
BACHELORARBEIT

Herr
Karsten Kuhles

**Analyse und Optimierung des
Perlstrahlens von
Radausgleichsachsen**

Mittweida, 2022

Fakultät Ingenieurwissenschaften

BACHELORARBEIT

Analyse und Optimierung des Perlstrahlens von Radausgleichsachsen

Autor:

Herr

Karsten Kuhles

Studiengang:

Industrial Engineering

Seminargruppe:

IE18W1-F

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Frank Köster

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Carsten Reinsch

Einreichung:

Mittweida, 26.08.2022

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2022

Faculty Engineering

BACHELOR THESIS

Analysis and Improvement of the Glass Bead Blasting of Differential Shafts

author:

Mr.

Karsten Kuhles

course of studies:

Industrial Engineering

seminar group:

IE18W1-F

first examiner:

Prof. Dr. rer. nat. Frank Köster

second examiner:

Dipl.-Ing. Carsten Reinsch

submission:

Mittweida, 26.08.2022

defence/ evaluation:

Mittweida, 2022

Bibliografische Beschreibung:

Kuhles, Karsten:

Analyse und Optimierung des Perlstrahlens von Radausgleichsachsen. - 2022 - 8, 49, 12 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften,
Bachelorarbeit, 2022

Referat:

Der Umstieg der Kfz-Technik weg von fossilen Treibstoffen hin zu vollelektrischen Antrieben bedarf einer Neuorientierung der Unternehmen, welche bisher Teile klassischer Antriebe gefertigt haben. Hinzu kommen die systembedingten, höheren Belastungen für Bauteile des Elektroantriebes. Für das Werk der Firma Oerlikon Balzers in Stollberg/Erz. bedeutet dies, einen starken Rückgang der Nachfrage an Verschleißschutzbeschichtungen im Bereich der Verbrennungsmotoren, welches bisher als Hauptgeschäftsfeld angesehen wurde.

Zusätzlich sind die Eigenschaften einer klassischen Hartstoffbeschichtung nicht mehr ausreichend für die neuen Belastungen.

Hierzu wurden Duplex-Behandlungen entwickelt, bestehend aus Plasmanitrieren der Oberfläche mit nachfolgender Hartstoffbeschichtung.

Negative Effekte des Plasmanitrierens, wie Oberflächendefekte und ein mattes Erscheinungsbild müssen dabei jedoch in einer Zwischenreinigung entfernt werden.

Dabei wird ein Druckluft-Perlstrahl-Verfahren eingesetzt. Dieses soll in der vorliegenden Arbeit zum besseren Verständnis analysiert und hinsichtlich ihrer Effizienz optimiert werden.

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 <i>Motivation</i>	1
1.2 <i>Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH</i>	2
1.3 <i>Aufgabenstellung</i>	3
2 Grundlagen	5
2.1 <i>Duplex Beschichtungen</i>	5
2.2 <i>Perlstrahlen</i>	9
2.3 <i>Oberflächenkennwerte</i>	11
2.3.1 <i>Rauheitsmessung</i>	11
2.3.1.1 <i>Gemittelte arithmetische Höhe</i>	13
2.3.1.2 <i>Rautiefe</i>	13
2.3.1.3 <i>Reduzierte und absolute Tal- und Spitzenhöhe</i>	14
2.3.1.4 <i>Maximale Spitzenhöhe</i>	15
2.3.2 <i>Härtemessung</i>	15
2.4 <i>Optische Bewertung</i>	17
3 Vorbetrachtungen	18
3.1 <i>Art des Materialabtrages</i>	18
3.2 <i>Strahlintensität</i>	20
3.3 <i>Bedeckungsgrad</i>	22
3.4 <i>Strahlmitteldurchsatz</i>	25
3.5 <i>Strahlwinkel</i>	28
3.6 <i>Strahlzeit</i>	30
4 Aktueller Stand	32

4.1	<i>Optischer Eindruck</i>	32
4.2	<i>Kennwerte</i>	34
5	Versuchsdurchführung	36
5.1	<i>Änderung der Strahlintensität</i>	36
5.2	<i>Änderung Strahlwinkel</i>	38
6	Optimierung Taktzeit	41
6.1	<i>Verteilung der Strahldüsen</i>	42
6.2	<i>Optimierung des erhöhten Taktabstandes</i>	44
7	Fazit	46
8	Ausblick	48
	Literaturverzeichnis	51
	Abbildungsnachweis	53
	Anlagen	
	Selbstständigkeitserklärung	
	Sperrvermerk	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: nitrierte und gestrahlte Achsen	2
Abbildung 2: Achsausgleichswelle.....	2
Abbildung 3: Einteilung von Schutzschichten	5
Abbildung 4: Verlauf von Härte und Zähigkeit bei nitrierten Oberflächen	7
Abbildung 5: Kombinationen der Duplex-Behandlung.....	7
Abbildung 6: Vergleich HF-Klassen 1-6	8
Abbildung 7: Komponentenübersicht Strahlanlage	9
Abbildung 8: Werkstückaufnahme	10
Abbildung 9: Strahlkabine.....	10
Abbildung 10: Aufbau Venturi-Strahldüse.....	11
Abbildung 11: Vergleich taktiler zu optischer Messung	12
Abbildung 12: Berechnung mittlere Rautiefe	13
Abbildung 13: Abbott-Firestone-Kurve.....	14
Abbildung 14: Maximale Spitzenhöhe Rp	15
Abbildung 15: Härteprüfung nach Vickers	15
Abbildung 16: Härteeindruck nach Vickers	16
Abbildung 17: Oberfläche einer ungleichmäßig gestrahlten Achse	17
Abbildung 18: Strahlwirkung auf die Oberfläche	18
Abbildung 19: Almenkurve.....	21
Abbildung 20: Bedeckungsgrad.....	22

Abbildung 21: Strahlform.....	23
Abbildung 22: Strahlbereiche	24
Abbildung 23: Dosierventil	26
Abbildung 24: Strahlmitteldurchsatz.....	27
Abbildung 25: Strahlwinkel.....	28
Abbildung 26: Vergleich Auftreffwinkel.....	28
Abbildung 27: Unbehandelte Oberfläche 400-fach vergrößert.....	29
Abbildung 28: Effekte bei senkrechtem Strahlwinkel	30
Abbildung 29: Zeitabhängiger Strahlverschleiß	31
Abbildung 30: Optischer Vergleich von nitrierter (oben) und gestrahlter Achse (unten)...	32
Abbildung 31: REM-Aufnahmen der Oberfläche vor und nach dem Strahlprozess.....	33
Abbildung 32: Rauheitswerte Serienproduktion.....	34
Abbildung 33: Vergleich Oberflächen mit 2,5 und 5,5 Bar Strahldruck	38
Abbildung 34: Vergleich Oberfläche zu Strahlwinkel	39
Abbildung 35: REM-Aufnahme.....	40
Abbildung 36: Vergleich Taktzeiten zu Taktabstand.....	41
Abbildung 37: Oberflächenbild mit einer aktiven Düse	42
Abbildung 38: Oberflächenbild mit zwei aktiven Düsen	42
Abbildung 39: Strahlbild verteilte Düsen.....	42
Abbildung 40: Vergleich Oberfläche zu Schrittweiten	43
Abbildung 41: Oberflächenbild bei Veränderung von Strahlwinkel und -druck.....	44
Abbildung 42: Erzeugte Almenintensität.....	45
Abbildung 43: Vergleich optimierte zu originalen Oberflächenwerten.....	46

Abbildung 44: Vergleich Oberflächenbild..... 47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Almenintensität.....	22
Tabelle 2: Vergleich aktuelle Werte nitriert zu gestrahlt.....	34
Tabelle 3: Vergleich optimierte zu originalen Oberflächenwerten	46

Abkürzungsverzeichnis

A	Zu messende Fläche
Abb.	Abbildung
CLT	Verbindungsschichtdicke
CVD	Chemical Vapour Deposition (dt. Chemische Gasphasenabscheidung)
d	Diagonalen Durchmesser Härteeindruck
D	Durchmesser Bauteil
d ₀	Düsendurchmesser
DLC	Diamond like Carbon (dt. Diamant ähnlicher Kohlenstoff)
d _p	Durchmesser des Partikels
E	Energie
E _p	Energie eines Partikels
E _{pges}	Gesamte Energie
F	Kraft
F _{kugel}	Kraft einer Strahlkugel
F _v	Vertikal wirkende Kraft
g	Erdanziehungskraft
HRC	Härte nach Rockwell, Skala C
HV	Härte nach Vickers
HV10	Härte nach Vickers, Prüfkraft = 10kgf
I	Strahlintensität
k	Korrekturfaktor
L _r	Länge der Messstrecke
m	Masse
n	Anzahl
NHD	Nitrierhärte tiefe
Pa	Pascal (Druck)
PACVD	Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung
PAPVD	Plasmaunterstützte physikalische Gasphasenabscheidung
PVD	Physical Vapour Deposition (dt. Physikalische Gasphasenabscheidung)
R _a	Mittlere arithmetische Höhe (Tastschnitt)
REM	Rasterelektronenmikroskop
RGWS	Rückgewinnungssystem
R _z	Rautiefe (Tastschnitt)
s.g.	So genannt
SIM-Verfahren	Structured Illumination Microscopy
S _a	Mittlere arithmetische Höhe (Flächenbasiert)
S _p	Maximale Spitzenhöhe
S _{pk}	Reduzierte Spitzenhöhe
S _{pk*} (S _{pkx})	Absolute Spitzenhöhe
S _{vk}	Reduzierte Talhöhe
S _{vk*} (S _{vkx})	Absolute Talhöhe

S_z	Rautiefe (Flächenbasiert)
$t_{98\%}$	Strahlzeit für 98% Bedeckungsgrad
t_s	Strahlzeit
v	Geschwindigkeit
vgl.	Vergleiche
v_p	Geschwindigkeit des Partikels
z.B.	Zum Beispiel
α	Spitzenwinkel Eindringkörper bei Härteprüfung nach Vickers
α	Strahlwinkel
Δp	Druckdifferenz
ρ_p	Dichte des Partikels

1 Einleitung

„Wer immer tut, was er schon kann, bleibt immer das, was er schon ist.“ – Henry Ford (Zitate.net, 2022)

1.1 Motivation

Die vorliegende Arbeit wurde im Auftrag der Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH am Standort in Stollberg/Erzgebirge durchgeführt. Wie schon zu Zeiten Henry Fords müssen sich Unternehmen heutzutage einem stetigen Wandel stellen und sich diesem anpassen. Nur durch diesen stetigen Wandel in Verbindung mit Innovation können Unternehmen auf lange Sicht gesehen erfolgreich bleiben und laufen nicht Gefahr von der Konkurrenz abgehängt zu werden. Durch den aktuellen Wandel in der Automobiltechnik hin zur Elektromobilität, ist auch hier eine stetige Neu- und Weiterentwicklung des Produktportfolios nötig. Die bisherige Produktion von Verschleißschutzbeschichtungen für hoch beanspruchte Bauteile, welche größtenteils im Bereich der Einspritzsysteme von Diesel- und Verbrennungsmotoren zum Einsatz kommen, steht durch diesen Trend weg von fossilen und hin zu erneuerbaren, grünen Energien vor einer großen Herausforderung. „Während 2020 die Pkw-Neuzulassungen in Europa (EU/UK) einen massiven Rückgang um – 25% aufweisen, verzeichnen Batterie-elektrische Fahrzeuge (BEV) mehr als eine Verdopplung, Plug-in-Hybride (PHEV) sogar mehr als eine Verdreifachung ihrer Volumina bei den Neuzulassungen.“ (IFO, 2021, S. 6). In den klassischen Antriebssträngen von Verbrennungsmotoren befinden sich ca. 1.400 Bauteile, von denen die meisten mehr oder weniger stark von Verschleiß betroffen sind. Elektroantriebe hingegen bestehen nur aus rund 200 Komponenten (vgl. e-auto-Journal, 2016-2022).

Aus diesem Wandel heraus wurde die Beschichtungsdienstleistung auf andere Teile des Antriebsstranges erweitert, wie z.B. auf Bauteile von Differenzialgetrieben. Die hier betrachteten Radausgleichsachsen sind ein Bauteil des Differenzialgetriebes eines deutschen Herstellers. Ein Beispiel für den Aufbau eines solchen Getriebes sowie die Radausgleichsachsen im Plasmanitrierten- und gestrahlten Zustand zeigen Abbildung 1 und 2.



Abbildung 1: nitrierte und gestrahlte Achsen

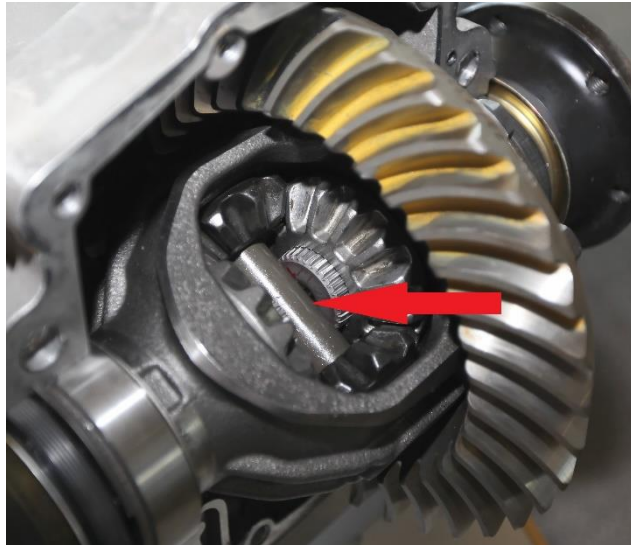


Abbildung 2: Achsausgleichswelle

Dieser Bauteiltyp ist bereits in bestehenden Antriebssträngen im Einsatz. Die systembedingten, höheren Belastungen von Elektroantrieben erfordern jedoch eine erweiterte Behandlung der Oberfläche. Um diese weichen und damit aber auch zähen Achsen an die höhere Belastung anzupassen, werden diese, wie bisher, zunächst an der Oberfläche plasmanitriert und anschließend noch mit einer DLC-Hartstoffbeschichtung versehen. Dieses Verfahren nennt sich auch Duplex-Verfahren und kann sowohl in einem durchgehenden Prozess erfolgen oder wie hier, in zwei voneinander getrennten Anlagen. Die Plasmanitrierung hinterlässt jedoch eine matte Oberfläche mit möglichen Rückständen. Diese müssen daher in einer zwischengelagerten Reinigung entfernt werden. Dies geschieht mittels eines Druckluft-Perlstrahl-Reinigungsverfahrens.

1.2 Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH

„Oerlikon Balzers ist nicht nur ein Unternehmen, sondern eine Faszination.

Bereits in den 1940er Jahren begann die Geschichte des heute weltweit führenden Anbieters moderner Oberflächentechnologien. Seitdem stehen Leidenschaft und Innovation hinter allem, was wir tun. Aus der Leidenschaft für die Entdeckung neuer Möglichkeiten, dem unermüdlichen Antrieb zur Meisterung von Herausforderungen, sowie dem Streben nach Perfektion entstehen die bestmöglichen Lösungen für unsere Kunden und unsere Umwelt.“ (OC Oerlikon Management AG, 2022).

Als Teil der Schweizer OC Oerlikon Corporation AG, welche aktuell mit 11.800 Mitarbeitern an 207 Standorten in 38 Ländern weltweit vertreten ist, hat sich die Sparte Surface Solution, zu welcher auch Oerlikon Balzers gehört, auf kundenspezifische Oberflächenbehandlungen spezialisiert. Ziel der Business Line ist die Verbesserung der Effizienz, Reduktion von Reibung oder Verlängerung der Standzeit von Werkzeugen.

Der Teilbereich Automotive stellt sich dabei den Herausforderungen der modernen Kfz-Technik. Die hauseigenen Hartstoffbeschichtungen BALINIT® DLC sowie die Weiterentwicklung BALINIT® DLC-STAR sorgen dabei für längere Laufzeiten bei gleichzeitig reduzierter Reibung. Technische Neuerungen sorgen für fast 3.000 Bar Einspritzdruck bei modernen Dieselmotoren sowie bis zu fünf getrennten Einspritzungen pro Zündung (focus online, 2013). Auch eine stetige Erhöhung des Kompressionsdruckes im Verbrennungsraum der Motoren verursachen eine höhere Belastung, z.B. der Kolbenbolzen. Diese beiden typischen Anwendungen wären ohne entsprechende Beschichtung nicht möglich gewesen oder hätten nach kurzer Zeit ein Versagen der Bauteile zur Folge gehabt. Das geplante Ende für die Neuzulassung von Verbrennungsmotoren im Jahre 2035 bedingt einen weiteren radikalen Wandel.

1.3 Aufgabenstellung

Die zuvor beschriebenen Radausgleichsachsen werden bereits im nitrierten Zustand angeliefert. Diese Nitrierung findet extern in einem anderen Werk von Oerlikon statt und kann daher nicht mit beeinflusst werden. Zusätzlich variiert die Oberflächenbeschaffenheit der Achsen zwischen einzelnen Chargen. Während des Nitrierens können sich an der Oberfläche Oxide, Poren oder Unterschiede in der Gefügestruktur der Nitrierung bilden (vgl. Kapitel 2.1). Diese Unreinheiten würden einen negativen Einfluss auf die Haftung der Beschichtung bedeuten und müssen daher entfernt werden. Auch verursacht das Plasmanitrieren eine matte, milchige Oberfläche. Da diese nicht den geforderten Kundenspezifikationen entspräche, würden diese Bauteile im Rahmen der 100%-Oberflächenprüfung nach der Beschichtung als fehlerhaft erkannt und aussortiert werden. Auch aus diesem Grund muss die Oberfläche vor der Beschichtung gereinigt und optisch vereinheitlicht werden. Auf Basis einer vom Kunden bei anderen Bauteilen validierten Technologie wird diese Reinigung mittels Druckluft-Perlstrahlen durchgeführt. Auf Grund der bereits durchgeführten Validierung dieses Prozesses ist eine Änderung des Reinigungsverfahrens sowie des verwendeten Stahlmittels nicht mehr möglich. Auch der Prozess für die DLC-Beschichtung kann auf Grund der Validierung nicht mehr geändert werden. Erforderliche Prozessänderungen, welche zum Erhalt oder zur Verbesserung der Schichthaftung nötig wären, können daher nicht vorgenommen werden.

Der bisher erzielte Grad der Reinigung muss daher unbedingt weiterhin eingehalten werden.

Da solch ein Reinigungsverfahren am Standort Stollberg bisher noch nicht zum Einsatz gekommen ist, soll die Untersuchung ein besseres Verständnis der Abläufe während des Strahlvorganges liefern. Die vom Kunden angekündigte Erhöhung der Stückzahlen kann mit nur einer einzelnen Strahlanlage nicht abgedeckt werden und würde die Anschaffung einer weiteren Strahlanlage erfordern. Es soll daher weiterhin untersucht werden, ob eine Optimierung des Prozessablaufes in Hinsicht auf eine Verkürzung der Prozesszeit möglich ist.

2 Grundlagen

Zunächst soll eine definierte Diskussionsgrundlage beschrieben werden. Dazu zählt das Verständnis über die Notwendigkeit der Duplex-Behandlung, die Geschehnisse während des Perlstrahlens aber auch die Definition der Messgrößen zur Bewertung der Oberfläche und der Nitrierschicht.

2.1 Duplex Beschichtungen

Durch stetig steigende Belastungen der Bauteile entstehen auch höhere Belastungen der jeweiligen Oberflächen. Werden beispielsweise zwei aneinander gleitende Bauteile stärker aneinandergespresst, steigt proportional dazu auch der Verschleiß durch Abrasion oder Kaltverschweißung der Oberflächen. Zur Reduktion dieser Effekte werden spezielle Schutzschichten eingesetzt. Abbildung 3 erläutert die grundsätzlichen Möglichkeiten, mittels Plasmaunterstützung definierte Schichten zu erzeugen.

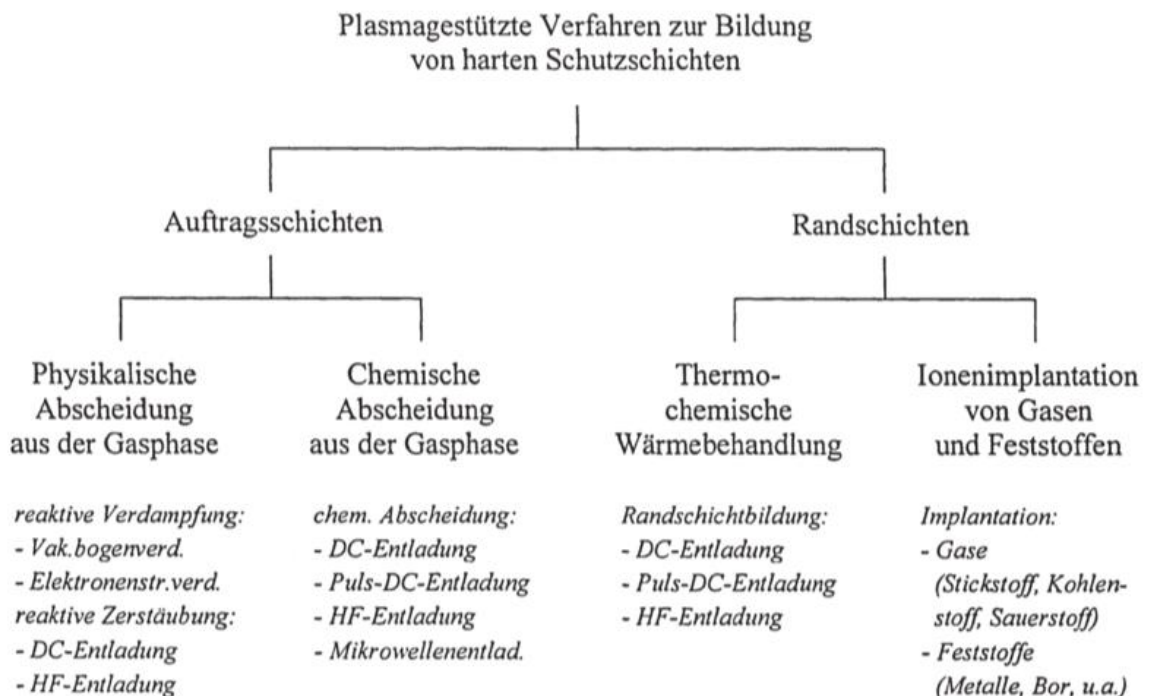


Abbildung 3: Einteilung von Schutzschichten

Bei Auftragsschichten mit PVD- oder CVD-Verfahren werden auf der Bauteiloberfläche bestimmte Schichten erzeugt, welche z.B. Verschleiß oder Reibung reduzieren können. Die Grenzen dieser Verfahren liegen jedoch meist in den strukturellen Eigenschaften des Substrates. Wird die kritische Grenze der Schwell- oder Wechselbelastung des Substrates

überschritten, wird dessen Oberfläche z.B. durch Oberflächenermüdung zerrüttet und verursacht damit auch das Ablösen der darauf aufgetragenen Beschichtung.

Eine andere mögliche Behandlung stellt eine Verstärkung der Randschichten z.B. durch Implementierung von Stickstoff-Atomen in das Metallgitter durch Gas- oder Plasmanitrieren dar. Für die Plasmaeinwirkung wird in einer stickstoffhaltigen Atmosphäre von üblicherweise 1 – 250 Pa an das Substrat eine Spannung von mehreren 100 V angelegt. Dabei entsteht an der Oberfläche ein Glimmplasma, welches den Stickstoff ionisiert und auf die Bauteiloberfläche beschleunigt. Die so in das Eisen-Metallgitter eingebrachten Stickstoffatome erzeugen daher einen nach innen abnehmenden Gradienten des Stickstoffgehaltes. Die gelösten Stickstoff-Atome setzen sich auf Zwischenplätze der Eisen-Gitterstruktur und verursachen dabei eine Deformation von ebendiesem. Bedingt durch den zusätzlichen Platzbedarf des Stickstoff Atoms entsteht dabei eine innere Druckspannung. Da diese Druckspannungen durch die von außen einwirkenden Zugkräfte erst kompensiert werden muss, erhöht sich damit auch die maximale Zugfestigkeit der Oberfläche.

Die durch den Stickstoffgehalt bewirkte Druckeigenspannung verursacht dabei eine deutliche Erhöhung der Härte, jedoch auch eine Reduktion der Zähigkeit (vgl. Abbildung 4). So kann die hohe Bruchfestigkeit eines zähen, niedrig legierten Stahls genutzt und gleichzeitig eine harte und verschleißfeste Oberfläche erzeugt werden. Der Nachteil dieser Behandlung liegt jedoch in der durch aufwachsen von Eisennitriden verursachten Erhöhung der Rauheit und damit bedingt ein stärkerer Gegenkörperverschleiß. Weiterhin entsteht, je nach Verfahrensablauf, eine mehrere μm -dicke und mit Stickstoff gesättigte Verbindungsschicht an der Oberfläche. Da diese Schicht durch den Ionenbeschuss mit zunehmender Dicke zur Bildung von Poren neigt, weist sie, im Vergleich zur darunter liegenden Diffusionsschicht, eine nochmals reduzierte Zähigkeit auf. Bei wechselnder Belastung neigt die Verbindungsschicht zum Abplatzen, daher wird vermehrt die Forderung nach einer verbindungs-schichtfreien Nitrierung gestellt (Huchel). Dies ist jedoch nur mit einer Reduktion des Stickstoffgehalts während der Nitrierung möglich und damit mit einer deutlichen Verlängerung der Prozessdauer.



Abbildung 4: Verlauf von Härte und Zähigkeit bei nitrierten Oberflächen

Bei Duplex-Beschichtungen werden diese beiden Verfahren kombiniert. Zunächst erfolgt die Nitrierung des Substrates, gefolgt von einer Hartstoffbeschichtung. In Abbildung 5 wird die Kombination der Vorteile aller drei Bestandteile aufgezeigt.

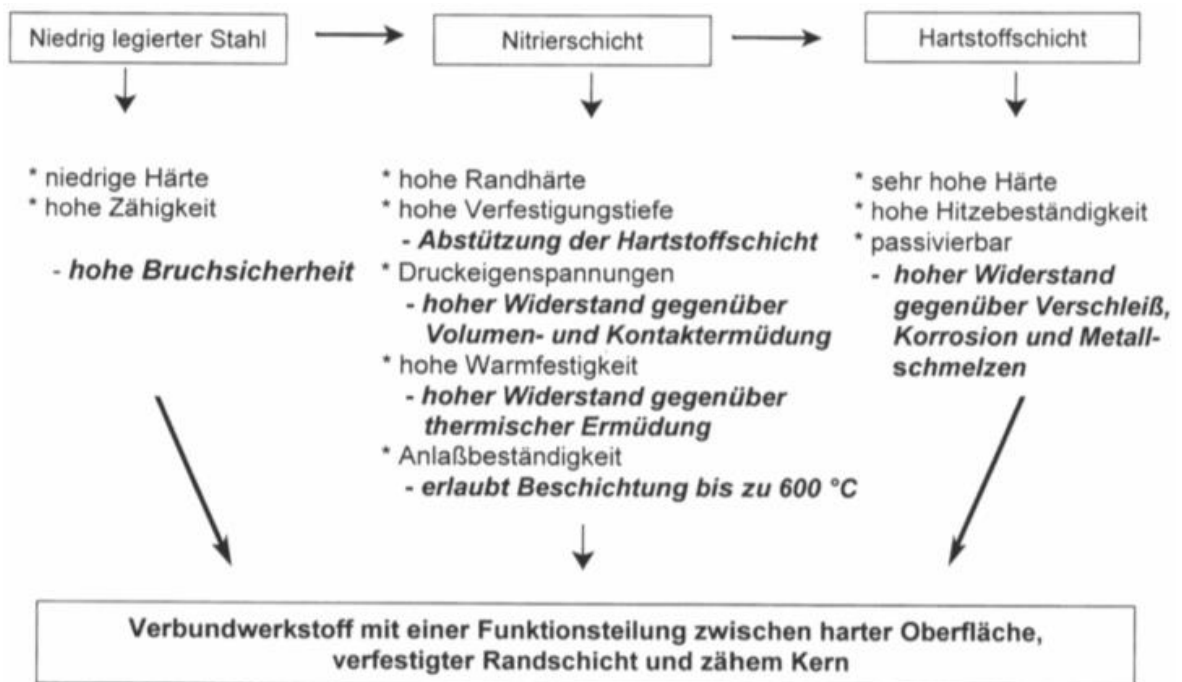


Abbildung 5: Kombinationen der Duplex-Behandlung

Die niedrig legierten Stähle bewirken die hohe Bruchfestigkeit, die Nitrierschicht wirkt primär als Stützschiicht für die nachfolgende Hartstoffbeschichtung. Diese stellt dabei die eigentliche Funktionsschicht dar und bestimmt damit maßgeblich die tribologischen Eigenschaften des fertigen Bauteils.

Dieses Verfahren kann ohne Unterbrechung in einer einzigen Anlage erfolgen. Wobei zunächst die Oberfläche nitriert und anschließend direkt die Hartstoffschicht aufgebracht wird. Alternativ, wie in diesem Fall, kann der Prozess mit Unterbrechung in zwei verschiedenen Anlagen stattfinden. Dabei wird zunächst in einer nur dafür ausgelegten Anlage die Oberfläche nitriert und anschließend in einer weitaus komplexeren Anlage in einer Kombination aus PAPVD- und PACVD-Verfahren die Hartstoffschicht vom Typ BALINIT® DLC aufgebracht. Der weitere Vorteil eines unterbrochenen Prozesses liegt in der Möglichkeit einer Zwischenbehandlung der Oberfläche. Mit steigender Nitrierdauer entsteht im äußeren Bereich die erwähnte Verbindungsschicht mit Porensaum, welcher die Haltbarkeit der Hartstoffbeschichtung negativ beeinflussen kann (vgl. Spies, Höck, & Larisch, 1996, S. 225). Daher sollte dieser Porensaum, mögliche Verbindungsschichten oder andere Oberflächenverunreinigungen vor der Hartstoffbeschichtung entfernt werden. Im Werk durchgeführte Untersuchungen aus dem Bereich des Musterbaus zeigen jedoch, dass bei diesen nitrierten Achsen auch auf unbehandelten Oberflächen eine sehr gute Haftung der Hartstoffschicht möglich ist. Beschichtungsversuche mit ungestrahlten Achsen zeigten durchweg alle die Haftungsklasse HF-1 (C. Reinsch, Persönliches Gespräch, Juli 2022).

Zur Ermittlung dieser Haftungsklassen, wird nach VDI-Richtlinie 3198 sowie 3824-4 die Größe und Art des Rissnetzwerkes sowie der Abplatzungen der Beschichtung im Randbereich eines HRA/HRC-Eindruckes beurteilt (Intranet Oerlikon Balzers, 20945_WI_de, 2019).

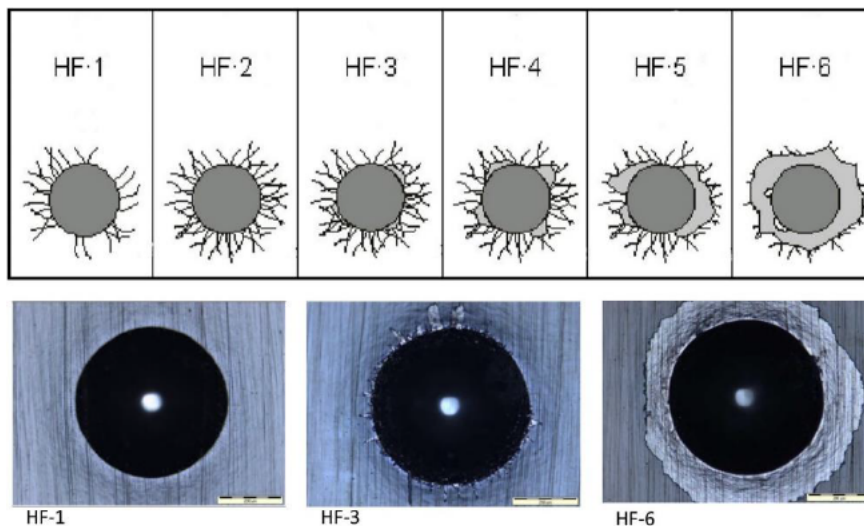


Abbildung 6: Vergleich HF-Klassen 1-6

HF-1 bedeutet dabei, dass Risse aber keine Abplatzungen am Rand, HF-3 kleine Abplatzungen bis 25% des Umfangs und HF-6 Abplatzungen auf dem gesamten Umfang vorhanden sind. (vgl. Abbildung 6).

2.2 Perlstrahlen

Wie einleitend bereits beschrieben, wird für die Zwischenreinigung gemäß den Kundenanforderungen ein Perlstrahlverfahren eingesetzt. Für diesen Zweck wurde bereits eine entsprechende Anlage beschafft und ist für die laufende Serienfertigung im Einsatz. Diese in sich geschlossene Anlage besteht aus den drei Komponenten: einer Strahlkabine, einem Rückgewinnungssystem (RGWS) und einem Entstauber (vgl. Abbildung 7).

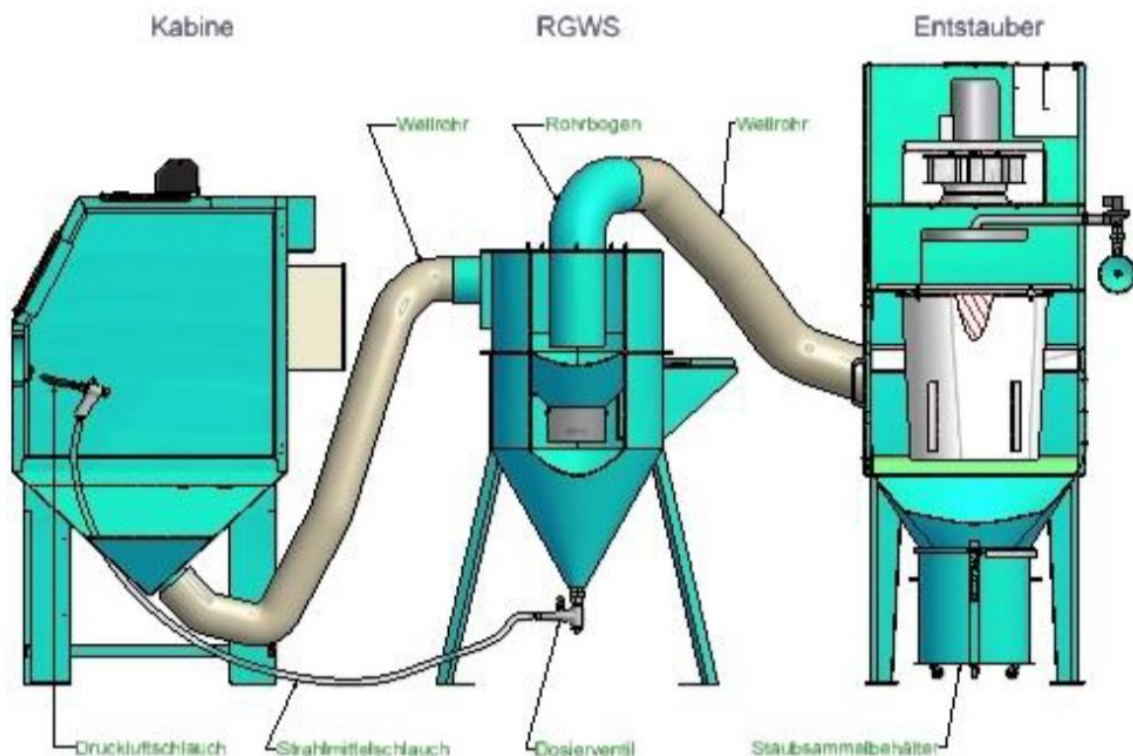


Abbildung 7: Komponentenübersicht Strahlanlage

Das kugelförmige Strahlmittel (siehe Anhang 1) bestehend aus ZrO_2 und SiO_2 und weist Durchmesser von $30\ \mu m$ bis $63\ \mu m$ auf. Dieses wird mittels Unterdruck aus dem Sammelbehälter des RGWS in die Strahldüse befördert, dort durch Druckluft beschleunigt und damit auf die zu bearbeitende Oberfläche gelenkt. Anschließend wird das Strahlmittel wieder abgesaugt, im RGWS gefiltert und steht dann im Sammelbehälter wieder für den Prozess bereit. Mikroskopische Messungen der gebrauchten Strahlkugeln zeigten kaum Kugeln mit Durchmessern kleiner als $30\ \mu m$. Diese wurden im RGWS, jedoch auch zusammen mit intakten Kugeln mit noch ausreichendem Durchmesser, aussortiert (siehe Anhang 1, Bild 3).

Die Werkstücke werden mechanisch und magnetisch auf einem Strahlsteller (Abbildung 8, Nr. 1) aufgesteckt und anschließend in Rotation versetzt. Durch die feststehenden Mitnehmer (Abbildung 8, Nr. 2) werden die drehbaren Achsen (Abbildung 8, Nr. 3) jeweils um etwa 90° bewegt, um den gesamten Umfang des Bauteils bestrahlen zu können. Die drei Strahldüsen (Abbildung 8, Nr. 4) sind variabel befestigt und können als Einheit vertikal verfahren werden, um die Bearbeitung der Gesamthöhe der Bauteile zu gewährleisten.

Diese Höhenverstellung ist in die Strahlkabine (Abbildung 9) integriert und wird automatisch nach einer einstellbaren Anzahl an Umdrehungen des Strahlzellers und einer ebenfalls einstellbaren Strecke verfahren. In ihr sind jeweils drei Strahlzeller übereinander angebracht sowie weitere drei Strahlzeller über ein Wechselsystem verbunden. So kann während des Strahlvorgangs des einen Satzes Strahlzeller, der andere Satz entladen und wieder neu bestückt werden.

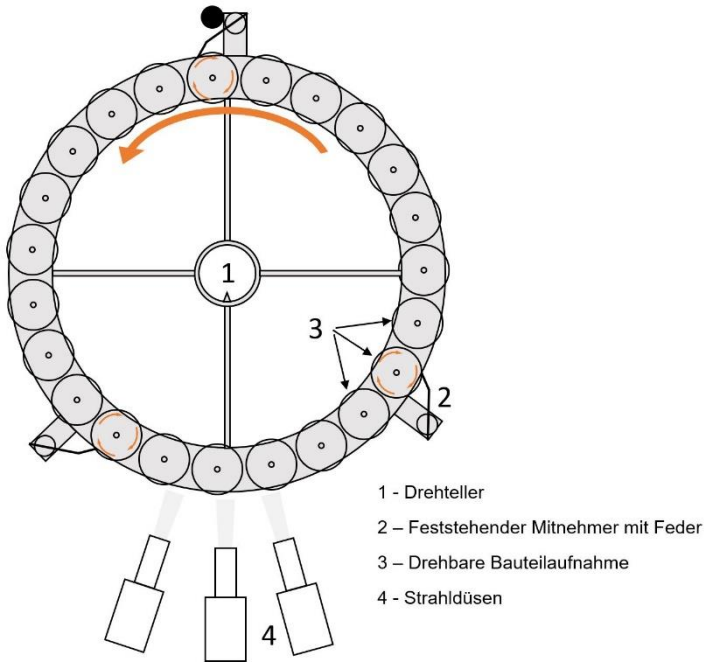


Abbildung 8: Werkstückaufnahme

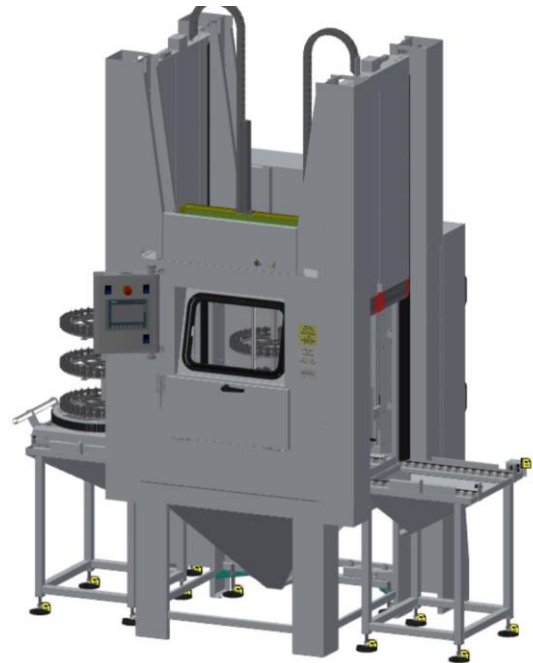


Abbildung 9: Strahlkabine

Mittels der drei Strahldüsen wird das Strahlmittel auf die Bauteile geführt. Den beispielhaften Aufbau zeigt Abbildung 10. Über den Druckluft-Anschluss (Abbildung 10, Nr. 1) wird die Strahlpistole mit variablem Strahl Druck beaufschlagt. Beim Austreten der komprimierten Luft aus der Venturi-Düse (Abbildung 10, Nr. 3) werden aus der umgebenden Kammer Luftteilchen mitgerissen. Durch den damit verursachten Unterdruck entsteht in der Strahlmittelzuführung (Abbildung 10, Nr. 2) ein Luftstrom, welcher das Strahlmittel aus dem Sammelbehälter in die Strahlpistole fördert. Das Luft-Strahlmittel-Gemisch tritt durch die am Düsenausgang verbaute Laval-Düse (Abbildung 10, Nr. 4) als ein konischer Strahl aus.

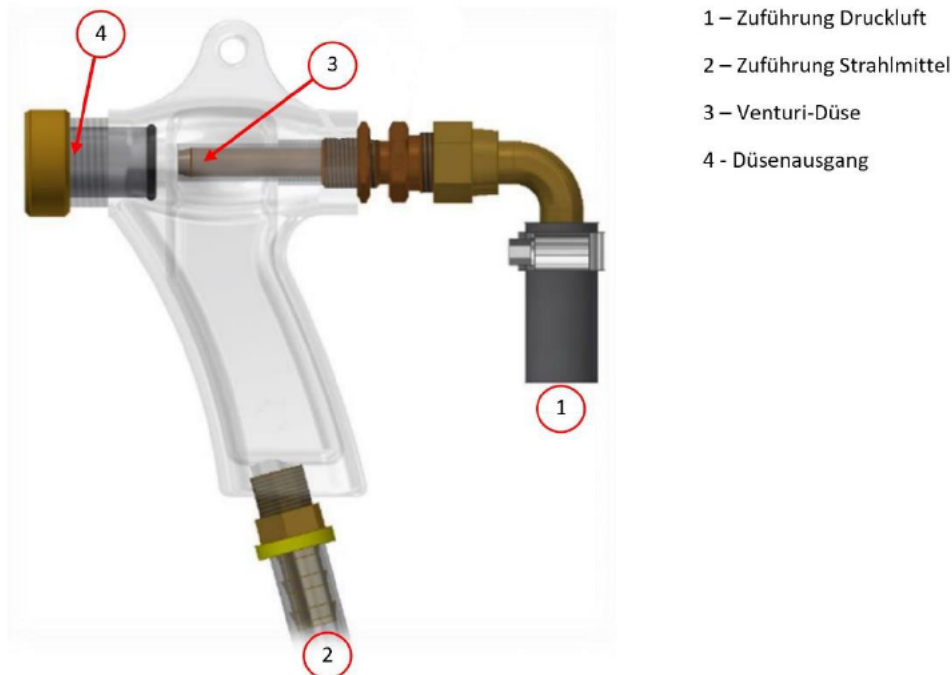


Abbildung 10: Aufbau Venturi-Strahldüse

2.3 Oberflächenkennwerte

Die in der Fertigung erzeugte Oberfläche weicht immer von der theoretisch perfekten Oberfläche einer Zeichnung ab. Für den Bereich der Oberflächentechnik existiert daher ein umfangreiches Regel- und Normenwerk zur qualitativen und vergleichbaren Bewertung der erzeugten Oberflächen.

2.3.1 Rauheitsmessung

Für die Ermittlung der Oberflächenrauheit wird diese zunächst mit Messgeräten erfasst. Dies geschieht klassisch als taktile-2D-Technik im Tastschnittverfahren (vgl. DIN EN ISO 13565) oder optisch, in diesem Falle mit konfokaler Messung mit dem SIM-Verfahren (vgl. DIN EN ISO 25178). Taktile Messgrößen werden über den Buchstaben „R“ gekennzeichnet, flächenhafte hingegen mit einem „S“. In Anlagen Teil 1 sind beide Verfahren schematisch dargestellt. Eine taktile Messung ist das deutlich schnellere der beiden Verfahren, da die

Tastspitze nur über eine lineare Messstrecke mit definierter Länge geführt wird. Jedoch stößt dieses Verfahren an seine Grenzen bei Konturen, welche kleiner als der Durchmesser der Fühlerspitze sind (vgl. Abbildung 11).

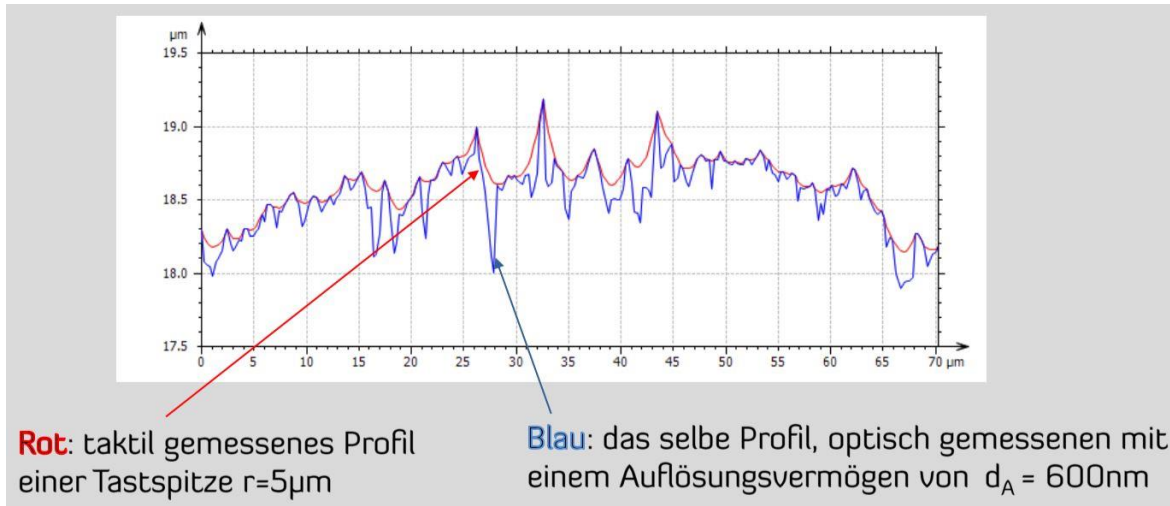


Abbildung 11: Vergleich taktiler zu optischer Messung

Diese feinsten Täler können mit geeigneten optischen Verfahren hingegen ermittelt werden. Während taktile Messgeräte nur Täler größer oder gleich dem Durchmesser der Fühlerspitze erkennen können, ermöglicht das hier eingesetzte Messgerät TOOLinspekt des Herstellers confovis Oberflächenauflösungen bis in den einstelligen Nanometer Bereich (siehe Anlage 2). „Während der konfokalen Messung mit dem SIM-Verfahren werden beide LEDs (Beleuchtung A und Beleuchtung B) abwechselnd angesteuert, was den Fokus durch die Topographie bewegt [...]. Die Berechnung des Messergebnisses erfolgt durch die Berechnung des Differenzkontrastes der beiden Aufnahmen. Es entsteht für jeden Messpunkt eine Point Spread Function (PSF), aus der die z-Koordinate mit einem Gauß-Fit bestimmt wird.“ (confovis GmbH, 2022). Weiterhin wird mit diesem optischen Verfahren eine Bewertung größerer Oberflächenstrukturen möglich, da dieses nicht linear, sondern flächenhaft basierend arbeitet. Die nach DIN EN ISO 13565 definierten Messstrecken werden in ein zu messendes Quadrat mit entsprechender Kantenlänge gewandelt.

Aus dem Primärprofil wird ebenfalls mit Filterung nach DIN EN ISO 11562 / DIN EN ISO 16610-21 eine Zerlegung in Welligkeit und Rauheit abgeleitet. Da jedoch nicht nur eine lineare Strecke ermittelt wird, sondern wie erwähnt, eine größere Oberfläche, beispielsweise $4 \times 4 \text{ mm}$ bei erwarteten S_z -Werten von $0,5 - 10 \mu\text{m}$, ist die Wahrscheinlichkeit dabei deutlich höher, Extremwerte an Tälern oder Spitzen gleichzeitig zu messen, als bei einer taktilen Messung. Die Werte für die Rautiefe beispielsweise liegen flächenhaft gemessen etwa um den Faktor 2 höher als bei taktiler Messung. Daher ist bei direktem Vergleich beider Verfahren eine signifikante Abweichung der ermittelten Werte möglich.

2.3.1.1 Gemittelte arithmetische Höhe

Die gemittelte arithmetische Höhe ist der arithmetische Mittelwert der absoluten Beträge der Ordinatenwerte der Messstrecke. Berechnet werden diese nach den folgenden Funktionen:

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx$$

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy$$

Da diese beiden Werte unempfindlich gegen Spitzen und Täler sind, besitzen sie daher weniger Aussagekraft über das tribologische Verhalten einer Oberfläche. Verwendet werden diese jedoch zur Bewertung und zum Vergleich mehrerer Oberflächen.

2.3.1.2 Rautiefe

Bei einem Vergleich der Rautiefe zwischen linearem Rz und flächenhaftem Sz Parameter treten hierbei die größten Unterschiede zueinander auf. Zur Bestimmung von Rz wird die Messstrecke in fünf Teilstrecken aufgeteilt und anschließend der Durchschnitt von Rz₁₋₅ gebildet. Damit wird eine höhere statistische Sicherheit erreicht. Einzelne Extrema werden so jedoch unterdrückt.

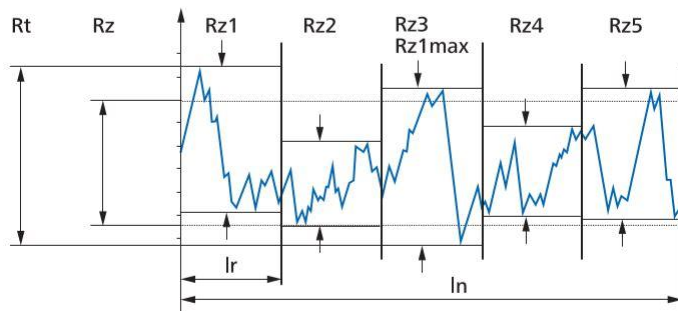


Abbildung 12: Berechnung mittlere Rautiefe

Der flächenhafte Parameter Sz hingegen wird nach DIN EN ISO 25178-2 als maximale Höhendifferenz zwischen höchster Spitze und tiefstem Tal der gesamten Fläche definiert. Daher zeigt dieser auch die deutlich höheren Werte. Folgende Berechnungsgrundlage wird dafür verwendet:

$$Sz = S_p + S_v$$

Die Rautiefe ist maßgeblich mit verantwortlich für die Bereitstellung von z.B. Öldepots zur Reduzierung der Gleitreibung.

2.3.1.3 Reduzierte und absolute Tal- und Spitzenhöhe

Abgeleitet werden die flächenhaften Parameter für die reduzierte und absolute Tal- und Spitzenhöhe, wie beim klassischen Tastschnittverfahren, nach der DIN EN ISO 13565-2 aus der Abbott-Firestone-Kurve (vgl. Abbildung 13).

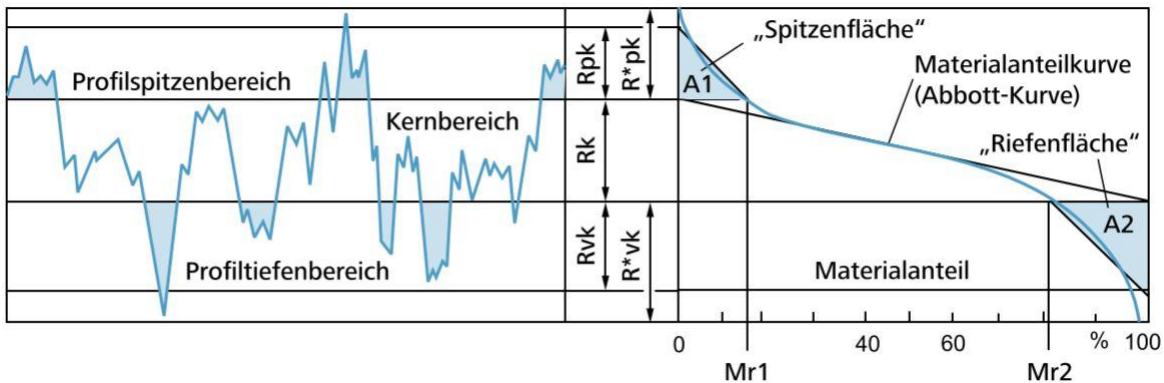


Abbildung 13: Abbott-Firestone-Kurve

Die Werte S_{pk} und S_{vk} stellen dabei die reduzierten Höhen dar. Gebildet werden diese aus einem rechtwinkligen Dreieck (A1, A2) mit dem gleichen Flächeninhalt wie die Spitzen- bzw. Talflächen, welche aus dem Kernprofil herausragen.

Die Werte für S_{pk}^* (S^*_{pk}) und S_{vk}^* (S^*_{vk}) stellen die absoluten Maxima innerhalb der Messfläche dar. In der Literatur werden diese auch als S_{pkx} und S_{vkv} bezeichnet. Diese beschreiben den Abstand zwischen Kernbereich und den absoluten Maximalwerten der Profilspitzen bzw. -täler.

Aussagekräftig sind die Spitzenwerte vor allem in der Bewertung des abrasiven Verhaltens am Gegenkörper sowie die Talhöhe für die Bereitstellung eines Öldepots für Gleitreibung.

2.3.1.4 Maximale Spitzenhöhe

Die maximale Spitzenhöhe resultiert aus der Differenz der höchsten Spitze zur Mittellinie des Rauheitsprofils. $s_p = \max Z(x, y)$. Im Gegensatz zur absoluten Spitzenhöhe, ergeben sich daher hier keine Abhängigkeiten aus der Lage und der Größe des Kernbereichs.

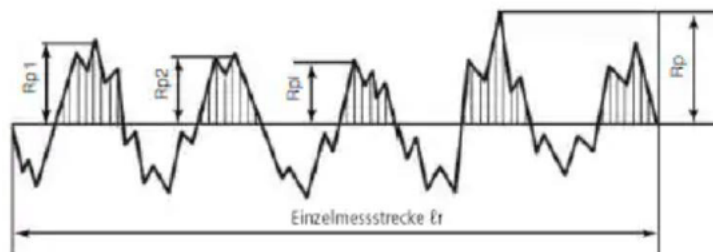


Abbildung 14: Maximale Spitzenhöhe R_p

Auch dieser Wert trägt eine maßgebliche Bedeutung für das abrasive Verhalten der Oberfläche am Gegenkörper.

2.3.2 Härtemessung

Verwendet wurde das Härtemessverfahren nach Vickers beschrieben durch DIN EN ISO 6507. Ein pyramidenförmiger, diamantener Eindringkörper mit Öffnungswinkel $\alpha=136^\circ$ (vgl. Abbildung 15) wird langsam auf die Oberfläche aufgesetzt und innerhalb von etwa 7 Sekunden mit der Prüfkraft beaufschlagt. Die Härteangabe in HV10 bedeutet dabei, eine Prüfkraft von 10 kgf (~ 49 N). Diese Kraft wird für 10-14 Sekunden konstant gehalten. Anschließend wird der Eindringkörper wieder angehoben.

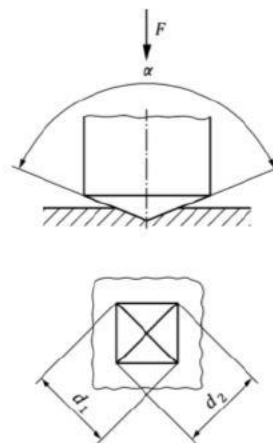


Abbildung 15: Härteprüfung nach Vickers

Der dabei entstandene Eindruck wird per Auflicht-Mikroskop in den Diagonalen ausgemessen (Abbildung 16). Durch die Krümmung der Oberfläche muss zur Berechnung noch ein Korrekturfaktor $k=d/D$ (Siehe DIN EN ISO 6507-1 Anhang B) berücksichtigt werden.

Die Härte nach Vickers ergibt sich dabei aus dem Verhältnis von Prüfkraft zur Eindruckoberfläche zu folgender Berechnung:

$$HV = k * \frac{1}{g} * \frac{2F \sin \frac{\alpha}{2}}{\left(\frac{d1 + d2}{2}\right)^2}$$

Auf Grund der strukturierten Oberfläche der Achsen mit quer verlaufenden Riefen, ist ein exaktes Ausmessen, auch mit technischer Unterstützung, nur bedingt möglich. Vor allem für die Ecken, welche in Riefenrichtung zeigen (Abbildung 16, Nr. 2), muss die Position des Messpunktes geschätzt werden. Daher ist eine Genauigkeit von nur etwa ± 5 HV10 erreichbar.

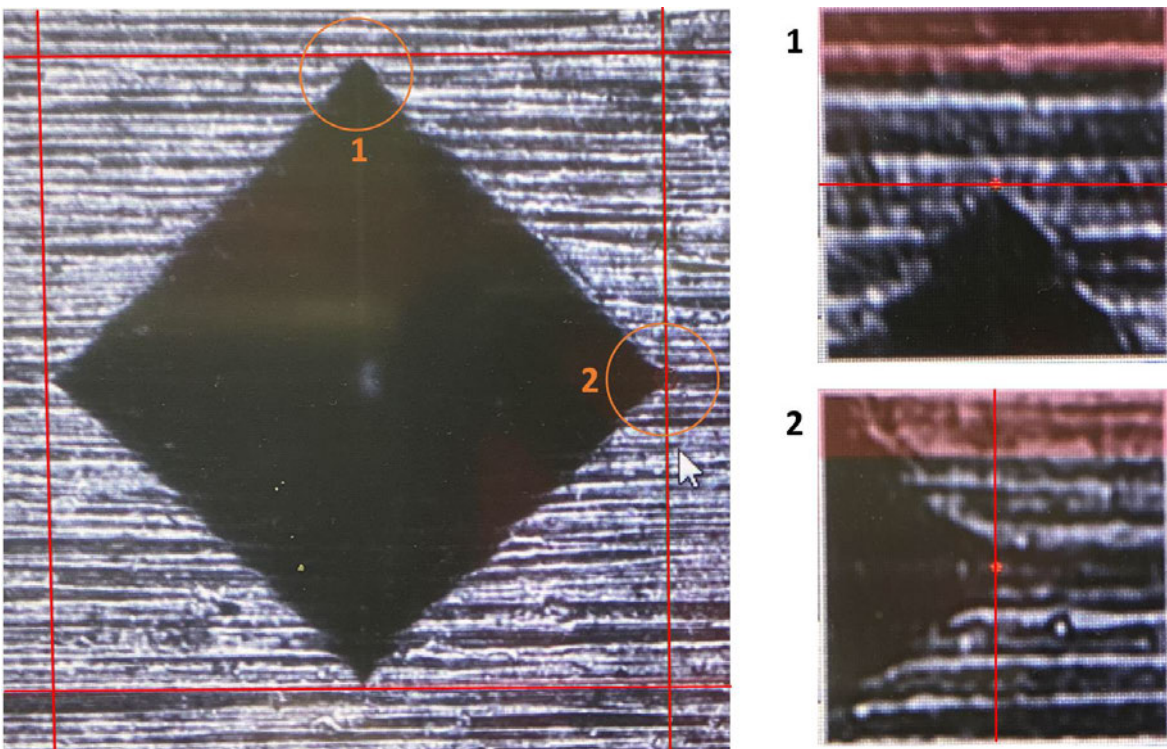


Abbildung 16: Härteeindruck nach Vickers

2.4 Optische Bewertung

Eine Bewertung des Strahlergebnisses kann rein visuell durch manuelle, optische Betrachtung der Oberfläche erfolgen. Alternativ wäre ein Vergleich zu Musterteilen möglich. Beides ist jedoch nur subjektiv möglich.

Eine qualifiziertere Bewertung der erzeugten Oberfläche ist jedoch möglich, wenn mittels eines Kamerasystems das Bauteil über den gesamten Umfang aufgenommen wird. Dazu wird die Achse auf zwei synchron drehende Wellen aufgelegt und mittels eines Kamerasystems mit einstellbarer Belichtungszeit segmentweise aufgenommen. Mit einer speziellen Software werden die Einzelaufnahmen zu einem kompletten Bild zusammengefasst. Dieses Prinzip wird ebenfalls in der Serienfertigung genutzt, um nach der Beschichtung Fehlstellen in und auf der Beschichtung sicher erkennen zu können. Mit für die helleren, unbeschichteten Achsen entsprechend angepasster Belichtungszeit ist jedoch auch eine Bewertung der gestrahlten Achsen möglich. Abbildung 17 zeigt eine damit aufgenommene Achse, welche durch einen simulierten Ausfall von zwei der drei Strahldüsen nur unzureichend gestrahlt wurde. Der fleckige Eindruck der Oberfläche war mit dem bloßen Auge nur schwer einzuschätzen, wird mit diesem Verfahren allerdings eindeutig als fehlerhaft erkannt.



Abbildung 17: Oberfläche einer ungleichmäßig gestrahlten Achse

3 Vorbetrachtungen

Vor der Analyse des aktuellen Strahlprozesses und Überlegungen zu dessen Optimierung sollen zunächst Betrachtungen zu den relevanten und grundlegenden Eigenschaften des Strahlvorganges erfolgen sowie deren Einfluss auf die resultierende Oberfläche erörtert werden.

3.1 Art des Materialabtrages

Die Vorgänge während der Interaktion vom Strahlmittel mit der Strahlgutoberfläche hängen im Wesentlichen von Form und Energie der Strahlkörner ab. Kantige Strahlmittel, wie beispielsweise Korund, sollten in einem flacheren Winkel $\alpha \ll 90^\circ$ auf die Oberfläche treffen. Diese erzeugen mit ihren Spitzen eine lokal sehr hohe Kräfteinwirkung und durchfurchen damit die Oberfläche. Dabei wird das Material des Strahlgutes aufgeworfen und bei Überschreiten der Streckgrenze erfolgt ein Materialabtrag. Bei rundem oder abgerundetem Strahlmittel hingegen kann zwischen senkrechtem und flacherem Auftreffwinkel differenziert werden. Treffen die Kugeln in einem rechten Winkel auf die Oberfläche, so leiten sie ihre Energie flächiger ein als dies bei Korund der Fall wäre. Daher entsteht keine abrasive Wirkung, jedoch wird die Oberfläche des Strahlgutes deformiert und eingedrückt. Je nach Einschlagsenergie erfolgt nur eine plastische oder elastische Verformung der Oberfläche, eine Verfestigung des Gefüges (s.g. Shot-Peening) bis hin zum Abtragen durch seitliches Aufwerfen, bei Überschreitung der Streckgrenze des Grundmaterials (vgl. Abbildung 18).

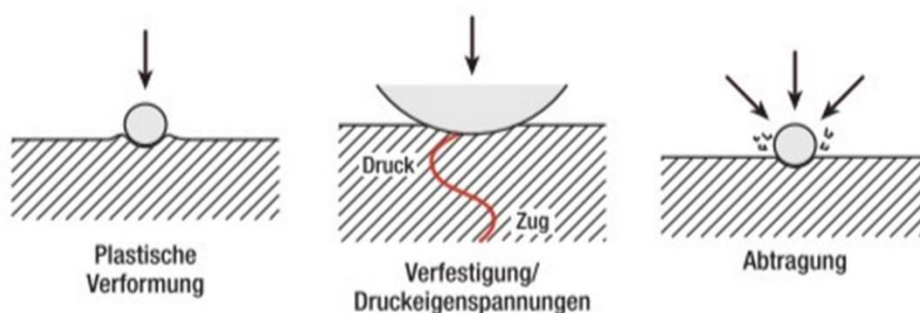


Abbildung 18: Strahlwirkung auf die Oberfläche

Hinzu kommt dabei noch der Effekt der Oberflächenermüdung. Hierbei wird der Materialabtrag als aus zwei Phasen bestehend angesehen. Während der Kräfteinwirkung wird im Material unter dem Strahlmittelkorn ein parallel zur Beanspruchung verlaufender Riss erzeugt. Dieser Riss schließt sich während der folgenden Entlastungsphase wieder und bedingt durch die Spannungsumlagerung bilden sich radial zur

Beanspruchungsrichtung verlaufende Risse. Wenn diese Risse die Werkstoffoberfläche erreichen, erfolgt ein Materialabtrag (vgl. Momber & Schulz, 2006, S. 165).

Wird hingegen ein Winkel flacher als $\alpha=90^\circ$ gewählt, reduziert sich damit die Kraft F_v , welche vertikal auf die Oberfläche wirkt mit:

$$F_v = F_{Kugel} * \sin \alpha.$$

Jedoch beginnen dabei die Kugeln über die Oberfläche zu gleiten und erzeugen damit, bedingt durch die steigende horizontale Kraft, einen Gleitverschleiß der Oberfläche. Durch Abrasion oder Adhäsion zwischen Bauteil und Strahlkugeln kann damit Material von der Oberfläche abgetragen werden. Sollten die Strahlkugeln beschädigt werden (siehe Anhang 1), würden die so entstehenden Kanten der Kugeln und deren Bruchstücke wiederum einen Abtrag ähnlich wie Korund erzeugen. Daher sollten diese defekten Strahlkugeln im RGWS aussortiert werden.

Aus diesen Aspekten kann eine erste mögliche Erhöhung der Abtragsleistung abgeleitet werden. Wird die Oberfläche länger bestrahlt, erhöht sich damit auch die Anzahl von Einschlägen pro Flächeneinheit. Damit nehmen die Oberflächenermüdung und auch der zu erwartende Abtrag durch Gleitverschleiß zu. Jedoch würde dies zwangsläufig auch zu einer Verlängerung der Prozesszeit führen.

Die Energie der auf die Oberfläche aufschlagenden Strahlkugeln wird über folgende Formel beschrieben:

$$E = \frac{m * v^2}{2}$$

Da die Masse proportional und die Geschwindigkeit quadratisch in die Einschlagsenergie eingeht, kann mit größeren und schnelleren Kugeln eine Erhöhung der Abtragsleistung erwartet werden. Da allerdings die Größe der zu verwendenden Kugeln seitens der Validierung festgelegt ist, kann hier keine Änderung vorgenommen werden. Verwendet werden kann daher ausschließlich das beschriebene Strahlmittel mit Korngrößen von 30 – 63 μm . Die Geschwindigkeit des Strahlmittels wird primär von der Geschwindigkeit der austretenden Strahlluft beeinflusst. Diese wiederum hängt maßgeblich von der Form und Größe der Düse ab, aber auch direkt von dem in der Zuleitung anliegenden Luftdruck. Eine exakte Berechnung ist jedoch technisch kaum zu verwirklichen (vgl. Abschnitt 3.2). Hier wäre dennoch ein proportionaler Zusammenhang zwischen dem eingestellten Strahldruck und der Abtragsleistung zu erwarten.

3.2 Strahlintensität

Die kinetische Energie der einzelnen Partikel kann berechnet werden mit:

$$E_p = \frac{\pi}{12} * \rho_p * v_p^2 * d_p^3$$

Beziehungsweise die gesamte verfügbare Energie mit:

$$E_{p_{ges}} = \sum_{i=1}^n E_{pi}$$

Unter der Strahlintensität wird dann allgemein die Summe aller während des Strahlens an die Oberfläche abgegebenen Impulse bezeichnet.

$$I \sim n * t_s * \cos \alpha * \rho_p * v_p^2 * d_p^3$$

Wobei die Anzahl n und die Strahlzeit t_s ebenfalls einen direkt proportionalen Zusammenhang zueinander aufweisen.

Da in diesem Fall das Strahlgut senkrecht steht, wird der Strahlwinkel α als 0° betrachtet, wenn die Strahldüsen in einer waagerechten Position stehen. Eine Erhöhung des Strahlwinkels bedeutet dabei, dass die Düsen schrag nach unten strahlen (vgl. Abbildung 25).

Die einzigen dabei exakt messbaren Größen sind die Dichte ρ_p und die Strahlzeit t_s . Sowohl die Geschwindigkeit v_p , der Durchmesser d_p der Strahlkugeln und der exakte Aufschlagwinkel α könnten nur als Verteilungskurven dargestellt werden. Die Durchmesser der Kugeln sind mit $30 \mu\text{m}$ bis $63 \mu\text{m}$ festgelegt. Bei einer Dichte $\rho = 3,8 \text{ g/cm}^3$ ergibt sich damit ein Gewicht von $m_{30\mu\text{m}}=0,43 \mu\text{g}$ bis $m_{63\mu\text{m}}=3,98 \mu\text{g}$, also einen Unterschied von fast Faktor 10. Das Gewicht wiederum erzeugt zusätzlich eine Rückwirkung auf die Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse.

Die mathematische Herangehensweise wurde daher nicht gewählt. Ein gängiges Verfahren zur Bewertung der Strahlintensität ist das aus dem Bereich des Shot-Peenings eingesetzte Almen-Verfahren nach SAE J442. Beim Shot-Peening wird die Oberfläche der Bauteile ebenfalls mit kugelförmigem Strahlmittel beschossen. Die verwendeten Kugeldurchmesser liegen dabei üblicherweise bei $\sim 500 \mu\text{m}$. Durch die Aufschläge wird die Oberfläche und damit das Atomgitter gestaucht wodurch eine Druckspannung erzeugt wird, welche die Widerstandsfähigkeit gegen Risse und Ermüdung erhöht. Zum Einstellen und Vergleichen

des Strahlprozesses werden spezielle Plättchen aus Federstahl einseitig bestrahlt. So wird auf der dem Strahl zugewandten Seite ebenfalls Druckspannungen erzeugt, welche nach der Demontage eine konvexe Biegung des Plättchens in Richtung der Strahldüse zur Folge hat. Diese Durchbiegung wird gemessen und in Relation zur Strahlzeit in einem Graphen aufgetragen (Abbildung 19).

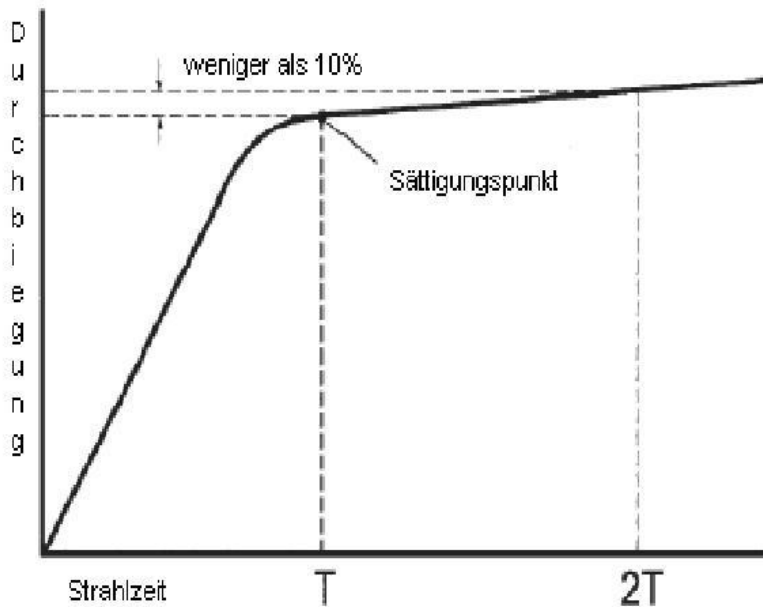


Abbildung 19: Almenkurve

Der Sättigungspunkt wird dort definiert, wo bei Verdoppelung der Strahlzeit nur 10% mehr Durchbiegung entsteht. Bei einem Test dieses Verfahrens konnte jedoch selbst bei der dünnsten Blättchenstärke Typ „N“ von 0,79 mm und einer vielfachen Strahlzeit lediglich eine Durchbiegung von einigen 1/100 Millimeter ermittelt werden. Dies dürfte darin begründet liegen, dass die hierbei verwendeten Kugeln mit einer Größe von maximal 63 μm im Gegensatz zu den üblichen Kugeln des Shot-Peenings mit ca. 500 μm etwa um den Faktor 10 kleiner sind. Daher sind ihre Volumina als auch ihre Massen um den Faktor 1000 kleiner. Durch den direkten proportionalen Zusammenhang zwischen der Masse der Kugeln und der Strahlintensität, wird diese Intensität ebenfalls um den gleichen Faktor kleiner.

Als Lösung dafür wurde nach einem alternativen Bauteil gesucht. Passend für diesen Zweck waren die Mitnehmerfedern der Serienhalterungen für die Beschichtungsanlagen, welche im Werk im Einsatz sind. Es handelt sich dabei um einen ebenfalls aus Federstahl hergestellten Mitnehmer, welcher ähnlich wie bei dem verbauten Strahlsteller, genutzt wird, um die Bauteilaufnahme der Beschichtungshalterung in Rotation zu versetzen. Diese Federn mit einer Materialdicke von 0,5 mm aus dem Material NIMONIC®90 besitzen eine Härte von nur rund 21 HRC. Diese ist damit nur etwa halb so groß, wie die der Almen-Testplättchen mit 44-50 HRC. Unter den aktuell verwendeten Strahlparametern ergibt sich dabei eine mess- und reproduzierbare Durchbiegung. Eine Verdoppelung der

Umdrehungen, also damit eine Erhöhung der Strahlzeit, zeigt eine weitere Zunahme der Intensität. Eine Verdreifachung hingegen nicht mehr (siehe Tabelle 1). Daher ist davon auszugehen, dass bereits mit den aktuell verwendeten drei Umdrehungen fast der Bereich der Sättigung erreicht wird.

Anzahl Umdrehungen	3	6	9
Durchbiegung	0,26 mmA	0,35 mmA	0,36 mmA

Tabelle 1: Almenintensität

Aus der Erkenntnis zur deutlich geringeren Strahlintensität im Vergleich zum Shot-Peening und der viel höheren Härte nitrierter Stähle lässt sich ableiten, dass ein plastisches Verformen der Oberfläche eher nicht zu erwarten ist. Ein Materialabtrag wird daher durch Oberflächenermüdung oder Gleitverschleiß erfolgen.

3.3 Bedeckungsgrad

Unter Bedeckungsgrad, auch „Überdeckung“ oder „Überdeckungsgrad“ genannt, versteht man den prozentualen Anteil der Oberfläche, welche vom Strahlmittel getroffen wurde.

$$\text{Bedeckungsgrad} = \frac{\text{Durch Einschläge deformierte Oberfläche}}{\text{Gesamter Oberfläche}} * 100\%$$

Wird der Bedeckungsgrad gegen die Strahlzeit aufgetragen, so erhält man bei homogener Verteilung des Strahlmittels im Kernbereich des Strahls, eine Kurve wie in Abbildung 20. Für eine einfache Überdeckung wird allgemein der Wert für 98% verwendet (vgl. Macherauch, 2011, S. 482).

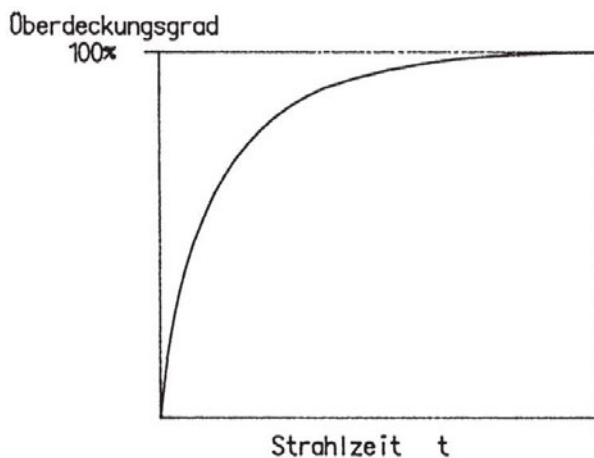


Abbildung 20: Bedeckungsgrad

Wird die Zeit für $t_{98\%}$ weiter überschritten, sind theoretische Werte mit einem Bedeckungsgrad von 100% möglich. Dies würde allerdings bedeuten, dass andere Bereiche der Oberfläche schon mehrfach getroffen wurden.

Weiter zu beachten ist, dass auf Grund der runden Form der Bauteile maximal die Hälfte des Umfangs pro Umdrehung des Strahlentellers erreicht wird. Erst wenn die Bauteilaufnahmen an dem nächsten Mitnehmer vorbeikommen, werden diese weitergedreht. Das bedeutet, dass erst nach mindestens zwei Umdrehungen des Tellers alle Seiten der Achsen einmal bestrahlt wurden. Daher muss zusätzlich noch beachtet werden, ob die Achsen im vollen Umfang gestrahlt wurden. Tests zu Beginn der Fertigung zeigten sogar, dass mindestens drei Umdrehungen nötig sind.

Aus dem Bedeckungsgrad kann direkt der effektive Bereich des Strahls ermittelt werden. Abbildung 21 zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen, oft Freistrahler genannten, Luftstrahl nach dem Austreten aus der Düse. Mit zunehmendem Abstand zur Düse weitet sich der Strahl durch den noch verbliebenen Überdruck auf. Am Randbereich zerfällt zunehmend der homogene Strahlkern durch Reibungs- und Turbulenzerscheinungen mit der umgebenden Luft. Nach einem Abstand von etwa $6 \times d_0$ ist dieser Strahlkern vollständig zerfallen (vgl. Momber & Schulz, 2006, S. 162). Strahlkörner aus dem Randbereich des Strahlkerns stoßen mit langsameren Teilchen aus der Umgebung zusammen und werden dabei selbst abgebremst. Es entsteht damit ein charakteristisches Geschwindigkeitsprofil mit zum Rand abnehmender Geschwindigkeit.

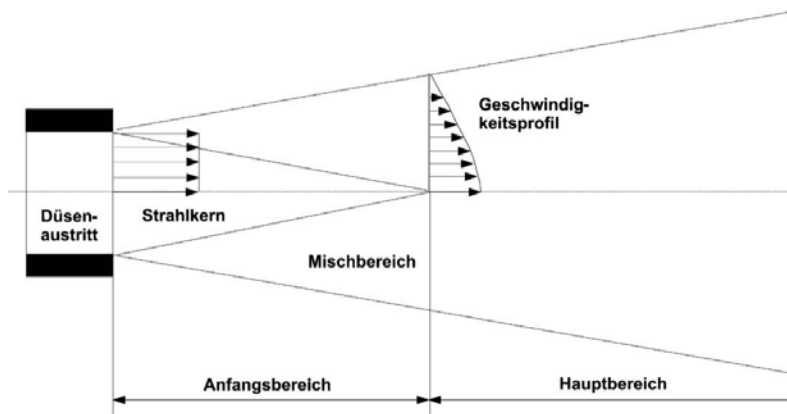


Abbildung 21: Strahlform

Zur Ermittlung der effektiven Strahlbreite wurde ein Stück Aluminium mit ähnlicher Geometrie wie die der Ausgleichsachsen einmalig mit nur einer aktiven Düse bestrahlt.

Unter lichtmikroskopischer 50-facher Vergrößerung können drei deutlich unterscheidbare Bereiche erkannt werden (vgl. Abbildung 22).

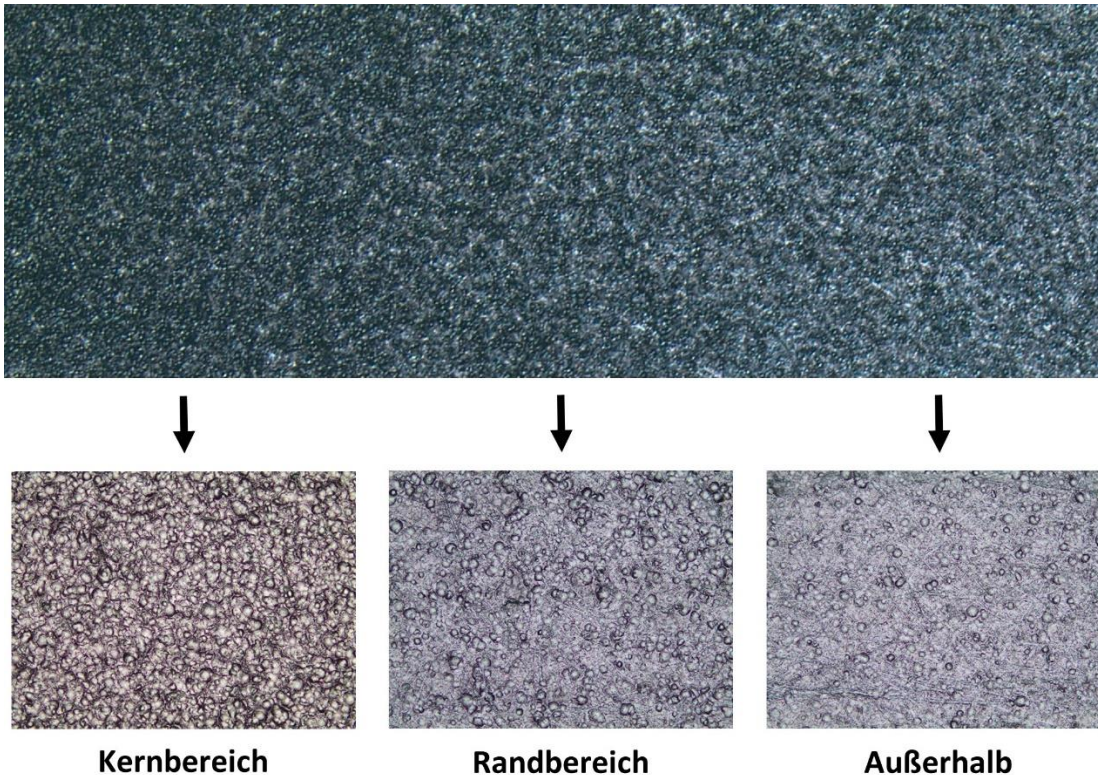


Abbildung 22: Strahlbereiche

Als Kernbereich kann jener Bereich angesehen werden, welcher einen Bedeckungsgrad von 100% aufweist. Es sind allerdings auch deutlich Überstrahlungen mit mehrfachen Einschlüssen zu erkennen. Im Randbereich sind erste Bereiche ersichtlich, welche nicht getroffen wurden, also eine Bedeckung von unter 100% aufweisen. Jedoch sind selbst weit außerhalb dieser beiden Bereiche noch Einschlüsse zu erkennen. Diese stammen von Abprallern oder entstehen, wenn Strahlkugeln bis auf die andere Seite des Strahlteilers gelangen.

Durch Ermittlung der beiden Randbereiche oberhalb und unterhalb des Kernbereichs, kann so auf eine effektive Strahlbreite von ca. 30 mm Breite geschlossen werden.

3.4 Strahlmitteldurchsatz

Durch die direkte Proportionalität der Anzahl auftreffender Strahlkugeln an der Strahlintensität, zur besseren Übersicht in nachfolgender Formel blau dargestellt, ergibt sich damit auch ein direkter Zusammenhang zur Veränderung der Oberfläche.

$$I \sim n * t_s * \cos \alpha * \rho_p * v_p^2 * d_p^3$$

Somit könnte bei gleichem Strahldruck ein höherer Energieeintrag erbracht werden, indem mehr Strahlmittel befördert wird. Gleichzeitig würde die Effizienz gesteigert, da die im Luftstrahl enthaltene Energie besser genutzt wird.

Jedoch nur so weit, wie die sich ausdehnende Druckluft genug Energie bereitstellt, um alle Strahlkugeln ausreichend und gleichmäßig zu beschleunigen. Ab einer gewissen kritischen Menge folgt aus dem Energieerhaltungssatz heraus, dass bei gleichbleibender Menge an Energie, allerdings verteilt auf eine steigende Anzahl Strahlkugeln, jede der Kugeln weniger Energie übertragen bekommt und damit weniger stark beschleunigt wird (vgl. Momber & Schulz, 2006, S. 172). Dies hätte wiederum eine Reduzierung der beim Auftreffen übertragenen Energie auf die Oberfläche zur Folge. Würde beispielsweise eine Verdoppelung des Durchsatzes an Strahlmittel eine Reduzierung der Geschwindigkeit auf $\leq 70\%$ des Originalwertes verursachen, hätte dies wegen dem quadratischen Einfluss der Geschwindigkeit zur Folge, dass trotz der Verdoppelung der Einschläge, sich die gesamte an die Oberfläche abgegebene Energie reduzieren würde.

Eine zusätzliche Begrenzung für den möglichen Strahlmitteldurchsatz stellt der Aufbau und die Funktion der Strahlmittelzuführung dar.

Die in der Strahldüse verbaute Venturi-Düse (siehe S. 11, Abbildung 10) erzeugt in der Strahlmittelleitung einen Unterdruck. Nach der Bernoulli-Gleichung ist dieser von der Strömungsgeschwindigkeit und somit vom anliegenden Strahldruck abhängig. Auf Grund des umgebenden Luftdrucks ist dieser Unterdruck auf $\Delta p \approx -1$ Bar begrenzt.

Reguliert über das Dosierventil (Abbildung 23) wird mit diesem Unterdruck Strahlmittel aus dem Vorratsbehälter zur Strahldüse transportiert.

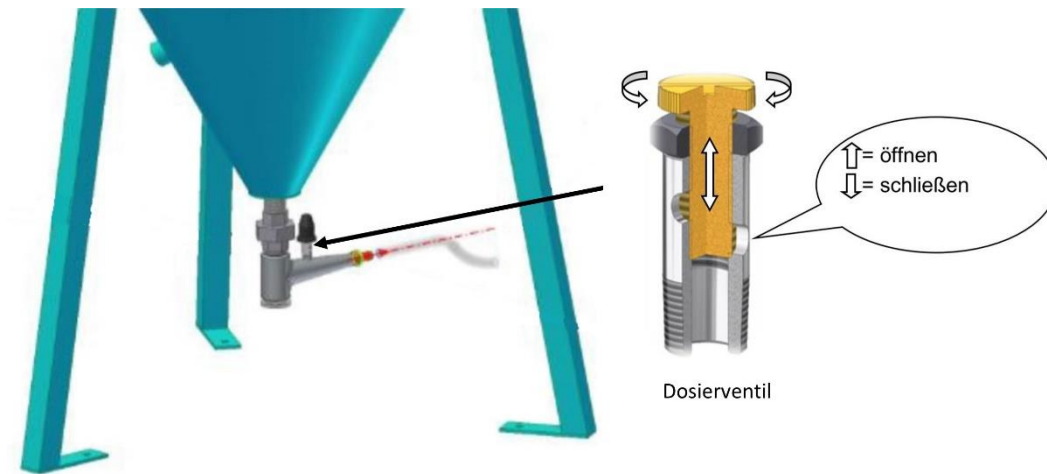


Abbildung 23: Dosierventil

Das Dosierventil verfügt über vier seitliche Bohrungen, über welche Nebenluft eingelassen werden kann. Durch Heraus- oder Hereindreuen der Stellschraube werden entsprechend mehr oder weniger dieser Bohrungen geöffnet. Je mehr der Bohrungen geöffnet sind, desto mehr Nebenluft wird angesaugt. Infolgedessen sinkt der Unterdruck im Strahlmittelschlauch und es wird weniger Strahlmittel aus dem Vorratsbehälter gezogen. Andersherum wird durch Verschließen der Bohrungen weniger Nebenluft angesogen, der Unterdruck steigt an und zieht daher mehr Strahlmittel an. Damit wäre, zumindest theoretisch, eine Regulierung des Strahlmitteldurchsatzes möglich.

Bei Versuchen an der realen Anlage zeigte sich jedoch, dass mit steigendem Einsatzalter des Strahlmittels dieses immer stärker zum Verklumpen neigt. Es entsteht daher nur ein sehr schmaler Einstellbereich. Durch mehr Nebenluft nimmt, wie beschrieben, der Unterdruck in der Saugleitung ab. Dies hatte zur Folge, dass der verbleibende Unterdruck nicht ausreichte, um Strahlmittel aus dem Vorratsbehälter zu saugen. Das Resultat davon war, dass kein Strahlmittel mehr die Strahldüsen erreichte.

In Folge eines weiter geschlossenen Dosierventils wurde, ebenfalls wie erwartet, auch mehr Strahlmittel angesaugt. Die größere Menge an Strahlmittel verursachte dabei jedoch auch mehr Kollisionen im Luftstrom sowie an der Schlauchwand. Daraufhin stockte das Strahlmittel und blieb liegen. Dies staute sich infolgedessen immer weiter an, bis es zu einem vollständigen Verschließen des Schlauches führte. Diese Verstopfung wurde, wenn überhaupt, schlagartig mitgerissen. Es konnte daher kein gleichmäßiges Strahlbild mehr erreicht werden, sondern nur ein schlagartiges „Spucken“ der Düse. Auf Grund des nur sehr schmalen Bereiches, in welchem ein konstantes Strahlbild erzeugt werden kann, konnten keine tieferen Untersuchungen zum Einfluss des Strahlmitteldurchsatzes durchgeführt werden.

Da, wie anfangs beschrieben, der in dem Strahlmittelschlauch erzeugte Unterdruck vom anliegenden Strahlendruck abhängt, ergibt sich damit ein vom verwendeten Strahlendruck abhängiger Einstellpunkt des Dosierventils.

Abbildung 24 zeigt die durch Messung der zurückströmenden Menge an Strahlmittel ermittelten Durchsätze relativ zum verwendeten Strahldruck. Der so ermittelte Durchsatz zeigt ab einem Druck von etwa 4 Bar ein deutliches Abknicken. Entgegen der erwarteten Proportionalität von Strahldruck zu Strahlmitteldurchsatz scheint dies ein Anzeichen dafür zu sein, dass der maximal mögliche Unterdruck in der Saugleitung nahezu erreicht wurde. Eine Erhöhung des Strahldruckes erzeugt daher nur noch eine minimale Erhöhung des Unterdruckes und damit nur eine geringe Erhöhung des Durchsatzes. Ein Einstellen des Betriebsdruckes auf Werte höher als 4 Bar würde zwar eine höhere kinetische Energie des Strahlmittels bewirken, jedoch auf Grund der sehr hohen Herstellungskosten für Druckluft die energetische Effizienz der Anlage reduzieren. Hinzu kommt, dass eine unzureichend mit Strahlmittel versorgte Strahldüse eine deutlich erhöhte Lärmemission verursacht. Dies, zusammen mit dem zu erwartenden höheren Verschleiß an Strahlmittel und an der gesamten Strahltechnik bei höheren Betriebsdrücken, lässt darauf schließen, dass es sich empfiehlt einen maximalen Arbeitsdruck von 4 Bar zu verwenden.

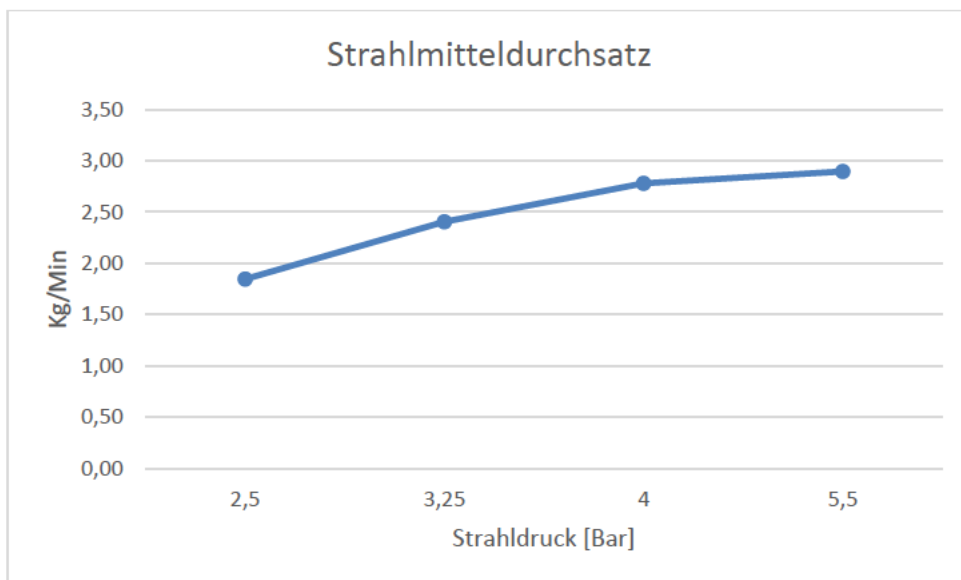


Abbildung 24: Strahlmitteldurchsatz

3.5 Strahlwinkel

$$I \sim n * t_s * \cos \alpha * \rho_p * v_p^2 * d_p^3$$

„Der Strahlauftreffwinkel ist der Winkel zwischen der Strahlrichtung und der Tangentialebene an die bearbeitete Oberfläche.“ (Momber & Schulz, 2006, S. 175) (Abbildung 25).

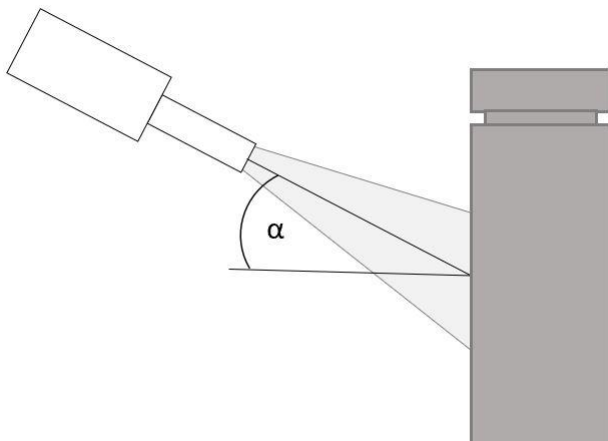


Abbildung 25: Strahlwinkel

Die besondere Relevanz liegt dabei in der Veränderung der Oberflächeneffekte je nach Einschlagswinkel der Kugeln (Abbildung 26).

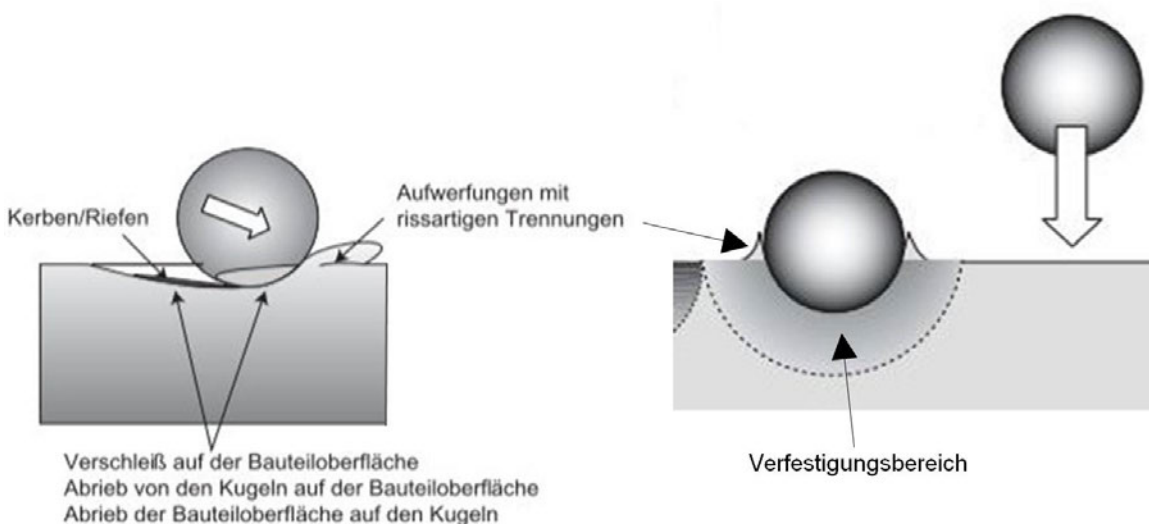


Abbildung 26: Vergleich Auftreffwinkel

Trifft die Kugel in einem Winkel von $\alpha=0^\circ$ die Oberfläche, wird dabei ein bedeutender Teil ihrer kinetischen Energie in ein Stauchen der Oberfläche umgewandelt. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, entstehen dabei runde Eindrücke mit möglichen Materialabtrag bei Überschreiten der Streckgrenze. Da jedoch zu erwarten ist, dass die kinetische Energie der Strahlkugeln nicht ausreichend ist, um eine solche plastische Deformation der Oberfläche

zu verursachen, werden wohl durch Oberflächenermüdung primär nur Bereiche abgestrahlt, welche wegen Abweichungen in der Gefügestruktur weniger stark gebunden sind.

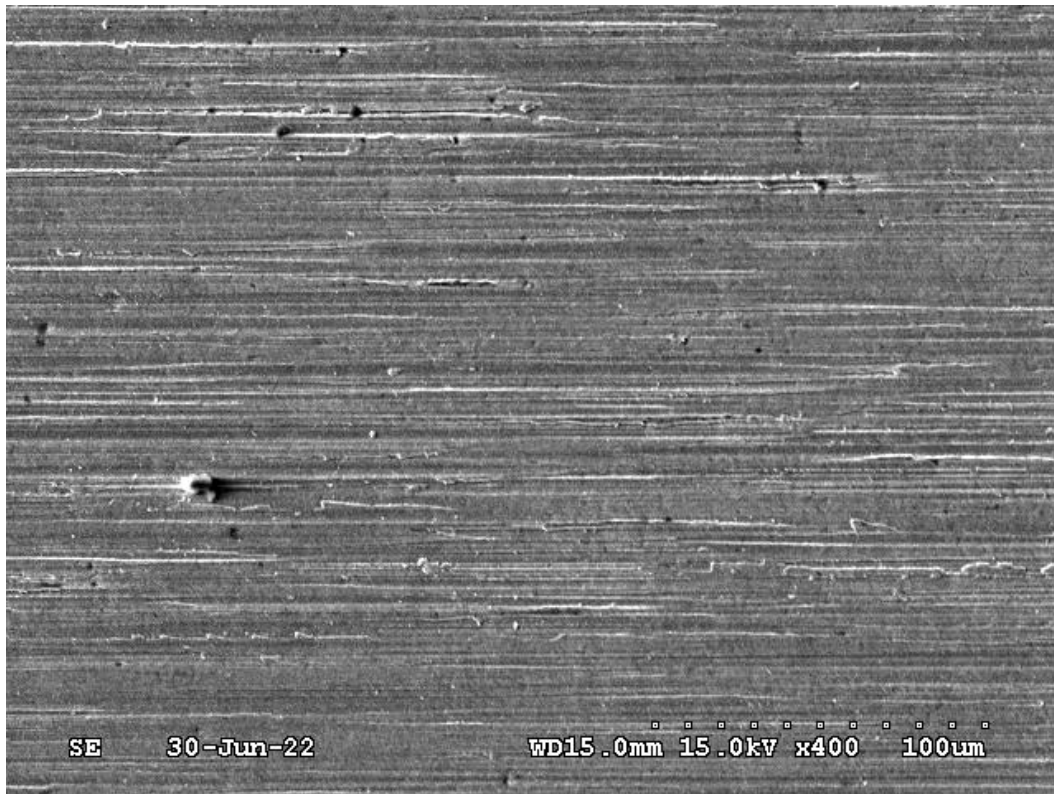


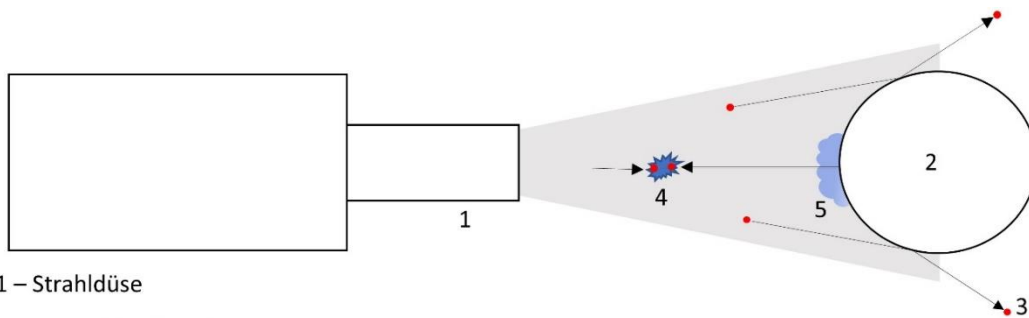
Abbildung 27: Unbehandelte Oberfläche 400-fach vergrößert

Abbildung 27 zeigt die unbehandelte Oberfläche in einer REM-Aufnahme mit 400-facher Vergrößerung. Erkennbar sind dabei die dunklen Flecke auf dem Substrat. Dies sind anhaftende Verunreinigungen und eventuell aufgewachsene Eisennitride.

Die quer um den Umfang verlaufenden Rillen entstanden durch die vorherigen Fertigungsschritte. Bei senkrechtem Strahlwinkel könnten diese durch die in gleicher Richtung verlaufenden „Streifschüsse“ (vgl. Abbildung 28, Nr. 3) wieder ungewollt verstärkt werden. Bedingt durch die in Kapitel 3.3 beschriebenen Effekte nach Verlassen der Strahldüse, weitet sich der Strahl mit dem Winkel $\beta \approx 18^\circ$ auf. Daher kommt zu dem idealen Auftreffwinkel α noch die Toleranz von $\pm 9^\circ$ hinzu. Durch einen Strahlwinkel $\alpha > 9^\circ$ kann daher verhindert werden, dass sich die Riefen der Fertigung und die Riefen, verursacht durch das Strahlen, überlagern und sich damit verstärken würden.

Ein anderer negativer Effekt eines senkrechten Strahlens ist die Möglichkeit, dass die sich nähernden Strahlkugeln durch senkrecht zurückprallende Kugeln abgelenkt werden würden (Abbildung 28, Nr. 4).

Durch die kreisrunde Strahlform kommt es zusätzlich im Kern des Strahls an der Bauteiloberfläche zu einem Stauen der Luft und somit zu einem für das Strahlen ungünstigen Strömungsverhalten an der Oberfläche (Abbildung 28, Nr. 5).



- 1 – Strahldüse
- 2 – Zu strahlende Achse
- 3 – „Streifschuss“
- 4 – Kollision mit Rückpraller
- 5 – gestaute Luft

Abbildung 28: Effekte bei senkrechtem Strahlwinkel

Erhöht man, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, den Auftreffwinkel auf $\alpha > 0^\circ$ so reduziert sich auch die vertikale Kraft F_v . Die horizontal zur Oberfläche wirkende Kraft jedoch nimmt bei größer werdendem Winkel zu, sodass die Kugel beginnt über die Oberfläche zu gleiten (vgl. Abbildung 26 links). Dabei schiebt diese, bei noch ausreichender vertikaler Kraft, Material des Strahlgutes vor sich her und trägt dieses schließlich bei genügendem Aufwurf ab. Möglich wäre auch, dass sich Teile der Oberfläche durch Kohäsion oder Kaltverschweißung an der Oberfläche der Strahlkugeln ablagern.

Wird der Winkel weiter erhöht, reduziert sich damit auch weiter die vertikale Kraft F_v . Daher entsteht zwar zunächst ein Anstieg im Gleitverschleiß, welcher aber ab einem bestimmten Winkel wieder abnimmt.

3.6 Strahlzeit

Unter der Strahlzeit wird allgemein die Zeitspanne angesehen, in welcher das Strahlmittel auf eine bestimmte Stelle des Strahlgutes einwirkt. Auch die Strahlzeit steht in einem direkten Zusammenhang mit der auf die Oberfläche abgegebene Strahlintensität.

$$I \sim n * t_s * \cos \alpha * \rho_p * v_p^2 * d_p^3$$

Der Faktor der Zeit ist jedoch nur bedingt beliebig skalierbar anzuwenden. Abbildung 29 zeigt einen typischen zeitlichen Verlauf für den gesamten Materialabtrag eines Bauteils.

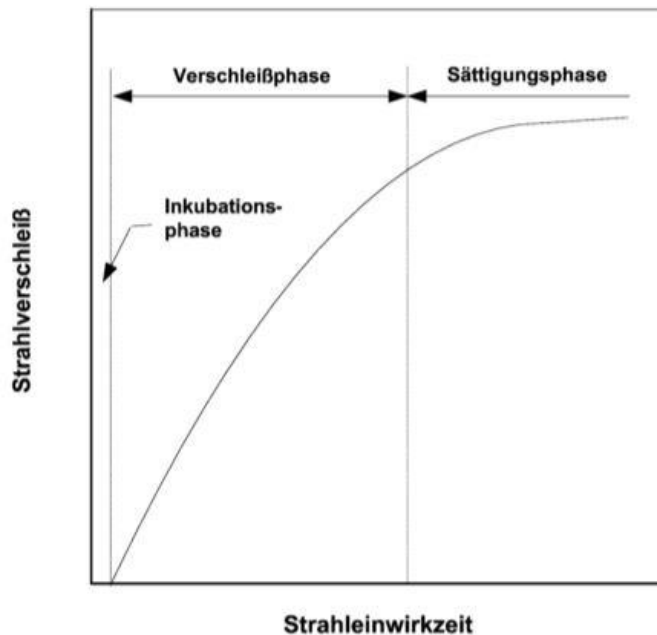


Abbildung 29: Zeitabhängiger Strahlverschleiß

In der Inkubationszeit erfolgt zunächst noch kein Materialabtrag. Es wird nur ein „Versagen“ der Oberfläche, z.B. durch Bildung von Mikrorissen durch eine definierte Anzahl erster Einschläge, vorbereitet (vgl. Momber & Schulz, 2006, S. 175). Erst nach Überschreiten der Inkubationsphase erfolgt ein Materialabtrag. In diesem konkreten Fall dürften während der Verschleißphase hauptsächlich die oberflächlichen Verschmutzungen, Nitrierfehler oder aufgewachsene Eisennitride entfernt werden. Nach Ende der Verschleißphase ist ein deutliches Abknicken hin zur Sättigungsphase zu erkennen. In dieser erfolgt kaum weiterer Materialabtrag, da auf Grund der Härte des verbleibenden Metallgefüges nur noch mit einer sehr hohen Anzahl an Einschlägen weiteres Grundmaterial abgetragen werden kann.

Eine Veränderung in der Strahlzeit wäre über die Drehgeschwindigkeit des Strahlteilers bzw. über die eingestellte Anzahl an Umdrehungen pro Höhenschritt möglich. Pro Umdrehung des Tellers ist das Strahlgut aktuell etwa einer Strahlzeit von 4 Sekunden ausgesetzt. Eine Erhöhung der Drehgeschwindigkeit des Tellers ist anlagenbedingt jedoch nicht mehr möglich. Eine Reduktion der Drehgeschwindigkeit würde auch eine Verlängerung der Strahlzeit bedeuten, jedoch damit auch eine ungewollte Verlängerung der gesamten Prozesszeit der Anlage.

Ein wichtiger Faktor bei dieser Anlage ist, wie in Kapitel 3.3 bereits beschrieben, dass mindestens drei Umdrehungen des Strahlteilers nötig sind, um den gesamten Umfang der Achsen einmal zu bestrahlen. Aktuell wird mit 12 mm etwas weniger als die Hälfte des effektiven Strahlbereichs als Höhenversatz je Schritt eingesetzt. Dies bedeutet, dass jeder Bereich der Achsen zwei Schritte lang, also über sechs Umdrehungen, bestrahlt wird.

4 Aktueller Stand

Zur Bewertung von Veränderungen im Strahlprozess vor und nach einer Anpassung sowie als Zielvorgabe für zu erreichende Mindestwerte wird zunächst der aktuelle Stand aus der Serienproduktion aufgenommen.

Die Zeit für einen kompletten Strahlprozess aller drei Ebenen liegt dabei aktuell bei etwa 30 Minuten Gesamtzeit, welche sich aus 25 Minuten reiner Strahlzeit, 4 Minuten für das automatische und etwa 1 Minute für das manuelle Abblasen der Bauteile zusammensetzt. Das Abblasen ist notwendig, um die Bauteile und das Kammerinnere von anhaftenden Resten des Strahlmittels zu befreien.

Verwendet wird aktuell weiterhin ein Strahldruck von 2,5 Bar, ein Strahlwinkel von $\alpha \sim 10^\circ$ und 12 mm Höhenversatz je Schritt.

4.1 Optischer Eindruck

Seitens des Kunden ist ein glänzender sowie gleichmäßiger Eindruck der Oberfläche gewünscht. Nach dem Nitrieren (Abbildung 30 oben) weisen die Achsen jedoch eine matte und teils fleckige Oberfläche auf. Außerdem variiert das Oberflächenbild zwischen einzelnen Chargen stark. Nach dem Strahlen (Abbildung 30 unten) ist die Oberfläche deutlich glänzender und homogener, bis auf einen schmalen, trüben Bereich von etwa 5 mm Breite am unteren Ende des Bauteils, welcher durch den Strahlvorgang zwar reduziert, aber nicht entfernt werden konnte. Siehe rote Markierung in Abbildung 30 unten.



Abbildung 30: Optischer Vergleich von nitrierter (oben) und gestrahlter Achse (unten)

Mittels REM aufgenommene Bilder der Oberfläche zeigen diese Veränderung noch deutlicher (Abbildung 31). Zu erkennen ist die durch das Strahlen bewirkte Glättung der Oberfläche, welche für das glänzendere Erscheinungsbild ausschlaggebend ist. Die Riefen der Fertigung konnten in ihren Ausmaßen größtenteils deutlich reduziert werden. Anhaftende Verunreinigungen oder Aufwüchse sind weitestgehend entfernt worden.

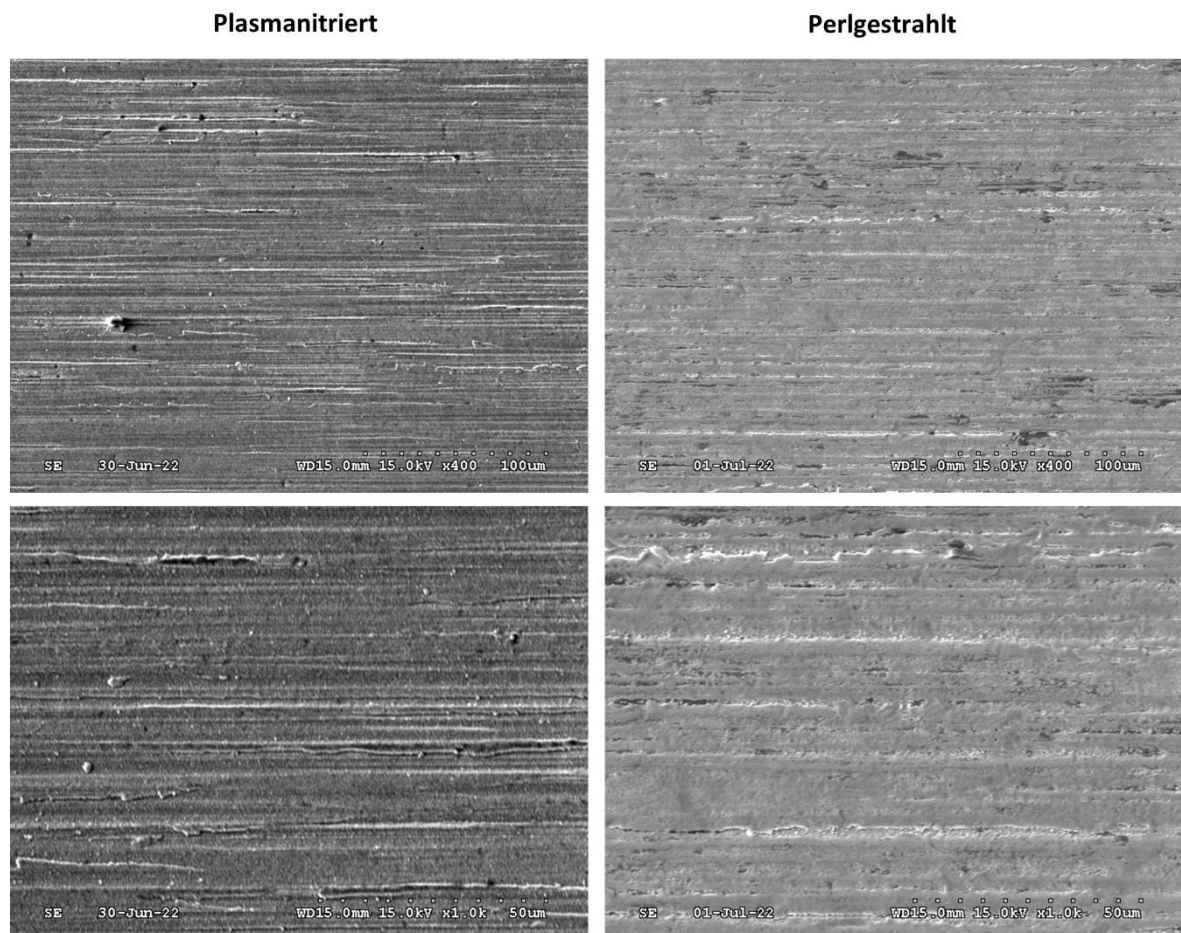


Abbildung 31: REM-Aufnahmen der Oberfläche vor und nach dem Strahlprozess

4.2 Kennwerte

In Tabelle 2 sowie in Abbildung 32 sind die aktuellen Werte aus der Serienproduktion zusammengestellt. Bei den kundenseitig spezifizierten Eigenschaften für Härte, Durchmesser und Rauheit R_z sind die einzuhaltenden Grenzwerte markiert.

	Oberflächenhärte [HV10]	Durchmesser [mm]	Rauheiten [μm]							
			Rz	Sz	Sa	Spk	Svk	Spk*	Svk*	Sp
Nitriert	692,62	19,0009	2,270	5,725	0,307	0,367	0,405	0,625	0,787	2,495
Gestrahlt	676,25	19,0005	1,710	4,635	0,240	0,246	0,338	0,435	0,672	1,225
Δ	16,37	0,0005	0,560	1,090	0,067	0,121	0,066	0,191	0,115	1,270

Tabelle 2: Vergleich aktuelle Werte nitriert zu gestrahlt



Abbildung 32: Rauheitswerte Serienproduktion

Gemessen wurden bei allen Versuchen jeweils vier Bauteile im untersten, mittleren und obersten Bereich und dort jeweils dreimal um je 120° versetzt entlang des Umfangs. Dies ergibt neun Messungen pro Bauteil und insgesamt je 36 Messwerte vor und nach jedem Versuch. Die ermittelten, einzelnen Messwerte der Rauigkeit wiesen teils Abweichungen von -30% bis +100% zum Mittelwert auf. Daher wurde zur Erhöhung der statistischen Genauigkeit, auf Grund des geringeren Einflusses einzelner Extremwerte, der Mittelwert mittels des Medians gebildet.

Die Abnahme der Oberflächenhärte kann mit dem Entfernen der Oberflächenverunreinigungen wie Eisennitriden begründet werden, aber wohl auch durch das teilweise Abtragen der Verbindungsschicht. Auf Grund der noch immer vorhandenen Riefen ist die optische Auswertung des entstandenen Eindrucks, wie einleitend gezeigt, deutlich erschwert. Es zeigten sich dabei Abweichungen von etwa ± 10 HV10 zum durchschnittlichen Messwert. Die Näherung an den Grenzwert von 670 HV10 ist daher besonders relevant, da dies bedeutet, dass im Extremfall der Grenzwert, wenn überhaupt, nur knapp erhalten bleibt. Tatsächliche Unterschreitungen dieses Grenzwertes sind aus der laufenden Produktion jedoch nicht bekannt.

Das teilweise Abtragen der Verbindungsschicht in Verbindung mit dem Verhalten der darunterliegenden Diffusionsschicht und des Grundmaterials dürfte ebenfalls einen gewissen Einfluss auf das Ergebnis der Härtemessung aufweisen.

Aus dem Entfernen der Oberflächendefekte und Teilen der Verbindungsschicht, folgt auch die Reduzierung des Durchmesser um ca. $0,5 \mu\text{m}$. Eine solch geringe Veränderung ist für das technische Bauteil an sich auf Grund der deutlich höheren Toleranzen jedoch kaum von Bedeutung, zeigt aber, in welchem Maße das Verhältnis von Verbindungsschicht zu Diffusionsschicht durch das Strahlen verändert wird. Die definierte $CLT \leq 3 \mu\text{m}$ weist vor dem Strahlen bei den gemessenen Bauteilen eine durchschnittliche Dicke von $3,1 \mu\text{m}$ und nach dem Strahlen einen Durchschnitt von noch $2,2 \mu\text{m}$ auf.

Eine stärkere Bedeutung kann der Reduzierung aller Rauheitswerte zugeschrieben werden, besonders der reduzierten Spitzenhöhe Sp_k , der absoluten Spitzenhöhe Sp_k^* und der maximalen Spitzenhöhe Sp , da diese maßgeblich für das Verschleißverhalten am Gegenkörper verantwortlich sind. Auch der beschriebene Unterschied zwischen dem linearen Wert der Rautiefe R_z und dem flächenhaften Wert S_z mit $S_z \approx 2,5 * R_z$ zeigt, dass es bei einem Wechsel auf optische Analysen mit flächenhaften Parametern einer neuen Auslegung der jeweiligen Grenzwerte bedarf.

Die zum Vergleich ermittelte Almenintensität beträgt $0,26 \text{ mA}$.

Die nach dem aktuellen Perlstrahlen ermittelten Messwerte für Rauigkeit und das erzeugte Oberflächenbild sollten auch nach der Optimierung erhalten bleiben. Beziehungsweise wäre es im Zuge der Optimierung möglich, die Werte der Rauheiten weiter zu reduzieren oder ein noch homogeneres Oberflächenbild zu erzeugen.

5 Versuchsdurchführung

Nach der Betrachtung der Parameter der Strahlanlage sowie den daraus resultierenden Möglichkeiten und der Aufnahme des Ist-Zustandes des Strahlprozesses, sollen nun die erörterten, möglichen Veränderungen untersucht und ausgewertet werden.

5.1 Änderung der Strahlintensität

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, ist die Strahlintensität die gesamte an die Oberfläche abgegebene Energie. Beeinflussbar ist hierbei der Strahl Druck mit daraus resultierendem Strahlmitteldurchsatz (vgl. Kapitel 3.4, Abbildung 24). Anlagenseitig war der Minimaldruck auf 2 Bar begrenzt, versorgungsseitig wiederum auf einen Maximaldruck von 5,5 Bar. Wobei dieser maximale Strahl Druck nur bei ruhender Produktion gefahren werden konnte. Kurze Schwankungen in der Versorgungsleitung, bedingt durch Schaltvorgänge anderer Anlagen, haben genügt, um zu einem Unterschreiten der zulässigen Druckabweichung und somit zum Unterbrechen des Strahlprozesses zu führen.

In Anlage Teil 3 sind alle ermittelten Messwerte aufgelistet.

Die Auswertung der Veränderung der Oberflächenhärte ist auf Grund der stark schwankenden Härte der Rohteile in Verbindung mit der Ungenauigkeit der Messung, nur bedingt aussagekräftig. Zu erkennen ist jedoch, dass der minimale Strahl Druck von 2 Bar eine höhere Oberflächenhärte hinterlässt als im aktuellen Zustand. Dies dürfte in der geringeren Abtragsleistung der Verbindungsschicht begründet liegen. Weiterhin ist erkennbar, dass sich bei Wechsel von 2,5 Bar auf 3,5 Bar Strahl Druck, trotz Abnahme der Rohteilhärte, die sich ergebende Oberflächenhärte erhöht. Ähnliches, wenn auch schwächer, zeigt sich beim Wechsel von 4,5 Bar auf 5,5 Bar Strahl Druck. Eine mögliche Erklärung dafür wäre es, dass die im Vergleich zum Shot-Peening zwar deutlich kleineren Kugeln nicht ausreichend Energie besitzen, um auf der nitrierten Oberfläche die typischen, kreisrunden Abdrücke zu hinterlassen, aber trotzdem über ausreichend Energie verfügen, um eine Deformation des Metallgitters zu bewirken und somit dieser Effekt eine höhere Härte der äußersten Randschicht verursacht.

Dieses beobachtete Verhalten der Oberflächenhärte deckt sich mit den ermittelten Werten für die Almenintensität, welche ebenfalls zunächst einen starken Anstieg im Bereich 2,5 - 3,5 Bar und ein Abflachen im Bereich von 3,5 - 5,5 Bar Strahldruck aufweist. Dieses Abflachen kann als Indikator dafür gesehen werden, dass sich die Strahlintensität in noch höheren Druckbereichen einer Sättigung nähert. Allerdings hat auch der nicht mehr proportionale Zusammenhang zwischen Strahldruck und Strahlmitteldurchsatz oberhalb von einem Druck von etwa 4 Bar einen Einfluss auf die erzielte Almenintensität (vgl. Kapitel 3.4).

Die Reduzierung des Durchmessers bleibt, ähnlich wie im Ist-Zustand, mit Werten $<1 \mu\text{m}$ für das Bauteil vernachlässigbar klein. Die Erhöhung der Strahlintensität zeigt hierbei allerdings eine ungefähre Verdopplung des Materialabtrages auf $0,6 \mu\text{m}$ bei maximalem Strahldruck, begründet durch einen stärkeren Abtrag der Verbindungsschicht.

Die resultierende, maximale Rautiefe R_z zeigt ein leichtes, vom Strahldruck abhängiges Verhalten. Auch wenn sich alle erzielten Werte innerhalb der Vorgaben bewegen, liegt die Rauigkeit bei minimalen Strahldruck von 2,0 Bar um $0,3 \mu\text{m}$ über den mit aktuellem Druck erzielten Wert. Die Erhöhung von 2,5 auf 3,5 Bar Strahldruck erzeugt eine weitere Verringerung um $0,1 \mu\text{m}$. Bei noch höherem Strahldruck verbleibt der Wert bei etwa $R_z=1,6 \mu\text{m}$. Auch dies deckt sich mit der erhöhten Abtragsleistung bei höheren Strahldrücken. Damit liegt der aktuell verwendete Strahldruck von 2,5 Bar grenzwertig tief. Zur Erhöhung der Prozesssicherheit wäre daher eine Erhöhung um 0,5 - 1 Bar zu empfehlen. Bei diesem Strahldruck von 3,5 Bar wäre mit diesen hier ermittelten Werten auch eine leichte Reduzierung der Tal- und Spitzenhöhen im Vergleich zum Ist-Wert vorhanden, auch wenn die Werte selbst, ausgenommen der absoluten Spitzenhöhe, kaum ein abhängiges Verhalten zeigen.

Werden die Rauheiten weiter flächenhaft bewertet, so zeigt sich bei allen relevanten Werten eine deutliche Reduzierung im Vergleich zu den Rohteilen, jedoch kaum ein Zusammenhang zum verwendeten Strahldruck. Einzig die Werte für die Spitzenhöhe S_p , S_{pk} sowie S_{pk}^* zeigen bei Strahldrücken über 4 Bar wieder einen leichten Anstieg. Zusammen mit dem Vergleich der REM-Aufnahmen der Oberfläche (Abbildung 33), ist zu erkennen, dass durch den höheren Strahldruck vermehrt Bereiche auf der Oberfläche abplatzen und somit die Erhöhung der Rauheit verursachen.

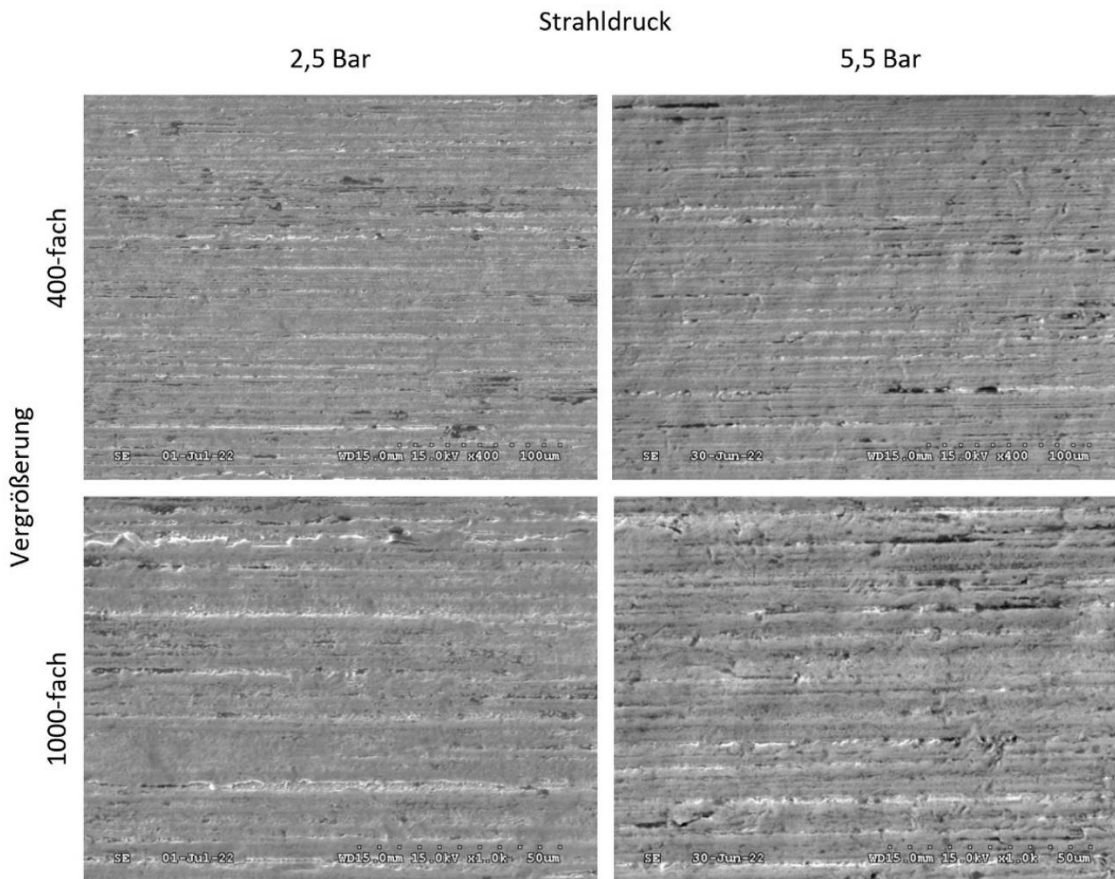


Abbildung 33: Vergleich Oberflächen mit 2,5 und 5,5 Bar Strahldruck

5.2 Änderung Strahlwinkel

Die zweite Möglichkeit, die Oberflächenstruktur zu beeinflussen, liegt im Auftreffwinkel der Strahlkugeln (vgl. Kapitel 3.5). Hierbei konnte erörtert werden, dass unter Erhöhung des Einschlagwinkels zwar die vertikal einwirkende Kraft abnimmt, jedoch der Gleitverschleiß zunehmen sollte. Der Bereich der untersuchten Winkel liegt bei $\alpha=0^\circ$ bis $\alpha=40^\circ$, wobei auf Grund der senkrechten Position des Strahlgutes $\alpha=0^\circ$ bedeutet, dass die Strahlpistole sich in einer waagerechten Position befindet. Winkel über $\alpha=40^\circ$ waren technisch nicht mehr realisierbar, da die Halterungsmechanik der Düsen beim Verfahren mit der Kammerdecke oder der Bauteilhalterung kollidieren würde.

Die so erhaltenen Werte sind in Anlage 4 aufgelistet.

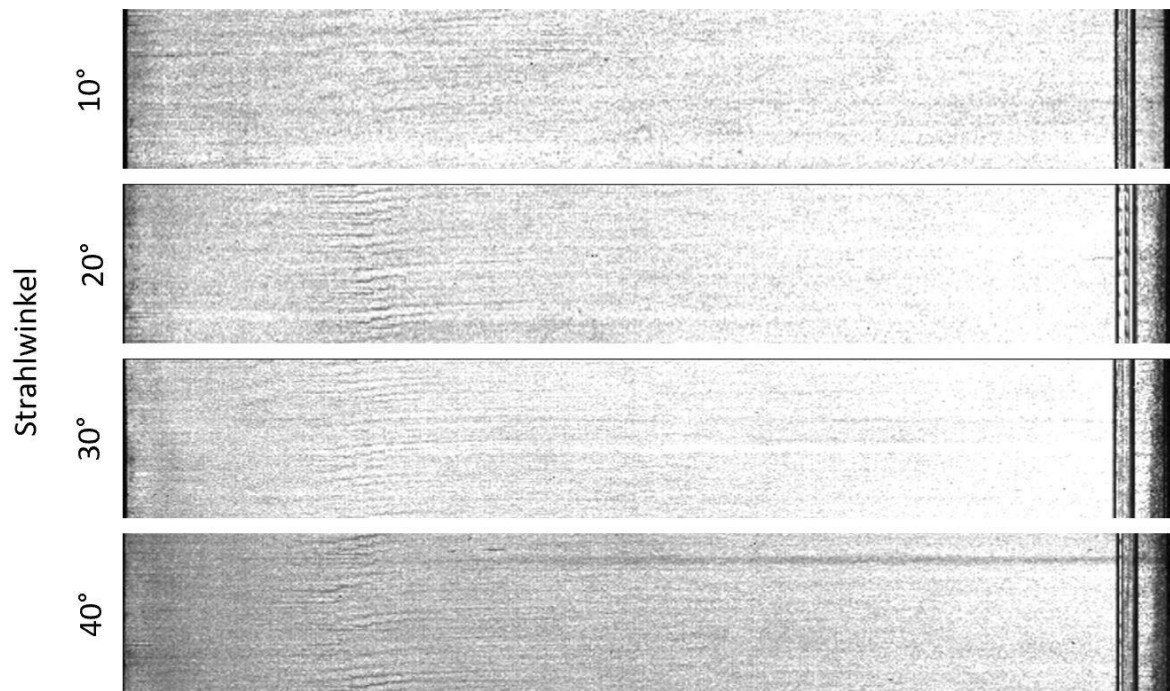


Abbildung 34: Vergleich Oberfläche zu Strahlwinkel

Der Vergleich der Oberflächenaufnahmen (Abbildung 34) zeigt eine homogenere, glänzendere Oberfläche bei steigendem Winkel bis $\alpha=30^\circ$. Vor allem bei der REM-Aufnahme (Abbildung 35), der unter $\alpha=30^\circ$ gestrahlten Achse ist zu erkennen, dass feine Strukturen, welche bei 10° -Strahlwinkel noch vorhanden sind, besser entfernt werden und somit die glänzendere Oberfläche bewirken. Ab Winkeln von $\alpha>30^\circ$ ist wiederum eine reduzierte Reinigungswirkung ersichtlich, da die Achsen wieder eine weniger homogene Oberfläche aufweisen. Gleiches Verhalten ist bei der erzeugten Oberflächenhärte zu erkennen. Durch den Mehrabtrag an Material entsteht hierbei jedoch ein Minimum. Dass die hier ermittelten Werte deutlich über denen liegen, welche bei der Untersuchung zur Strahlintensität ermittelt wurden, zeigt die einleitend erwähnte starke Streuung der Bauteileigenschaften zwischen unterschiedlichen Chargen.

Damit dürfte ab diesem Winkel von $\alpha>30^\circ$ der Punkt erreicht sein, ab welchem die Reduzierung der vertikalen Kraft der Strahlkugeln eine Reduzierung des Materialabtrags bewirkt.

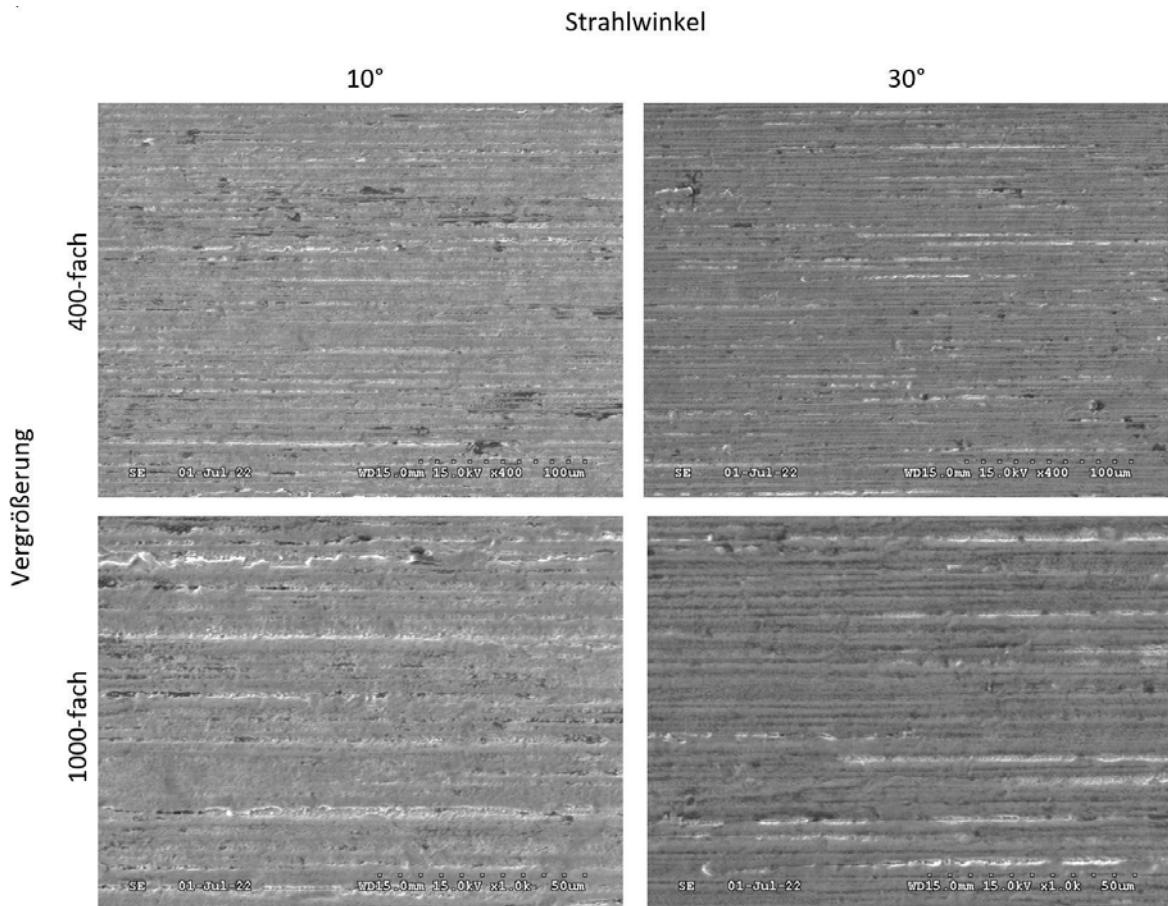


Abbildung 35: REM-Aufnahme

Die für den Gegenkörperverschleiß relevante maximale Spitzenhöhe S_p steigt hingegen schon ab einem Winkel $\alpha > 0^\circ$ an. Die gemessene Rautiefe S_z zeigt noch ein Minimum bei einem Winkel $\alpha = 20^\circ$, bei weiter erhöhtem Winkel hingegen, steigt dieser Wert, begründet durch den Anstieg der Spitzenhöhen, jedoch auch wieder an. Hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen dem optischen Erscheinungsbild und der erzeugten Oberflächenrauheit.

Für die Almenintensität wäre eigentlich eine Abnahme der Intensität mit steigendem Winkel zu erwarten gewesen, da die für die Biegung verantwortliche Oberflächenspannung direkt proportional zu der wirkenden vertikalen Kraft der Strahlkugeln sein sollte. Jedoch zeigt sich, dass die erzeugte Intensität bis zu einem Winkel von $\alpha = 20^\circ$ konstant bis sogar leicht steigend ist. Hinzu kommt der aus der Vorbetrachtung zur Strahlintensität bekannte Effekt, dass die aktuellen Parameter einen Almenwert nahe der Sättigung erzeugen. Erst bei größeren Winkeln beginnt der Graph, wie erwartet, zu fallen. Die gemessene Almenintensität kann hierbei also nur begrenzt als ein Maß für die erzeugte optische Oberfläche genutzt werden.

6 Optimierung Taktzeit

Ziel der Versuche war es, neben einem besseren Verständnis des Strahlprozesses, auch eine mögliche Reduzierung der für den Strahlprozess nötigen Zeit zu untersuchen. Eine schnellere Bearbeitung ist nur möglich, wenn die benötigte Zeit pro Tellerebene reduziert wird.

Auf Grund der Bauart der Strahlteiler wird nur etwa die Hälfte des Umfanges der Achsen bestrahlt. Wie unter 2.2 beschrieben, wird die Achse zwar dreimal pro Umdrehung des Strahlteilers gedreht, allerdings zeigten die Versuche zu Beginn der Produktion, dass mindestens drei Umdrehungen des Tellers nötig sind, um eine gleichmäßige Bearbeitung zu erhalten. Die Höhenschritte von 12 mm der Strahldüsen zusammen mit dem ermittelten effektiven Strahlbereich von 30 mm ergibt damit für jede Höhenlage der Achse eine Bestrahlung von mindestens sechs Umdrehungen. Zur Reduzierung der Strahlzeit wäre daher eine Vergrößerung der effektiven Strahlbreite nötig.

Bei der aktuellen Schrittweite von 12 mm und einer Gesamtlänge von 120 mm ergeben sich daraus zehn einzelne Schritte. Die Erhöhung auf eine Schrittweite von 20 mm würde eine Reduzierung auf sechs Schritte und somit beim Strahlprozess eine Zeitersparnis von 40% ermöglichen. Mit der Erhöhung auf 30 mm, wären sogar nur vier Schritte nötig und damit ergäbe sich eine Zeitersparnis von 60% (vgl. Abbildung 36). Die Schrittweiten der Taktung können jedoch nur begrenzt frei gewählt werden, da es aus dem Strahlablauf heraus sinnvoll ist, wenn der letzte Schritt auf der Endposition des Bauteils liegt. Die Bauteilhöhe von 120 mm sollte also, soweit möglich, glatt durch die Schrittweite teilbar sein.

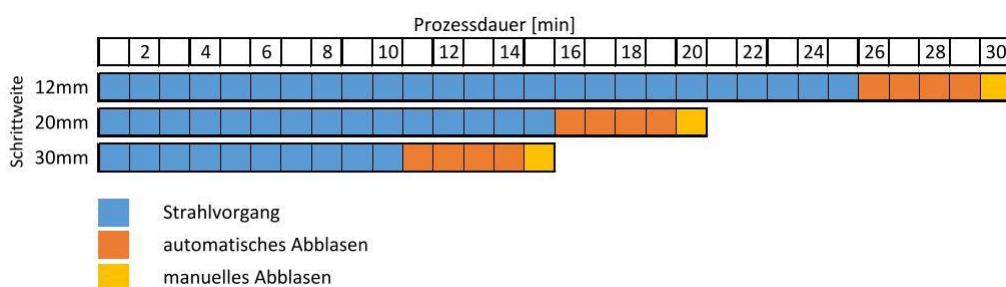


Abbildung 36: Vergleich Taktzeiten zu Taktabstand

6.1 Verteilung der Strahldüsen

Um die Ausrichtung und Verteilung der Strahldüsen verändern zu können, wurde zunächst ermittelt, wie weit die Strahlintensität, ohne Qualitätsverluste, reduziert werden kann. Die Verwendung nur einer aktiven Düse erzeugte dabei keine gleichmäßige Oberfläche (Abbildung 37). Das Zuschalten einer zweiten Düse genügt jedoch schon, um das gewünschte Oberflächenbild zu erzeugen (Abbildung 38).

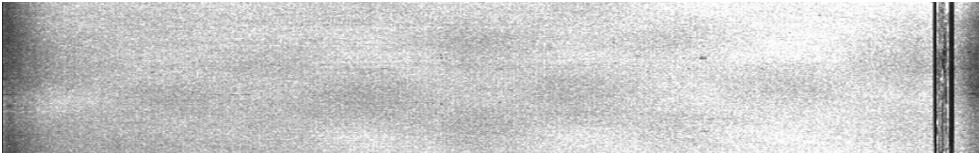


Abbildung 37: Oberflächenbild mit einer aktiven Düse



Abbildung 38: Oberflächenbild mit zwei aktiven Düsen

Unter der Erkenntnis, dass zwei aktive Düsen ausreichend sind, könnten die drei Düsen mit je 15 mm Höhenversatz zueinander angeordnet werden. Das so erzeugte Strahlbild zeigt Abbildung 39. So kann weiterhin, wie bisher, ein effektiver Bereich von 30 mm Breite erzeugt werden, welcher noch von je zwei Düsen bestrahlt wird. Zusätzlich allerdings würden die Düsen 1 und 3 einen Bereich von 15 mm oberhalb bzw. unterhalb mit bestrahlen und somit in diesen Bereichen ebenfalls eine Reinigungswirkung erzeugen. Als Maximalwert wäre daher eine Schrittweite von 30 mm möglich.

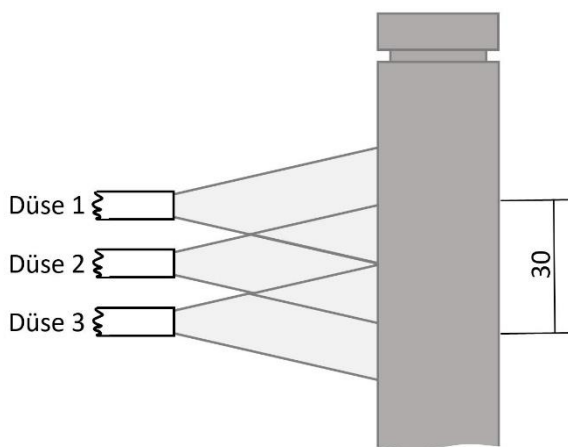


Abbildung 39: Strahlbild verteilte Düsen

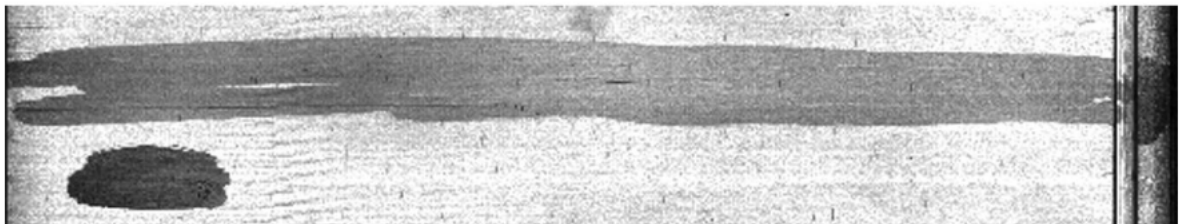
Zur Überprüfung dieser These, wurden Achsen mit schwarzen Strichen versehen und anschließend mit Schrittweiten von 12 mm, 20 mm bzw. 30 mm mit originalem Strahlendruck von 2,5 Bar unter $\alpha=10^\circ$ gestrahlt.

Der Materialabtrag kann anhand der verbleibenden Strichstärke bewertet werden.

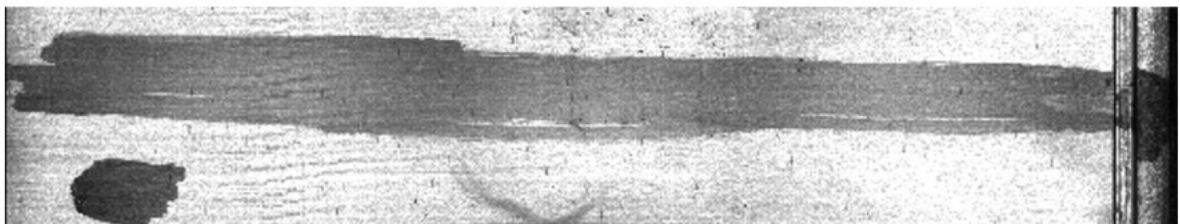
Die ermittelte Almenintensität lag bei allen drei Versuchen bei etwa 0,28 mA, also weiterhin im Bereich des Ist-Zustandes. Die resultierenden Oberflächen weisen bei einer optischen Betrachtung kaum einen erkennbaren Unterschied auf. Die Aufnahmen mit dem Kamerasystem zeigen jedoch eine deutliche Veränderung bei größeren Schrittweiten (Abbildung 40). Die dunklen Bereiche im unteren, linken Bildfeld stellen jeweils die Originalwerte der Striche dar.



Schrittweite 12mm



Schrittweite 20mm



Schrittweite 30mm

Abbildung 40: Vergleich Oberfläche zu Schrittweiten

Die originale Schrittweite von 12 mm erzeugt eine nahezu komplette Entfernung der Striche. Trotz der konstanten Almenintensität zeigt eine Erhöhung der Schrittweite jedoch, dass die effektive Reinigungsleistung des Strahlvorgangs reduziert wird. Daher würde dies eine Erhöhung der Anzahl an Umdrehungen je Höhenschritt nötig machen, welches allerdings wiederum auch die Taktzeit erhöhen würde.

Somit zeigt sich, dass es bei einer Vergrößerung der Schrittweite allein nicht mehr möglich ist, die gewünschte Reinigungswirkung aufrecht zu erhalten.

6.2 Optimierung des erhöhten Taktabstandes

Aus den Versuchen zur Strahlintensität (Kapitel 5.1) resultierte eine Verbesserung der Rauheitswerte bei einer Erhöhung des Strahldrucks von 2,5 Bar auf 3,5 Bar.

Dieses Resultat sowie die Erkenntnis, dass der optimale Strahlwinkel (Kapitel 5.2) als Kompromiss aus Rauheit und optischem Eindruck etwa 25° beträgt, dürften diese beiden Parameter zusammen zu einer Optimierung des Strahlergebnisses beitragen.

Abbildung 41 zeigt die mit einer Schrittweite von 20 mm dabei erzeugten Oberflächen zunächst original, nach Änderung des Strahldruckes und noch mit anschließender Winkeländerung. Die Erhöhung des Strahldruckes erzeugt bereits eine deutlich erkennbare Verbesserung der Reinigung, die vor allem bedingt wird durch die Zunahme der Strahlintensität (Abbildung 42). Die zusätzliche Veränderung des Strahlwinkels verursacht wiederum die erwartete Abnahme dieser Intensität. Jedoch liegt diese mit $0,33 \text{ mmA}$ noch immer über dem Wert des ersten Versuchs mit 10° und 2,5 Bar, wobei $0,28 \text{ mmA}$ erreicht wurden.

Die so erzeugte Oberfläche weist optisch sogar einen noch besseren Glanz auf, als es mit einem Strahlen unter einem Winkel von 30° mit nur 2,5 Bar Strahldruck möglich war.



Schrittweite 20mm

Strahlwinkel 10°

Strahldruck 2,5 Bar



Schrittweite 20mm

Strahlwinkel 10°

Strahldruck 3,5 Bar



Schrittweite 20mm

Strahlwinkel 25°

Strahldruck 3,5 Bar

Abbildung 41: Oberflächenbild bei Veränderung von Strahlwinkel und -druck

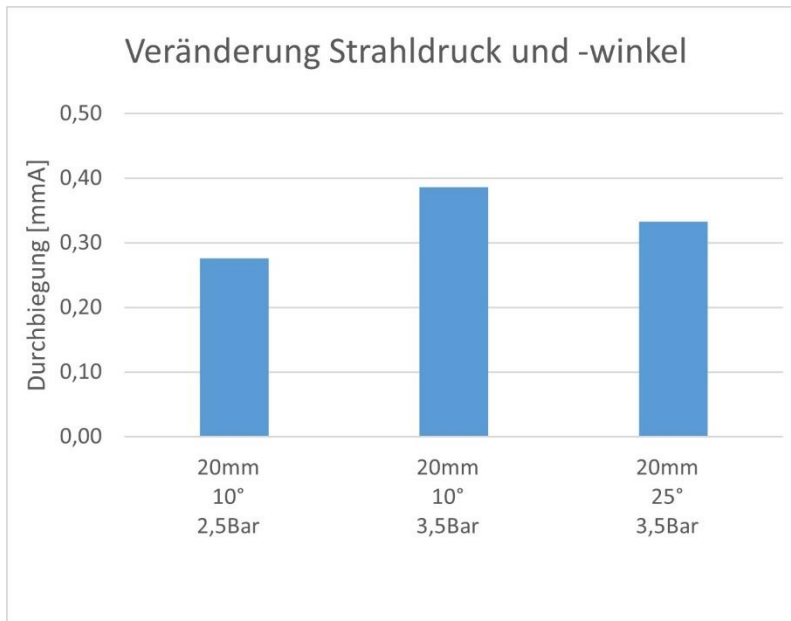


Abbildung 42: Erzeugte Almenintensität

Bei den weiteren Versuchen mit einer Schrittweite von 30 mm zeigte sich trotz des geänderten Strahlwinkels auf $\alpha=25^\circ$ zunächst das gleiche Bild wie bei der Änderung von 12 mm auf 20 mm Taktabstand. Die gestrahlte Achse zeigte ein Oberflächenbild vergleichbar zu dem in Abbildung 41 Mitte. Zur Kompensation wäre daher nochmals ein Erhöhen des Strahldrucks erforderlich gewesen. Nach Kapitel 3.4 zeigen sich Druckbereiche über 4 Bar jedoch als energetisch nicht mehr effizient. Daher wurden keine weiteren Untersuchungen dahingehend durchgeführt.

7 Fazit

Als Fazit soll nun noch die geforderte Gegenüberstellung der originalen und optimierten Oberflächeneigenschaften erfolgen und damit der Nachweis, dass auch nach der Optimierung die zu Beginn geforderte Qualität erreicht wird. Tabelle 3 zusammen mit Abbildung 43 zeigen die jeweiligen Werte in Relation zueinander sowie als Vergleich zum Durchschnitt der Werte der verwendeten Achsen im nitrierten Zustand.

Bauteil	Oberflächenhärte [HV/10]	Oberflächenrauheit [μm]								Durchbiegung (Almen) [mm]
		Rz	Sz	Sa	Spk	Svk	Spk*	Svk*	Sp	
Nitriert	696,6	2,24	6,06	0,31	0,37	0,42	0,69	0,75	3,18	-
Original	676,2	1,71	4,64	0,24	0,25	0,34	0,43	0,67	2,32	0,269
Optimiert	673,9	1,45	4,73	0,20	0,21	0,29	0,50	0,62	2,00	0,333

Tabelle 3: Vergleich optimierte zu originalen Oberflächenwerten

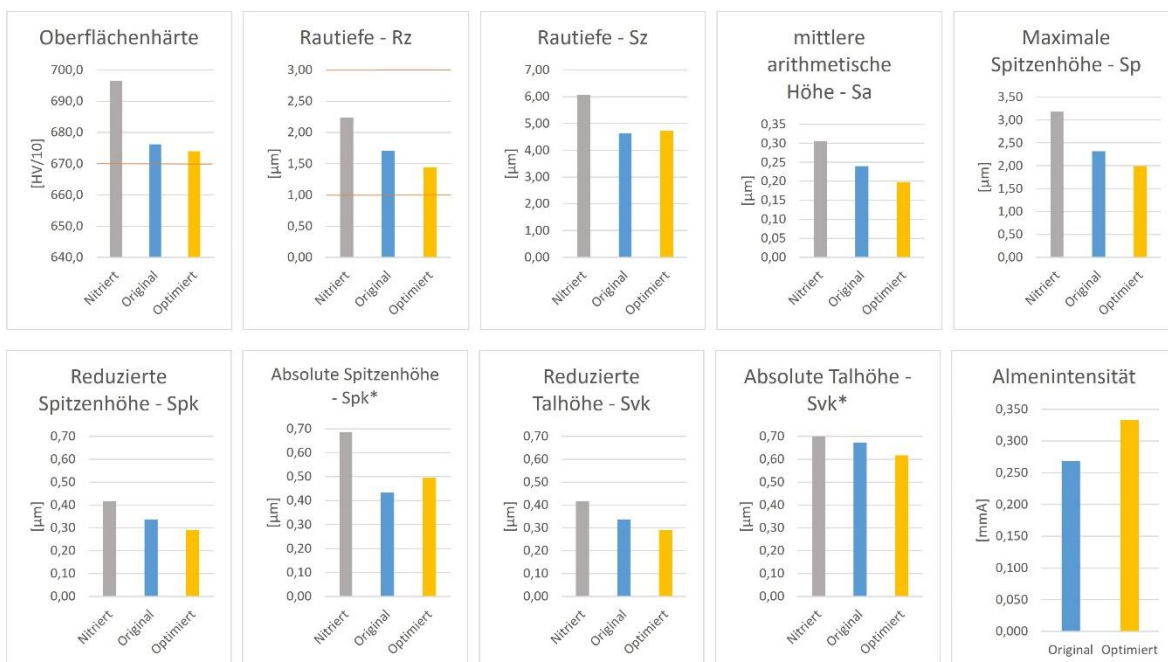


Abbildung 43: Vergleich optimierte zu originalen Oberflächenwerten

Die angewandte Variation im Strahlwinkel und Strahlruck zeigt fast überall einen positiven Einfluss.

Der Grenzwert für die Oberflächenhärte konnte gehalten werden und liegt noch immer innerhalb der Toleranz des Originalwertes, was darauf schließen lässt, dass beide Versionen einen ähnlich großen Reinigungseffekt auf die Oberfläche haben.

Die ebenfalls spezifizierte Rautiefe R_z konnte im Vergleich zum Original nochmals um $0,3 \mu\text{m}$ reduziert werden. Damit ist ein größerer Puffer geschaffen, da durch die

Hartstoffbeschichtung üblicherweise wieder eine Erhöhung der Rauheit entsteht. Der flächenhafte Parameter S_z zeigt dieses Verhalten hingegen nicht und bleibt etwa konstant. Begründet liegen dürfte dies wieder in der unterschiedlichen Definition der beiden Werte. Solange nur einzelne, wenige Spitzen erhalten bleiben, werden diese durch das Aufteilen der Messstrecke mit anschließender Durchschnittsbildung bei linearer Messung ausgefiltert. Flächenhaft berechnet, bleiben diese jedoch erhalten.

Die Reduzierung der mittleren arithmetischen Höhe S_a zeigt hierbei, dass die Oberfläche im Allgemeinen besser geglättet wird, was dadurch eine Verschiebung des Kernbereichs des Rauheitsprofils zur Folge hat. Das unerwartete Ansteigen der absoluten Spitzenhöhe Spk^* kann, wie auch bei S_z mit dem Verbleib einzelner Spitzen in Verbindung gebracht werden, welche durch den veränderten Kernbereich nun einen größeren Abstand zu diesen aufweisen. Ähnliches gilt für die Werte der Talhöhen. Zwar ist es nicht möglich mit oberflächlichem Strahlen die Täler zu verschließen, dies verursacht jedoch durch den Materialabtrag an der Oberfläche eine Reduktion der Talhöhen.

Die Zunahme der Almenintensität, vor allem begründet durch die Erhöhung der Strahldrucks, zeigt ebenfalls, wie auch die Rauheitswerte, dass eine Steigerung der Reinigungswirkung erzielt wurde.

Gleiches stellt sich auch bei einem Vergleich der optischen Oberfläche dar (Abbildung 44).



Original



Optimiert

Abbildung 44: Vergleich Oberflächenbild

Mit optimierten Einstellungen wird die Körnung der Oberfläche, vor allem im mittleren Bereich, verbessert. Der verbleibende inhomogene, trübe Bereich am unteren Bauteilende erweist sich auch als deutlich schmaler als dies zuvor der Fall war.

Die gesamte Taktzeit von Strahlen und Abblasen kann somit um 30% von 30 Minuten auf 21 Minuten reduziert werden (vgl. Abbildung 36, Seite 41).

8 Ausblick

Die nicht näher betrachtete Möglichkeit den Taktabstand bei einem Strahldruck von 3,5 Bar auf 30 mm zu erhöhen würde eine Reduzierung der Taktzeit um 50% auf 15 Minuten Gesamtzeit bedeuten und damit eine Verdopplung der Produktionskapazität erzielen. Jedoch nur unter der Voraussetzung, dass das Ent- und Beladen des zweiten Halterungssatzes ebenfalls innerhalb dieser Zeit realisierbar ist. Das originale Oberflächenbild kann dabei jedoch nicht mehr gehalten werden und müsste als Muster mit dem Kunden neu bewertet werden.

Weiter möglich wäre eine Erweiterung der Anlage auf mehr Strahldüsen in allen drei Ebenen. Dies würde jedoch massive Änderungen in der Druckluft- und Strahlmittelversorgung sowie der Absaugung bedeuten, was derzeit nicht realisierbar ist.

Die weitere Entwicklung im Bereich der Beschichtungstechnik wird zeigen, ob bei Duplex-Beschichtungen weiterhin eine Zwischenreinigung erforderlich bleibt. Wie einleitend erwähnt, deuten Versuche darauf hin, dass die Zwischenreinigung der Oberfläche keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die erzielte Schichthaftung aufweist und dass selbst auf nicht gestrahlten Bauteilen eine sehr gute Verbindung zwischen Nitrier- und Hartstoffschicht erzeugt werden kann. Dies müsste jedoch noch mit Langzeittests unter realen Bedingungen belegt werden.

Das Strahlen wird daher aktuell einzig nur zur Erzeugung der vom Kunden geforderten Optik benötigt, welche möglicherweise auch nur mittels eines Polierens der Achsen mit entsprechenden Bürsten erreicht werden könnte. Zumindest, sofern dies die Bauteilkontur zulässt. Jedoch gibt es bei einem Perlstrahlen ebenfalls konturbedingte Grenzen z.B. bei schmalen Sacklöchern, wo ein Strahlen ebenfalls nicht möglich ist.

Weitere Untersuchungen könnten beispielsweise noch mit in der Literatur oft erwähnten Wallnuss- oder Hartholzmehl durchgeführt werden, welches ebenfalls eine sehr gute, glättende Wirkung aufweisen soll. Da diese Verwendung jedoch eine explosionsfähige Atmosphäre erzeugen kann, wäre eine Explosionsgeschützte Anlage nach der ATEX-Richtlinie erforderlich. Die Kosten für solch eine Anlage sind jedoch um ein Vielfaches höher als für die hier verwendete Anlage.

Der Umstieg auf reine Elektromobilität wird eine weitere Erhöhung der abgerufenen Stückzahlen zur Folge haben. Aber auch neue technische Entwicklungen lassen eine stärkere Verbreitung solcher Duplex-Beschichtungen erwarten. Der potenzielle Einsatzbereich umfasst nahezu alle Anwendungen, in denen eine Kombination aus zähem Grundwerkstoff mit verschleißfester Oberfläche von Vorteil ist. Diese reichen von weiteren Getriebebauteilen, bis hin zu Zahnrädern und anderen Achsen, aber auch bei Schneid-

oder Umformwerkzeugen, bei welchen eine reine Hartstoffbeschichtung an ihre Leistungsgrenzen gerät.

Eine Erweiterung des Anlagenparks an Strahlanlagen wird daher unumgänglich sein, um den Marktbereich erfolgreich bearbeiten und erweitern zu können.

Auch aus dem Aspekt der Prozesssicherheit stellt nur eine einzelne Anlage ein sehr großes Ausfallrisiko dar, welches jedoch selbst durch eine Verbesserung des Prozesses nicht kompensiert werden kann. Somit wäre es empfehlenswert eine weitere Anlage anzuschaffen, um ein Ausfallrisiko weitestgehend zu vermeiden. Eine solche Anschaffung und die damit verbundene Instandhaltung sind mit Kosten verbunden, welche sich jedoch auf Grund des verringerten Ausfallrisikos rentieren könnten. Die Entscheidung zur Anschaffung einer neuen Anlage ist allerdings abhängig von der strategischen Ausrichtung des Unternehmens.

Wie die Versuche darlegen, kann durch die Umstellung des Prozesses, wie in dieser Arbeit analysiert, eine Optimierung von 30 % erreicht werden. Daher wird der optimierte Prozess zeitnah in die Fertigung implementiert.

Wie diese Thesis zeigt, ist es empfehlenswert, auch in Zukunft bestehende Prozesse immer wieder neu zu analysieren und gegebenenfalls zu optimieren, um als Unternehmen effizient und rentabel wirtschaften zu können.

„Alles geht immer noch besser, als es gemacht wird.“ – Henry Ford (Zitate.net, 2022)

9 Literaturverzeichnis

- confovis GmbH. (2022). *confovis*. Abgerufen am 05. 06 2022 von <https://www.confovis.com/optische-messverfahren/>
- DIN 4760. (Juni 1982). Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 11126. (12 2018). Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen - Anforderungen an nichtmetallische Strahlmittel. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 13565. (04 2008). Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 16610. (06 2013). Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung . Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 25178. (09 2012). Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 3274. (04 1998). Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 6507. (07 2018). Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 8504-2. (11 2019). Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen - Verfahren für die Oberflächenvorbereitung - Teil 2: Strahlen. Beuth Verlag GmbH.
- e-auto-Journal. (2016-2022). Abgerufen am 22. 05 2022 von <https://e-auto-journal.de/elektromotor-vs-verbrennungsmotor/>
- focus online. (19. 11 2013). *focus online*. Abgerufen am 22. 05 2022 von https://www.focus.de/auto/ratgeber/diesel/2500-bar-sind-nicht-genug-so-funktionieren-die-hightech-diesel-von-morgen_id_2709168.html
- Huchel, D. I. *Nitrierpraxis.de*. Abgerufen am 20. 07 2022 von <http://www.nitrierpraxis.de/verbindungsschichtfreies-nitrieren>

- IFO. (12. 05 2021). *ifo Institut*. Abgerufen am 22. 05 2022 von <https://www.ifo.de/DocDL/sd-2021-05-puls-etal-automobilindustrie-strukturwandel.pdf>
- Intranet Oerlikon Balzers. (04. 04 2019). *20945_WI_de - HF-Bewertung fuer DLC-Balinit - Beschichtungen beim Rockwelltest*. Abgerufen am 20. 07 2022
- Macherauch, E. (2011). *Praktikum in Werkstoffkunde*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Momber, A., & Schulz, R.-R. (2006). *Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Morlok, O. (1998). *Die Kombination von Plasmanitrierung und plasmagestützter Schichtabscheidung aus der Gasphase (PACVD) in einem Versuchsablauf*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- Müller, K.-P. (1996). *Praktische Oberflächentechnik*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- OC Oerlikon Management AG. (2022). *Oerlikon Balzers*. Abgerufen am 22. 05 2022 von <https://www.oerlikon.com/balzers/de/de/faszination-balzers/>
- Spies, H.-J., Höck, K., & Larisch, B. (1996). Duplex-Randschichten der Verfahrenkombination Nitrieren-Hartstoffbeschichten. In HTM, *Journal of Heat Treatment and Materials* (S. 222-231). Berlin: Walter de Gruyter GmbH.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl. (24. 07 2022). *Stahl-Online*. Abgerufen am 24. 07 2022 von <https://www.stahl-online.de/publikationen/strahlen-von-stahl/>
- Zitate.net. (2022). Abgerufen am 22. 05 2022 von <http://zitate.net/zitat?id=4027>

Abbildungsnachweis

Abbildung	Titel	Quelle
1	nitrierte und gestrahlte Achsen	Eigene Aufnahme
2	Achsausgleichswelle	Dr. Mirko Junge - Eigenes Werk at Hochschule Regensburg, Germany., CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10624194 Abgerufen am 24.07.2022
3	Einteilung von Schutzschichten	Morlok, 1998, S17
4	Verlauf von Härte und Zähigkeit bei Nitrierten Oberflächen	Nitrierpraxis http://www.nitrierpraxis.de/verbindungsschichtfreie-s-nitrieren Abgerufen am 01.08.2022
5	Kombinationen der Duplex-Behandlung	Spies, Höck, & Larisch, 1996, S.223
6	Vergleich HF-Klassen 1-6	Intranet Oerlikon Balzers, 20945_WI_de
7	Komponenten-übersicht Strahlanlage	Betriebsanleitung MHG – Strahlanlage SMG100/1
8	Werkstückaufnahme	Eigene Darstellung
9	Strahlkabine	Betriebsanleitung MHG – Strahlanlage SMG100/1

10	Aufbau Venturi-Strahldüse	Betriebsanleitung MHG – Strahlanlage SMG100/1
11	Vergleich taktiler zu optischer Messung	Schulungsmaterial confovis – Teil 1 Grundlagen
12	Berechnung mittlere Rautiefe	Jenoptik – Poster Rauheit https://www.jenoptik.de/-/media/websitedocuments/metrology/neu/parameters/rauheit-faltblatt-de.pdf Abgerufen am 05.06.2022
13	Abbott-Firestone-Kurve	Jenoptik – Poster Rauheit https://www.jenoptik.de/-/media/websitedocuments/metrology/neu/parameters/rauheit-faltblatt-de.pdf Abgerufen am 05.06.2022
14	Maximale Spitzenhöhe	Keyence – Parameter der Oberflächenrauheit https://www.keyence.de/ss/products/microscope/roughness/surface/tab01_f.jsp Abgerufen am 05.06.2022
15	Härteprüfung nach Vickers	DIN EN ISO 6504-1
16	Härteeindruck nach Vickers	Eigene Aufnahme
17	Oberfläche einer ungleichmäßig gestrahlten Achse	Eigene Aufnahme
18	Strahlwirkung auf die Oberfläche	Wirtschaftsvereinigung Stahl - Merkblatt 212 S.29

19	Almenkurve	Wikimedia https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/Almenkurve.JPG Abgerufen: 25.06.2022
20	Bedeckungsgrad	Müller, 1996, S.23
21	Strahlform	Momber & Schulz, 2006, S.164
22	Strahlbereiche	Eigene Aufnahmen
23	Dosierventil	Betriebsanleitung MHG – Strahlanlage SMG100/1
24	Strahlmitteldurchsatz	Eigene Darstellung Eigene Darstellung
25	Strahlwinkel	
26	Vergleich Auftreffwinkel	Turboconsult https://www.turboconsult.de/turbomaschinen/pdf/bd4-Leseprobe-Verfestigungsstrahlen.pdf Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen Abgerufen am 06.06.2022
27	Unbehandelte Oberfläche 400-fach vergrößert	Eigene Aufnahme, Labor Oerlikon Balzers Stollberg
28	Effekte bei senkrechtem Strahlwinkel	Eigene Darstellung
29	Zeitabhängiger Strahlverschleiß	Momber & Schulz, 2006, S. 175

30	Optischer Vergleich von nitrierter und gestrahlter Achse	Eigene Aufnahme
31	REM-Aufnahmen der Oberfläche vor und nach dem Strahlprozess	Eigene Abbildung
32	Rauheitswerte Serienproduktion	Eigene Darstellung
33	Vergleich Oberflächen mit 2,5 und 5,5 Bar Strahldruck	Eigene Aufnahme, Labor Oerlikon Balzers Stollberg
34	Vergleich Oberflächen zu Strahlwinkel	Eigene Aufnahme
35	REM-Aufnahme Strahlwinkel 10° und 30°	Eigene Aufnahme, Labor Oerlikon Balzers Stollberg
36	Vergleich Taktzeiten zu Schrittweite	Eigene Darstellung
37	Oberflächenbild mit einer aktiven Düse	Eigene Aufnahme
38	Oberflächenbild mit zwei aktiven Düsen	Eigene Aufnahme
39	Strahlbild verteilte Düsen	Eigene Darstellung

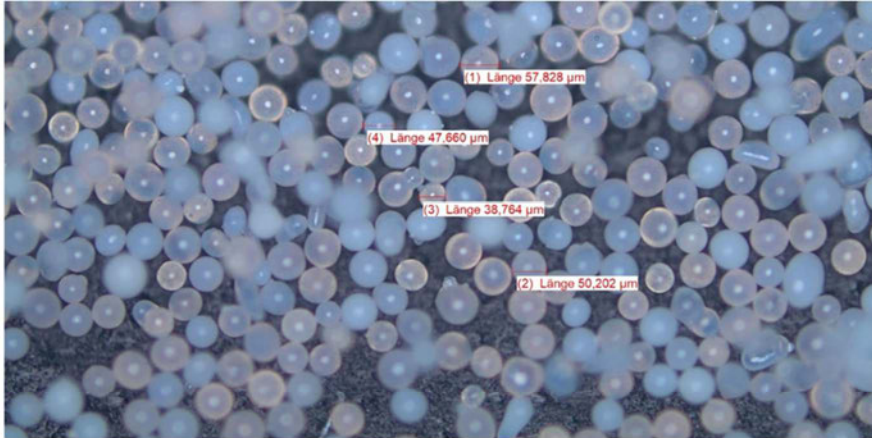
40	Vergleich Oberfläche zu Schrittweiten	Eigene Aufnahmen
41	Oberflächenbild bei Veränderung von Strahlwinkel und - druck	Eigene Aufnahmen
42	Erzeugte Almenintensität	Eigene Abbildung
43	Vergleich optimierte zu originalen Oberflächenwerten	Eigene Abbildung
44	Vergleich Oberflächenbild	Eigene Aufnahmen

Anlagen

Teil 1 - Vergleich neues zu gebrauchtem Strahlmittel	A-I
Teil 2 - Vergleich taktile zu optischer Rauheitsmessung	A-II
Teil 3 - Messwerte Veränderung Strahlintensität	A-III
Teil 4 - Messwerte Veränderung Strahlwinkel	A-IV

Anlagen, Teil 1– Vergleich neues zu gebrauchtem Strahlmittel

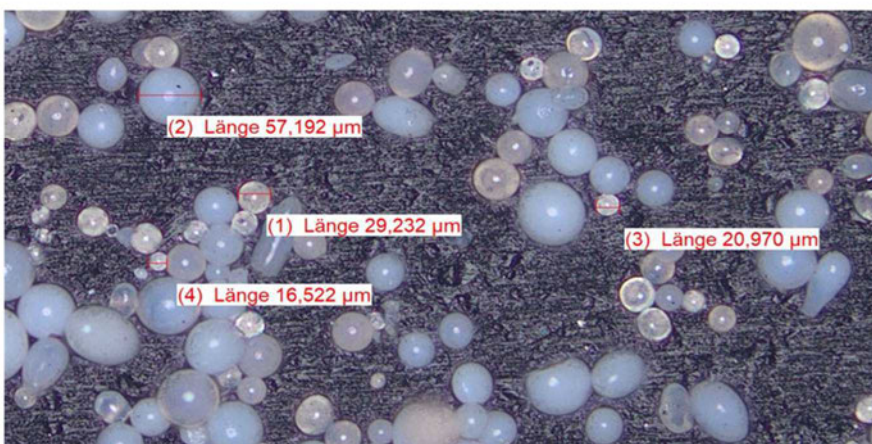
Strahlmittel



Neues Strahlmittel

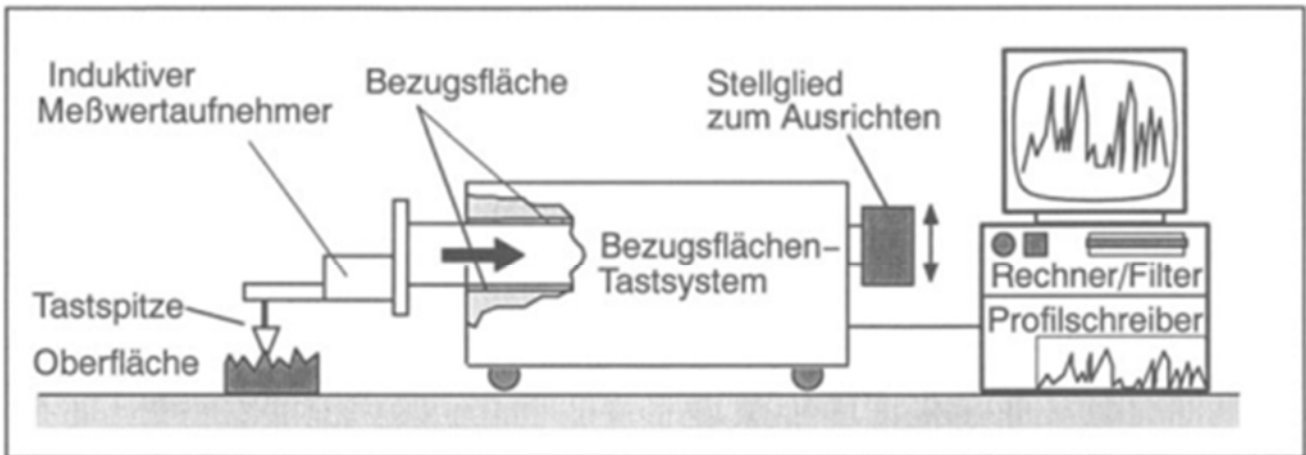


Gebrochene Strahlkugel



Verbrauchtes Strahlmittel

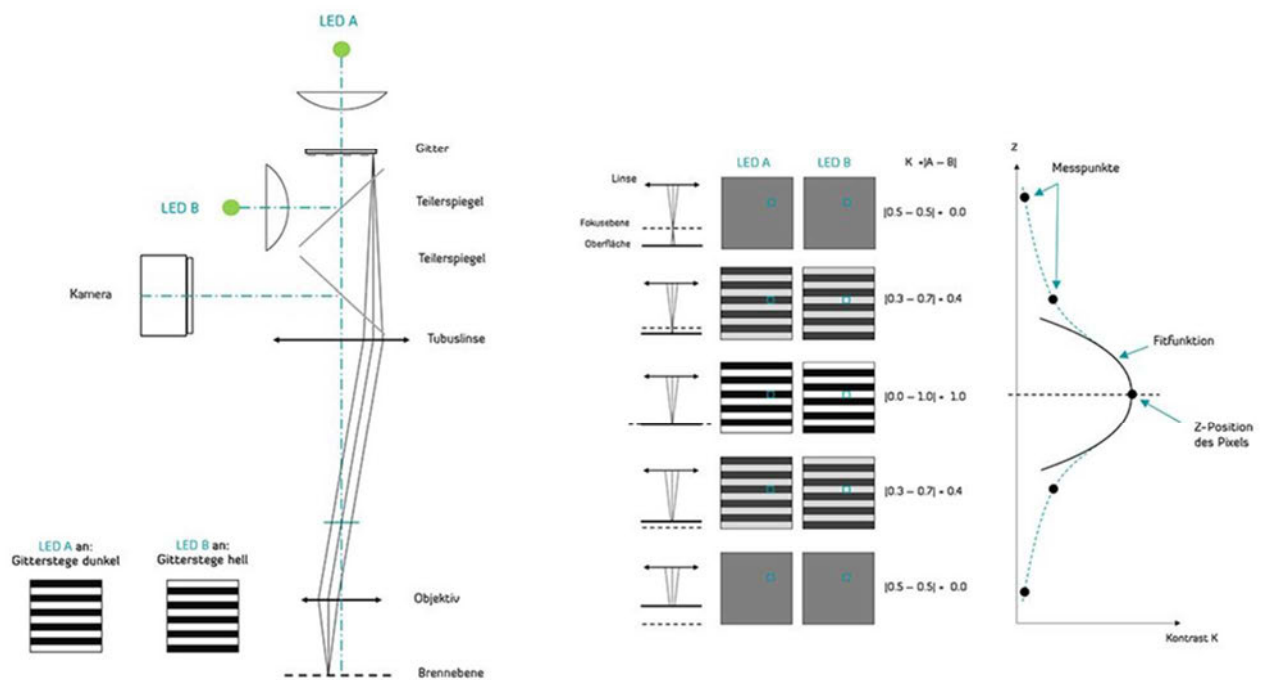
Anlagen, Teil 2 - Vergleich taktile zu optischer Rauheitsmessung



Taktiler Tastschnittverfahren

Quelle: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-322-96810-4_12.pdf

Abgerufen am 05.06.2022



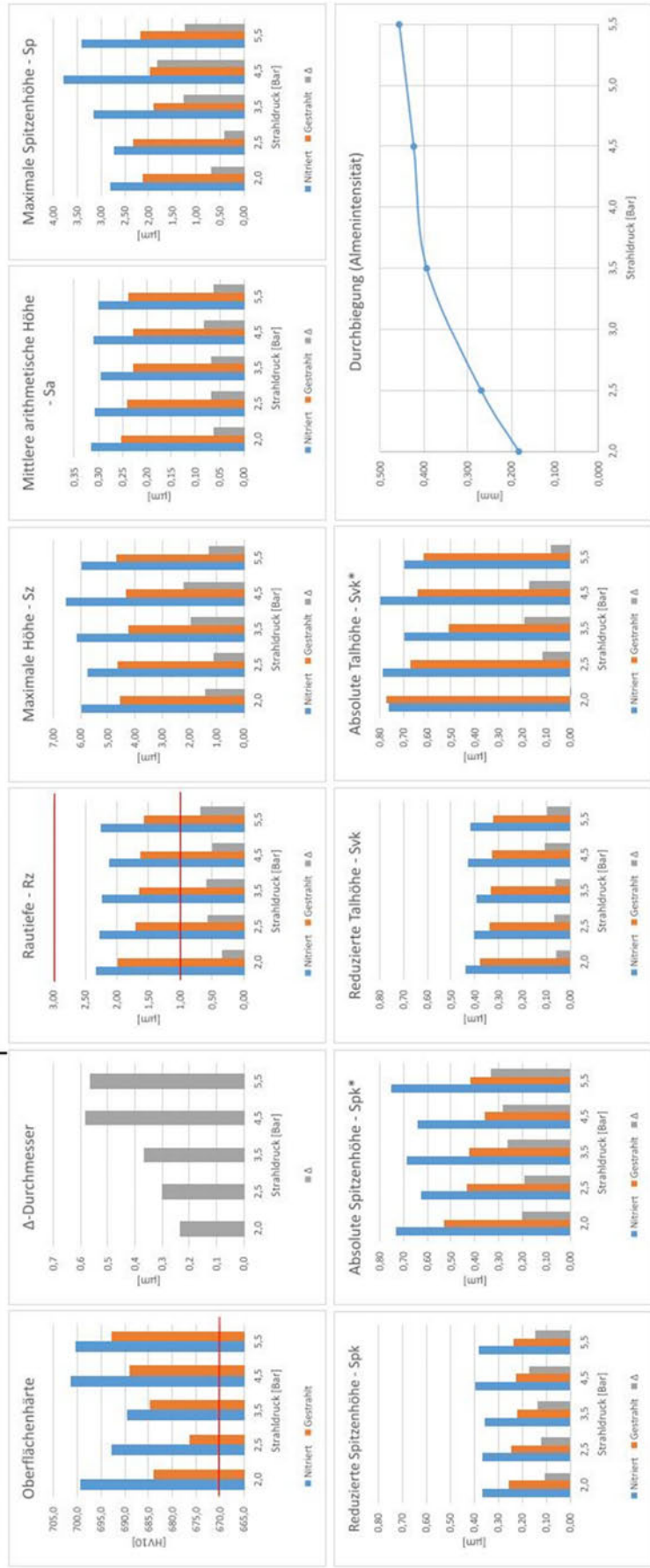
konfokale Messung mit dem SIM-Verfahren

Quelle: <https://www.confovis.com/optische-messverfahren/>

Abgerufen am 05.06.2022

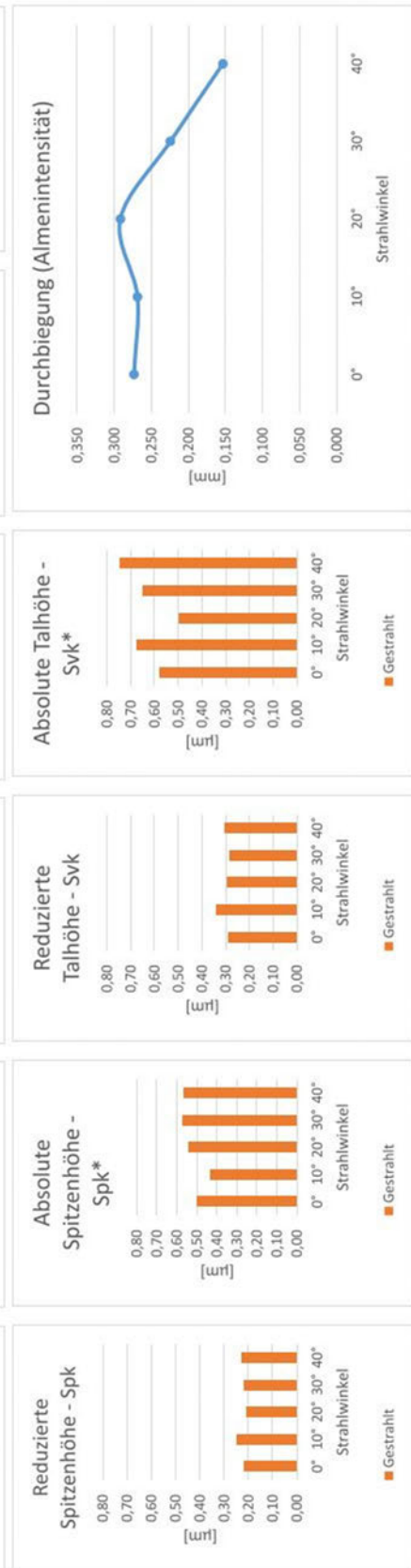
Anlagen, Teil 3– Messwerte Veränderung Strahlintensität

Strahltrieb	Oberflächenhärte [HV10]		Durchmesser [mm]		Oberflächenrauheit [µm]												Durchbiegung [Almen] [mm]													
	Nitriert	Gestrahlt	Nitriert	Gestrahlt	Rz	Sz	Sa	Spk	Svk	Spk*	Svk*	Spk	Svk	Spk*	Svk*	Nitriert	Gestrahlt	Δ												
2.0	699.3	683.9	18.9997	18.9995	0.0002	2.32	1.98	0.34	5.97	4.57	1.41	0.31	0.25	0.06	0.36	0.06	0.73	0.53	0.20	0.76	0.77	-0.02	2.80	2.13	0.68	0.182				
2.5	692.6	676.2	19.0008	19.0005	0.0003	2.27	1.71	0.56	5.73	4.64	1.09	0.31	0.24	0.07	0.37	0.25	0.12	0.40	0.34	0.07	0.63	0.43	0.19	0.79	0.67	0.12	2.72	2.32	0.40	0.269
3.5	689.4	684.7	19.0004	19.0000	0.0004	2.23	1.64	0.59	6.16	4.22	1.94	0.30	0.23	0.07	0.35	0.22	0.14	0.39	0.33	0.06	0.68	0.42	0.26	0.70	0.51	0.19	3.17	1.90	1.27	0.393
4.5	701.4	689.0	18.9994	18.9988	0.0006	2.12	1.63	0.49	6.51	4.31	2.20	0.31	0.23	0.08	0.40	0.23	0.17	0.43	0.33	0.10	0.64	0.36	0.28	0.81	0.64	0.17	3.79	1.98	1.81	0.423
5.5	700.2	692.7	18.9993	18.9987	0.0006	2.24	1.57	0.67	5.96	4.69	1.27	0.30	0.24	0.06	0.38	0.23	0.14	0.42	0.32	0.10	0.75	0.42	0.33	0.61	0.61	0.08	3.42	2.17	1.25	0.456



Anlagen, Teil 4 - Messwerte Veränderung Strahlwinkel

Strahlwinkel	Oberflächenhärte [HV10]	Durchmesser [mm]			Oberflächenrauheit [μm]								Durchbiegung (Almen) [mm]
		Nitriert	gestrahlt	Δ	Rz	Sz	Sa	Spk	Svk	Spk*	Svk*	Sp	
0°	Gestrahlt 701,7	18,9989	18,9988	0,0001	1,55	4,03	0,20	0,22	0,29	0,50	0,58	1,79	0,273
10°	695,2	19,0009	19,0005	0,0004	1,71	4,01	0,24	0,25	0,34	0,43	0,67	1,83	0,269
20°	693,2	18,9988	18,9982	0,0006	1,58	3,95	0,20	0,21	0,29	0,54	0,49	1,88	0,292
30°	691,5	18,9999	18,9992	0,0007	1,71	4,23	0,20	0,22	0,29	0,57	0,65	2,09	0,224
40°	693,8	18,9993	18,9990	0,0003	1,85	4,36	0,21	0,23	0,30	0,57	0,75	2,01	0,153



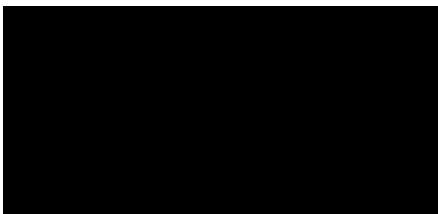
Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Reinsdorf, den 26.08.2022



Kuhles, Karsten

