zu frei verstellbaren Prozesseinstellgrößen. Der Abrichtprozess wird möglichst mit der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe beim Schleifen, nämlich mit der Schleifschnittgeschwindigkeit  $v_c$  des nachfolgenden Schleifprozesses, ausgeführt, damit die beim Abrichten und beim Schleifen durch die Zentrifugalkräfte eintretenden Schleifscheibenverformungen gleich bleiben.

Ein Sonderfall des Abrichtens mit Diamantprofilrollen ist das Abrichten während des Schleifens, kurz CD-Schleifen genannt (*CD: Continuous Dressing*). **Bild 10** zeigt das Prinzip des CD-Schleifens.



**Bild 10:** Prinzip des CD-Schleifens

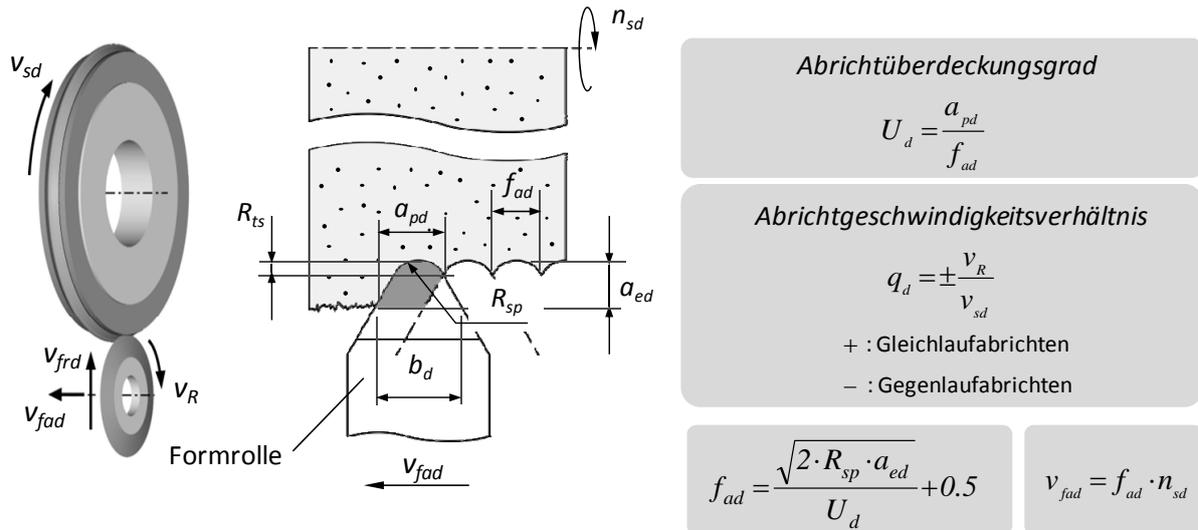
Beim CD-Schleifen weist die Schleifscheibe während des Schleifens immer ein genaues Profil und eine scharfe Schneidfläche auf. Das CD-Schleifen wird meistens für die Bearbeitung von schwer zerspanbaren Werkstoffen eingesetzt. Ein typisches Einsatzgebiet ist das Schleifen von Turbinenschaufeln aus hochwarmfesten Werkstoffen. Der Hauptvorteil des CD-Schleifens liegt in der stark reduzierten Fertigungszeit aufgrund des höheren erreichbaren bezogenen Zeitspannungsvolumens bei einer hohen Schleifqualität und -stabilität [Kloc05].

### 2.3 Diamantformrollen

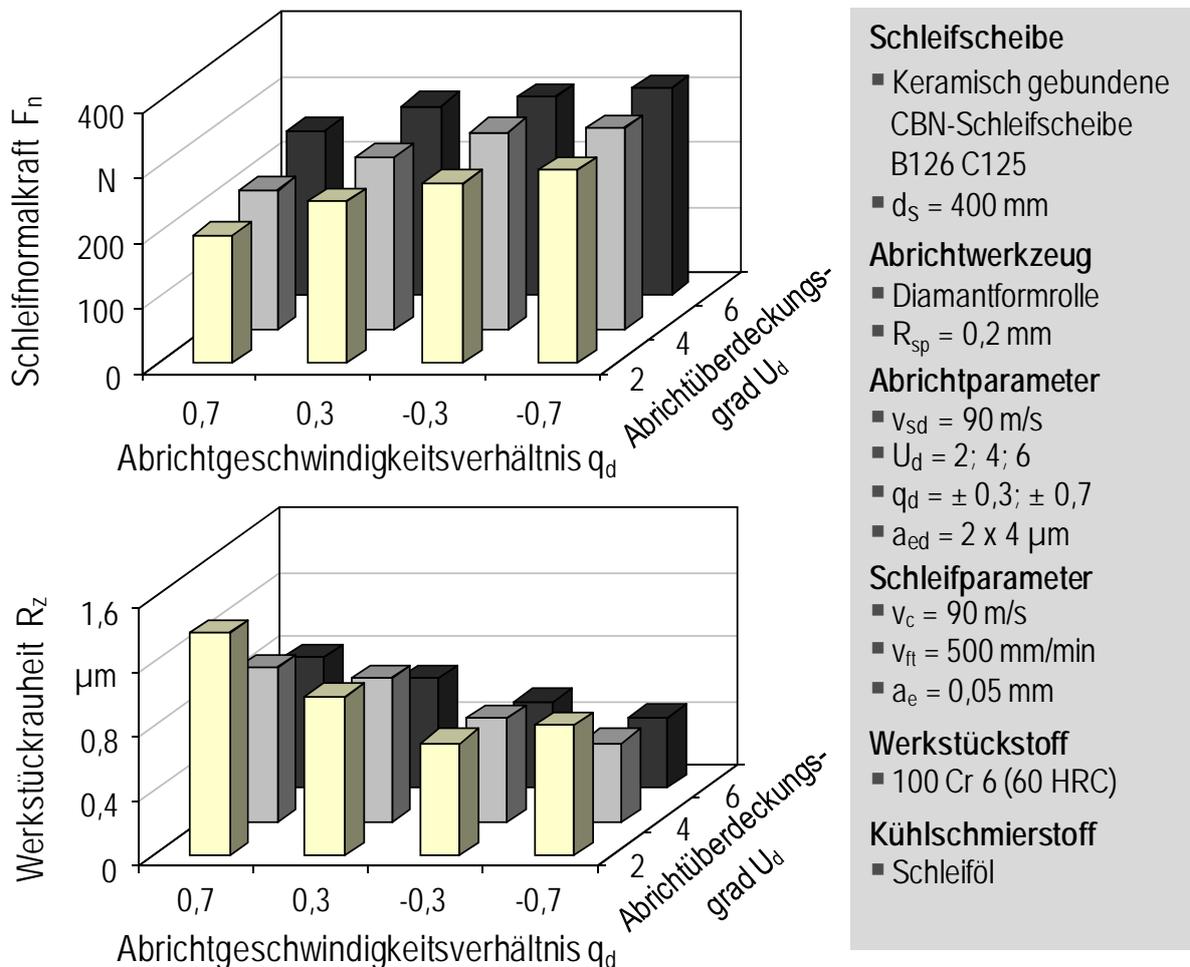
Das Wirkprinzip des Abrichtens mit Formrollen ist in **Bild 11** dargestellt. Ausgehend von der Prozesskinematik entstehen beim Abrichten mit Formrollen die folgenden Hauptstellgrößen:

- $q_d$  : Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis
- $U_d$  : Abrichtüberdeckungsgrad
- $a_{ed}$  : radiale Abrichtzustellung pro Abrichthub

Die Bahnkurve eines Punktes auf dem Umfang einer Formrolle kann ebenfalls wie beim Abrichten mit Profilrolle im schleifscheibenfesten Koordinatensystem  $(x, y)$  mathematisch als Epizykloide nach Gleichungen 1 und 2 mit  $f_{rd}=0$  beschrieben werden. Die Eingriffsbahnen sind wie beim Abrichten mit Profilrollen in dem praxisüblichen Bereich für  $q_d$  ( $0,1 < |q_d| < 1$ ) im Gleichlauf steiler als im Gegenlauf. Die Durchführung des Abrichtprozesses im Gegenlaufmodus führt daher zu feineren Schleifscheibentopographien mit der Folge höherer Schleifkräfte (**Bild 12**). In der Praxis werden keramisch gebundene CBN-Schleifscheiben daher überwiegend im Gleichlaufmodus abgerichtet, um die thermische Beschädigung des Werkstückes zu vermeiden.



**Bild 11:** Kinematik und Stellgrößen beim Abrichten mit Formrollen



**Bild 12:** Schleifkräfte und Werkstückrauheit in Abhängigkeit von Abrichtbedingungen beim Einsatz von Formrollen [Tawa10]

Eine wesentliche Stellgröße beim Abrichten mit Formrollen stellt der Abrichtüberdeckungsgrad  $U_d$  dar. Der Abrichtüberdeckungsgrad  $U_d$  ergibt sich aus dem Quotienten aus der Schnitteingriffsbreite der Abrichtformrolle  $a_{pd}$  und dem axialen Abrichtvorschub der Rolle pro Schleifscheibenumdrehung  $f_{ad}$ . Ein höherer Abrichtüberdeckungsgrad ergibt eine glattere Schleifscheibentopographie und damit eine kleinere Werkstückrauheit, aber auch höhere Schleifkräfte (s. Bild 12). Infolge einer hiermit verbundenen Zunahme der Temperaturen in der Schleifkontaktzone kann es zu Brandmarken kommen [Kloc05].

Die Abrichtzustellung  $a_{ed}$  beeinflusst ebenfalls die Ausbildung der Schleifscheibentopographie sowie den Abrichtrollenverschleiß. Beim Abrichten von hochharten CBN-Schleifscheiben liegt die Abrichtzustellung aufgrund der technologischen und wirtschaftlichen Gründe zwischen 2 bis 6  $\mu\text{m}$ . Untersuchungen zeigen, dass beim Abrichten mit einer Abrichtzustellung kleiner als 2  $\mu\text{m}$  die CBN-Körner nicht richtig absplitteln, was die Reduzierung der Schneidfähigkeit der Körner zur Folge hat [Tawa93]. Eine Verringerung der Abrichtzustellung führt zwar zu einer Verbesserung der Werkstückoberflächenqualität, hat jedoch infolge einer stärkeren Einebnung der Schleifscheibentopographie einen Anstieg der Schleifkräfte zur Folge und führt somit zu einer Reduzierung der möglichen Zeitspannungsvolumina [Schu96]. Die Erhöhung der Abrichtzustellungen führt zur Steigerung des Abrichtrollenverschleißes [Link07, Schu96].

Der Verschleiß einer Formrolle wird durch die Abrichtstellgrößen beeinflusst, wobei der Abrichtrollenverschleiß generell im Gleichlauf höher als im Gegenlauf ist. Das kann aufgrund höherer Prozesskräfte und daraus resultierend stärkerer Mikrosplitterung der Diamantkörner beim Gleichlaufabrichten entstehen. Eine Reduzierung von  $U_d$  sowie eine Erhöhung von  $a_{ed}$  kann auch über höhere Abrichtkräfte zu einer Erhöhung des Abrichtrollenverschleißes führen. Darüber hinaus wird der Abrichtrollenverschleiß auch von der Schleifscheibenkorngröße beeinflusst. Beim Abrichten von hochharten CBN-Schleifscheiben tritt bei einer grobkörnigeren Schleifscheibe ein höherer Abrichtrollenverschleiß auf [Schu96].

### 3 Problemdarstellung und Zielsetzung

Wie bereits erwähnt, werden heutzutage komplexe hochpräzise Schleifscheibenprofile ausschließlich mit hochwertigen Diamantprofil- oder Diamantformrollen abgerichtet. Allerdings stellt jedes dieser Abrichtwerkzeuge einige Nachteile dar, die die Fertigungsqualität und -wirtschaftlichkeit bei deren Einsatz negativ beeinflussen. Die Diamantformrollen sind flexibler als die Diamantprofilrollen und führen hinsichtlich kleiner Kontaktlängen zu niedrigeren Abrichtkräften und -temperaturen. Diamantprofilrollen zeichnen sich dagegen durch sehr kurze Abrichtzeiten aus. Allerdings sind die Profilrollen weniger flexibel und führen aufgrund der bei deren Einsatz auftretenden größeren Abrichtkontaktfläche zu höheren Abrichtkräften und -temperaturen, wodurch neben größeren Rollenverformungen und daraus resultierenden Profilungenauigkeiten starke Verschleißausbildung an den äußerst teuren Diamantprofilrollen auftritt.

***Derzeit existiert hinsichtlich der Nachteile der konventionellen Abrichtverfahren und -werkzeuge immer noch ein hoher Bedarf an der Entwicklung neuer Verfahren bzw. Werkzeuge zum Abrichten von komplexen hochpräzisen Schleifscheibenprofilen, welche in Genauigkeit und Aufwand die heutigen Ansprüche an die Präzisionsfertigung erfüllen können.***

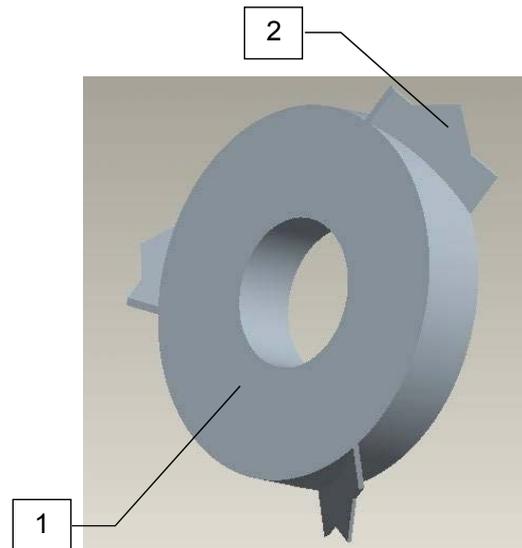
Das innovative Abrichtwerkzeug „T-Dress“ ist eine neu entwickelte Abrichtrolle, die die Vorteile von Abrichtprofilrolle und Abrichtformrolle kombiniert und damit neue Wege zum Abrichten bei kurzen Abrichtzeiten mit niedrigeren Abrichtkräften und -temperaturen durch Punktkontakt ermöglicht. Die ersten Untersuchungen mit T-Dress stellen das höhere Potential zur Steigerung der Schleifprozesseffizienz durch diese neue Erfindung dar. Zu einer erfolgreichen Einführung des T-Dress in die Industrie besteht allerdings der Bedarf an einer Weiterentwicklung des T-Dress-Konzeptes. Das Ziel des Vorhabens besteht darin, durch systematische Untersuchungen die wichtigsten Fragen zu einer Einführung des T-Dress zu erklären und damit den industriellen Einsatz der neuen Erfindung zu ermöglichen. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sollen nicht nur zur Optimierung des neuen Abrichtwerkzeuges eingesetzt werden, sondern sie sollen potentiellen Anwendern zur Verfügung gestellt werden.

#### 4 Aufbau und Prinzip der T-Dress-Rolle

Beim T-Dress handelt es sich um ein rotierendes Abrichtwerkzeug, das wie eine Abrichtprofilrolle funktioniert, wobei der Kontakt zwischen Abrichtwerkzeug und Schleifscheibe im Gegensatz zu konventionellen Abrichtprofilrollen nicht an einer Linie sondern theoretisch nur an einem Punkt stattfindet. Die Abrichtkräfte und die daraus resultierenden Verformungen und Wärmeentwicklungen sind daher bei T-Dress-Rollen niedriger als bei konventionellen Abrichtprofilrollen, was zu einer Steigerung der Fertigungsqualität führt. Außerdem ist die Herstellung dieses Werkzeuges erheblich einfacher, wodurch eine signifikante Reduzierung der Fertigungskosten erreicht werden kann.

Das **Bild 15** zeigt den prinzipiellen Aufbau des neuen Profilabrichtwerkzeuges mit Punktkontakt. Es besitzt einen metallischen Abrichtkörper [1]. Auf den Abrichtkörper kommen ein oder mehrere gewendelte, komplett oder an der Spitze aus aus Diamanten bestehende Profilabrichter [2], die das Negativprofil der Schleifscheibe aufweisen. Die Profilabrichter sind nicht parallel zur Achse des Abrichtkörpers; sondern mit einem definierten Winkel zur Achse des Abrichtkörpers auf dessen Umfang befestigt. Es gibt auch die Möglichkeit, die Profilabrichter nur an ihrer Spitze mit Diamant- oder CBN-Belägen zu beschichten. Selbstverständlich muss bei der Befestigung der Profilabrichter mit dem Abrichtkörper eine hohe Steifigkeit des Systems gewährleistet sein.

Aufgrund der speziellen Anordnung der Profilabrichter kommt bei einem Eingriff eines Profilabrichters mit der Schleifscheibenoberfläche zunächst der Anfangspunkt des Profilabrichters in Kontakt mit der Schleifscheibe. Bei der Weiterumdrehung der T-Dress-Rolle verschiebt sich der Kontaktpunkt auf dem Profilabrichter vom Anfangspunkt zum Endpunkt des Profilabrichters, sodass theoretisch immer nur ein einzelner Punkt des Profilabrichters in Kontakt mit der Schleifscheibenoberfläche steht. Durch dieses Punktkontaktprinzip bleiben die Abrichtkräfte und die daraus resultierenden Verformungen und Wärmeentwicklungen beim Abrichten mit einer T-Dress-Rolle überaus klein.



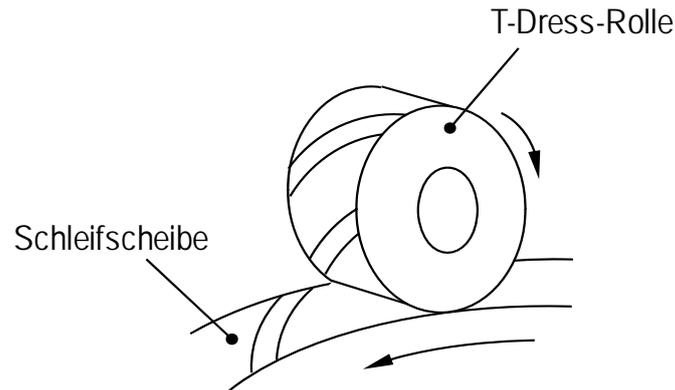
**Bild 15:** Prinzipieller Aufbau der T-Dress-Rolle

Neben dem Punktkontakt liegt ein weiterer Vorteil des T-Dress in der größeren Länge des Profils des Profilabrichters im Vergleich zu dem tatsächlichen Werkstück- und Schleifscheibenprofil. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Auf einem Werkstück soll ein V-Profil mit steilen Flanken angebracht werden. Also muss das Abrichtwerkzeug ein ähnliches Profil besitzen. Der Profilabrichter [2] wird mit einem Winkel von z.B. 30 Grad auf dem Abrichtkörper angebracht. Wegen der Wendel und der Schräge des Profilabrichters wird die Länge des Profilabrichters zweimal so groß wie die Breite der Abrichtrolle bzw. die Breite der abzurichtenden Schleifscheibe. Das bedeutet, dass der Abstand der Flanken des V-Profiles ebenfalls zweimal größer als das tatsächliche Profil ist. Auch die Radien des V-Profiles sind doppelt so groß wie die des tatsächlichen Profils. Diese größeren Abstände und Radien sind zum einen einfacher auf dem Profilabrichter zu erzeugen und zum anderen begünstigen sie auch den Abrichtprozess, vor allem bei Schleifscheiben mit steilen Flanken und kleinen Radien.

Eine Variation des T-Dress ist ein Abrichtkörper mit mehreren Belag-Segmenten, die z.B. galvanisch positiv oder negativ hergestellt werden können (**Bild 16**).



**Bild 16:** Variante des T-Dress mit mehreren schrägen Segmenten



**Bild 17:** Schematische Darstellung der Strukturierung einer Schleifscheibe mit einer T-Dress-Rolle

Als positive Eigenschaften für den T-Dress sind kleinere Fertigungskosten, kurze Abrichtzeiten, geringere und gleichmäßiger wirkende Abrichtkräfte, niedrigere Schleifkräfte und geringere Wärmeentwicklung beim Abrichten und Schleifen zu nennen.

T-Dress kann auch zu einer gezielten Strukturierung der Schleifscheiben eingesetzt werden. Wie bereits erwähnt, existiert derzeit ein großes Interesse an der Herstellung von funktionalen Oberflächenstrukturen mit den strukturierten Schleifscheiben (**Bild 17**). Durch den beim Einsatz des T-Dress auftretenden unterbrochenen Schnitt wird eine spezielle Makrotopographie auf der Schleifscheibe erzeugt, die nicht nur die Schleifspanbildung begünstigt und damit einen Schleifprozess mit niedrigeren Kräften und geringeren Temperaturen erlaubt, sondern auch die Erzeugung von funktionalen Oberflächenstrukturen ermöglicht.

## 5 Versuchsanordnung und Messtechnik

### 5.1 Versuchsmaschine

Die experimentellen Untersuchungen zum ultraschallunterstützten Abrichten wurden auf einer CNC-Flachschleifmaschine vom Typ „MICRO-CUT AC 8 CNC“ der Firma ELB-Schliff Werkzeugmaschinen GmbH, Babenhausen, durchgeführt (**Bild 18**). Ihre technischen Daten sind in **Tabelle 1** angegeben. Die Maschine verfügt über eine CNC-Steuerung vom Typ „Sinumerik 840D“ der Firma Siemens, die die Bearbeitung komplexester Aufgaben gewährleistet.



**Bild 18:** Versuchsmaschine Typ „MICRO-CUT AC 8 CNC“ der Firma ELB-Schliff Werkzeugmaschinen

**Tabelle 1:** Technische Daten der Versuchsmaschine

<i><b>Kenngröße</b></i>	<i><b>Wert</b></i>
maximale Schleifspindelleistung	85 kW
maximale Schleifspindeldrehzahl	7500 min <sup>-1</sup>
maximale Schleifscheibenabmessungen D x B x d	500 x 100 x 127 mm
programmierbare Tischgeschwindigkeit	2 bis 26 m/min
Schleifbereich Länge x Breite x Höhe	800 x 600 x 400 mm
maximale zulässige Tischbelastung	1.000 kg
CNC-Steuerung	Sinumerik 840D

Als Führungssystem sind in allen drei Maschinenachsen (X, Y, Z) Wälzlinearführungen, die sich durch eine hohe Tragkraft und Steifigkeit auszeichnen. Zusätzlich sind die bei den Gleitführungen auftretenden Stick-Slip-Effekte nicht vorhanden. Somit erhöht sich die Positioniergenauigkeit. Das Maschinenbett besteht aus Micro-Granitan, einem Polymerbeton, der sich durch eine hervorragende Schwingungsdämpfung und eine hohe Thermostabilität auszeichnet.

Der Antrieb des Arbeitstisches, sowie die Verstellung der Vertikal- und Querachse erfolgt elektro-mechanisch mittels Kugelumlaufspindeln und regelbaren AC-Servomotoren. Als Wegmeßsystem werden in der Y- und Z-Achse Linearmaßstäbe und in der X-Achse (Arbeitstisch) ein Drehgeber verwendet. Der Schleifspindeltrieb erfolgt über einen 85 kW AC-Asynchronmotor mit stufenlos regelbarem Drehzahlbereich und konstanter Schnittgeschwindigkeit.

## 5.2 Schleifscheiben

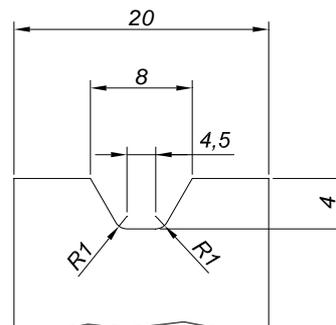
Für die Untersuchungen wurden eine keramisch gebundene CBN-Schleifscheiben B126 C125 und zwei unterschiedliche Korundschleifscheiben mit der geometrischen Form 14A1 nach FEPA eingesetzt (**Bild18**).



**Bild 18:** Eingesetzte Schleifscheiben bei den Untersuchungen; Links: keramisch gebundene CBN Schleifscheibe B126 C125; Rechts: Korundschleifscheiben F13A60FF21V und A120F8VP (70% EKW und 30% Sinterkorund)

## 5.3 Diamantabrichtrolle

Zur Durchführung der Untersuchungen wurden 4 Diamantrolle eingesetzt: 2 konventionelle und 2 T-Dress-Rollen. Eine konventionelle und zwei T-Dress-Rollen weisen das im **Bild 19** dargestellte Profil auf; die anderen Diamantrollen sind zylindrisch mit einer Breite von 30 mm und wurden hauptsächlich bei der Ermittlung der Abrichtkräfte und des Abrichtwerkzeugverschleißes eingesetzt. Zur Ermittlung des Einflusses des Fertigungsverfahrens auf das Einsatzverhalten der T-Dress-Rolle werden die T-Dress-Rollen sowohl mit galvanisierten Segmenten als auch mit Profilabrichtern aus Diamantplätzchen gefertigt. Die verwendeten Diamantrollen sind in **Tabelle 2** aufgelistet.



**Bild 19:** Profil der Diamantprofilrollen

**Tabelle 2:** Verwendete Diamantabrichtrolle

Werkzeugnummer	Typ der Rolle	Diamantierung	Abmessungen	Foto
1	zylindrisch konventionell	galvanisch gebunden D427	120 x 30 x 52	
2	zylindrische T-Dress-Rolle	galvanisch gebunden D427	120 x 30 x 52	
3	konventionelle Profilrolle	galvanisch gebunden D427	120 x 20 x 52	
4	T-Dress-Profilrolle	galvanisch gebunden D427	120 x 20 x 52	

#### 5.4 Versuchswerkstoff

Bei den Untersuchungen zum CD-Schleifen wurde als Versuchswerkstoff IN 718 - die eine Nickel-Basis-Superlegierung (Werkstoffnummer: 2.4668) - verwendet. Die Nickel-Basis-Superlegierungen werden aufgrund ihrer hohen Korrosionsbeständigkeit, Kriech- und Ermüdungsfestigkeit häufig in Bereichen mit extrem hoher Temperaturbelastung eingesetzt. Verdichter- und Turbinenschaufeln oder Brennkammern in Gasturbinen sind typische Einsatzbereiche. Aufgrund der hohen Wärmeentwicklung und der daraus resultierenden

erheblichen Temperaturerhöhung in der Prozesskontaktzone (bis etwa 1400° C) beim Schleifen dieser Materialien, die zu starken thermischen Beschädigungen führen kann, werden diese Materialien als schwer zerspanbare Werkstoffe bezeichnet. Daher ist die Verbesserung des Schleifens dieser Werkstoffe mit T-Dress-Rollen von großem Interesse. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes ist **Tabelle 3** zu entnehmen.

**Tabelle 3:** Chemische Zusammensetzung von IN 718 (2.4668) [Quelle: NISOMET GmbH]

C	Cr	Mo	Ni	Fe
0,05%	17-21%	2,8-3,3%	50-55%	Rest

Bei den Untersuchungen zum Tiefschleifen wurde als Versuchswerkstoff 60 HRC durchgehärteter Wälzlagerstahl 100Cr6 (1.3505) verwendet. Hierbei handelt sich um einen übereutektoiden Vergütungsstahl mit einem feinen und sehr gleichmäßigen Gefüge, der überwiegend zur Herstellung von Bauteilen hoher Beanspruchung Verwendung findet (wobei eine gute Steifigkeit und eine hohe Verschleißfestigkeit erforderlich ist, wie z. B. Wälzkörper und Lagerringe). Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes ist in **Tabelle 4** dargestellt.

**Tabelle 4:** Chemische Zusammensetzung von 100Cr6 (1.3505)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,93 – 1,05%	0,15 - 0,35%	0,25 - 0,45%	0,025%	0,015%	1,35 - 1,60%

## 5.5 Kühlschmierung

Bei den Untersuchungen wurde eine 5%-ige Emulsion eines Produktes der Firma Blaser Swisslube AG, Hasle-Rüegsau (Schweiz), mit der Bezeichnung B-Cool 9665 eingesetzt, dessen technischen Daten in **Tabelle 5** dargestellt sind. Er ist ein wassermischbarer, chlorfreier, halbsynthetischer Kühlschmierstoff mit niedrigem Mineralölgehalt. Das Produkt zeichnet sich durch seine hohe Schneidleistung, Schaumarmut in Hart- und Weichwasser, gute Stabilität und geringen Verbrauch aus.

Die Kühlschmierstoffzuführung wurde durch Freistrahldüsen und mit einem konstanten Druck und Volumenstrom erfolgt.

**Tabelle 5:** Technische Daten des eingesetzten Schleiföls

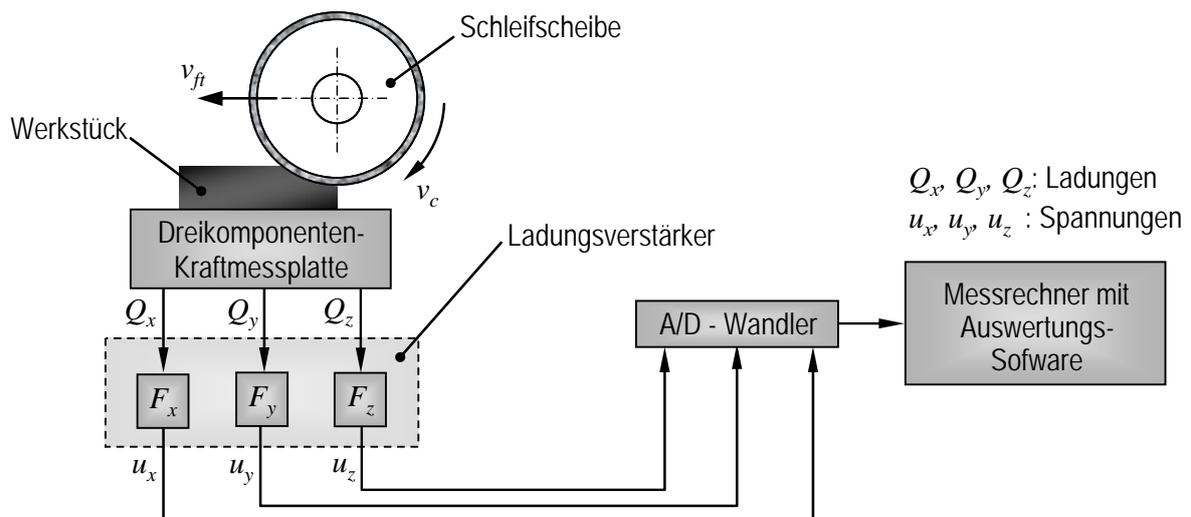
<i>Eigenschaft</i>	<i>Einheit</i>	<i>Wert</i>
Basis	-----	14% Mineralöl
Dichte bei 20°C	g/cm <sup>3</sup>	1,01
Kinem. Viskosität bei 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	59
Flammpunkt	°C	136

## 5.6 Mess- und Analysetechnik

### 5.6.1 Kraftmesssystem

Die Schleifkräfte lassen sich in eine Normalkraft  $F_n$  und eine Tangentialkraft  $F_t$  aufteilen. Diese Prozesskräfte müssen als signifikante Messgrößen bei jedem Schleifversuch ermittelt werden, da sie in unmittelbarem Zusammenhang mit der Topographie des Schleifscheibenbelags stehen und daher Rückschlüsse auf die Schleifergebnisse zur Verfügung stellen können.

Zur Ermittlung der Schleifkräfte wurde ein selbstgebautes Dreikomponenten-Kraftmeßsystem in Form einer Messplatte, die bei der Durchführung der Versuche unter dem Versuchsteil liegt, verwendet. Dieses besteht aus vier piezoelektrischen Mehrkomponentenkraftaufnehmern vom Typ 93366BB der Firma Kistler AG, Winterthur (Schweiz). Die auf die Kraftmessplattform einwirkenden Kräfte werden mittels Piezosensoren proportional zur Kraft in Ladung umgewandelt. Die Ausgänge der vier Sensoren werden in der Summierbox zusammengefasst und dann über Ladungsverstärker vom Typ 5015A ebenfalls von der Firma Kistler in eine Ausgangsspannung von -10V bis +10V umgewandelt. Die Aufbereitung der Messwerte für die Auswertung am PC erfolgt durch eine Analog-/Digitalwandlerkarte. Mit Hilfe eines Auswertungsprogramms können dann die Signale in einem Rechner graphisch dargestellt und ausgewertet werden. Das Blockschaltbild der Kraftmesseinrichtung ist in **Bild 20** dargestellt.



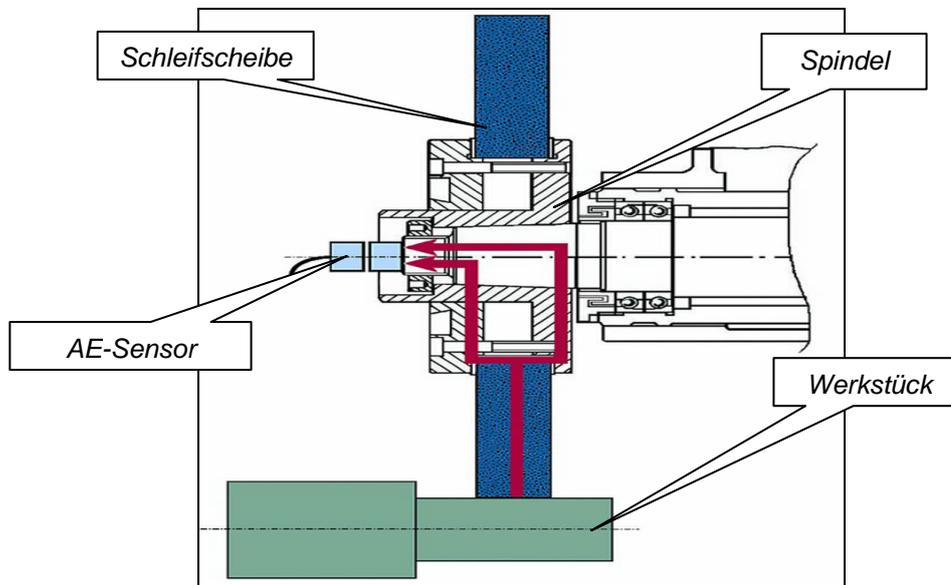
**Bild 20:** Blockschaltbild der Kraftmesseinrichtung

### 5.6.2 Acoustic Emission System

Zur Überwachung des Abricht- und Schleifprozesses wurde ein Acoustic Emission Sensor vom Typ „M“ der Firma Walter Dittel GmbH, Landsberg, eingesetzt, wobei die auftretenden Schallemissionen direkt auf der Maschinenspindel sensorisch erfasst werden (**Bild 21**). Der Sensor besteht aus einem Sender, der drehfest auf der Spindel montiert ist, und einem Empfänger, der ortsfest mit geringem axialem Abstand zum Sender (ca. 1 mm) angeordnet wird. Die Übertragung des AE-Signals von dem rotierenden Sender in den statischen Empfänger erfolgt mittels einer induktiven kontaktlosen Signalübermittlung.

Der Vorteil dieses Sensors liegt in der einfachen Montage und dem relativ guten Stör/Nutzsignal-Verhältnis, da der Sensor die AE-Signale direkt auf der rotierenden Welle

der Spindel aufnimmt. Darüber hinaus ist er relativ resistent gegen Störeinflüsse, da das Signal bei der Übertragung vom drehenden Aufnehmer auf den feststehenden Empfänger verstärkt wird. Außerdem ist die Sensorik kühlenschmiermittelresistent und drehzahlunabhängig. Nachteilig ist der relativ große Abstand zur Schallquelle, der sich durch die Anordnung der Sensoren auf der Spindelachse ergibt, wobei im Frequenzspektrum ein Grundrauschen entsteht, das aus Lagergeräuschen resultiert.



**Bild 21:** Anordnung des AE-Sensors auf der rotierenden Spindel [Quelle: Fa. Dittel]

Das Signal des auf der Schleifspindel montierten AE-Sensors wird durch die elektronische Auswerteinheit vom Typ „AE4100-1“ ebenfalls der Firma Walter Dittel GmbH verstärkt, gefiltert und gleichgerichtet. Mit Hilfe des Programms „WinControl“ der Firma Dittel kann die AE-Kurve graphisch dargestellt, ausgewertet und gespeichert werden.

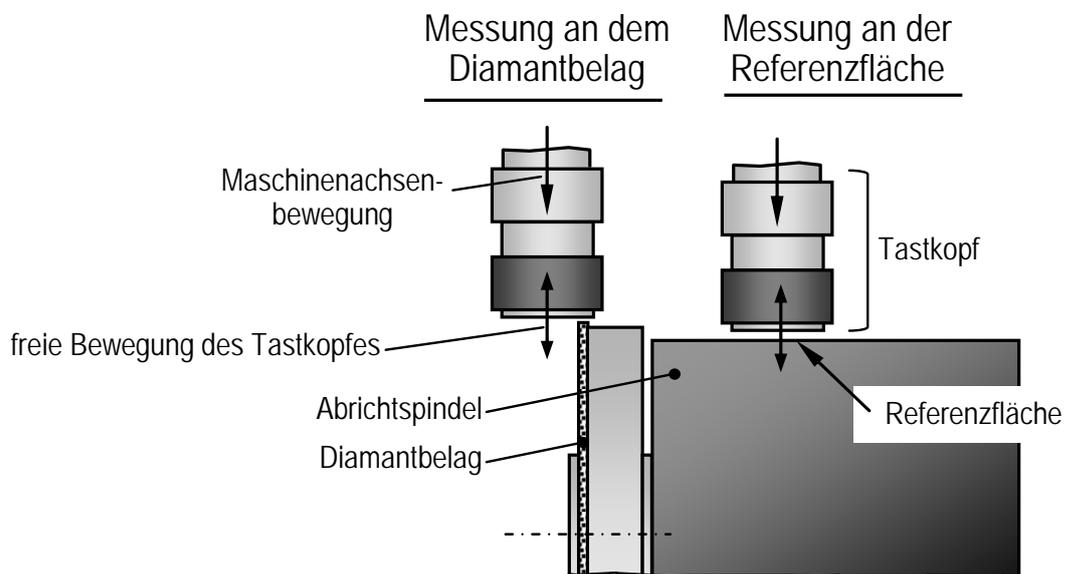
### 5.6.3 Erfassung der Oberflächenstruktur

Zur Rauheitsmessung wurde das stationäre und voll automatisierte Messsystem vom Typ „Wavesystem™ Hommel Tester T8000“ der Firma Hommel-Etamic GmbH, Villingen-Schwenningen, eingesetzt. Die Messungen wurden nach dem Tastschnittverfahren mit einem Taststab Typ TS1T 5/90 des gleichen Herstellers durchgeführt, dessen Diamantnadel einen Spitzenwinkel von 90° und einen Spitzenradius von 5 µm aufweist. Beim Tastschnittverfahren wird das Profil einer Oberfläche zweidimensional erfasst und das Rauheitsprofil sowie das Welligkeitsprofil durch eine Filterung aus dem Primärprofil ermittelt. Die auf Windows basierende Auswertesoftware „Turbo Rauheit“ erlaubt die Erfassung, Analyse und Auswertung, sowie die Darstellung und Archivierung der Messwerte und Kenngrößen.

### 5.6.4 Ermittlung des Abrichtwerkzeugverschleißes

Die Ermittlung des Verschleißes der Abrichtwerkzeuge erfolgt durch tastende Messung mittels des in die Schleifmaschine integrierten Werkzeugtasters vom Typ „Z-Nano HP“ der Firma Blum-Novotest GmbH, Ravensburg. Dieses Messsystem basiert auf einem optoelektronischen Messprinzip und erlaubt eine präzise automatische Messung mit einer

Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ . Bei Messungen wird der Tastkopf des Messsystems, der auf einer integrierten Linearführung gelagert und dadurch frei von Querkräften ist, durch die Bewegung der Maschinenachsen in die Messrichtung betätigt. Beim Ankommen des Tastkopfes auf den Referenzpunkt des Messsystems wird ein Ausgangssignal an die CNC-Steuerung der Schleifmaschine geliefert, wobei die CNC-Steuerung die Bewegung der Maschine anhält. Durch das Ablesen der Maschinenachsenposition kann dann der Verschleiß erfasst werden. Um den Einfluss von thermisch bedingten Verlagerungen des Maschinensystems zu kompensieren, wird der Verschleiß des Abrichtwerkzeuges durch eine Differenzmessung zu einer Referenzfläche erfasst. Der Messvorgang bei der Erfassung des Abrichtrollenverschleißes ist in **Bild 22** dargestellt. Bei der Erfassung des Radialverschleißes an der Ultraschall-Spindel wurde die Differenzmessung an 34 Stellen des Diamantbelages durchgeführt und anschließend wurde der Radialverschleiß als der Durchschnitt der Messwerte berechnet.



**Bild 22:** Messvorgang bei der Ermittlung des Abrichtrollenverschleißes

## 6 Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die Bedingungen und Ergebnisse der durchgeführten technologischen Untersuchungen zur Bewertung des Einsatzverhaltens der T-Dress-Rollen beim CD- und Tiefschleifen erläutert.

### 6.1 Versuchsbedingungen

Zur Realisierung der Untersuchungen wurden folgende vorbereitende Arbeiten durchgeführt:

- Konstruktion und Bestellung von Diamantprofilrollen
- Auslegung und Bestellung von Schleifscheiben
- Anfertigung von Testwerkstücken
- Detaillierte Versuchsplanung
- Vorbereitung der Messvorrichtungen zur Kraft- und Rollenverschleißmessung

Zur Bewertung des Einsatzverhaltens vom T-Dress bei verschiedenen Schleifverfahren wurden zwei unterschiedliche Untersuchungsreihen durchgeführt: Untersuchungen zum CD-Schleifen und Untersuchungen zum Langzeit-Tiefschleifen. Bei den Untersuchungen zum Langzeit-Tiefschleifen wurde eine CBN-Schleifscheibe und bei den Untersuchungen zum CD-Schleifen eine Korundschleifscheibe eingesetzt. Als Bewertungsgröße für die Untersuchungen wurden die Schleifkräfte und die Werkstückrauheit, sowie punktuell der Rollenverschleiß und die Abrichtkräfte gemessen.

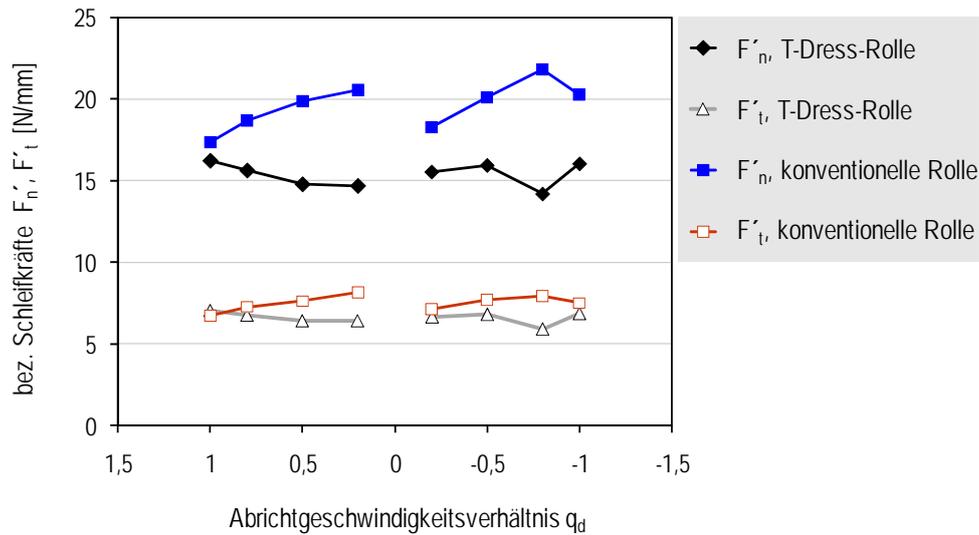
### 6.2 Schleifkräfte beim CD-Schleifen mit der konventionellen und T-Dress-Rollen

Die **Bilder 22-24** zeigen die bezogenen Schleifkräfte beim CD-Schleifen von der Nickel-Basis-Superlegierung IN 718 mit der konventionellen galvanisch gebundenen Diamantprofilrolle D427 und der galvanisch gebundenen T-Dress-Profilrolle (Werkzeug Nr. 3 und 4 nach der Tabelle 2) in Abhängigkeit vom Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis. Die Untersuchungen in diesen Bildern unterscheiden sich voneinander nur in Abricht radialvorschub  $f_{rd}$  oder Schleifvorschubgeschwindigkeit  $v_{ft}$ .

Die dargestellten Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

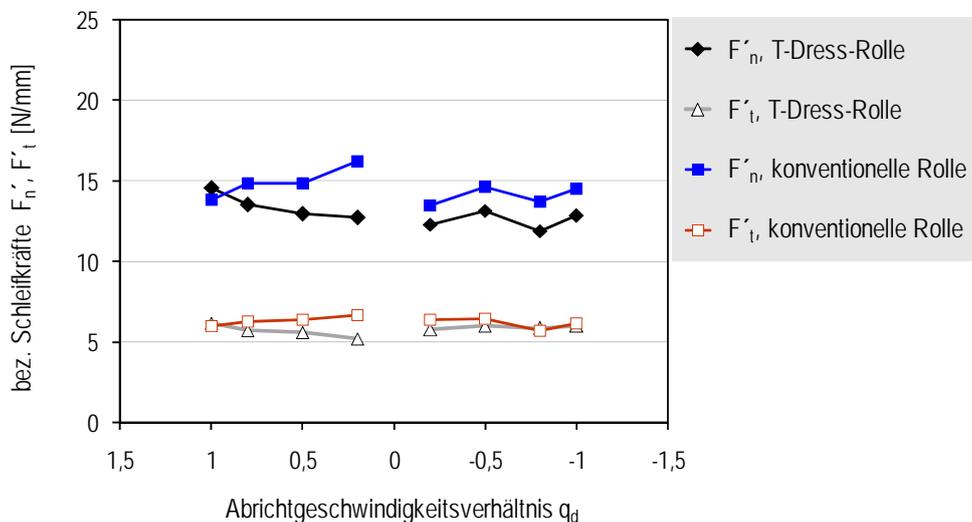
- Beim CD-Schleifen einer Nickel-Basis-Superlegierung wie IN 718 lässt sich im Gegensatz zum Schleifen von Stahllegierungen keine allgemeingültige Aussage bezüglich der Beeinflussung des Schleifprozesses durch den Abrichtmodus – sowohl beim CD-Schleifen mit einer konventionellen Rolle, als auch bei dem mit einer T-Dress-Rolle – treffen.
- Eine Erhöhung des Abricht radialvorschubs führt insbesondere beim CD-Abrichten mit der konventionellen Rolle zu einer Reduzierung der Schleifkräfte (vgl. Bilder 22 und 23).
- Eine Reduzierung der Relativgeschwindigkeit zwischen Abrichtrolle und Schleifscheibe im Gleichlaufabrichtmodus führt beim CD-Schleifen mit der konventionellen Diamantprofilrolle zu einer Reduzierung und beim CD-Schleifen mit der T-Dress-Profilrolle zu einer Erhöhung der Schleifkräfte.

<b>Schleifverfahren</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>CD-Schleifen</li> </ul>	<b>Abrichtwerkzeug</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>konventionelle galvanisch gebundene Diamantprofilrolle D427</li> <li>galvanisch gebundene T-Dress-profilrolle D427</li> </ul>	<b>Werkstückstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>IN 718</li> </ul>
<b>Schleifscheibe</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Korundscheifscheibe F13A60FF21V</li> </ul>	<b>Abrichtparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_{sd} = 22 \text{ m/s}</math></li> <li><math>f_{rd} = 0,5 \mu\text{m/Umd.}</math></li> <li><math>q_d = \pm 0,2; \pm 0,5; \pm 0,8; \pm 1,0</math></li> </ul>	<b>Kühlschmierstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Emulsion (5%-ig)</li> </ul>
<b>Schleifparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_c = 22 \text{ m/s}</math></li> <li><math>v_{ft} = 900 \text{ mm/min}</math></li> <li><math>a_e = 0,5 \text{ mm}</math></li> </ul>		



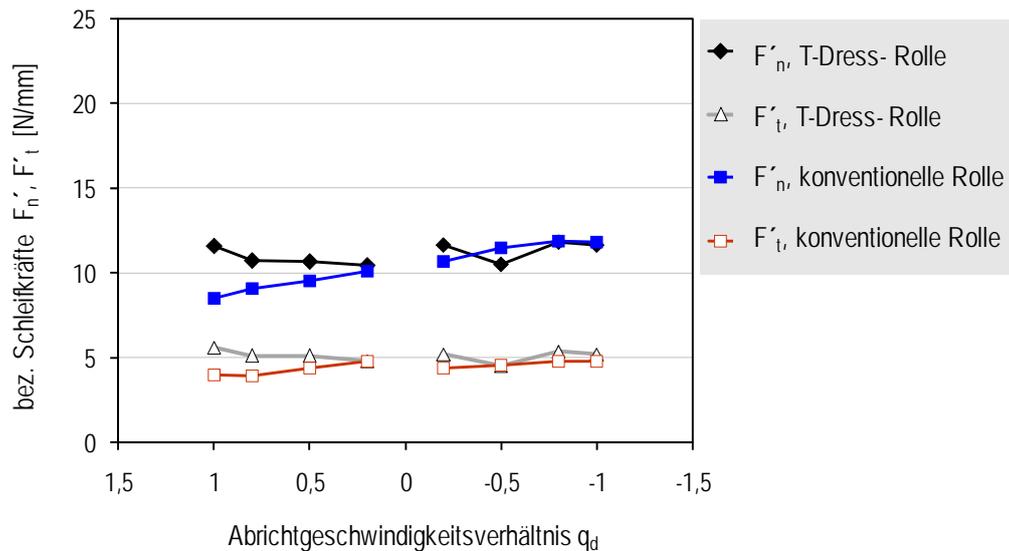
**Bild 22:** Schleifkräfte beim CD-Schleifen mit  $f_{rd} = 0,5 \mu\text{m/U}$  und  $v_{ft} = 900 \text{ mm/min}$

<b>Schleifverfahren</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>CD-Schleifen</li> </ul>	<b>Abrichtwerkzeug</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>konventionelle galvanisch gebundene Diamantprofilrolle D427</li> <li>galvanisch gebundene T-Dress-profilrolle D427</li> </ul>	<b>Werkstückstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>IN 718</li> </ul>
<b>Schleifscheibe</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Korundscheifscheibe F13A60FF21V</li> </ul>	<b>Abrichtparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_{sd} = 22 \text{ m/s}</math></li> <li><math>f_{rd} = 1,5 \mu\text{m/Umd.}</math></li> <li><math>q_d = \pm 0,2; \pm 0,5; \pm 0,8; \pm 1,0</math></li> </ul>	<b>Kühlschmierstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Emulsion (5%-ig)</li> </ul>
<b>Schleifparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_c = 22 \text{ m/s}</math></li> <li><math>v_{ft} = 900 \text{ mm/min}</math></li> <li><math>a_e = 0,5 \text{ mm}</math></li> </ul>		



**Bild 23:** Schleifkräfte beim CD-Schleifen mit  $f_{rd} = 1,5 \mu\text{m/U}$  und  $v_{ft} = 900 \text{ mm/min}$

<b>Schleifverfahren</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>CD-Schleifen</li> </ul>	<b>Abrichtwerkzeug</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>konventionelle galvanisch gebundene Diamantprofilrolle D427 (Werkzeug Nr. 3)</li> <li>galvanisch gebundene T-Dress-profilrolle D427 (Werkzeug Nr. 4)</li> </ul>	<b>Werkstückstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>IN 718</li> </ul>
<b>Schleifscheibe</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Korundscheibe F13A60FF21V</li> </ul>	<b>Abrichtparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_{sd} = 22 \text{ m/s}</math></li> <li><math>f_{rd} = 0,5 \text{ } \mu\text{m/Umd.}</math></li> <li><math>q_d = \pm 0,2; \pm 0,5; \pm 0,8; \pm 1,0</math></li> </ul>	<b>Kühlschmierstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Emulsion (5%-ig)</li> </ul>
<b>Schleifparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_c = 22 \text{ m/s}</math></li> <li><math>v_{ft} = 450 \text{ mm/min}</math></li> <li><math>a_e = 0,5 \text{ mm}</math></li> </ul>		



**Bild 24:** Schleifkräfte beim CD-Schleifen mit  $f_{rd} = 0,5 \text{ } \mu\text{m/U}$  und  $v_{ft} = 450 \text{ mm/min}$

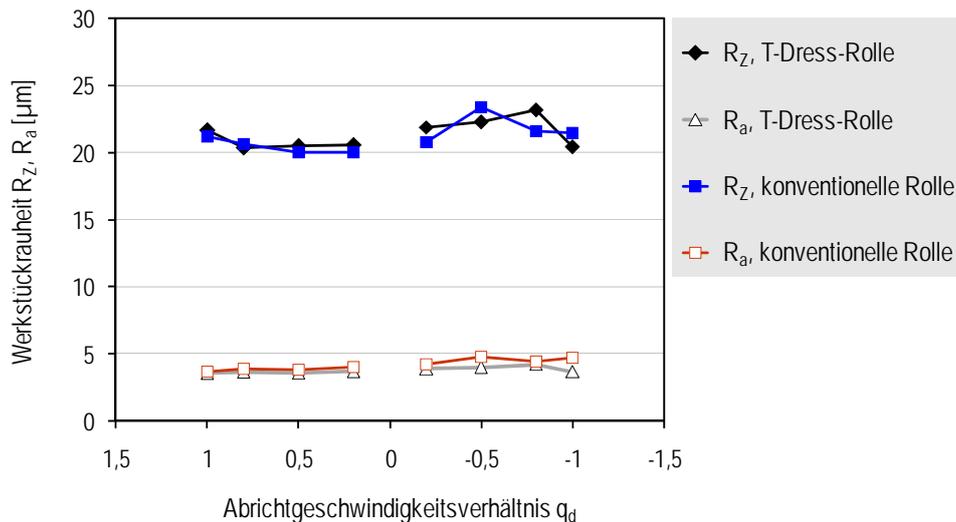
- Beim CD-Schleifen von Nickel-Basis-Superlegierungen kann der Einsatz der T-Dress-Rolle in Abhängigkeit von der Abricht- und Schleifbedingungen sowohl zu einer Reduzierung (s. Bilder 22 und 23) als auch zur Erhöhung der Schleifkräfte (s. Bild 24) im Vergleich zum CD-Schleifen mit konventionellen Rollen führen.

### 6.3 Werkstückrauheit beim CD-Schleifen mit konventionellen und T-Dress-Rollen

In den **Bildern 25-27** sind die Werkstückrauheitswerte  $R_z$  und  $R_a$  beim CD-Schleifen von IN 718 in Abhängigkeit vom Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

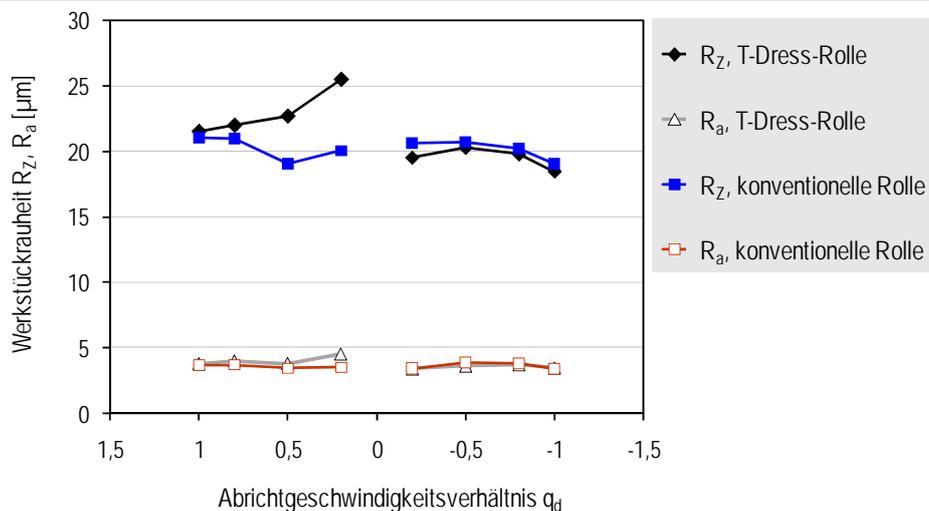
- Es lässt sich feststellen, dass bei vielen Untersuchungen die Ausführung des Abrichtprozesses im Gegenlaufmodus zu höheren Werkstückrauheitswerten führen kann (s. Bild 25). Daher kann beim CD-Schleifen von IN 718 ebenfalls keine allgemeingültige Aussage bezüglich der Beeinflussung der Werkstückrauheit durch den Abrichtmodus getroffen werden.
- Eine Reduzierung der Relativgeschwindigkeit zwischen Abrichtrolle und Schleifscheibe im Gleichlaufabrichtmodus führt beim CD-Schleifen mit der konventionellen Diamantprofilrolle tendenziell zu einer Erhöhung der Werkstückrauheit.

<b>Schleifverfahren</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>CD-Schleifen</li> </ul>	<b>Abriechtwerkzeug</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>konventionelle galvanisch gebundene Diamantprofilrolle D427 (Werkzeug Nr. 3)</li> <li>galvanisch gebundene T-Dress-profilrolle D427 (Werkzeug Nr. 4)</li> </ul>	<b>Werkstückstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>IN 718</li> </ul>
<b>Schleifscheibe</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Korundscheifscheibe F13A60FF21V</li> </ul>		<b>Kühlschmierstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Emulsion (5%-ig)</li> </ul>
<b>Schleifparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_c = 22</math> m/s</li> <li><math>v_{ft} = 900</math> mm/min</li> <li><math>a_e = 0,5</math> mm</li> </ul>	<b>Abriechtparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_{sd} = 22</math> m/s</li> <li><math>f_{rd} = 0,5</math> <math>\mu\text{m}/\text{Umd.}</math></li> <li><math>q_d = \pm 0,2; \pm 0,5; \pm 0,8; \pm 1,0</math></li> </ul>	

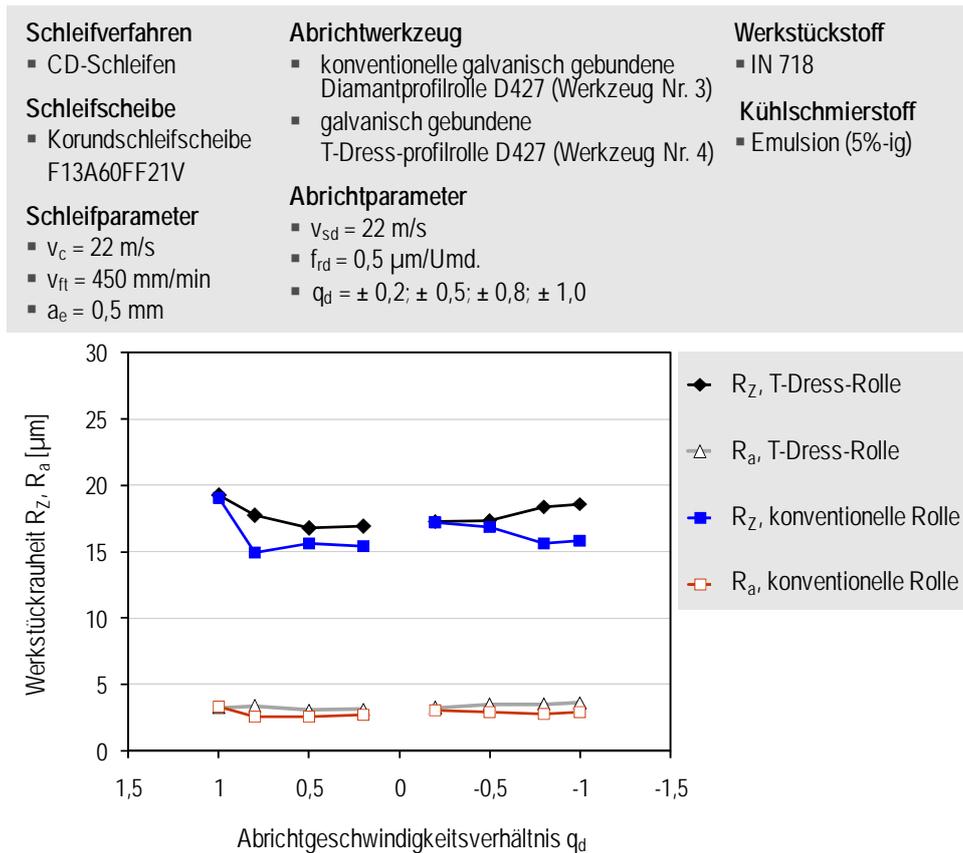


**Bild 25:** Werkstückrauheit beim CD-Schleifen mit  $f_{rd} = 0,5 \mu\text{m}/\text{U}$  und  $v_{ft} = 900$  mm/min

<b>Schleifverfahren</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>CD-Schleifen</li> </ul>	<b>Abriechtwerkzeug</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>konventionelle galvanisch gebundene Diamantprofilrolle D427 (Werkzeug Nr. 3)</li> <li>galvanisch gebundene T-Dress-profilrolle D427 (Werkzeug Nr. 4)</li> </ul>	<b>Werkstückstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>IN 718</li> </ul>
<b>Schleifscheibe</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Korundscheifscheibe F13A60FF21V</li> </ul>		<b>Kühlschmierstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Emulsion (5%-ig)</li> </ul>
<b>Schleifparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_c = 22</math> m/s</li> <li><math>v_{ft} = 900</math> mm/min</li> <li><math>a_e = 0,5</math> mm</li> </ul>	<b>Abriechtparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_{sd} = 22</math> m/s</li> <li><math>f_{rd} = 1,5</math> <math>\mu\text{m}/\text{Umd.}</math></li> <li><math>q_d = \pm 0,2; \pm 0,5; \pm 0,8; \pm 1,0</math></li> </ul>	



**Bild 26:** Werkstückrauheit beim CD-Schleifen mit  $f_{rd} = 1,5 \mu\text{m}/\text{U}$  und  $v_{ft} = 900$  mm/min



**Bild 27:** Werkstückrauheit beim CD-Schleifen mit  $f_{rd} = 0,5$   $\mu\text{m}/\text{U}$  und  $v_{ft} = 450$  mm/min

- Eine Erhöhung der Abrichtradvorschub führt insbesondere beim CD-Abrichten mit der konventionellen Rolle zu einer Erhöhung der Werkstückrauheit (vgl. Bilder 22 und 23).
- Es gibt keinen signifikanten Unterschied in  $R_a$ -Werten beim CD-Schleifen von IN 718 mit konventionellen und T-Dress-Rolle. Die  $R_z$ -Werte sind dagegen beim CD-Schleifen mit der T-Dress-Rolle höher oder fast gleich wie beim CD-Schleifen mit der konventionelle Rolle.

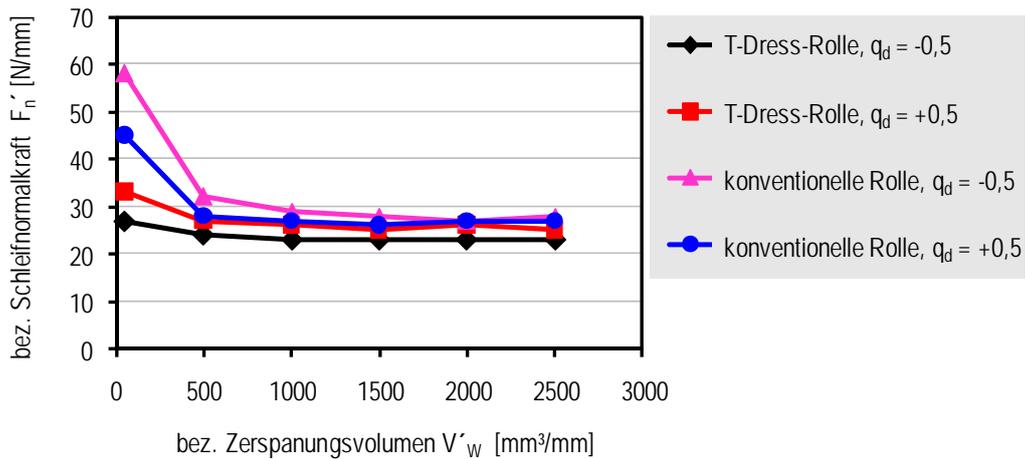
#### 6.4 Schleifkräfte und Werkstückrauheit beim Tiefschleifen nach dem Abrichten mit der konventionellen und T-Dress-Rolle

**Bild 28** zeigt die gemessenen bezogenen Schleifnormalkräfte beim Tiefschleifen bis zu einem bezogenen Zerspanungsvolumen von  $V'_w = 2500$   $\text{mm}^3/\text{mm}$  nach dem Abrichten mit der konventionellen und der T-Dress-Rolle mit  $q_d = \pm 0,5$ .

Bei allen Untersuchungen sinken die Schleifkräfte in der anfänglichen Schleifprozessphase. Diese anfängliche Senkung der Schleifkräfte ist auf eine „Freischleifphase“ zurückzuführen, wobei sich die Spanräume und damit der Kornüberstände durch den Bindungsabtrag mittels der abrasiven Wirkung der Späne vergrößern. Dies begünstigt den Spanabtrag und die Kühlschmierstoffzuführung in die Schleifkontaktzone und reduziert somit die Schleifkräfte.

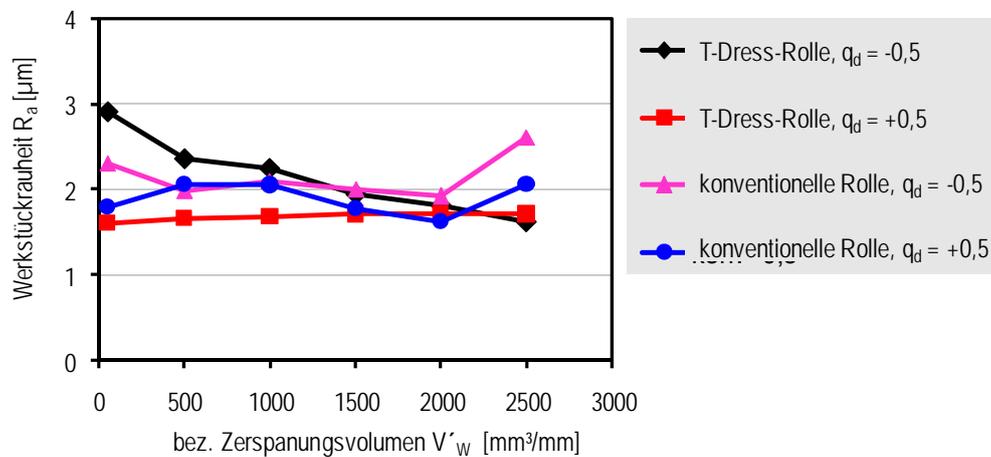
Die Freischleifphase ist nach dem Abrichten mit der konventionellen Rolle länger. Eine kürzere Freischleifphase nach dem Abrichten mit der T-Dress-Rolle weist auf eine geringere Schleifscheibentopographieänderung durch die Zurücksetzung der Bindungsanteile und demzufolge einen stabileren Schleifprozess hin.

<b>Schleifverfahren</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tiefschleifen</li> </ul>	<b>Abrichtwerkzeug</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>konventionelle galvanisch gebundene Diamantprofilrolle D427 (Werkzeug Nr. 3)</li> <li>galvanisch gebundene T-Dress-Profilrolle D427 (Werkzeug Nr. 4)</li> </ul>	<b>Werkstückstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>100Cr6</li> </ul>
<b>Schleifscheibe</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keramisch gebundene CBN-Schleifscheibe B126 C125</li> </ul>	<b>Abrichtparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_{sd} = 35 \text{ m/s}</math></li> <li><math>f_{rd} = 0,1 \text{ } \mu\text{m/U}</math></li> <li><math>q_d = \pm 0,5</math></li> <li><math>a_{ed} = 0,05 \text{ mm}</math></li> </ul>	<b>Kühlschmierstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Emulsion (5%-ig)</li> </ul>
<b>Schleifparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_c = 60 \text{ m/s}</math></li> <li><math>v_{ft} = 900 \text{ mm/min}</math></li> <li><math>a_e = 1 \text{ mm}</math></li> </ul>		



**Bild 28:** Bez. Schleifnormalkraft beim Langzeit-Tiefschleifen

<b>Schleifverfahren</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tiefschleifen</li> </ul>	<b>Abrichtwerkzeug</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>konventionelle galvanisch gebundene Diamantprofilrolle D427 (Werkzeug Nr. 3)</li> <li>galvanisch gebundene T-Dress-Profilrolle D427 (Werkzeug Nr. 4)</li> </ul>	<b>Werkstückstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>100Cr6</li> </ul>
<b>Schleifscheibe</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keramisch gebundene CBN-Schleifscheibe B126 C125</li> </ul>	<b>Abrichtparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_{sd} = 35 \text{ m/s}</math></li> <li><math>f_{rd} = 0,1 \text{ } \mu\text{m/U}</math></li> <li><math>q_d = \pm 0,5</math></li> <li><math>a_{ed} = 0,05 \text{ mm}</math></li> </ul>	<b>Kühlschmierstoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Emulsion (5%-ig)</li> </ul>
<b>Schleifparameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_c = 60 \text{ m/s}</math></li> <li><math>v_{ft} = 900 \text{ mm/min}</math></li> <li><math>a_e = 1 \text{ mm}</math></li> </ul>		

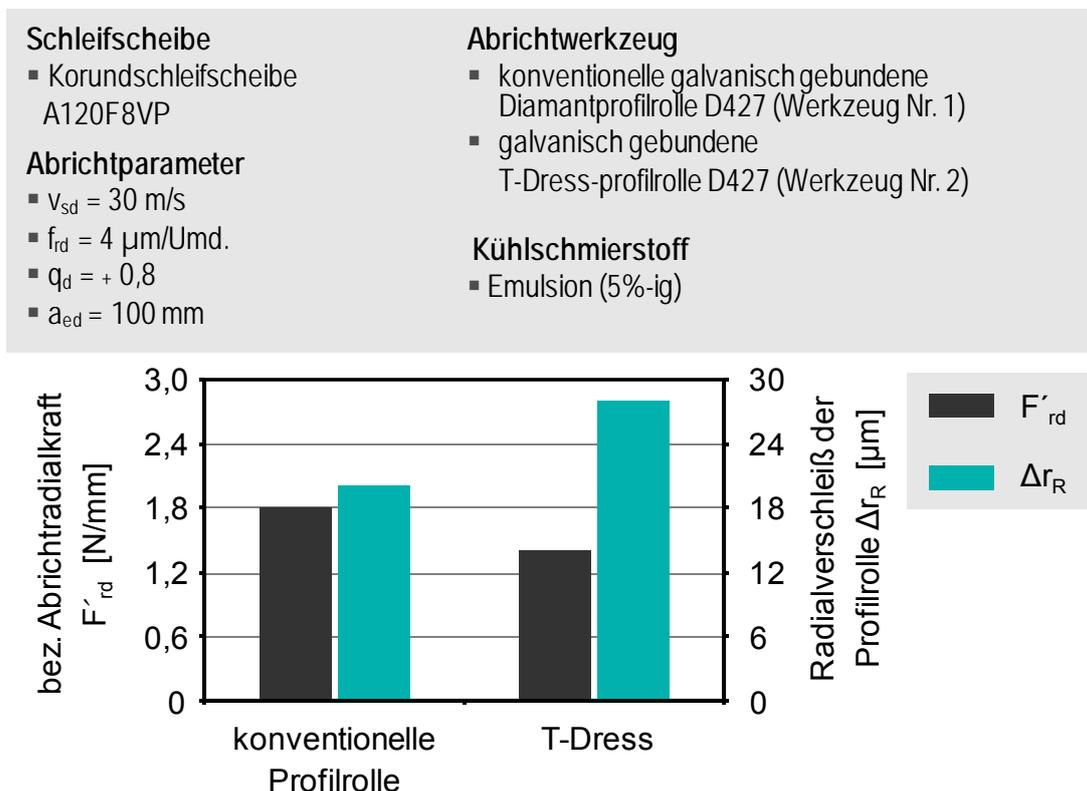


**Bild 29:** Werkstückrauheit beim Langzeit-Tiefschleifen

Es gibt keine ausgeprägte Entwicklung in  $R_a$ -Werten beim Tiefschleifen nach dem Abrichten mit der konventionellen und T-Dress-Rolle zu beobachten (**Bild 29**). Allerdings lässt sich feststellen, dass die Werkstückrauheit nachdem Abrichten mit der T-Dress-Rolle höher als die nach dem Abrichten mit konventionellen Rolle ist.

## 6.5 Prozesskräfte und Werkzeugverschleiß beim Abrichten mit einer konventionellen und einer T-Dress-Rolle

Zur Ermittlung des Prozesskräfte und Werkzeugverschleißes wurden die zylindrische konventionelle und die T-Dress-Rolle eingesetzt. In **Bild 30** sind die radialen Abrichtkräfte und den radialen Verschleiß der T-Dress-Rolle im Vergleich zur konventionellen Rolle dargestellt. Vorteilhaft bei der T-Dress-Rolle ist die niedrigere Abrichtkraft, die zu geringeren Verformung, Nachgiebigkeit und zu höherer Präzision führt. Nachteilig ist der höhere Verschleiß der T-Dress-Rolle. Wenn man aber berücksichtigt, dass bei der T-Dress-Rolle ca. 90 % weniger Diamant zum Einsatz kommt, kann man den ca. 30% höheren Verschleiß akzeptieren, was im Endeffekt einen niedrigeren Verschleiß bezogen auf die belegte Fläche bedeutet.



**Bild 30:** Niedrige Abrichtradialkräfte für T-Dress und höherer Verschleiß

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im innovativen Abrichtwerkzeug „T-Dress“ sind die Vorteile von Abrichtprofilrolle und Abrichtformrolle kombiniert. Damit wird das Abrichten bei kurzen Abrichtzeiten mit niedrigeren Abrichtkräften und -temperaturen und demzufolge geringere mechanische und thermische Verformungen im Vergleich zu konventionellen Abrichtrollen ermöglicht.

Beim Abrichten mit einer T-Dress-Rolle wird neben der Schleifscheibenmikrotopographie die Makrotopographie der Schleifscheibe über die Strukturierung der Schleifscheibenoberfläche beeinflusst. Die Beeinflussung des Schleifprozesses durch die T-Dress-Rolle hängt daher von der Auslegung der T-Dress-Rolle und den Abrichtparametern, sowie von den Schleifbedingungen ab. Allerdings können durch eine schleifprozessorientierte Auslegung der T-Dress-Rolle kleinere Schleifkräfte mit einer vergleichbaren Werkstückrauheit erzielt werden. Daher soll im Rahmen eines neuen Forschungsvorhabens die Strukturierung der Schleifscheibe mit der T-Dress-Rolle und deren Einfluss auf die Spanbildung beim Schleifprozess simuliert und untersucht werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- [Harb97] Harbs, U.: Beitrag zur Einsatzvorbereitung hochharter Schleifscheiben; Dr.-Ing. Dissertation, Universität Braunschweig, 1997
- [Gärt82] Gärtner, W.: Untersuchungen zum Abrichten von Diamant- und Bornitrid-Schleifscheiben; Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1982
- [Graf99] Graf, W.: CBN und Diamant; Firmenschrift Rappold Winterthur, 1999
- [Kloc05] Klocke, F., König, W.: Fertigungsverfahren Band 2 – Schleifen; Honen, Läppen; 4. Auflage, Springer-Verlag, 2005
- [Link07] Linke, B.: Wirkmechanismen beim Abrichten keramisch gebundener Schleifscheiben; Dr. -Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 2007
- [Mink99] Minke, E.: Handbuch zur Abrichttechnik, Herausgeber: Riegger Diamantwerkzeuge GmbH, 1. Auflage, ISBN: 3-9800-5325-3, 1999
- [Oliv10] Oliveira, J.F.G.; Bottene, A. C.; Franc, T. V.: A novel dressing technique for texturing of ground surfaces; CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 , 361–364, 2010
- [Salj90] Saljé, E.; Harbs, H.: Wirkungsweisen und Anwendungen von Konditionierungs-verfahren; Annals of the CIRP 39 (1990) 1, S. 337-340
- [Sche73] Scheidermann, H.: Einfluss der durch Abrichten mit zylindrischen und profilierten Diamantrollen erzeugten Schleifscheibenschneidfläche auf den Schleifbelag; Technische Universität Braunschweig, 1973
- [Schm68] Schmitt, R.: Abrichten von Schleifscheiben mit diamantbestückten Rollen; Dr. -Ing. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1968
- [Schu96] Schulz, A.: Das Abrichten von keramisch gebundenen CBN-Schleifscheiben mit Formrollen; Dr. -Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1996

- [Stuf96] Stuff, D.: Einsatzvorbereitung keramisch gebundener CBN-Schleifscheiben; Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1996
- [Tawa93] Tawakoli, T.: High Efficiency Deep Grinding, Technology, process, planning and application; Mechanical Engineering Publication, London, 1993
- [Tawa10] Tawakoli, T.; Rasifard, A.: Dressing of Grinding Wheels; 4. Chapter of the Book "Machining with Abrasives", Springer-Verlag New York, 2010
- [Zitt99] Zitt, U.: Modellierung und Simulation von Hochleistungsschleifprozessen; FBK-Produktionstechnische Berichte, Band 34, Hrsg.: Prof. Warnecke, Kaiserslautern, 1999