



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Institut für
Fertigungstechnik und
Photonische Technologien



Diplomarbeit

Parameteranalyse des Bandschleifprozesses durch kinematische Simulation

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs (Dipl.-Ing oder DI) unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Friedrich Bleicher

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Stefan Kaschnitz-Biegl BSc

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Gerald Morgenbesser BSc

Matr.Nr: 11907063

Ramplach, im Juli 2024

Gerald, Morgenbesser

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Ramplach, im Juli 2024

Gerald, Morgenbesser

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern Univ.Prof. Dr. Friedrich Bleicher und Dipl.-Ing. Stefan Kaschnitz-Biegl bedanken. Sie haben es mir ermöglicht diese interessante und lehrreiche Arbeit zu verfassen.

Weiters bin ich meiner Familie und meinen Freunden für die laufende Unterstützung besonders dankbar. Ohne sie wäre der herausfordernde Weg, welchen ich eingeschlagen habe, nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Der Schleifprozess ist ein Fertigungsverfahren, welches bereits sehr lange angewendet wird. Hauptanwendungsgebiet ist dabei die Verbesserung von Oberflächen, wobei auch präzise Formtoleranzen eingehalten werden können. Diese Anforderungen werden auch an den in dieser Arbeit betrachteten Bandschleifprozess gestellt. Als Referenz dient ein Fertigungsprozess der Berndorf Band GmbH, welcher als Werkstück ein Endlosstahlband bearbeitet und daher eine Stelle auch mehrmals überschleift wird.

Dieser Prozess soll in der vorliegenden Arbeit untersucht und eine kinematische Simulation entwickelt werden. Dazu ist es nötig zuerst die Einflussparameter zu identifizieren. Diese können jedoch nicht alle direkt in die Simulation implementiert werden, da die Komplexität des Schleifprozesses, durch seinen stochastischen Charakter, zu hoch ist. Daher müssen die Wirkmechanismen verstanden werden, um die wichtigsten Prozessparameter zu identifizieren. Auf dieser Basis wird eine Literaturrecherche zu bereits vorhandenen kinematischen Simulationen durchgeführt und die verwendeten Methoden zusammengefasst und analysiert. Dadurch ist es möglich, jene Methoden zu identifizieren, welche für die Simulation des betrachteten Bandschleifprozesses am besten geeignet sind. Um die gewählten Prozessparameter bestimmen zu können, werden Messungen am realen Bandschleifprozess durchgeführt. Diese Messungen dienen auch der Verifizierung von späteren Simulationsergebnissen.

Die implementierte Simulation basiert grundlegend auf der Repräsentation einer generierten Schleifbandoberfläche durch ein Gitter an Punkten. Dafür wird auf stochastische Methoden zur Erzeugung von Zufallsflächen zurückgegriffen. Jedem Punkt wird anschließend eine Bewegungsbahn zugeordnet und die Schnittmenge aus der Werkstückoberfläche entfernt. Zusätzlich werden das elastische Rückweichen von Einzelkörnern sowie die plastische Verdrängung vom Werkstückmaterial zu den Kornseiten hin modelliert. Bei Untersuchungen mit dieser Simulation kann erkannt werden, dass das Zustellverhalten den größten Einfluss auf das Rauheitsergebnis aufweist. Das elastische Verhalten sowie die Verdrängung haben auch eine eindeutige Wirkung, wobei kurzfristige Effekte nicht eindeutig erklärt werden können und stark von gewählten Filterparametern abhängig sind. Eine Reproduktion des realen Verhaltens mit der entwickelten Simulation ist jedoch möglich, weshalb das gewählte Vorgehen als geeignet angesehen werden kann.

Abstract

The grinding process is a manufacturing method which has been used for a long time. The main application is the improvement of technical surfaces, while it is also possible to reach tight shape tolerances. Exactly these requirements are also required for the analysed belt grinding process. As a reference a grinding process of the Berndorf Band GmbH is used. The workpiece of that process is a continuous steel band, so there are lots of grinding passes over the surface until the process is finished.

The goal of this thesis is to analyse this process and develop a kinematic simulation. To do this, it is necessary to identify all parameters which influence the grinding process. However, not all these parameters can be directly implemented into the simulation, because the interaction between the grinding belt and the workpiece is too complex, due to the stochastic characteristics of the process. Therefore, the grinding mechanisms must be understood, to be able to select the most important process parameters. On this basis, the literature is searched for existing kinematic simulations and the methods used. With this overview it is then possible to identify the methods which are best suited for the simulation of the analysed belt grinding process. To be able to determine the values of the selected parameters, measurements on the real process are carried out. These measurements are also the basis for the verification of later simulation results.

The basis for the implemented simulation is the representation of the grinding belt surface by a grid of points. This surface must be generated based on measurements and for that, stochastic methods to generate random surfaces are used. Each point then gets assigned a trajectory and the intersection is removed from the workpiece material. Additionally, the elastic retraction of each cutting grain and the plastic displacement of material towards the grain sides are modelled. Investigations with this simulation show that the feed of the grinding belt to the workpiece shows the greatest influence on the simulated roughness. The elastic behaviour and the displacement of material also show a clear effect, although short-term effects cannot be clearly explained, and they also strongly depend on selected filter parameters. However, it is possible to reproduce the grinding behaviour with the developed simulation and therefore the used methods and implementations can be considered suitable for such a simulation.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
2 Grundlagen und Stand der Technik	9
2.1 Grundlagen Schleifprozess	9
2.1.1 Korneingriff	9
2.1.2 Energiebilanz	11
2.1.3 Kornwerkstoffe	13
2.1.4 Aufbau Schleifwerkzeuge	14
2.1.5 Verschleißformen	15
2.1.6 Betrachteter Bandschleifprozess	16
2.2 Erzeugung der Schleifbandoberfläche	18
2.2.1 Grundlagen	18
2.2.2 Literaturübersicht	20
2.2.3 Zeitreihenmodelle	23
2.2.4 2D-Filter-Methode	25
2.3 Simulation des Schleifprozesses	26
2.3.1 Grundlagen	27
2.3.2 Analytische Simulation	31
2.3.3 Diskrete Simulation	32
3 Zielsetzung	34
4 Messungen am Bandschleifprozess	35
4.1 Schleifbandzustellung	35
4.2 Antriebsleistung	37
4.3 Schleifbandoberfläche (Edgemaster)	37
4.4 Schleifbandoberfläche (Abformung)	39
4.5 Werkstückoberfläche (Rauheitsmessgerät)	39
4.6 Werkstückoberfläche (Abformung)	40
5 Datenaufbereitung	41
5.1 Ablauf der Schleifbanddatenerhebung	41

Inhaltsverzeichnis	6
5.2 Fehlende Daten und Verzerrungen	44
5.3 Spektrale und statistische Parameter des Schleifbandes.....	46
5.4 Erzeugung der Schleifbandoberfläche	52
5.5 Rauheitswerte der Werkstückoberfläche.....	54
5.6 Antriebsleistung und Zustellung	58
6 Implementierung der Simulation.....	60
6.1 Gewählte Simulationsparameter	60
6.2 Schematischer Ablauf	61
6.3 Kraftmodell	66
6.4 Elastisches Verformungsmodell	70
6.5 Plastisches Verformungsmodell	71
6.6 Zustellalgorithmus	73
7 Ergebnisse	76
7.1 Gemessene Werte	76
7.1.1 Zustellung	76
7.1.2 Ultraschall-Dickenmessung	77
7.1.3 Schleifbandoberfläche	78
7.1.4 Werkstückoberfläche	85
7.2 Simulierte Oberflächen.....	86
7.2.1 Generierte Schleifbandoberfläche	87
7.2.2 Simulierte Werkstückoberflächen	89
8 Zusammenfassung und Ausblick	100
Literaturverzeichnis	102
Abbildungsverzeichnis.....	106
Tabellenverzeichnis.....	108
Verzeichnis Codeausschnitte	109

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
SiC	Siliziumkarbid
Tab.	Tabelle

1 Einleitung

Der Schleifprozess zählt zu den ältesten und wohl bekanntesten Fertigungsverfahren. Der prinzipielle Ablauf erscheint simpel und einleuchtend. Bei näherer Betrachtung jedoch zeigen sich die Probleme, welche mit einem Prozess mit geometrisch nicht definierten Schneiden einhergehen. Die Prozessparameter, welche die Form der Schneiden angeben, können meist nur statistisch betrachtet werden und es kann kein eindeutiges Schliffergebnis gefunden werden.

Für die fertigende Industrie bedeuten diese statistischen Eigenschaften des Schleifprozesses vor allem, dass die Verbesserung von bestehenden Prozessen bzw. das Einführen eines neuen Prozesses mit sehr viel Arbeit und Zeit verbunden ist, um ausreichend Daten für statistisch relevante Aussagen zu generieren. Dieses Problem kann vor allem durch den Einsatz von Prozesssimulationen entschärft werden.

An diesem Punkt setzt die vorliegende Diplomarbeit an, indem eine kinematische Simulation eines Bandschleifprozesses entwickelt werden soll. Dazu wird der Bandschleifprozess von Endlosstahlbändern der Berndorf Band GmbH näher betrachtet. Zuerst wird der aktuelle Stand der Technik bezüglich des Prozesses generell analysiert. Daraus können die relevanten Prozessparameter abgeleitet werden. Anschließend wird die Literatur nach bekannten Ansätzen zur Realisierung einer derartigen Simulation untersucht. Die Simulation soll als Ergebnis eine simulierte Schlifftopografie mit realistischen Rauheitskennwerten erzeugen, dabei ist vor allem auch der Verschleiß vom Schleifband zu berücksichtigen. Für die Bestimmung der Prozessparameter sowie zur Verifizierung des Simulationsmodells werden experimentelle Untersuchungen am tatsächlichen Prozess durchgeführt.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Diese Diplomarbeit benötigt Wissen aus den Teilgebieten der Fertigungstechnik, der Simulation sowie der diskreten Mathematik. Im Folgenden wird daher auf für die weitere Bearbeitung relevante Themen eingegangen. Zuerst wird in Abschnitt 2.1 das Schleifen als spannender Prozess mit geometrisch unbestimmten Schneiden kurz beschrieben und vertiefend auf die Prozessparameter eingegangen. Für die Simulation ist es notwendig, Schleifbandoberflächen mit beliebiger Oberfläche zu generieren. Daher wird in Abschnitt 2.2 näher auf mögliche Methoden eingegangen. Die Simulationsmethoden können grundlegend in analytische Methoden und diskrete Methoden unterschieden werden. Diesbezügliche Unterschiede sowie entsprechende Vertreter in der Literatur werden in Abschnitt 2.3 erläutert.

2.1 Grundlagen Schleifprozess

Die Prozesse mit geometrisch unbestimmten Schneiden können nach ihren Wirkprinzipien unterschieden werden. Man unterscheidet je nach aufgebracht Zwangsbedingung zwischen energiegebunden, kraftgebunden, bahnggebunden und raumgebunden. Der Schleifprozess wird in dieser Klassifizierung dem bahnggebundenen Wirkprinzip bzw. im Fall von Gleitschleifen dem kraftgebundenen Wirkprinzip zugeordnet [1]. Der für diese Arbeit betrachtete Bandschleifprozess wird von den aufgezwungenen Korntrajektorien dominiert, daher liegt in den folgenden Abschnitten der Fokus auf diesem Prinzip.

2.1.1 Korneingriff

Um den Zerspanungsprozess beim Schleifen verständlich zu machen, wird zuerst nur der Eingriff eines einzelnen Schleifkornes in das Werkstück betrachtet. Der grundlegende Aufbau sowie das Wirkprinzip ist in Abb. 1 skizziert. Das Korn ist über eine Matrix mit einem Trägermaterial verbunden. Das Trägermaterial läuft über eine zuerst als starr betrachtete Walze und zwingt darüber dem Schleifkorn eine gewisse Trajektorie auf. Diese Bewegungsbahn ist entscheidend für den Materialabtrag am Werkstück. Beim Eintauchen des Kornes in das Werkstückmaterial kommt es zuerst nur zu einer rein elastischen Verformung des Werkstücks, also zu keinem bleibenden Materialabtrag. Erst wenn das Korn tief genug in das Material vordringt, wird die Spannung groß genug und es kommt zusätzlich zu dem elastischen Anteil eine bleibende plastische Verformung. Das plastisch verformte Material fließt dabei zum einen unter dem Korn durch und wird zum anderen zur Seite hin verdrängt, wo es eine Erhöhung bildet. Erst wenn der Winkel zwischen der Kornoberfläche und der Werkstückoberfläche am Kontaktpunkt in Schnittrichtung groß genug wird, kann sich zusätzlich zu den bereits beschriebenen Phänomenen ein Span bilden, der auch tatsächlich Material vom Werkstück abträgt [1].

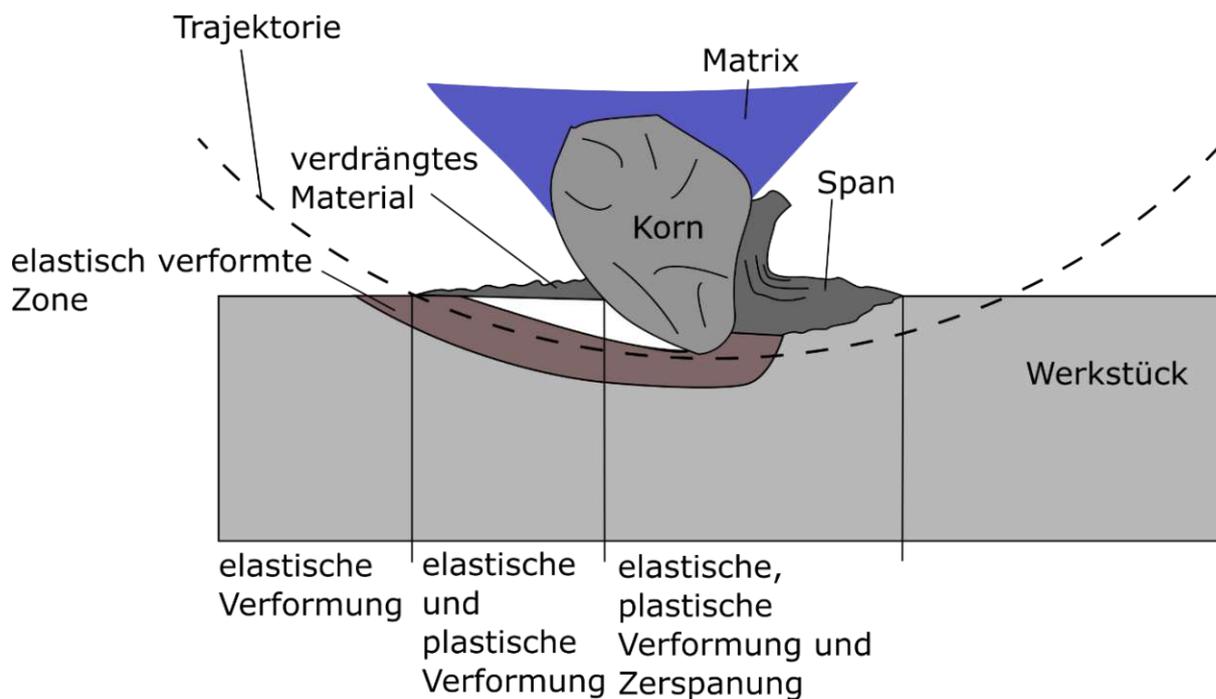


Abb. 1: Einzelkorneingriff in das Werkstück; angelehnt an [1]

Klocke [1] beschreibt in seinem Buch auch die Parameter, welche den Prozess der Materialverdrängung und der Spanbildung beeinflussen. Dazu wird zuerst der Einfluss des Reibungskoeffizienten zwischen Korn und Werkstück betrachtet. Es zeigt sich, dass es bei einer hohen Reibung zu einer schnelleren Spanbildung und einer niedrigeren Verdrängung des Materials kommt. Im Umkehrschluss nimmt das Spanvolumen bei geringerer Reibung, durch zum Beispiel das Zuführen eines Schmierstoffes, ab und der Anteil an plastisch verdrängtem Material nimmt zu. Weiters haben der Schneideradius, die Korntrajektorie mit dem entsprechenden Eintrittswinkel, die Schnittgeschwindigkeit sowie die Werkstoffeigenschaften einen Einfluss auf die Spanbildung. Ein hoher Schneideradius begünstigt die plastische Verdrängung des Materials und bewirkt eine spätere Spanbildung mit einem geringeren Spanvolumen. Auch ein sehr flacher Eintrittswinkel vom Korn in das Werkstück erschwert die Spanbildung und führt zu einem höheren Anteil an verdrängtem, nicht zerspantem Material. Eine höhere Schnittgeschwindigkeit erschwert das plastische Fließen des Werkstückmaterials und begünstigt die Spanbildung. Zuletzt werden noch die Eigenschaften des Materials angeführt. Ein sehr duktiler Werkstoff neigt eher zum plastischen Fließen und zu einer späteren und weniger ausgeprägten Spanbildung. Daher kann auch die Temperatur an der Schnittstelle als Parameter identifiziert werden. Eine höhere Temperatur steigert die Duktilität des Werkstoffes und sorgt für ein verringertes Spanvolumen. An dieser Stelle lässt sich eine entgegengesetzte Wirkung im Falle einer Kühlschmierung erkennen. Zum einen wird die Zerspanung

durch die Kühlung begünstigt, zum anderen sorgt die verringerte Reibung für eine erhöhte plastische Verformung.

2.1.2 Energiebilanz

In Abschnitt 2.1.1 wurde der grundlegende Korneingriff und die dazugehörigen Einflussparameter beschrieben. Für die Zerspanung sind neben geometrischen Größen vor allem auch die Schnittgeschwindigkeit, Reibung und Temperatur von Bedeutung. Um die Zusammenhänge dieser Parameter besser zu verstehen, ist es notwendig, näher auf die Energiebilanz an der Kontaktstelle zwischen Korn und Werkstück einzugehen.

In Abb. 2 sind die wirkenden Kräfte sowie die Wärmeströme beim Korneingriff an einem einzelnen Korn skizziert. Das Korn bewegt sich mit der tangentialen Geschwindigkeit v_c durch das Werkstück. Durch die Bahnbindung des Korns entsteht eine Reaktionskraft, welche in eine tangentiale Komponente F_t und eine normale Komponente F_n aufgeteilt wird. Durch Reibung und Verformungsarbeit wird Wärme frei, welche im stationären Fall durch die Wärmeströme q_s über das Korn, q_{span} über den Span, q_{ks} über einen eventuellen Kühlschmierstoff und q_w über das Werkstück von der Kontaktfläche abgeführt wird.

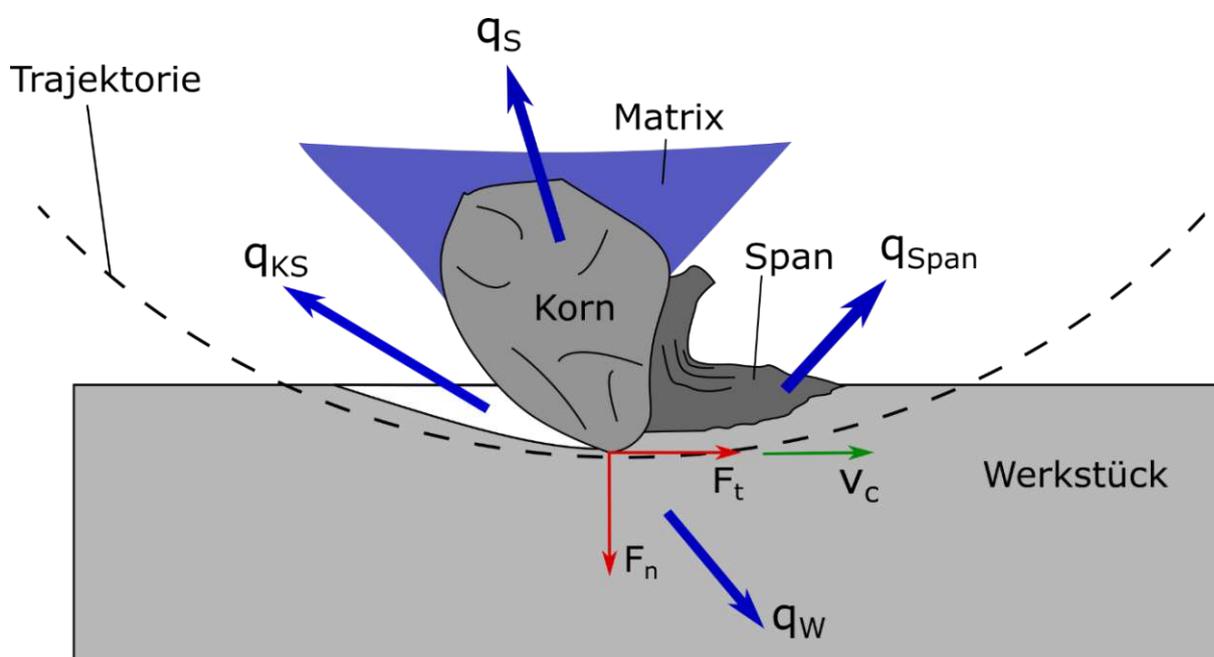


Abb. 2: Energiebilanz am Einzelkorn; angelehnt an [1], [2]

Die zugeführte Leistung P kann wie folgt berechnet werden.

$$P = F_t * v_c \quad (1)$$

P ... zugeführte Leistung

F_t ... Tangentialkraft

v_c ... tangentielle Geschwindigkeit des Korns

Das Schnittkraftverhältnis μ ist folgendermaßen definiert.

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (2)$$

F_t ... Tangentialkraft

F_n ... Normalkraft

μ ... Schnittkraftverhältnis

Damit kann die Energiebilanz im stationären Fall wie folgt angegeben werden.

$$P = q_s + q_{span} + q_{KS} + q_w \quad (3)$$

P ... zugeführte Leistung

q_s ... Wärmestrom durch das Korn

q_{span} ... Wärmestrom durch den Span

q_{KS} ... Wärmestrom durch den Kühlschmierstoff

q_w ... Wärmestrom durch das Werkstück

2.1.3 Kornwerkstoffe

Ein weiterer wichtiger Faktor beim Betrachten des Schleifprozesses ist neben dem Korneingriff der Aufbau und die Werkstoffwahl für das Schleifwerkzeug. In diesem Abschnitt wird daher ein Überblick zu den möglichen Kornwerkstoffen gegeben. Der gesamte Aufbau und die Unterschiede bezüglich der Schleifwerkzeuge werden im nächsten Abschnitt 2.1.4 behandelt.

Klocke [1] nennt drei wichtige Eigenschaften, die ein Kornwerkstoff erfüllen sollte. Erstens sollte das Material eine hohe Härte aufweisen und zugleich möglichst zäh sein. Diese Eigenschaften sorgen für eine hohe Standzeit. Zweitens soll der verwendete Werkstoff unempfindlich gegen starke Temperaturschwankungen sein. Im Eingriff wird das Korn sehr schnell erhitzt und nach dem Werkstückkontakt kommt es zu einer starken Abkühlung. Um starken Verschleiß zu vermeiden, muss der Kornwerkstoff den auftretenden Temperaturen sowie den Temperaturschwankungen standhalten können. Als drittes wird eine hohe chemische Beständigkeit gefordert. Chemische Reaktionen mit zum Beispiel dem Kühlschmierstoff können das Korn schädigen. Daher sollten diese möglichst durch die Materialwahl unterbunden werden.

Natürlich vorkommende Kornwerkstoffe weisen meist vergleichsweise schlechte Festigkeitseigenschaften auf, daher wurden diese größtenteils durch synthetische Werkstoffe ersetzt. Die wichtigsten Vertreter unter den synthetischen Werkstoffen sind Korund, Siliziumkarbid, kubisches Bornitrid und Diamant. Für die in dieser Arbeit behandelten Schleifbänder werden größtenteils Korund- und Siliziumkarbidkörner verwendet, daher wird nun näher auf diese zwei Werkstoffe eingegangen [1].

Korund oder Aluminiumoxid Al_2O_3 wird aus Bauxit durch Schmelzen oder aus Böhmit durch einen Sinterprozess gewonnen. Vorteile dieses Kornwerkstoffes sind die hohe Härte und Zähigkeit sowie gute thermische Eigenschaften. Diese Eigenschaften sind jedoch auch stark von der Qualität des Korunds abhängig, wobei Verunreinigungen und gezielte Zusätze hier eine große Rolle spielen [1].

Siliziumkarbid SiC wird durch einen Schmelzprozess aus Quarzsand gewonnen. Man unterscheidet zwischen grünem und schwarzem Siliziumkarbid, wobei die grüne Farbe auf Stickstoffanteile und die schwarze Farbe auf Aluminiumanteile zurückzuführen sind. Gegenüber Korund besitzt SiC eine noch höhere Härte. Die Zähigkeitseigenschaften sind gut, jedoch auch stark von der Korngröße abhängig. Temperaturgradienten innerhalb des Korns können von Siliziumkarbid sehr gut ertragen werden und SiC ist chemisch mit Ausnahme gegen Phosphorsäure äußerst stabil [1].

2.1.4 Aufbau Schleifwerkzeuge

Die Schleifwerkzeuge können nach dem Aufbau in gebundene Schleifkörper und Schleifmittel auf Unterlage unterteilt werden. Die gebundenen Schleifkörper bestehen aus den Schleifkörnern und einem Bindewerkstoff. Die Klassifizierung erfolgt anhand des Volumenanteils der Körner, des Binders sowie der Poren. Als Binder werden Kunstharze, Keramiken und Metalle verwendet [1]. Es wird weiters nicht näher auf den Aufbau von gebundenen Schleifkörpern eingegangen, da in dieser Arbeit ausschließlich Schleifbänder behandelt werden.

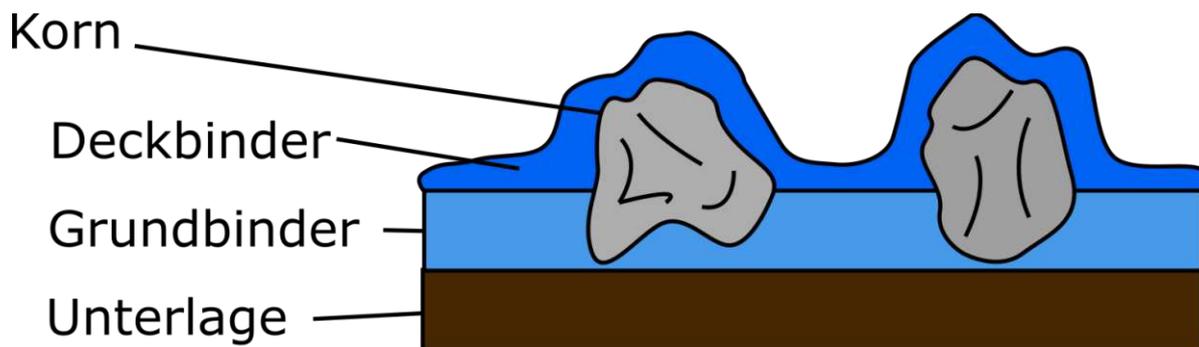


Abb. 3: Aufbau von Schleifmittel auf Unterlage; angelehnt an [1]

In Abb. 3 ist der prinzipielle Aufbau eines Schleifmittels auf Unterlage skizziert. Die häufigsten Vertreter sind Schleifblätter und endlos Schleifbänder. Grundlegend kann der Aufbau in vier Bestandteile gegliedert werden. Die Basis bildet die Unterlage, auf die alle anderen Bestandteile aufgebracht werden. Diese kann aus Papier, Vulkanfiber, Gewebe und Variationen davon hergestellt werden. Papier stellt hier die günstigste und thermisch beste Lösung dar, jedoch ist die niedrige Festigkeit bei höheren Belastungen problematisch. Um die Festigkeit zu steigern, wird auf die Lösungen mit Natur- oder Kunstfasern zurückgegriffen. Auf die Unterlage wird eine Schicht des Grundbinders aufgetragen. Dafür werden Kunstharze und Naturleim eingesetzt. Auf diesen Grundbinder werden die Schleifkörner entweder aufgestreut oder mittels eines elektrostatischen Prozesses aufgetragen. Der Vorteil der elektrostatischen Aufbringung besteht darin, dass die Körner gleichmäßiger und reproduzierbarer aufgebracht werden. Außerdem werden mit diesem Verfahren die Körner gerichtet auf die Unterlage aufgebracht. Der Grundbinder bildet dabei die Verbindung zwischen den Körnern und der Unterlage und hält die Körner direkt nach dem Auftragen fest. Über die Schleifkörner und den Grundbinder wird anschließend eine weitere Kunstharzschicht, der Deckbinder aufgetragen. Dieser umhüllt die Körner vollständig und stützt das Korn im Korneingriff gegen den Grundbinder und benachbarte Körner ab [1].

Je nach verwendeten Materialien und genauer Ausführung des Aufbaus werden folgende drei Typen unterschieden. Jene Schleifwerkzeuge, welche für den Grundbinder und den Deckbinder Leim verwenden sind besonders günstig und sehr elastisch. Die zweite Gruppe sind jene mit Leim als Grundbinder und Kunstharz als Deckbinder. Hier wird die gute Haftung und Elastizität des Leimes mit der höheren Festigkeit und niedrigeren Temperaturempfindlichkeit des Kunstharzes kombiniert. Die dritte Gruppe sind jene, bei denen der Grundbinder sowie der Deckbinder als Kunstharz ausgeführt ist. Diese weisen die höchste Festigkeit gegen Kornausbruch auf und sind wärme- und wasserbeständig. Nachteil ist die geringe Elastizität. Um dem entgegenzuwirken, werden solche Schleifmittel jedoch oft einer weiteren Behandlung unterzogen, bei der die Bindungsschichten gezielt aufgebrochen werden [1].

2.1.5 Verschleißformen

Die Standzeit eines Werkzeuges ist in der Fertigungstechnik immer von Relevanz, da dieser Faktor direkten Einfluss auf die Bearbeitungskosten und die Bearbeitungszeit nimmt. Beim Schleifen mit Schleifscheiben oder Schleifmittel auf Unterlage kann das Versagen von zwei verschiedenen Bestandteilen zu Verschleißerscheinungen führen. Am naheliegendsten scheint der direkte Verschleiß des Kornes, jedoch stellt das Versagen der Bindung, mit dem kompletten Ausbrechen von Schleifkörnern eine weitere wichtige Form des Werkzeugverschleißes dar [1].

Beim Kornverschleiß wird zwischen dem Verschleiß durch Abrasion an der Oberfläche und dem Ausbrechen von Kornanteilen durch Werkstoffermüdung und Fehlstellen unterschieden. Der Kornverschleiß kann durch eine hohe thermische Wechselbelastung oder chemische Einflüsse auch verstärkt auftreten [1].

Der Bindungsverschleiß wird hauptsächlich durch die mechanische Wechselbelastung hervorgerufen. Dabei spielt der Kornverschleiß insofern auch eine Rolle, indem eine flachere verschlissene Kornoberfläche höhere Schnittkräfte hervorruft und dadurch auch eine höhere Last auf den Binder wirkt. Auch hier können starke Temperaturschwankungen und chemische Einflüsse zu einer zusätzlichen Schwächung des Binders beitragen [1].

Ein für diese Arbeit wichtiges Phänomen bei Schleifbändern, welches jedoch nicht direkt als Verschleiß betrachtet wird, ist das Anlagern von Spänen in den Tälern zwischen einzelnen Körnern. Dieses führt ab einer gewissen Intensität zu einer Reduktion der Eindringtiefe und hat daher auch einen Einfluss auf das Schliffergebnis. Jedoch ist es genau genommen keine Verschleißerscheinung, da es zu keiner direkten geometrischen Veränderung am Schleifband führt. Dieses Phänomen tritt, wie aus den Versuchen am realen Prozess ersichtlich, vor allem dann auf, wenn das Schleifband

mit einer viskosen Flüssigkeit benetzt ist und dadurch die Späne besser am Band haften.

2.1.6 Betrachteter Bandschleifprozess

Um die später entwickelte Simulation parametrisieren und verifizieren zu können, wird ein Bandschleifprozess der Firma Berndorf Band GmbH betrachtet. Eine schematische Darstellung des Schleifaufbaus ist in Abb. 4 dargestellt. Grundlegend ist das Ziel eine gewisse Oberflächengüte bei ausreichender Formtoleranz. Dazu wird ein Endlosschleifband über mehrere Rollen geführt, die auch für die Einstellung der Schleifbandspannung und für das Einleiten der Querbewegung in y-Richtung verwendet werden. Die in Abb. 4 dargestellte Schleifbandwalze ist darunter jene, die das Schleifband mit dem Stahlband in Kontakt bringt. Für eine möglichst konstante Flächenpressung sorgt eine elastische Kunststoffhülle mit der Dicke a_{el} mit einer Härte von in etwa 80 Shore A. Die Zustellwalze und der Kern der Schleifbandwalze sind aus Stahl gefertigt. Die Zustellung des Stahlbandes erfolgt über das Verschieben der Zustellwalze in Z-Richtung und ist auch während des Schleifprozesses ständig möglich. Das Schleifband bewegt sich in der XZ-Ebene mit der Geschwindigkeit v_s und führt in Y-Richtung eine periodische Bewegung zwischen zwei Endpunkten aus. Das Stahlband wird mit der Geschwindigkeit v_w durch die Kontaktstelle geführt. Die Schleifbandgeschwindigkeit und die Stahlbandgeschwindigkeit sind im Schleifpunkt entgegengesetzt gerichtet, daher handelt es sich hier um einen Gegenlaufschleifprozess. Als Orientierungshilfe für den Anpressdruck steht an der Maschine eine Anzeige der Schleifbandantriebsleistung zur Verfügung.

Der Schleifprozess selbst beginnt mit einem Antasten des Schleifbandes an das Stahlband und ein anschließendes Einstellen des Anpressdrucks über die Leistungsanzeige. Dabei wird zu Beginn kein Kühlschmierstoff zugesetzt. Der Schleifstaub wird von einer Absaugung abgeführt. Etwas später werden kleine Mengen an Petroleum auf das Stahlband aufgebracht. Dieser dünne Petroleumfilm dient als Kühlschmierstoff und wird regelmäßig mit immer größer werdender Quantität zugeführt. Um schlussendlich eine noch höhere Oberflächengüte zu erreichen, wird zu einem späteren Zeitpunkt auf eine Petroleum-Schneideölmischung zurückgegriffen. Das Schneideöl weist dabei eine geringere Flüchtigkeit auf und sammelt sich daher auch auf dem Schleifband an.

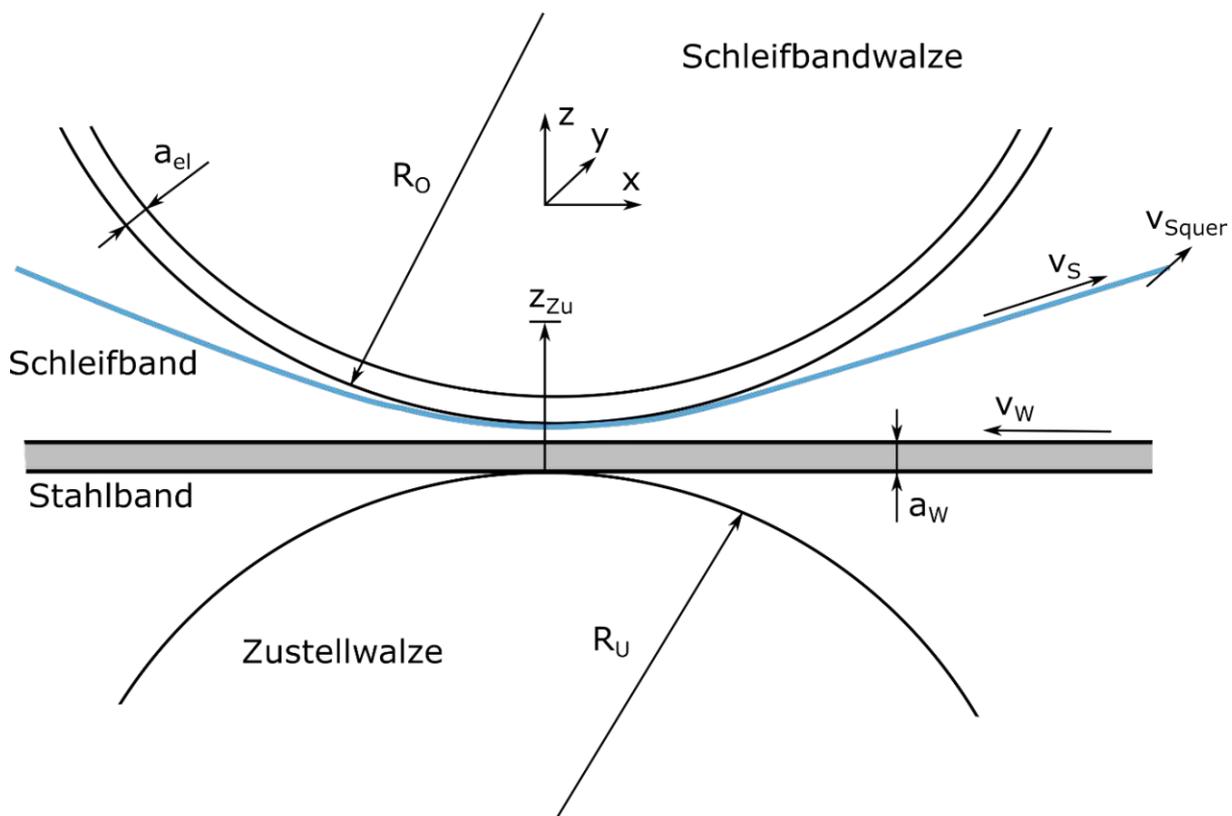


Abb. 4: Schemaskizze Bandschleifprozess

In folgender Tab. 1 werden alle geometrischen Abmessungen, Geschwindigkeiten und andere Prozessparameter zusammengefasst.

Tab. 1: Prozessparameter des untersuchten Schleifprozesses

R_o	250 mm	a_{el}	16 mm
R_u	190 mm	a_w	~ 0,2 mm
v_s	8 m/s	v_w	8 m/min
Amplitude Querbewegung	~ 20 mm	Periodendauer Querbewegung	~ 8 s
Schleifbandlänge	6,2 m	Stahlbandlänge	9,6 m

2.2 Erzeugung der Schleifbandoberfläche

Um eine realitätsnahe Simulation des Schleifprozesses erreichen zu können, spielt die Modellierung der Schleifbandoberfläche eine zentrale Rolle. Zum einen soll ein solches Modell die spektralen Eigenschaften und die Höhenverteilung so gut als möglich nachbilden, zum anderen ist jedoch auch eine effiziente Berechnung und Eignung als Grundlage für z.B. ein Kraftmodell wünschenswert. Dabei sollte es auch möglich sein, Oberflächen mit genügend großen Abmessungen bzw. verschiedene Schleifbandoberflächen mit gleicher Charakteristik zu erhalten. Die Parameter, welche die Charakteristik beschreiben, werden in Abschnitt 2.2.1 behandelt. Für die Oberflächengenerierung gibt es in der Literatur verschiedene Herangehensweisen, welche in Abschnitt 2.2.2 zusammengefasst werden. Die folgenden drei Kapitel beschäftigen sich näher mit Möglichkeiten zur Erzeugung von Zufallsflächen, da dieses Verfahren für die weitere Arbeit ausgewählt wurde.

2.2.1 Grundlagen

Eine Schleifbandoberfläche kann im Allgemeinen nicht als eindeutig definiertes Werkzeug betrachtet werden. Daher sind für die Charakterisierung statistische Methoden notwendig. Die zentralen Größen, die die Schleifwerkzeugoberfläche beschreiben, sind die statistischen Parameter Mittelwert \bar{z} , Standardabweichung σ , Skewness S_k , Kurtosis K_u und die Autokorrelationsfunktion ACF der Oberflächenhöhen [3].

Die Definitionen der statistischen Parameter für eine Oberfläche $z_{i,j}$ dargestellt in einer $M \times N$ Matrix und deren Zusammenhänge mit den ersten vier Momenten der Oberflächenhöhen $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ lauten wie folgt [4], [5].

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z_{i,j}}{M * N} = \mu_1 \quad (4)$$

\bar{z} ... Durchschnittliche Höhe

$z_{i,j}$... Höhenprofil der Oberfläche

μ_1 ... erstes Moment

M, N ... Anzahl der Punkte in jede Richtung der Fläche

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z_{i,j}^2}{M * N} = \mu_2 \quad (5)$$

σ^2 ... Varianz der Oberfläche

$z_{i,j}$... Höhenprofil der Oberfläche

μ_2 ... zweites Moment

M, N ... Anzahl der Punkte in jede Richtung der Fläche

$$Sk = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z_{i,j}^3}{\sigma^3 * M * N} = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} \quad (6)$$

Sk ... Skewness der Oberfläche

σ ... Standardabweichung der Oberfläche

$z_{i,j}$... Höhenprofil der Oberfläche

μ_2 ... zweites Moment

μ_3 ... drittes Moment

$M, N \dots$ Anzahl der Punkte in jede Richtung der Fläche

$$Ku = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z_{i,j}^4}{\sigma^4 * M * N} = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} \quad (7)$$

$Ku \dots$ Kurtosis der Oberfläche

$\sigma \dots$ Standardabweichung der Oberfläche

$z_{i,j} \dots$ Höhenprofil der Oberfläche

$\mu_2 \dots$ zweites Moment

$\mu_4 \dots$ viertes Moment

$M, N \dots$ Anzahl der Punkte in jede Richtung der Fläche

Die spektrale Information wird durch die Autokorrelationsfunktion ACF repräsentiert, und diese ist folgendermaßen definiert [5].

$$ACF(k,l) = \frac{1}{M * N} * \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z(i,j) * z(i+k,j+l) \quad (8)$$

ACF... Autokorrelationsfunktion der Oberfläche

$z \dots$ Höhenprofil der Oberfläche

$M, N \dots$ Anzahl der Punkte in jede Richtung der Fläche

2.2.2 Literaturübersicht

Es lassen sich in der Literatur drei grundlegend verschiedene Herangehensweisen, zur Erzeugung einer Schleifbandoberfläche identifizieren. Die erste und vermeintlich einfachste, jedoch auch zeitaufwendigste und am wenigsten flexibelste Methode ist das direkte Vermessen von genügend vielen und ausreichend großen Oberflächen eines realen Schleifwerkzeugs [6]. Dieses Vorgehen ist sehr zeitaufwendig und ermöglicht nur sehr wenig Flexibilität speziell auch im Hinblick auf den in dieser Arbeit berücksichtigten Schleifbandverschleiß. Das Vermessen von kleinen Schleifbandoberflächen zur Gewinnung der jeweiligen Charakteristik ist jedoch meist

die Grundlage für die folgenden zwei Herangehensweisen und soll daher nicht vernachlässigt werden.

Die zweite Möglichkeit, welche besonders durch die Nachvollziehbarkeit und die einfachen Möglichkeiten zur weiteren Implementierung von Kraft- und Verschleißmodellen hervorsteht, ist die Simulation der Oberfläche. Dabei wird von einer vereinfachten Kornform ausgegangen und diese werden durch einen Algorithmus zufällig auf einer Ebene platziert. Zhu et al. [7] verwendet als Kornmodell einen Kegelstumpf. Diese Körner werden gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt und als federgelagert in alle Koordinatenrichtungen betrachtet. Anschließend wird eine mikroskopische Kraftmodellierung über die Definition der Vickers-Härte und eine makroskopische Kraftmodellierung über die Herz-Theorie gewonnen. Wang et al. [8] empfiehlt „Shuttleförmige“ Schleifkörner. Die Winkel der Körner werden als normalverteilt und die Höhen als gammaverteilt betrachtet. Diese Körner werden auf einem gleichmäßigen Gitter positioniert und in der Ebene nach einer Normalverteilung und aus der Ebene heraus nach einer Gleichverteilung zufällig verschoben. Liu et al. [9] verwendet kugelförmige Körner deren Durchmesser normalverteilt sind. Die Körner werden gleichverteilt in einer Ebene so positioniert, sodass es zu keinen Überlappungen kommt. Eine mikroskopische Kraftmodellierung erfolgt über die Definition der Brinell-Härte und eine makroskopische Kraftbetrachtung erfolgt über die Herz-Theorie. Chen et al. [10] verwendet für die volumetrische Modellierung einer Schleifscheibe Kugeln, welche gleichverteilt im Raum angeordnet werden. Die Schleifoberfläche wird durch ein Abrichtmodell nachträglich aufgeprägt. Warnecke und Zitt [11] nennen einen Oktaeder als Beispiel für eine angenäherte Kornform. Diese werden wieder auf einem Gitter gleichmäßig verteilt und anschließend nach einer Verteilung in alle drei Raumrichtungen zufällig verschoben. Auch Wang et al. [12] verwendet Oktaeder als Körner. Diese werden anhand einer Normalverteilung skaliert und gleichverteilt auf der Oberfläche positioniert. Li et al. [13] verwendet drei verschiedene Grundformen. Diese sind Tetraeder, bei denen die Spitzen entfernt werden, Hexaeder, welche der Länge nach durch eine Ebene getrennt werden und Hexaeder, bei denen die beiden Spitzen mit dem kleinsten Winkel abgeschnitten sind. Die Größen dieser Körner werden durch einen einschließenden Kreis, mit einem normalverteilten Durchmesser parametrisiert. Die Oberfläche wird durch einen Suchalgorithmus generiert, der keine Überlappung der einschließenden Kreise erlaubt. Liu et al. [14] vergleichen in ihrer Arbeit kugelförmige, konische und an der Spitze abgeschnittene konische Körner miteinander. Die Abmessungen werden durch eine Normalverteilung zufällig bestimmt. Die Körner werden gleichmäßig auf einem Gitter positioniert und zufällig iterativ in alle drei Raumrichtungen verschoben, mit der Nebenbedingung, dass sich die einschließenden Kreise in der xy-Ebene nicht überschneiden dürfen. (siehe Abb. 5) Yang et al. [15] entwickelt ein Kraftmodell basierend auf der Brinell-Härte und verwendet dafür kugelförmige Körner, welche in z-

Richtung durch eine Feder gelagert sind. Liu et al. [16] verwenden in ihrer Arbeit an den Spitzen abgeschnittene Oktaeder, um eine Diamantscheibe zu modellieren. Diese Körner werden normalverteilt skaliert, auf einem gleichmäßigen Gitter platziert, danach nach einer Gleichverteilung im Raum verschoben und die Raumwinkel mithilfe einer Transformationsgleichung verändert.

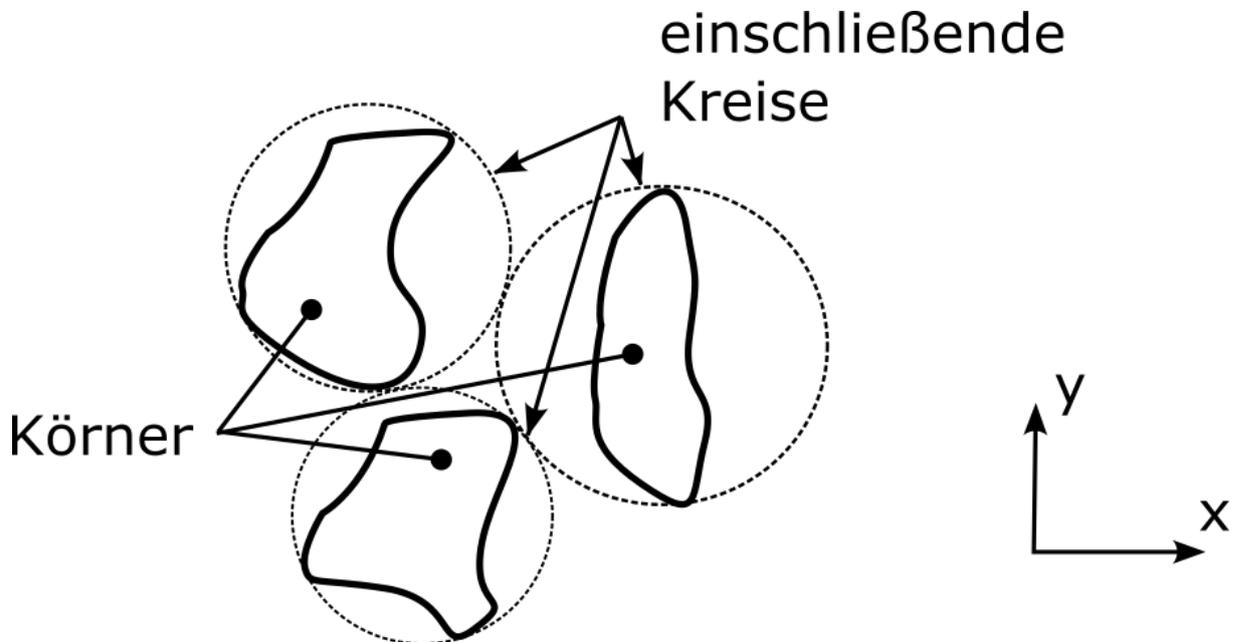


Abb. 5: Oberflächensimulation durch Einzelkörner

Die dritte Möglichkeit, welche das realistische Nachbilden von Oberflächen am besten realisiert und daher in dieser Arbeit und den folgenden Abschnitten weiter vertieft wird, ist das Generieren von Zufallsflächen nach mathematischen Bestimmungsmethoden. Dabei ist das Ziel, möglichst direkt aus den Definitionen aus Abschnitt 2.2.1 Methoden zu finden, mit dessen Hilfe neue Oberflächen mit entsprechender Charakteristik erzeugt werden können. Für die Umsetzung und das Verständnis dieser Methoden sind einige Basiswerke notwendig. Ein sehr verbreitetes Vorgehen ist das Verwenden der Johnson-Transformation nach Johnson [17], um eine Verteilung mit gegebenen Mittelwert, Standardabweichung, Skewness und Kurtosis zu erhalten. Für die Implementierung wird meist der Algorithmus von Hill et al. [18] verwendet. Das Werk von Patir [19] kann als Basiswerk für die Verwendung von Zeitreihenmethoden betrachtet werden. Es wird dort erstmals ein Vorgehen beschrieben, bei dem eine Oberfläche durch eine Zeitreihen-Ansatzfunktion beschrieben wird und durch das Lösen des damit einhergehenden Gleichungssystems die Koeffizienten gefunden werden, welche für das Erzeugen einer neuen Zufallsfläche notwendig sind. Watson und Spedding [20] beschreiben in ihrer Arbeit verschiedene Ansatzfunktionen und gehen auf deren Stärken und Schwächen ein. Hu und Tonder [21] betrachten die Koeffizienten des Zeitreihenmodells mit der

Ansatzfunktion nach dem rollierenden Durchschnittsverfahrens als 2D-Filter und umgehen damit das rechenintensive Lösen eines Gleichungssystems. Wu [22], [23] weicht in seinen Arbeiten später komplett von der Basis der Zeitreihenmodelle ab und beschreibt die Oberflächen mittels Fourier-Transformation im Frequenzbereich. Dieses Vorgehen wird folgend als spektrale Repräsentationsmethode bezeichnet. Wang et al. [24] liefern in ihrer Arbeit einen Überblick über die Verfahren mittels Lösen des Gleichungssystems, dem 2D-Filter Verfahren, sowie der spektralen Repräsentationsmethode. Diese werden für das Erzeugen von Gauß'schen Zufallsflächen direkt miteinander verglichen. Als einfachste Form der Generierung von Zufallsflächen für die Simulation eines Schleifprozesses kann das Herangehen von Zhou und Xi [25] betrachtet werden. Diese modellieren die Schleifwerkzeugoberfläche durch eine einfache Matrix mit normalverteilten Zufallswerten. Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Autokorrelationsfunktion einer realen Oberfläche nicht nachgebildet werden kann. Nguyen und Butler [26] erzeugen ein Gauß'sches Zufallsfeld durch die spektrale Repräsentationsmethode und schlagen für die Anpassung der Eingangszufallsvariable die Methode der Johnson-Transformation oder der inversen Verteilungsfunktion vor. Chen et al. [27] verwendet für die Erzeugung einer Zufallsfläche, basierend auf Messungen einer realen Schleifscheibenoberfläche, ein Zeitreihenmodell. Die Eingangsverteilung wird mittels Johnson-Transformation erreicht und die Koeffizienten werden mittels Lösen des Gleichungssystems gefunden. Die meisten Autoren [3], [28], [29], [30] verwenden in ihren Arbeiten die 2D-Filter-Methode, um die Filterkoeffizienten zu finden. Für die Eingangsverteilung wird wiederum die Johnson-Transformation verwendet.

2.2.3 Zeitreihenmodelle

Das Erzeugen von Zufallsflächen mit einem Ansatz als gleitender Durchschnitt geht auf Patir [19] zurück und stellt auch die Grundlage für die 2D-Filter-Methode in Abschnitt 2.2.4 dar. Weitere Ansätze, um eine Zufallsfläche zu beschreiben, sind ein autoregressiver Prozess oder eine Mischung des autoregressiven und des Prozesses als gleitender Durchschnitt [20]. In dieser Arbeit wird der Ansatz als gleitender Durchschnitt, wie auch in der Literatur am häufigsten eingesetzt, weiterverwendet. Dieser kann wie folgt geschrieben werden.

$$z_{ij} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m a_{kl} * \eta_{i+k,j+l} \quad (9)$$

z_{ij} ... Höhenprofil der Oberfläche

a_{kl} ... Koeffizientenmatrix

$\eta_{i+k,j+l} \dots$ Matrix mit Zufallswerten

$m, n \dots$ Form der Koeffizientenmatrix

Darin ist z_{ij} die Oberfläche mit $i = 1, 2, \dots, N$ und $j = 1, 2, \dots, M$ und a_{kl} ist eine $n \times m$ -Matrix mit den Koeffizienten, die gefunden werden müssen. $\eta_{i+k,j+l}$ ist eine $(N+n) \times (M+m)$ Matrix mit Zufallswerten, die einer Verteilung folgen, die in Abhängigkeit von a_{kl} bestimmt werden kann. Durch Kombination der Definition der Autokorrelationsfunktion in Gleichung (8) und der die Oberfläche beschreibenden Gleichung (9) erhält man das folgende nicht-lineare Gleichungssystem, mit dem a_{kl} bestimmt werden kann [24].

$$\text{ACF}(p, q) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m a_{kl} * a_{k+p,l+q} \quad (10)$$

ACF... Autokorrelationsfunktion der Oberfläche

$a_{kl} \dots$ Koeffizientenmatrix

$m, n \dots$ Form der Koeffizientenmatrix

Die Verteilung, welche η_{ij} bestimmt, hat den Mittelwert = 0, Standardabweichung = 1 und Skewness Sk_{η} und Kurtosis Ku_{η} , welche nun durch folgende Formeln bestimmt werden können [31].

$$Sk_z = \frac{\sum_{i=0}^q \theta_i^3}{(\sum_{i=0}^q \theta_i^2)^{3/2}} * Sk_{\eta} \quad (11)$$

$Sk_z \dots$ geforderte Skewness

$\theta \dots$ Koeffizienten

$Sk_{\eta} \dots$ Skewness der Eingangsverteilung

$$Ku_z = \frac{\sum_{i=0}^q \theta_i^4 * Ku_{\eta} + 6 * \sum_{i=0}^{q-1} \sum_{j=i+1}^q \theta_i^2 * \theta_j^2}{(\sum_{i=0}^q \theta_i^2)^2} \quad (12)$$

$Ku_z \dots$ geforderte Kurtosis

θ ... Koeffizienten

Ku_{η} ... Kurtosis der Eingangsverteilung

Mit $\theta_i = a_{kl}$ und $i = (k - 1) * m + l$ wenn $k = 1, 2, \dots, n$ und $l = 1, 2, \dots, m$

Mit diesen statistischen Parametern kann nun mithilfe der Johnson-Transformation eine entsprechende Verteilung berechnet werden. Dafür wird der Algorithmus von Hill et al. [18] verwendet. Grundlegend besteht die Johnson-Transformation aus drei Transformationskurven, der ungebundenen, der gebundenen und der logarithmischen Kurve. Diese haben prinzipiell die folgende Form [17].

$$x = \gamma + \delta * f\left(\frac{\eta - \xi}{\lambda}\right) \quad (13)$$

x ... normalverteilte Zufallsvariable

η ... transformierte Zufallsvariable

$\gamma, \delta, \xi, \lambda$... Parameter der Transformation

Darin ist x eine normalverteilte Zufallsvariable, η ist die transformierte Zufallsvariable und γ, δ, ξ und λ sind Konstante, welche die Transformation bestimmen und durch die gegebenen statistischen Parameter berechnet werden können.

Durch Anwendung von Gleichung (9) kann nun eine neue nicht Gauß'sche Zufallsoberfläche erzeugt werden.

2.2.4 2D-Filter-Methode

Das Lösen des Gleichungssystems (10) durch zum Beispiel das Newton Verfahren [19] oder die Nonlinear-conjugate-gradient-Methode NCGM [31], [32] nimmt eine lange Rechenzeit und teilweise große Speicherressourcen in Anspruch. Daher betrachten Hu und Tonder [21] die Faltung in Gleichung (9) als 2D-Filter der Zufallsvariablen η_{ij} . Die Matrix a_{kl} stellt in diesem Fall die Filterfunktion dar und kann durch folgende Schritte berechnet werden. Dazu wird zuerst die Fourier-Transformation auf Gleichung (9) angewendet [32].

$$Z(\omega_x, \omega_y) = A(\omega_x, \omega_y)E(\omega_x, \omega_y) \quad (14)$$

Z ... Fourier-Transformierte des Höhenprofils

A ... Fourier-Transformierte der Koeffizientenmatrix

E ... Fourier-Transformierte der Zufallswerte

Darin ist $Z(\omega_x, \omega_y)$ die Fourier-Transformierte von z_{ij} , $A(\omega_x, \omega_y)$ die Transformierte von a_{kl} und entsprechend $E(\omega_x, \omega_y)$ jene von η_{ij} . Die Gleichung (14) kann weiters auch mit den spektralen Leistungsdichten S_z von z_{ij} und S_η von η_{ij} geschrieben werden [32].

$$S_z(\omega_x, \omega_y) = |A(\omega_x, \omega_y)|^2 S_\eta(\omega_x, \omega_y) \quad (15)$$

S_z ... spektrale Leistungsdichte des Höhenprofils

A ... Fourier Transformierte der Koeffizientenmatrix

S_η ... spektrale Leistungsdichte der Zufallswerte

S_z kann weiters als die Fourier Transformierte der gewünschten Autokorrelationsfunktion ACF berechnet werden. Weiters ist die spektrale Leistungsdichte einer Zufallsvariable S_η eine Konstante, welche für die Berechnung der Filterfunktion eins gesetzt werden kann. Damit ist es nun möglich, $A(\omega_x, \omega_y)$ und durch inverse Fouriertransformation a_{kl} zu berechnen [3]. Im Vergleich zu den Methoden durch das Lösen des Gleichungssystems in Abschnitt 2.2.3 ist anzumerken, dass die 2D-Filter-Methode nicht dasselbe Ergebnis liefert und daher auch keine Lösung für das Gleichungssystem (10) ist.

Sobald die Filterfunktion a_{kl} berechnet ist, kann dasselbe Verfahren aus Abschnitt 2.2.3 mit den Gleichungen (11), (12), der Bestimmung der Eingangs-Zufallsvariable durch Johnson-Transformation und das Anwenden von Gleichung (9) durchgeführt werden, um eine neue Zufallsoberfläche mit den gewünschten spektralen und statistischen Parametern zu erhalten.

2.3 Simulation des Schleifprozesses

Nachdem mit der Modellierung des Schleifwerkzeugs eine der wichtigsten Grundlagen für die weitere Simulation betrachtet wurde, wird in diesem Abschnitt das Simulationsdesign selbst und die unterschiedlichen Herangehensweisen in der Literatur behandelt. Dazu werden in Abschnitt 2.3.1 die kinetischen und kinematischen Grundlagen zusammengefasst. Anschließend wird in Abschnitt 2.3.2 der grundlegende Ablauf von analytischen Modellen gezeigt und ein Literaturüberblick der Vertreter geboten. Abschnitt 2.3.3 behandelt in gleicher Weise die diskreten Modelle.

Diese sind für die weitere Arbeit am bedeutendsten und daher auch mit ausführlicher Literatur untermauert.

2.3.1 Grundlagen

In Kapitel 2.1 und 2.2 wurde bereits der statistische Charakter des Schleifprozesses festgestellt. Dennoch ist die Grundlage für das Verständnis des Prozesses, und daher auch der folgenden Simulationsansätze, die Betrachtung eines einzelnen zufälligen Schneidkorns. Der Einzelkorneingriff in das Werkstück sowie die Energiebilanz am Korn ist bereits in Abschnitt 2.1.1 bzw. Abschnitt 2.1.2 abgedeckt. Für die kinetische Betrachtung des Einzelkorns kann dieses als Punkt betrachtet werden. Zur besseren Verbildlichung kann dieser Punkt als „Spitze“ eines Kornes betrachtet werden. Die schematische Darstellung in Abb. 6 wird im Folgenden zur Herleitung der Bewegungsgleichung herangezogen.

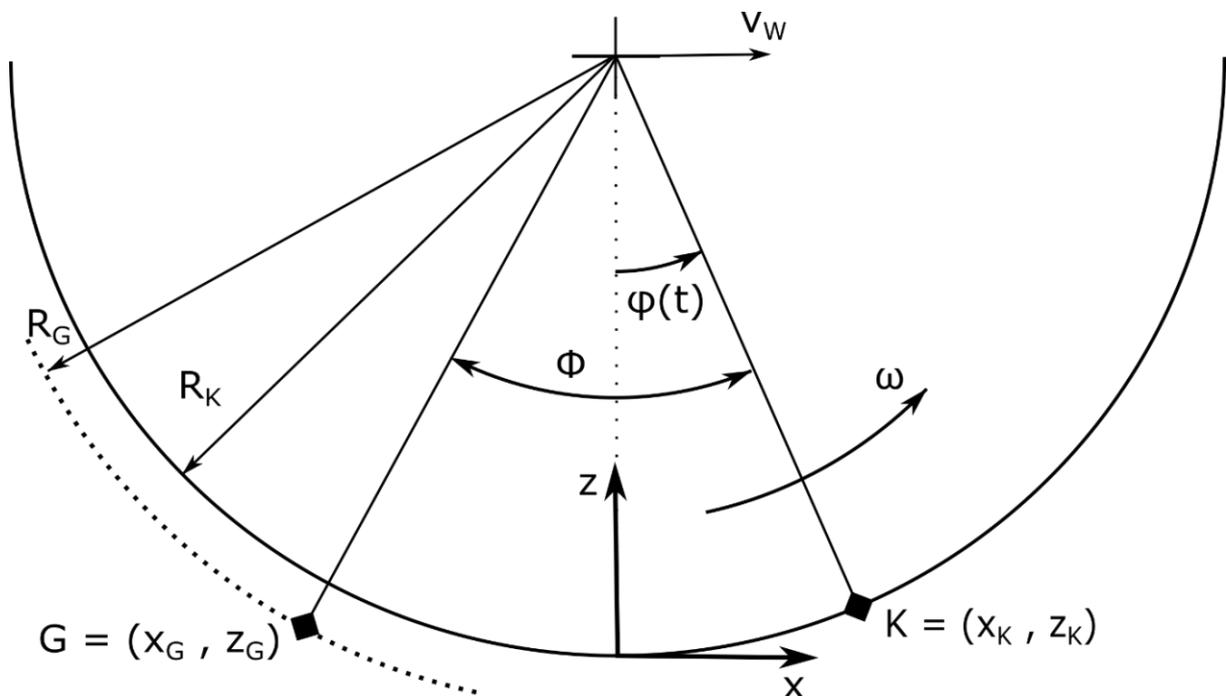


Abb. 6: Schematische Darstellung der Kornbewegung; angelehnt an [25]

Für die Beschreibung der Kornbewegung wird das beschreibende Koordinatensystem so gewählt, dass es fest mit dem Werkstück verbunden ist und das Zentrum dort liegt, wo das Korn K seinen tiefsten Punkt erreicht. Die Betrachtung der y-Koordinate wird vernachlässigt, da eine Querbewegung keinen Einfluss auf die zu entwickelnde Bewegungsgleichung hat und daher einfach überlagert werden kann. In diesem Koordinatensystem hat das Korn K die Koordinaten x_K in x-Richtung und z_K in z-Richtung und ist mit dem Radius R_K von der Rotationsachse entfernt. Äquivalentes gilt für ein zweites Korn G, welches um den Winkel ϕ dem Korn K nacheilt. Der

zylinderförmige Schleifkörper rotiert mit einer Winkelgeschwindigkeit ω und dessen Rotationsachse bewegt sich mit der Werkstückgeschwindigkeit v_W relativ zum Koordinatensystem. Damit lassen sich die Koordinaten des Kornes K wie folgt beschreiben [33].

$$x_K = R_K * \sin \varphi(t) + v_W * t \approx R_K * \varphi(t) + v_W * t \quad (16)$$

x_K ... x-Koordinate des Kornes K

R_K ... Abstand von der Rotationsachse des Kornes K

φ ... Drehwinkel des Kornes K

v_W ... Vorschubgeschwindigkeit

t ... Zeit

$$z_K = R_K * (1 - \cos \varphi(t)) \approx R_K * \frac{\varphi(t)^2}{2} \quad (17)$$

z_K ... z-Koordinate des Kornes K

R_K ... Abstand von der Rotationsachse des Kornes K

φ ... Drehwinkel des Kornes K

Die Linearisierungen $\sin \varphi(t) \approx \varphi(t)$ und $\varphi(t)^2 \approx 2 * (1 - \cos \varphi(t))$ in Gleichung (16) und (17) lassen sich dadurch begründen, dass der Radius R_K normalerweise im Verhältnis zu der Eindringtiefe des Schleifkorns sehr groß ist und daher der Winkel $\varphi(t)$ im Betrachtungsbereich sehr klein bleibt. Mit $v_S = R_K * \omega$ und $\varphi(t) = \omega * t$ lässt sich die Zeit t wie folgt ausdrücken [25].

$$t = \frac{R_K * \varphi(t)}{v_S} \quad (18)$$

t ... Zeit

R_K ... Abstand von der Rotationsachse des Kornes K

φ ... Drehwinkel des Kornes K

v_S ... Bahngeschwindigkeit des Kornes K

Durch Substitution von Gleichung (18) in Gleichung (16) und durch Kombination mit Gleichung (17) kann die Koordinate z_K durch eine zeitfreie Bewegungsgleichung beschrieben werden [25].

$$z_K = \frac{x_K^2}{2 * R_K * \left(1 + \frac{v_W}{v_S}\right)^2} \quad (19)$$

z_K ... z-Koordinate des Kornes K

x_K ... x-Koordinate des Kornes K

R_K ... Abstand von der Rotationsachse des Kornes K

v_W ... Vorschubgeschwindigkeit

v_S ... Bahngeschwindigkeit des Kornes K

Das Korn G eilt dem Korn K, welches das Koordinatensystem bestimmt um Δt und ϕ nach. In dieser Zeit legt die Rotationsachse den Weg Δx zurück. Durch das Ersetzen von $\varphi(t)$ durch ϕ und t durch Δt in Gleichung (18) lässt sich Δx berechnen.

$$\Delta x = v_W * \Delta t = \frac{R_K * v_W}{v_S} * \phi \quad (20)$$

Δx ... zurückgelegter Weg

v_W ... Vorschubgeschwindigkeit

Δt ... verstrichene Zeit

R_K ... Abstand von der Rotationsachse des Kornes K

v_S ... Bahngeschwindigkeit des Kornes K

ϕ ... Winkeldifferenz zwischen den Körnern

Nun können damit die Koordinaten von Korn G mit den Koordinaten von Korn K in Zusammenhang gebracht werden.

$$x_K = x_G - \Delta x = x_G - \frac{R_K * v_W}{v_S} * \phi \quad (21)$$

x_K ... x-Koordinate des Kornes K

x_G ... x-Koordinate des Kornes G

R_K ... Abstand von der Rotationsachse des Kornes K

v_W ... Vorschubgeschwindigkeit

v_S ... Bahngeschwindigkeit des Kornes K

Φ ... Winkeldifferenz zwischen den Körnern

$$z_K = z_G + \Delta z = z_G + (R_G - R_K) \quad (22)$$

z_K ... z-Koordinate des Kornes K

z_G ... z-Koordinate des Kornes G

R_K ... Abstand von der Rotationsachse des Kornes K

R_G ... Abstand von der Rotationsachse des Kornes G

Δz ... Distanz in z-Richtung zwischen den Körnern

Durch Einsetzen von Gleichung (21) und (22) in Gleichung (19) kann unter der Annahme eines konstanten Gitterwinkels Φ eine zeitfreie Bewegungsgleichung für die Lage im beschreibenden Koordinatensystem eines jeden Kornes mit Index i gefunden werden [25].

$$z = \frac{\left(x - \frac{R_K * v_W}{v_S} * \Phi * i\right)^2}{2 * R_K * \left(1 + \frac{v_W}{v_S}\right)^2} - (R_i - R_K) \quad (23)$$

z ... z-Koordinate von Korn i

x ... x-Koordinate von Korn i

R_K ... Abstand von der Rotationsachse des Referenzkornes K

R_i ... Abstand von der Rotationsachse des Kornes i

- v_W ... Vorschubgeschwindigkeit
- v_S ... Bahngeschwindigkeit des Kornes K
- ϕ ... Winkeldifferenz zwischen den Körnern
- i ... Kornindex

Die bearbeitete Schleifoberfläche kann im Wesentlichen durch die Überlagerung aller Korntrajektorien bestimmt werden. Die Oberfläche wird dabei immer von jenen Körnern bestimmt, welche an derselben Stelle in der xy-Ebene den kleinsten z-Wert aufweisen. Auf dieser Basis kann anschließend mit weiteren Modellen, die zum Beispiel die plastische Verdrängung zur Kornseite oder die elastische Verformung von Systemkomponenten berücksichtigen, aufgebaut werden.

2.3.2 Analytische Simulation

Oft ist die zentrale Zielgröße einer Schleifsimulation die Oberflächengüte, welche mit einer bestimmten Parameterkonfiguration erreicht werden kann. Dazu ist nicht zwingend eine Simulation nötig, welche auch eine 3D-Schlifftopographie erzeugen kann. Als Basis dafür wird auf die statistische Betrachtung der Kornhöhen zurückgegriffen. Es wird versucht auf Basis dieser Verteilung, welche zum Beispiel am realen Schleifwerkzeug gemessen werden kann, eine weitere Verteilung der Zerspanungshöhe zu erhalten. Diese wiederum kann als statistisches Abbild der Schliifoberfläche betrachtet werden, woraus beschreibende Größen der Oberflächengüte berechnet werden können. Der große Vorteil dieser Herangehensweise gegenüber den diskreten Simulationen in Abschnitt 2.3.3 ist der durchgängige analytisch definierte Ablauf. Das führt zu sehr kurzen Rechenzeiten und zu einer einfachen Handhabung [34]. Unterschiede in der Literatur finden sich vor allem bei der verwendeten Verteilung der Kornhöhen und der Herleitung der Zerspanungshöhen. Als Beispiel sei wiederum Malkin et al. [33] genannt. Sie verwenden die Definition der Korntrajektorien aus Abschnitt 2.3.1 und die Zerspanungsvolumina, um eine Gleichung für die Spanhöhen zu erhalten. Li et al. [35] beschreiben die Kornhöhen mithilfe einer Gamma-Verteilung und modellieren mit deren Hilfe auch den makroskopischen Schleifbandverschleiß. Dieser Verschleiß fließt indirekt in die Gleichung der Zerspanungshöhen ein, welche auch um Einflüsse durch sich kreuzende Korntrajektorien und die elastische Verformung der Trägerwalze korrigiert wird. Außerdem bietet die Arbeit von Li et al. [35] einen guten Überblick über andere Werke und fasst die hergeleiteten Gleichungen für die Zerspanungshöhen zusammen.

Es wird nun nicht näher auf die Einzelheiten der analytischen Modelle eingegangen, da die in dieser Diplomarbeit zu entwickelnde Simulation auch eine 3D-

Schlifftopografie liefern soll. Daher ist dieser Abschnitt als grober Überblick ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu betrachten. Bei weiterem Interesse bezüglich analytischer Modelle wird auf die oben genannte Literatur verwiesen.

2.3.3 Diskrete Simulation

Im letzten Abschnitt 2.3.2 wurde ein Überblick zu analytischen Modellen gegeben. Diese betrachten den gesamten Schleifprozess als statistische Größe. Die diskreten Modelle im Gegensatz dazu betrachten nur die Oberfläche des Schleifwerkzeugs als statistisch definierte Größe, welche mit unterschiedlichen Verfahren (siehe Abschnitt 2.2) erzeugt werden können. Auf Basis dieser eindeutig definierten Schleifwerkzeugtopographien wird der Schliifprozess modelliert und simuliert. Der große Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Möglichkeit, erweiternde Modelle auf makroskopischer sowie auch auf Einzelkornebene zu implementieren. Auch wird die Schlifftopografie berechnet, was das Erforschen von Parametereinflüssen auf die erzeugte Oberfläche im Detail erlaubt. Als großer Nachteil der diskreten Simulationen kann der hohe Rechenaufwand und die langen Simulationszeiten genannt werden.

Die Entwicklung diskreter Simulationen betrachtete anfangs hauptsächlich den Schleifprozess mit Schleifscheiben. Alle verwenden dabei den grundlegenden Ansatz der Simulation der einzelnen Korntrajektorien bzw. der Trajektorien der diskreten Punkte, welche die Schleifoberfläche beschreiben. Chen und Rowe [36] arbeiten mit abgerichteten Schleifscheiben und inkludieren bereits ein Kraftmodell basierend auf einem Kugeln Korn durch die Definition der Brinell-Härte. Auch werden Reibungskräfte berechnet und ein Faktor eingeführt, der bestimmt, wie viel Material tatsächlich vom Korn abgetragen wird und wie viel durch plastisches Fließen an die Kornseiten parabelförmig verdrängt wird. Es wird ein einzelner Schliffdurchgang in 2D simuliert. Warnecke und Zitt [11] betrachten das Problem erstmals in drei Dimensionen. Sie schlagen eine Kombination zwischen einer rein kinematischen Simulation der Kornbahnen und der Finiten Elemente Methode (FEM) vor. Das FEM-Modell sollte darin die Verformungen durch thermische Effekte und Krafeinflüsse liefern und ein Ergebnis durch eine iterative Suche nach einem energetischen Gleichgewicht finden. Zhou und Xi [25] simulieren ein 3D-Schliffbild ohne Materialverdrängung und inkludieren den Verschleiß der Schleifscheibe durch das Verringern vom Mittelwert der Normalverteilung, welche zum Generieren der Scheibenoberfläche verwendet wird. Nguyen und Butler [37] führen einen Suchalgorithmus ein, der die in Eingriff kommenden Körner filtert und deren Schneidenradius und Schnittwinkel abschätzt. Das an die Seiten verdrängte Material wird mit einem gleichseitigen Dreieck modelliert, dessen Fläche und Winkel abhängig vom Schnittwinkel gewählt werden. Dabei werden die Phasen der reinen elastischen Verformung des Werkstücks, der starken plastischen Verformung und dem tatsächlichen Schneiden auch aufgrund des Schnittwinkels unterschieden. Liu et al. [14] betrachten eine einfache kinematische

Simulation ohne Verdrängungseffekte. Sie vereinfachen die 3D Form der einzelnen Körner jedoch auf eine 2D-Projektion und verkürzen die Berechnungszeiten dadurch um das 9-fache. Wang et al. [12] betrachten auch nur den einfachen Fall, erweitert diesen jedoch um eine hochfrequente Schwingung in z-Richtung, welche durch einen exzentrischen Schwerpunkt der Schleifscheibe eingebracht wird. Chen et al. [27] implementieren eine kinematische Simulation ohne plastische Effekte, verwenden jedoch einen Algorithmus, der die einzelnen Trajektorien parallel berechnet und damit die Rechenzeiten reduziert. Chen und Jin [38] nutzen die Definition der Brinell-Härte, um die Kräfte abzuschätzen und damit die elastische Verformung des Werkstücks und der Schleifscheibe zu berücksichtigen. Außerdem wird auch die Materialverdrängung durch eine Parabelform modelliert.

Erst ab ca. 2018 lässt sich Literatur finden, die sich explizit mit der kinematischen Simulation von Bandschleifprozessen beschäftigt. Li et al. [13] behandeln einen Bandschleifprozess ohne Stützwalze. Die Kontaktkräfte werden auf makroskopischer Ebene über das Zurückweichen des Schleifbandes berechnet und die Schliffoberfläche über mehrere Durchgänge simuliert. Zou et al. [3] beschreiben einen Bandschleifprozess mit elastischer Kontaktwalze und einem starren Werkstück. Die elastische Verformung der Kontaktwalze wird durch eine Schwingung der einzelnen Körner modelliert. Yang et al. [15] simulieren einen ähnlichen Prozess, wobei das Werkstück durch einen Roboterarm geführt wird. Die Einzelkornkräfte werden wiederum über die Brinell-Härte berechnet und die elastische Verformung der Kontaktwalze über ein vereinfachtes Einzelfedermodell berücksichtigt. Wange et al. [29] betrachten einen Bandschleifprozess auf einem ebenen, konvexen und konkaven Werkstück. Die Kräfte und elastischen Verformungen werden bereits vor der Simulation durch eine Finite-Elemente-Simulation bestimmt und über Parameterkurven dem kinetischen Modell zur Verfügung gestellt. Liu et al. [9] ermitteln die Normalkraft durch eine empirisch bestimmte Gleichung und berechnen über die Brinell-Härte die Eindringtiefe eines Einzelkorns.

Als Abschluss des Literaturüberblicks sei noch das Werk von Xie et al. [39] genannt. Diese schlagen in ihrer Abhandlung den Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz vor. Als Ergebnis kann ein neuronales Netz eine Schlifftopografie für gegebene Parameter abschätzen und ausgeben.

3 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Diplomarbeit ist das Erarbeiten einer kinematischen Simulation eines industriell eingesetzten Bandschleifprozesses. Dabei soll ein besonderes Augenmerk auf die Modellierung des Schleifbandverschleißes gelegt werden. Damit verknüpft ist auch das Erarbeiten eines Prozessverständnisses und das Ermitteln der wichtigsten Einflussgrößen.

In Kapitel 2 wurden bereits die Prozessparameter identifiziert und relevante Methoden aus der Literatur zusammengefasst. Dabei zeigt sich, dass der erste wichtige Schritt hin zu einer realitätsnahen Simulation das Modellieren der Schleifbandoberfläche ist. Dazu sind mehrere methodische Herangehensweisen bekannt. Für diese Arbeit wird die Repräsentation und Modellierung als Zufallsfläche ausgewählt und implementiert, da diese die realitätsnächsten Schleifbandoberflächen generieren kann.

Der zweite grundlegende Schritt ist die Auswahl der Simulationsmethodik. Diese ist für die Modellierung vorgegeben, da als Ergebnis auch eine simulierte Schlifftopografie gefordert ist. Daher wird eine diskrete kinematische Simulation auf Basis der Korntrajektorien umgesetzt.

In der Literatur finden sich einige zusätzliche Modelle, welche die Simulation verbessern sollen. Darunter fallen die Abschätzung der Kornkräfte, die Korrektur von elastischen Verformungen und die Simulation der plastischen Werkstoffverdrängung. Diese Effekte können auch für den betrachteten Prozess relevant sein. Diese sollen in einfacher Form auch implementiert werden. Dabei wird darauf geachtet, dass die jeweilige Implementierung keinen zu großen zusätzlichen Rechenaufwand hervorruft. Außerdem ist es erstrebenswert, dass diese Modelle auch einfach aktiviert und deaktiviert werden können.

Um die Simulationsparameter an den betrachteten Prozess anpassen zu können, werden Messungen am realen Prozess durchgeführt. Diese werden, wenn möglich, direkt in der Simulation verwendet bzw. zur Parameterkalibrierung herangezogen. Auch können Parameterkombinationen getestet und mit dem tatsächlichen Schleifergebnis verglichen werden.

4 Messungen am Bandschleifprozess

Als Grundlage für die kinematische Simulation dient ein Bandschleifprozess der Firma Berndorf Band GmbH. Der schematische Aufbau sowie die wichtigsten geometrischen und kinetischen Parameter wurden bereits in Abschnitt 2.1.6 gezeigt. Auf dieser Basis werden in diesem Kapitel die Details zu den weiteren gemessenen Größen sowie zur Messdurchführung erläutert. Abschnitt 4.1 zeigt die Messung der Schleifbandzustellung. In Abschnitt 4.2 wird der Messaufbau der Schleifbandantriebsleistung behandelt. Auch wurden die Oberflächentopografien regelmäßig mit zwei verschiedenen Methoden abgenommen. Diese werden für die Schleifbandoberfläche in Abschnitt 4.3 und 4.4 erläutert. Die Messung der Stahlbandoberfläche wird in Abschnitt 4.6 kurz zusammengefasst.

Die Messungen mussten im laufenden Betrieb durchgeführt werden. Auch war die Messzeit begrenzt, was die Möglichkeiten in Hinblick auf den Messaufbau einschränkte. Dadurch war es auch nicht möglich, einen Messaufbau zu realisieren, mit welchem auch die Prozesskräfte aufgezeichnet werden könnten.

Alle Messungen, bis auf die Schleifbandzustellung und die Antriebsleistung, können nicht während des Schleifprozesses gemessen werden. Daher werden diese in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Die Messzeitpunkte in Bezug auf die Schleifzeit sind in folgender Tabelle (Tab. 2) angeführt.

Tab. 2: Messzeitpunkte in Stunden

Messzeitpunkte in Stunden										
0	0,5	2	4	6	8	10	13	15,5	18,5	22

4.1 Schleifbandzustellung

In Abb. 4 ist ersichtlich, wie die Zustellung zum Schleifband realisiert ist. Eine Gegenwalze, auf welcher das Stahlband läuft, kann über ein Zustellgetriebe auf beiden Seiten in der Höhe verstellt werden. Die Laufwalze des Schleifbandes ist starr und damit kann gegen diese die Zustellung erfolgen. Für die Wegmessung standen vier kapazitive Messtaster zur Verfügung.

Optimal wäre die direkte Messung des Abstandes zwischen der Laufwalze und dem Stahlband. Das ist jedoch mit diesem Equipment nicht direkt möglich. Auch stellt die ständige Bewegung der Walzen sowie des Werkstücks ein Problem dar. Aus diesen Gründen wurden der Abstand indirekt über die statische Lagerung der Gegenwalze

und der Laufwalze durchgeführt. Dazu wurden die Wegmesser mithilfe von Magnethaltern am Maschinenkörper befestigt und relativ zu jeweils einem Lagersitz positioniert. Der Aufbau ist auch in Abb. 7 ersichtlich. Zum Aufzeichnen der Messwerte werden die Wegmesser mit einem Messverstärker und dieser mit einem Laptop verbunden. Mit diesem Aufbau ist es durch eine Differenzenbildung möglich, mithilfe von zwei Wegsensoren die Zustellung zu messen. Dabei ist zu beachten, dass in diesem Maß auch das Lagerspiel von beiden Walzen enthalten ist. Um dieses so gut als möglich zu eliminieren, ist bei der Auswertung darauf zu achten, dass als Referenzpunkt eine Stellung herangezogen wird, bei der bereits eine Normalkraft wirkt. Als ein solcher Referenzpunkt bietet sich in Kombination mit der Messung der Antriebsleistung jener Punkt an, bei dem das Schleifband erstmals in Kontakt mit dem Stahlband kommt. Dieses Szenario tritt mindestens einmal nach jedem Messintervall auf und somit kann auch ein möglicher Drift der Wegmesssysteme erkannt und korrigiert werden.

Zur Kalibrierung der Daten wird eine Messschraube verwendet und mehrere Datenpaare zwischen Ausgabespannung und gemessenen Weg in einer Tabelle abgespeichert. Mit diesen Daten ist es im Anschluss möglich, das aufgezeichnete Spannungssignal in das entsprechende Wegsignal umzurechnen.

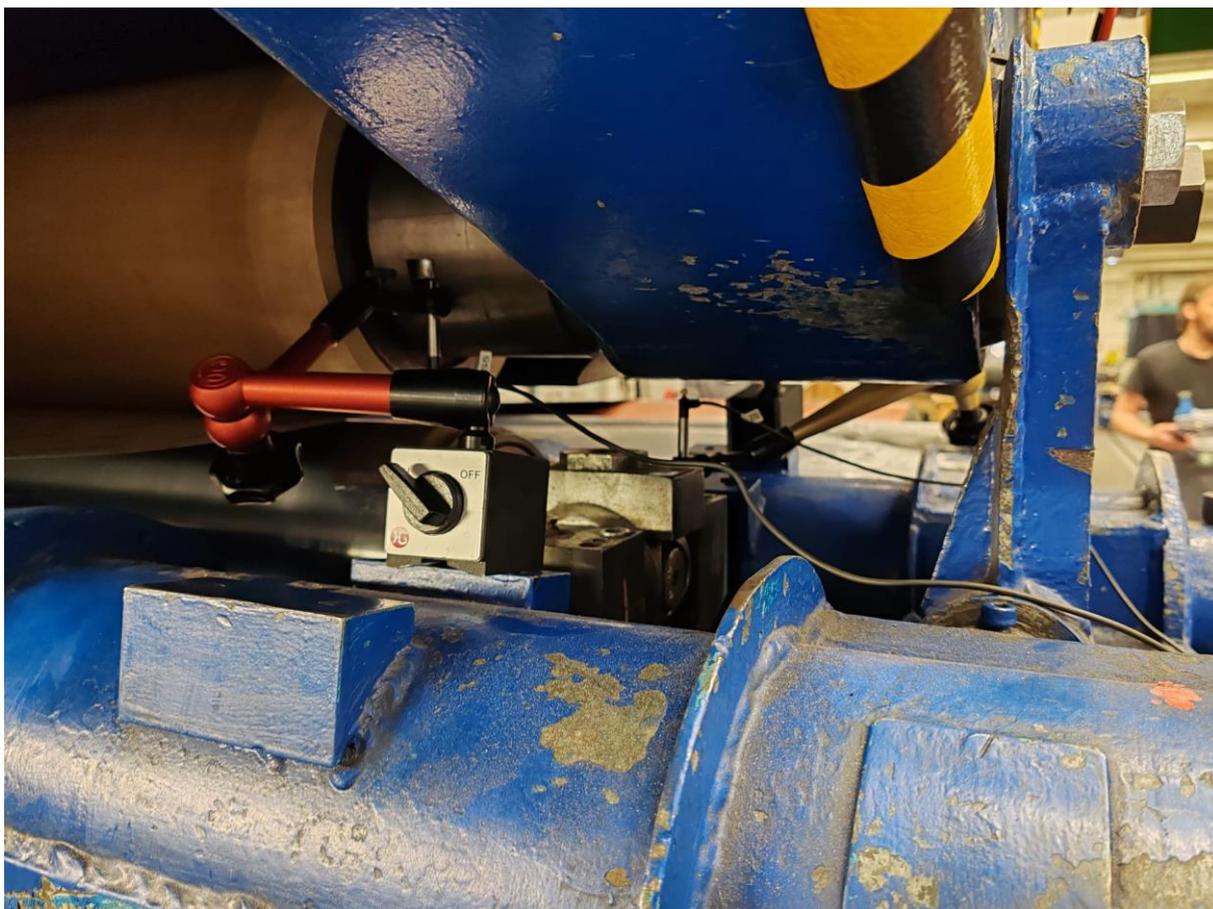


Abb. 7: Aufbau der Wegmessung mithilfe von Magenthaltern

4.2 Antriebsleistung

Die Antriebsleistung des Schleifbandes dient dem Maschinenführer als Referenzgröße und daher wird diese auch direkt bei der Bandschleifmaschine auf einem Display angezeigt. Als Datenquelle dient der Frequenzumrichter, welcher die Antriebsleistung in Form einer analogen Spannung ausgibt. Diese Ausgabespannung kann mit dem Messverstärker verbunden werden, welcher auch für die Wegmesser verwendet wird. Laut Auskunft des Firmenpersonals wurde die Sensitivität mit 3 Kilowatt pro Volt angegeben. Während der Messungen kamen jedoch Zweifel an dieser Anzeige auf, weswegen diese Daten mit Vorsicht zu betrachten sind. Die Verwendung als Referenzpunkt für die Wegmessungen sollte jedoch möglich sein, da beim Erstkontakt jeweils eine eindeutige Signaldifferenz feststellbar ist.

4.3 Schleifbandoberfläche (Edgemaster)

Die wichtigste Grundlage für die Simulation ist ein verlässlicher Datensatz, mit welchem die Schleifbandoberfläche charakterisiert werden kann. Dazu steht als erste direkte Methode ein Alicona Edgemaster zur Verfügung. Die zweite Methode wird im

nächsten Abschnitt 4.4 behandelt. Das Alicona Edgemaster ist ein optisches Topografiemessgerät, welches zur Vermessung von Wendeschneidplatten ausgelegt ist. Die Vorteile dieses Gerätes gegenüber anderen Messgeräten ist die Möglichkeit der kontaktlosen Vermessung, das geringe Eigengewicht und die geringen Abmessungen. Dadurch ist es möglich, das Messgerät direkt an der Maschine anzubringen und das Schleifband muss nicht für jede Messung aus der Schleifmaschine ausgebaut werden. Dies würde viel Zeit in Anspruch nehmen und daher die effektive Schleifzeit drastisch verkürzen. Durch das begrenzte Zeitfenster an der Schleifmaschine war es auch notwendig, die Montagevorrichtung für das Alicona Edgemaster zu improvisieren. Als beste Lösung stellte sich eine Galgenkonstruktion heraus, welche am freien Ende auch gegen die Schleifmaschine abgestützt werden konnte (siehe Abb. 8). Das Messgerät ist beweglich am Querbalken angebracht, damit es während der Schleifarbeiten in sicherer Distanz zum Schleifpapier positioniert werden kann. Auch ist es dadurch möglich, mehrere Messpositionen am Schleifband anzufahren. Zur Positionierung wird ein gekerbtes Aluminiumprofil (siehe Abb. 9) verwendet. Es ist auch ersichtlich, dass die Messtelle direkt auf einer Umlenkwalze liegt. Dabei ist das Problem, dass eine Krümmung im Messbereich auftritt. Um diese Krümmung zu reduzieren, wird für die Messung ein Aluminium L-Profil zwischen Walze und Schleifband geschoben. Nach der Messung wird die Schablone und das L-Profil wieder entfernt und das Alicona Edgemaster aus dem Zerspanungsbereich verschoben.



Abb. 8: Abgestützter Querbalken mit dem Alicona Edgemaster

Mithilfe der Messung der Schleifbandoberfläche soll eine Verschleißkurve generiert werden. Durch diese Messeinrichtung können verschiedene Verschleißanteile erfasst werden. Um den reinen Kornverschleiß zu vermessen, werden jeweils zwei Messpositionen vor der Messung mit Ethanol gereinigt und von den Spänen befreit.

Weitere zwei Positionen werden im verschmutzten Zustand belassen. Diese liefern Informationen darüber, wie stark das Schleifband durch Späne und Verschleißpartikel zugesetzt wird.



Abb. 9: Montierte Schablone zur Positionierung des Alicona Edgemaster

4.4 Schleifbandoberfläche (Abformung)

Die optische Messung aus Abschnitt 4.3 ist sehr empfindlich gegenüber Schwingungen, was zu fehlenden Datenpunkten führen kann. Daher wurden zusätzlich Abformungen der Schleifbandoberfläche abgenommen. Hierfür wurde wiederum die Schablone aus Abb. 9 verwendet. Zur Abformung wird diese an der oberen Umlenkwalze montiert, wo das Schleifband parallel zum Maschinenfundament verläuft. Dort wird in Kerben die Abformmasse aufgebracht. Auch hier werden jeweils zwei Positionen vor der Abformung mit Ethanol gereinigt und von den Spänen befreit, weitere zwei Positionen werden im verschmutzten Zustand belassen. Mit Ersteren kann der reine Kornverschleiß beobachtet werden. Bei den verschmutzten Flächensegmenten sollten die Späne und Verschleißpartikel auch auf der Abformmasse kleben bleiben und hierdurch das Verlegen der Schleifbandoberfläche beobachtbar sein. Die Negativabformungen können anschließend im Labor optisch vermessen werden und liegen schließlich im selben Dateiformat vor, wie die optischen Messungen aus Abschnitt 4.3.

4.5 Werkstückoberfläche (Rauheitsmessgerät)

Die wichtigste Größe, die von der Simulation ausgegeben werden soll, ist die Oberflächenrauheit der geschliffenen Oberfläche. Damit diesbezüglich die Simulationsparameter bestimmt bzw. die Simulationsergebnisse verifiziert werden können, sind auch die realen Rauheiten über die Schleifzeit zu erfassen. In dem

Standardprozess des Unternehmens wird ein Rauheitsmessgerät vom Typ MarSurf PS10 verwendet, welches mit einem Tastkopf arbeitet und entlang einer Messtrecke die Topografie aufzeichnet. Daraus werden verschiedene Rauheitsparameter berechnet. Für diese Arbeit wird vor allem die gemittelte Rautiefe Rz und der Mittenrauhwert Ra herangezogen. Zu jedem Messzeitpunkt, an dem auch alle anderen Messungen durchgeführt werden, werden auf dem Stahlband zwei Messpunkte entlang der Länge gewählt und jeweils über die Stahlbandbreite fünf Messstrecken vermessen. Die daraus berechneten Rauheitswerte werden von dem Messgerät ausgelesen und in Form einer Microsoft Excel Tabelle abgespeichert.

4.6 Werkstückoberfläche (Abformung)

Mit der in Abschnitt 4.5 beschriebenen Methode können nur die Rauheitswerte bestimmt werden, jedoch ist es nicht möglich, die dreidimensionale Oberflächentopografie zu betrachten. Um diesbezüglich noch zusätzliche Daten zu ermitteln, wird an beiden der Länge nach gewählten Messpositionen am Stahlband auch jeweils eine Abformung vorgenommen. Dazu wird die Oberfläche im gewünschten Bereich von den Schleifzusätzen gereinigt und dieselbe Abformmasse, wie zur Abformung der Schleifbandoberfläche, in Breitenrichtung aufgebracht. Die Länge der Abformung wird mit ca. drei Zentimeter gewählt. Diese Abformungen können anschließend wiederum im Labor optisch vermessen werden und liegen im Alicona Dateiformat vor. Aus diesen Daten werden dieselben Rauheitswerte wie mit dem Rauheitsmessgerät berechnet und die gemessenen Daten gegeneinander verglichen.

5 Datenaufbereitung

In Kapitel 4 werden die am realen Prozess gemessenen Größen angeführt sowie die Messdurchführung selbst dokumentiert. Diese Daten können jedoch nicht direkt für eine Simulation verwendet werden, da zum einen immer wieder Datenpunkte fehlen, die Höhendaten eine Schiefelage und eine Krümmung aufweisen. Die Messdaten sind mit einer zu hohen Auflösung abgebildet, was zu einem sehr großen Arbeitsspeicherbedarf und unnötig hohen Rechenzeiten führt. Außerdem erfordern die beiden Methoden zum Generieren von neuen Schleifbandoberflächen einen quadratischen Ausschnitt der Messdaten, da ansonsten die Autokorrelationen in der Messebene nicht der zyklischen Autokorrelation entsprechen.

Der aufwändigste Aufbereitungsprozess ist dabei jener der Schleifbanddaten mit der Berechnung der Parameter, welche für das Generieren der neuen Schleifbandoberflächen benötigt werden. Dieser Prozess wird daher in Abschnitt 5.1 dargestellt und im Überblick erläutert. Abschnitt 5.2 behandelt anschließend genauer jene Methoden, welche verwendet werden, um die Schiefelagen und Krümmungen zu korrigieren und die fehlenden Datenpunkte zu interpolieren. In Abschnitt 5.3 werden die implementierten Funktionen erläutert, welche verwendet werden, um die spektralen Eigenschaften der Schleifbandoberfläche und die statistischen Parameter der entsprechenden Tiefendaten zu erhalten. Anschließend wird in Abschnitt 5.4 die Implementierung der 2D-Filter-Methode und der Methode nach Patir näher behandelt sowie nötige Vereinfachungen und Probleme in der Durchführung beschrieben. Die mathematischen Grundlagen für diese Funktionen werden bereits im Grundlagenteil Abschnitt 2.2.3 und 2.2.4 ausgeführt.

Auch die restlichen Daten der Stahlbandoberfläche, die Antriebsleistung und die Zustellung können nicht ohne weitere Bearbeitung für die Simulation beziehungsweise für die Verifikation verwendet werden. Diese Aufbereitungsprozesse beinhalten jedoch wesentlich weniger Schritte und Methoden und werden daher jeweils nur mehr in einem Unterabschnitt kurz erklärt. In Abschnitt 5.5 werden die Rauheitsdaten der Stahlbandoberfläche zusammengefasst und sortiert sowie die weiteren Rauheitsparameter aus den Abformungsdaten berechnet. Abschnitt 5.6 behandelt die Aufarbeitung der aufgezeichneten Schleifleistung und Zustellung des Schleifbandes.

5.1 Ablauf der Schleifbanddatenerhebung

Der grundlegende Programmablauf zur Verarbeitung der Schleifbanddaten ist grafisch als Flussdiagramm in Abb. 10 dargestellt. Die Grundlage dafür sind die Alicona-Datensätze, welche direkt vermessen wurden, sowie jene, die nachträglich von den Abformungen gewonnen wurden. Diese werden nach dem Schema benannt, welches

zuerst die jeweilige Nummer der Messposition vorsieht und anschließend den jeweilige Messzeitpunkt in Stunden. Die Messzeitpunkte sind in Tab. 2 angeführt.

Nun werden alle Dateien durchsucht und jene mit demselben Messzeitpunkt ausgewählt. Von jeder Datei werden anschließend die Matrix mit den Tiefendaten, die Gitterabstände und die Anzahl der Datenpunkte in die Raumrichtungen der Ebene ausgelesen. Dazu wird die Funktion „alicona_read“ aus der Library SlipPy [40] verwendet. Diese liest alle Daten in Form einer Python-Bibliothek ein und die gewünschten Daten können einfach in Form eines Arrays oder einer Float-Zahl entnommen werden. Die so erhaltenen Tiefendaten können nun bereits abgebildet werden, wobei hier die Krümmung, Schiefelage und die fehlenden Datenpunkte ersichtlich sind. Daher werden diese Artefakte anschließend behoben. Dazu wird eine per Regression angepasste Ebene und ein Paraboloid von den Daten abgezogen und ein Bildreparaturalgorithmus für die Interpolation von fehlenden Punkten in der Ebene verwendet. Dieser wird später genauer betrachtet.

Die nun bereinigten Daten beinhalten noch jegliche Information, die durch die Messungen aufgenommen wurden. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um eine rechteckige Matrix mit einem sehr geringen Gitterabstand. Für die Berechnung der Verteilungsparameter stellt die Form kein Problem dar und für möglichst repräsentative Ergebnisse ist der maximal mögliche Informationsgehalt nötig. Damit wird nun eine Unterscheidung zwischen den Daten, welche mit dem Alicona Edgemaster aufgenommen wurden und jenen, die von den Abformungen stammen durchgeführt. Als dritter Datensatz werden alle Daten zusammengeführt. Von jedem dieser drei Datensätze, welche von demselben Messzeitpunkt stammen, werden nun die statistischen Verteilungsparameter berechnet. Diese werden in einer Microsoft Excel Tabelle sowie in einer Variablen abgespeichert. Auch wird jeweils ein Histogramm der Höhendaten erstellt und als Bild gespeichert.

Das Berechnen der Autokorrelationsfunktion sowie die spätere Verwertung zum Generieren von neuen Zufallsflächen erfordert eine quadratische Tiefenmatrix. Auch sind diese Berechnungen sehr rechenintensiv und daher muss der Datensatz auf einen höheren Gitterabstand gesampled werden. Doch zuerst wird eine quadratische Matrix mit der Seitenlänge der kürzeren Seite aus der Gesamtmatrix geschnitten. Diese wird mit der Funktion „resampe_array“ auf einem veränderten Gitterraster neu abgetastet. Als Basis dient die Funktion „resample“ aus SlipPy [40]. Diese wurde jedoch so verändert, dass diese direkt mit einem NumPy [41] Array arbeiten kann. Dieses Vorgehen hat im Vergleich zu der Originalfunktion, welche mit einem objektorientierten Ansatz die Oberflächen repräsentiert, den Vorteil, dass der Arbeitsspeicherbedarf drastisch reduziert werden kann. Das Vorgehen ist dabei recht einfach. Im Zentrum steht die Funktion „interpolate.RectBivariateSpline“ des Paketes SciPy [42], welches die Oberfläche analytisch durch eine 2D-Spline-Fläche

repräsentiert. Diese kann anschließend an beliebigen neuen Gitterpunkten ausgewertet und somit neu gesampled werden.

Die nun in einer überschaubaren Größe vorliegende Matrix mit den bereinigten Tiefendaten kann nun als Basis für die spektralen Oberflächenparameter verwendet werden. Dazu wird die Autokorrelationsfunktion nach Gleichung (8) berechnet und als 3D-Plot abgebildet. Bei der Betrachtung dieser Plots fällt auf, dass es sich prinzipiell um die Form einer exponentiellen Autokorrelationsfunktion handelt. Da jedoch der betrachtete Bereich sehr klein ist, kommt es in der Umgebung teilweise auch zu starken Verwerfungen, welche in dieser Form nicht auftreten sollten. Um dieses Problem zu umgehen, wird eine angepasste exponentielle Ansatzfunktion an die Daten angepasst und diese als weitere Autokorrelationsfunktion verwendet. Die genauere Ausführung ist in Abschnitt 5.3 zu finden. Auf dieser Basis wird mit einer weiteren Funktion die schnellste und langsamste Abklingdauer berechnet, bei der die Autokorrelation erstmals unter 20% fällt. Diese charakteristischen Autokorrelationslängen werden wiederum in einer Excel-Tabelle abgespeichert.

Nun sind alle Daten vorhanden, um nach der 2D-Filter-Methode und der Methode nach Patir den Filter und die Eingangsverteilung zu berechnen. Dazu wird auf die Grundlagen in den Abschnitten 2.2.3 und 2.2.4 zurückgegriffen. Der Filter liegt anschließend in Form eines Arrays vor und die Eingangsverteilung ist ein SciPy-Objekt, welches eine kontinuierliche Zufallsverteilung repräsentiert. Beide Variablen werden für beide angewandten Methoden abgespeichert.

Abschließend schließt sich der Kreis, indem abgefragt wird, ob bereits alle Messzeitpunkte behandelt wurden. Wenn nicht, wird der nächste Messzeitpunkt gewählt und das Programm startet wieder beim Sortieren und Auslesen der entsprechenden Daten. Wenn alle Schleifzeiten abgearbeitet sind, wird das Programm beendet.

Auch wurde bereits in Abschnitt 4.3 erläutert, dass das Schleifband nicht perfekt parallel zu der optischen Linse positioniert werden konnte und dadurch in den Daten immer eine Schiefelage vorhanden ist. Dasselbe gilt für die Aufnahmen der Abformungen, da diese eine unregelmäßige Rückseite aufweisen und daher nicht exakt positioniert werden können. In Abb. 9 ist auch ersichtlich, dass trotz des ebenen untergelegten L-Profiles immer eine kleine Krümmung vorhanden ist. Wiederum gilt dasselbe auch für die Abformungen, da diese zum einen auch von einer gekrümmten Oberfläche abgenommen wurden und zum andern auch beim Messen noch ein elastisches Verhalten aufweisen und damit eine zusätzliche Verformung nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Funktionen, welche verwendet werden, um diese Umstände zu bereinigen, sind für die Krümmungen und Schiefelage die „subtract_polynomial“ Funktion aus dem SlipPy Paket [40]. Dieses bietet die Möglichkeit, eine Ebene beliebiger Ordnung nach der Least-Square-Methode an die Daten anzupassen und diese von der gegebenen Oberfläche zu subtrahieren. Dieses Vorgehen wird mit einer Ebene der Ordnung 2 auch von Zou et al. [3] verwendet. Als Beispiel für die Formkorrektur kann also ein Paraboloid (Ordnung 2) der Form nach Gleichung (24) herangezogen werden. Die Koeffizienten werden so gewählt, dass die Fehlerquadrate zu der ursprünglichen Oberfläche minimal sind. Durch das Subtrahieren der Korrekturfläche $f(x, y)$ von der ursprünglichen Fläche $z(x, y)$ kann damit eine globale Krümmung entfernt werden.

$$f(x, y) = c_{00} + c_{10} * x + c_{01} * y + c_{20} * x^2 + c_{02} * y^2 + c_{20} * x * y \quad (24)$$

$f(x, y)$... Korrekturfläche

c ... Koeffizientenmatrix

x, y ... Ortsvariablen

Auch die Funktion „fill_holes“ zur Interpolation der fehlenden Daten ist bereits im SlipPy Modul vorhanden [40]. Diese sucht alle Löcher, welche in den Daten vorkommen, und erweitert den Bereich um diese, bis ein gegebener Anteil der direkt umliegenden Daten einen gültigen Wert aufweist. Für die Implementierung wurde dieser Anteil als Eins gewählt, was bedeutet, dass alle Datenpunkte an der „Lochgrenze“ gültig sein müssen. Auf jedes Loch wird anschließend ein Bildreparaturalgorithmus angewendet. Dieser arbeitet nach dem Ansatz von Damelin und Hoang [43] und verwendet zur Interpolation biharmonische Funktionen. Diese sind so definiert, dass diese Gleichung (25) erfüllen müssen. Δ stellt in dieser Gleichung den Laplace-Operator dar. Auf Basis dieser Definition, welche ein Differentialgleichungssystem darstellt, kann die Funktion $u(x, y)$ gefunden werden, welche anschließend an den fehlenden Datenpunkten ausgewertet wird.

$$\Delta\Delta u(x, y) = 0 \quad (25)$$

$u(x, y)$... Interpolationsfunktion

x, y ... Ortsvariablen

Für die Implementierung in dieser Arbeit hat sich der Ablauf nach Abb. 11 als zielführend erwiesen. Dabei wird zuerst die Schiefelage der Daten durch das Subtrahieren einer Ebene bereinigt. Es ist darauf zu achten, dass die noch vorhandenen fehlenden Datenpunkte nicht berücksichtigt werden dürfen, da diese keinen numerischen Wert aufweisen. Auf diese so gedrehte Ebene kann anschließend der Algorithmus zur Interpolation der fehlenden Punkte angewendet werden. Ohne das Drehen der Ebene zuvor kommt es manchmal zu eindeutig verzerrten Daten aus der Interpolation. Zuletzt wird eine globale Krümmung in den Daten durch die Subtraktion eines Paraboloids entfernt. Die somit reparierten Daten enthalten nun keine „Not a Number“-Einträge mehr und können für die weiteren Schritte verwendet werden.

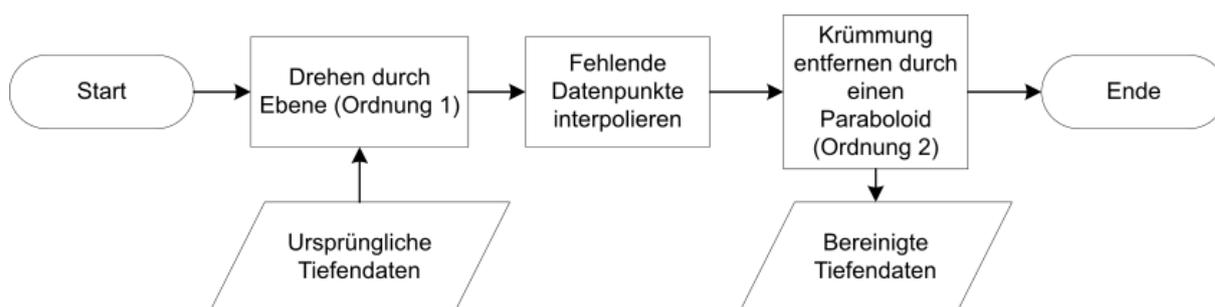


Abb. 11: Algorithmus zum Reparieren der gemessenen Oberflächendaten

5.3 Spektrale und statistische Parameter des Schleifbandes

In Abschnitt 2.2.1 wurden bereits die grundlegenden Formeln für die statistischen Parameter und die Autokorrelationsfunktion angegeben. Auch wurde bereits festgestellt, dass sich eine Zufallsfläche durch genau diese Parameter, nämlich den Mittelwert \bar{z} , die Standardabweichung σ , Skewness Sk , Kurtosis Ku und die Autokorrelationsfunktion ACF der Oberflächenhöhen definieren lässt.

Für die statischen Verteilungsparameter werden die Implementierungen im SciPy-Modul verwendet [42]. Diese sind für den Mittelwert „stats.tmean“, für die Standardabweichung „stats.tstd“, für die Skewness „stats.skew“ und für die Kurtosis „stats.kurtosis“. Für die Kurtosis wird jene Definition verwendet, bei welcher eine Normalverteilung einen Wert von Drei aufweist. Diese Funktionen bilden die Gleichungen (4) bis (7) ab und wurden in eine zusätzliche Funktion geschrieben, welche alle Parameter einer Punktematrix mit einem Aufruf zurückgibt. Zusätzlich ist es auch interessant, ein Histogramm der Höhendaten zu erhalten. Dafür wurde eine

Funktion implementiert, die auf Basis der Library Matplotlib [44] ein solches ausgeben und speichern kann. In dieser Arbeit werden die Histogramme immer von den genormten Oberflächen, das heißt mit Mittelwert = 0 und Standardabweichung = 1, abgebildet. Das führt zu einer besseren direkten Vergleichbarkeit und erleichtert die Auswertung. Zu diesem Zweck, sowie auch später für die Erzeugung von neuen Oberflächen und auch für die Implementierung der Simulation, ist eine Funktion notwendig, welche eine Oberfläche auf einen gewünschten Mittelwert und Standardabweichung skalieren kann. Dabei ist es wichtig zu verstehen, dass sich dabei die Skewness und die Kurtosis nicht ändert. Eine solche Funktion ist, wie in Listing 1 ersichtlich, implementiert. Darin werden zuerst der Mittelwert und die Standardabweichung der eingegebenen Oberfläche ermittelt und die Daten anschließend entsprechend skaliert und verschoben.

```
1 def scale_surface_array(surface: np.ndarray=None, target_mean=0, target_std=1):
2     mean=stats.tmean(surface,axis=None)
3     norm_surface=np.float32(surface-mean)
4     standard_deviation=stats.tstd(norm_surface,axis=None)
5     norm_surface = norm_surface*(target_std/standard_deviation)+target_mean
6     return np.float32(norm_surface)
```

Listing 1: Funktion zur Skalierung von Tiefendaten

Die Autokorrelationsfunktion nach Gleichung (8) kann wieder mithilfe des SlipPy-Pakets berechnet werden [40]. Darin ist eine Methode der Oberflächenobjekte implementiert, die wiederum auf die Funktion „signal.correlate“ aus dem SciPy-Modul zurückgreift [42]. Anschließend wird auch die Funktion „interpolate.RectBivariateSpline“ verwendet, um eine kontinuierliche Repräsentation der Autokorrelationsfunktion durch Splines zu erhalten.

Die so erhaltenen Autokorrelationsfunktionen haben dieselbe Form, wie die eingegebene Oberfläche. Im Falle der direkten Messungen handelt es sich dabei um quadratische Flächen mit einer Seitenlänge von ca. 1,2 mm. Die größten Korndurchmesser sind angelehnt an die Maschenweite der Prüfsiebe laut DIN ISO 6344-1 [45] im Bereich von etwa 0,15 mm. Daran lässt sich bereits erkennen, dass die vermessenen Flächen keine allzu große statistische Aussagekraft haben können, da nicht viele Körner abgebildet sind. Das macht sich auch bei den Autokorrelationsfunktionen dadurch bemerkbar, dass der Außenbereich der Funktionen, welche nahe Null sein sollten, noch immer starke Verwerfungen aufweisen. Um dieses Problem zu beheben, wird eine angepasste exponentielle Autokorrelationsbasisfunktion (siehe Gleichung (28)) mithilfe der SciPy-Funktion „optimize.curve_fit“ an die tatsächliche Autokorrelationsfunktion angepasst [42]. Dabei wird der Bereich um das Zentrum bis hin zur doppelten kürzesten

Autokorrelationslänge höher gewichtet als der Rest. Damit kann erreicht werden, dass der zentrale Teil der Autokorrelationsfunktion sehr genau nachgebildet wird, jedoch die außenliegenden Bereiche einen Wert nahe Null, nach der exponentiellen Autokorrelationsfunktion (siehe Gleichung (26)), einnehmen.

Um diese Funktion zu realisieren, ist jedoch bereits eine andere Funktion nötig, welche es ermöglicht, die schnellste und langsamste Autokorrelationslänge von einer gegebenen Autokorrelationsfunktion zu bestimmen. Dazu wird die Funktion „fastest_slowest_acl“, wie in Listing 2 ersichtlich, herangezogen. Diese erstellt zuerst das Gitternetz mit den x und y-Koordinaten eines jeden Gitterpunktes und berechnet daraus die Distanz eines jeden Gitterpunktes zum Zentrum. Nun können die z-Werte an den jeweiligen Gitterpunkten kontrolliert werden. Die kürzeste Distanz vom Mittelpunkt zu jenen Gitterpunkten, dessen z-Werte kleiner als 20% des globalen Maximalwertes sind, entspricht der kürzesten Autokorrelationslänge. Eine ähnliche Logik wird auch zur Bestimmung der längsten Autokorrelationslänge verwendet, wobei hier ein falscher Wert ausgegeben werden kann, wenn die umliegenden Verwerfungen in der Autokorrelationsfunktion einen Wert größer als 20% des Maximalwertes annehmen. Die beiden Autokorrelationslängen unterscheiden sich für die Schleifbandoberflächen nicht sehr stark. Daher gestaltet sich die Erkennung dieses Fehlers als nicht schwer, jedoch wird deshalb in den anderen Funktionen immer auf die kürzeste Autokorrelationslänge zurückgegriffen.

```
1 def fastest_slowest_acl(ACF: s.ACF=None, grid_spacing: int=0.01):
2     acf = np.asarray(ACF)
3     x = grid_spacing * np.arange(acf.shape[1] / -2, acf.shape[1] / 2)
4     y = grid_spacing * np.arange(acf.shape[0] / -2, acf.shape[0] / 2)
5     x_mesh, y_mesh = np.meshgrid(x, y)
6     distance_to_centre = np.sqrt(x_mesh ** 2 + y_mesh ** 2)
7     max_ac = np.max(acf)
8     min_acl = min(distance_to_centre[acf < (0.2*max_ac)])
9     max_acl = max(distance_to_centre[acf > (0.2*max_ac)])
10    return [min_acl, max_acl]
```

Listing 2: Funktion zur Bestimmung der Autokorrelationslängen

Die allgemein übliche exponentielle Autokorrelation kann entsprechend Gleichung (26) angegeben werden [24]. Diese grundlegende Form haben die meisten technischen Oberflächen und die Definition der Autokorrelationslängen ist auch nur für diese sinnvoll. Das kann auch an Abb. 12 erkannt werden. Diese zeigt eine solche exponentielle Autokorrelationsfunktion mit $\sigma^2 = 1$ und $\beta_x = \beta_y = 0,2$.

$$ACF_{exp} = \sigma^2 * \exp(\ln(0,1) * \sqrt{\left(\frac{x}{\beta_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\beta_y}\right)^2}) \quad (26)$$

ACF_{exp} ... exponentielle Autokorrelationsfunktion

σ^2 ... Varianz des Höhenprofils

x, y ... Ortsvariablen

β_x, β_y ... Autokorrelationslängen

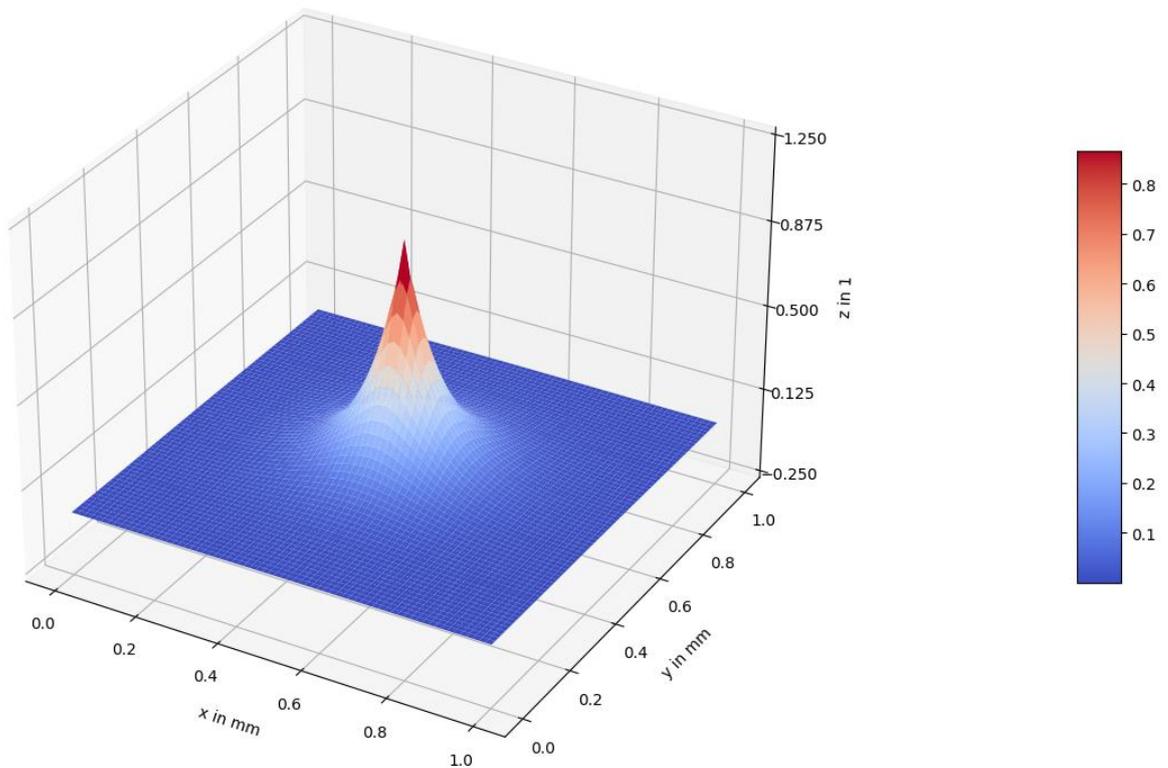


Abb. 12: Exponentielle Autokorrelationsfunktion, $\sigma^2 = 1$ und $\beta_x = \beta_y = 0,2$

$$w = \sqrt{\left(\frac{x}{\beta_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\beta_y}\right)^2} \quad (27)$$

w ... Abklingparameter

$x, y \dots$ Ortsvariablen

$\beta_x, \beta_y \dots$ Autokorrelationslängen

Die Autokorrelationsfunktionen der Schleifbandoberflächen folgen grundlegend auch einer exponentiellen Form. Nur die Spitzen im Zentrum zeigen eine lokale Abweichung durch eine Wendestelle und einer dadurch etwas abgerundeten, nicht exponentiellen Form. Um auch diese kleinen Abweichungen abbilden zu können, wird die Basisform erweitert. Dazu wird zuerst der elliptische Term im Exponenten nach Gleichung (27) definiert, damit die folgende Gleichung übersichtlich gestaltet werden kann. Anschließend wird die Konstante σ^2 durch ein Polynom sechsten Grades ersetzt, welches auch der elliptischen Distanzvariable vom Zentrum w folgt. Dadurch ist genügend Flexibilität vorhanden, um die lokalen Wendestellen abbilden zu können, ohne das globale Verhalten grundlegend zu verändern. Ein Vergleich zwischen einer auf Basis einer Messung berechneten Autokorrelationsfunktion und der entsprechenden Nachbildung mit Gleichung (28) ist in Abb. 13 und Abb. 14 ersichtlich. Der Fehler der Nachbildung beschränkt sich hauptsächlich auf die äußeren Bereiche, welche jedoch durch dieses Vorgehen entfernt werden sollten. Dadurch wird diese Methodik als geeignet angesehen und weiters auf alle Schleifbandoberflächen angewendet.

$$ACF_{erw} = (a * w + b * w^2 + c * w^3 + d * w^4 + e * w^5 + f * w^6 + g) * \exp(\ln(0,1) * w) \quad (28)$$

$ACF_{erw} \dots$ erweiterte Autokorrelationsfunktion

$a, b, c, d, e, f, g \dots$ Parameter des Polynoms

$w \dots$ Abklingparameter

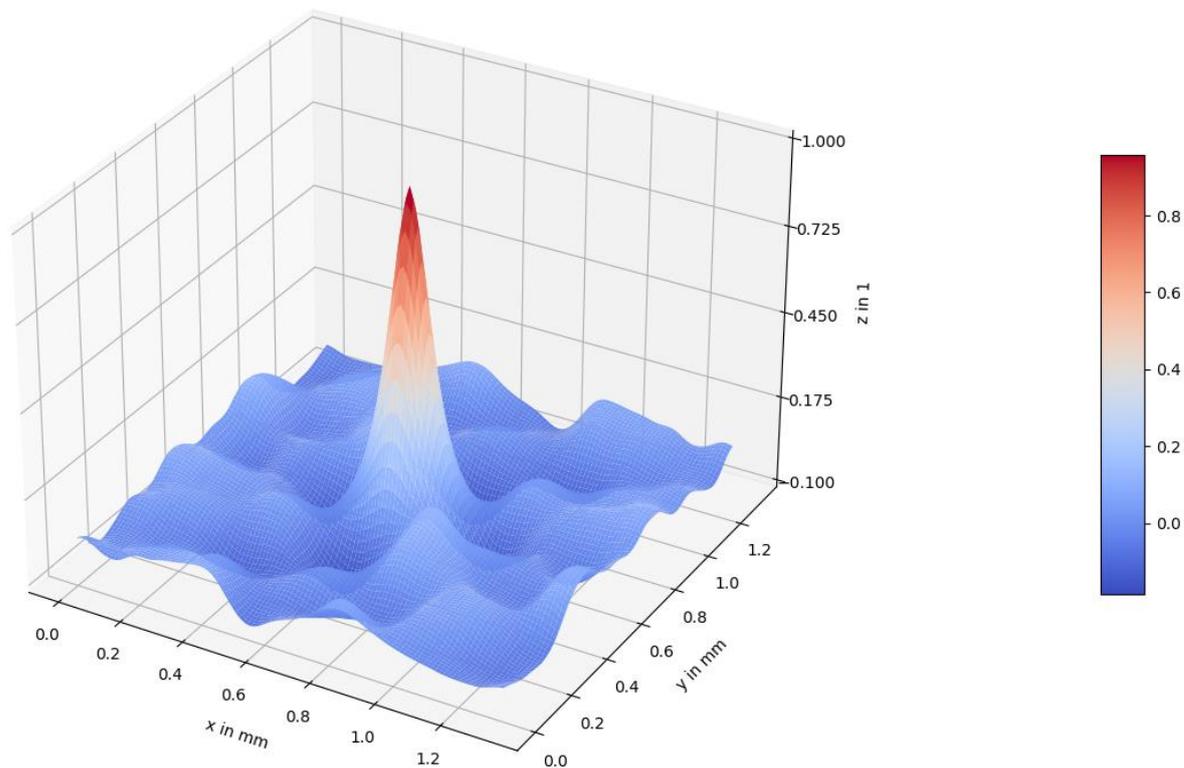


Abb. 13: Autokorrelationsfunktion der Initialmessung mit dem Alicona Edgemaster an Position 8

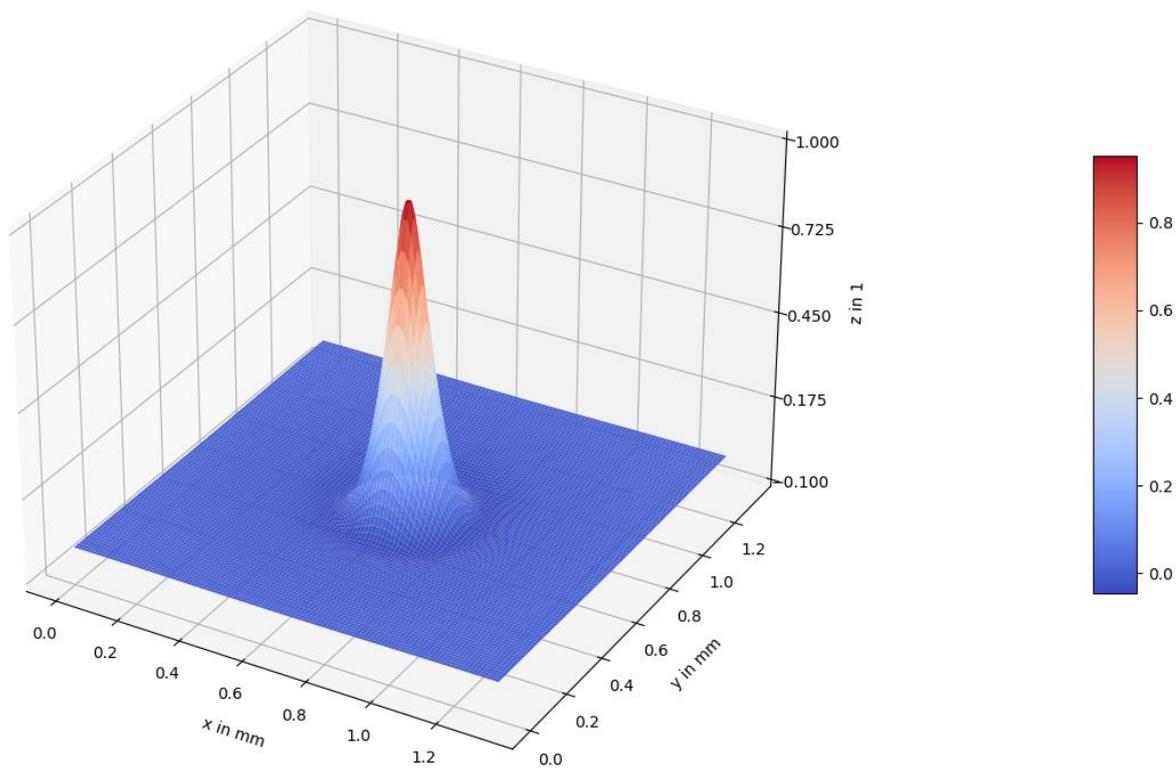


Abb. 14: Nachbildung der Funktion in Abb. 13 nach Gleichung (28)

5.4 Erzeugung der Schleifbandoberfläche

Die mathematische Basis für die Erzeugung neuer Schleifbandoberflächen wurde bereits in Abschnitt 2.2 behandelt. Die dort angeführten Methoden wurden teils neu implementiert, aber teils auch aus der Library SliPy [40] übernommen. In dieser ist speziell das Verfahren nach Patir [19] bereits gut implementiert und kann daher verwendet werden. Die Implementierung des 2D-Filter-Verfahrens konnte, wenn auch theoretisch in dem Modul vorhanden, nicht verwendet werden, da diese einige Fehler aufweist.

Für beide Methoden ist es im ersten Schritt notwendig, auf Basis einer Ziel-Autokorrelationsfunktion einen Filter zu berechnen. Danach kann mit diesem Filter unter Anwendung von Gleichung (11) und (12) und der Johnson-Transformation [17] eine geeignete Verteilung der Zufallsvariable gefunden werden, solange nicht zu hohe Skewness-Werte gefordert sind. Der Algorithmus für die Johnson-Transformation wurde aus dem Modul SliPy [40] kopiert und leicht modifiziert, damit Ausnahmefälle besser abgearbeitet werden. Die Basis dafür ist vor allem der Algorithmus AS 99 von Hill et al. [18].

Listing 3 zeigt die Implementierung des 2D -Filter -Verfahrens nach Hu und Tonder [21]. Zuerst wird überprüft ob die Ziel-Autokorrelationsfunktion als NumPy-Array oder als SliPy-Objekt vorliegt. Entsprechend wird ein passendes Stück um das Zentrum ausgeschnitten und berechnet, oder die gegebene Matrix direkt verwendet. Anschließend wird die 2D-Fast-Fourier Transformation verwendet, um die spektrale Leistungsdichte als Fourier-Transformierte der Autokorrelationsfunktion zu erhalten. Durch das Ziehen der Matrixwurzel und die Anwendung der inversen Fast-Fourier-Transformation können nun die Filterkoeffizienten berechnet werden. Durch numerische Fehler handelt es sich dabei um komplexe Zahlen, weswegen der Absolutwert verwendet wird. Nun kann die Johnson-Transformation angewendet werden und die Funktion gibt die Filterkoeffizienten, die Verteilungsvariable in Form eines SciPy-Objekts, die spektrale Leistungsdichte sowie einen Wahrheitswert zurück, welcher Auskunft darüber gibt, ob es möglich war, die Kurtosis und Skewness entsprechend nachzubilden.

```

1  def Filter_2D_preSurface(target_acf: s.ACF=None, grid_spacing: float=0.01,
2  filter_shape=(100,100), mean=0,sd=1, sk=-0.5, ku=3,smooth_filter = False):
3  surf = s.RandomFilterSurface(grid_spacing=grid_spacing)
4  if type(target_acf) == np.ndarray:
5      filter_index_y_from=int(np.round((target_acf.shape[0]-filter_shape[0])/2))
6      filter_index_y_to=int(target_acf.shape[0]-filter_index_y_from)
7      filter_index_x_from=int(np.round((target_acf.shape[1]-filter_shape[1])/2))
8      filter_index_x_to = int(target_acf.shape[1]-filter_index_x_from)
9      acf_array=target_acf[filter_index_y_from:filter_index_y_to,
10     filter_index_x_from:filter_index_x_to]
11
12 else:
13     k=grid_spacing*np.arange(-filter_shape[0]/2,filter_shape[0]/2)
14     el=grid_spacing*np.arange(-filter_shape[1]/2,filter_shape[1]/2)
15     acf_array =target_acf(k, el)
16
17 psd=np.fft.fft2(acf_array,norm="forward")
18 fir_koeff=np.fft.ifft2(alg.sqrtm(psd),norm="forward")
19 fir_koeff=np.abs(fir_koeff)
20 surf._filter_coefficients=fir_koeff
21
22 surf.dist,Sk_fitted=Johnson_Transformation.Johnson_dist(mean,sd,sk,ku,
23 fir_koeff)
24 return fir_koeff, surf.dist,psd,Sk_fitted

```

Listing 3: Implementierung des 2D-Filter-Verfahrens

Die Implementierung für die Berechnung der Filterkoeffizienten nach Patir [19] folgt der Logik aus Abschnitt 2.2.3 und damit der Literatur. Der einzige Unterschied zu Patir ist, dass dieser zur Lösung des Gleichungssystems das Newton-Verfahren angewendet hat. Die hier verwendete Implementierung verwendet dazu den Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (BFGS) Algorithmus. Dies führt jedoch zu keinen unterschiedlichen Ergebnissen, weshalb darauf nicht näher eingegangen wird.

In der Simulation ist es notwendig, verschiedene Schleifbandoberflächen mit gegebener Form zu generieren. Dazu können nun die Filter und Zufallszahlverteilungen herangezogen werden. Um auch mit denselben Parametern unterschiedliche Oberflächen erzeugen zu können, kann der Zufallsgenerator mit verschiedenen Seeds verändert werden. Nun erhält man durch das Berechnen der Faltung in Gleichung (9) eine Oberfläche mit beliebiger Seitenlänge. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den Autokorrelationsfunktionen um zyklische Formen handelt und auch hier nur quadratische Oberflächen sinnvoll sind. Die Berechnung von rechteckigen Matrizen ist zwar mathematisch möglich, jedoch kommt es dabei zu Verzerrungen entlang der längeren Seite.

Die hier verwendeten Methoden sind statistischer Natur, weshalb insbesondere bei der Erzeugung von Oberflächen mit vielen Punkten auch Ausreißer auftreten können. Diese stellen hohe Spitzen dar, welche in dieser Form in der Realität nicht auftreten beziehungsweise sofort ausbrechen würden. Daher müssen diese aus den generierten Oberflächen entfernt werden, bevor diese in der Simulation verwendet werden können. Dafür wird die Funktion „remove_outliers“ implementiert. Diese erhält als Eingabe eine Oberfläche und einen Grenzwert in Prozent. Anschließend wird als Startwert der höchste Punkt der Oberfläche herangezogen und eine Schnittebene eingezogen. Die Höhe der Schnittebene wird schrittweise reduziert, bis der angegebene prozentuelle Anteil an Gesamtpunkten über dieser Ebene liegt. Diese Punkte werden anschließend entfernt und die Löcher werden mithilfe der „fill_holes“ Funktion des Modules SliPy [40] interpoliert.

5.5 Rauheitswerte der Werkstückoberfläche

Entsprechend Abschnitt 4.5 und 4.6 wurden die Werkstückoberflächen mit zwei verschiedenen Methoden vermessen. Die Messung der Oberflächenrauheiten mit dem Rauheitsmessgerät ist einfach, da die Rauheitswerte Rz und Ra für jede Messstrecke direkt berechnet werden und bereits als solche in einer Microsoft Excel-Tabelle vorliegen. Daher ist für die Verarbeitung kein eigenes Python-Script notwendig, sondern dies kann direkt in Excel erfolgen. Dazu werden jeweils die fünf Rz- und Ra-Werte von Messtelle eins und Messtelle zwei zusammengeführt und das arithmetische Mittel dieser Werte berechnet. Dadurch entsteht eine Tabelle, welche für jeden Messzeitpunkt (siehe Tab. 2) einen gemittelten Spitzenrauheitswert Rz und Mittenrauhwert Ra enthält. Diese Tabelle kann direkt in Python eingelesen werden und muss daher nicht weiterbearbeitet werden.

Etwas komplexer gestaltet sich die Auswertung der Abformungen des Stahlbandes. Hier liegen die topographischen Daten vor und die Rauheitswerte müssen daraus erst berechnet werden. Dazu werden zwei Funktionen definiert, welche die gemittelte Rautiefe Rz und den Mittenrauhwert Ra einer jeden Oberfläche berechnen können. Diese werden auch später in der Simulation verwendet. Es wird die Schlifftopografie simuliert und daraus für den Vergleich die Rauheitswerte berechnet.

Die gemittelte Rautiefe Rz wird mit den Summen der Distanzen zur größten Spitze und zur größten Tiefe vom Mittelwert aus, jeweils für eine Einzelmessstrecke, berechnet. Die Messstrecke besteht aus fünf Einzelmessstrecken und der Rz-Wert ist der Mittelwert dieser fünf Spitzenwerte. Der arithmetische Mittenrauhwert Ra ist über das folgende Integral in Gleichung (29) definiert. Darin ist L die Länge der Messstrecke und $z(x)$ ist der Vektor, welcher die Höhendaten um die Mittellinie enthält [46].

$$Ra = \frac{1}{L} * \int_0^L |z(x)| dx \quad (29)$$

Ra... arithmetischer Mittenrauhwert

L... Länge der Messstrecke

z(x)... Höhenprofil

Die Implementierung der gemittelten Rautiefe Rz ist in Listing 4 dargestellt. Zuerst wird die Form der Matrix ausgelesen und die Oberfläche so verschoben, dass der Mittelwert zu Null wird. Anschließend werden die Messstrecken in beide Raumrichtungen jeweils in der Mitte der Fläche positioniert. Zusätzlich ist es möglich eine Messstreckenbreite zu definieren, von der die jeweiligen Extremwerte als neue Messstrecke herangezogen werden. Auch kann durch den Parameter „remove_curve“ ausgewählt werden, ob die Welligkeit der Messstrecke durch eine Funktion 4.Grades entfernt werden soll. Anschließend wird die Messstrecke in Einzelmessstrecken unterteilt und jeweils der kleinste negative Höhenwert der Einzelmessstrecke von dem größten positiven subtrahiert. Der Mittelwert dieser Werte entspricht dem Rz-Wert der betrachteten Messstrecke.

```

1 def get_Rz(surface: np.ndarray=None, Messtrecken=5, Messtreckenbreite=1,
  remove_curve = False):
2
3     x_points = surface.shape[1]
4     y_points = surface.shape[0]
5     dist_x = int(x_points/(Messtrecken))
6     dist_y = int(y_points/(Messtrecken))
7
8     surface2 = surface - np.mean(surface)
9
10    Rz_array_x = np.asarray([])
11    Rz_array_y = np.asarray([])
12
13    Messstrecke_x=surface2[:,int(int(x_points/2)-np.floor(Messtreckenbreite/2))
  :int(int(x_points/2)+np.ceil(Messtreckenbreite/2))]
14    Messstrecke_y=surface2[int(int(y_points/2)-np.floor(Messtreckenbreite/2))
  :int(int(y_points/2)+np.ceil(Messtreckenbreite/2)),:]
15
16    if remove_curve == True:
17        Messstrecke_x,coeffsx = s.subtract_polynomial(Messstrecke_x,4)
18        Messstrecke_y,coeffsy = s.subtract_polynomial(Messstrecke_y,4)
19
20    if Messtreckenbreite == 1:
21        Messstrecke_x = Messstrecke_x[:,0]
22        Messstrecke_y = Messstrecke_y[0,:]
23
24    for i in range(0,Messtrecken):
25        if Messtreckenbreite == 1:
26            Einzelmessstrecke_x = Messstrecke_x[(i*dist_y):((i+1)*dist_y)]
27            Einzelmessstrecke_y = Messstrecke_y[(i*dist_x):((i+1)*dist_x)]
28        else:
29            Einzelmessstrecke_x = Messstrecke_x[(i*dist_y):((i+1)*dist_y),:]
30            Einzelmessstrecke_y = Messstrecke_y[:,(i*dist_x):((i+1)*dist_x)]
31
32        Rz_array_x=np.append(Rz_array_x,np.max(Einzelmessstrecke_x)-
  np.min(Einzelmessstrecke_x))
33        Rz_array_y=np.append(Rz_array_y,np.max(Einzelmessstrecke_y)-
  np.min(Einzelmessstrecke_y))
34    Rz_x = np.mean(Rz_array_x)
35    Rz_y = np.mean(Rz_array_y)
36
37    return (Rz_x,Rz_y)

```

Listing 4: Funktion zur Berechnung der Spitzenrauheit Rz einer Oberfläche

Die Implementierung der arithmetischen Mittenrauheit R_a ist ähnlich aufgebaut und in Listing 5 angeführt. Auch hier wird die Form ausgelesen und der Mittelwert auf Null verschoben. Es besteht hier die Möglichkeit, mehrere Messstrecken über die Fläche zu verteilen und eine Messstreckenbreite pro Messstrecke zu definieren, wovon die Extremwerte für die Berechnung herangezogen werden. Der R_a -Wert wird anschließend für beide Raumrichtungen durch das diskrete Integral berechnet. Der Gitterabstand wird als Eins angenommen, wodurch $dx = 1$ gilt und daher L gleich der Anzahl der Gitterpunkte in die betrachtete Richtung ist.

```

1 def get_Ra(surface: np.ndarray=None, Messstrecken = 1, Messstreckenbreite = 1):
2     x_points = surface.shape[1]
3     y_points = surface.shape[0]
4     dist_x = int(x_points/(Messstrecken+1))
5     dist_y = int(y_points/(Messstrecken+1))
6
7     surface2 = surface - np.mean(surface)
8
9     Ra_array_x = np.asarray([])
10    Ra_array_y = np.asarray([])
11
12    for i in range(1, Messstrecken+1):
13        if remove_curve == True:
14            Messstrecke_x, coeffs_x = s.subtract_polynomial(surface2[:, (dist_x*i):
15                (dist_x*i+Messstreckenbreite)], 4)
16            Messstrecke_y, coeffs_y = s.subtract_polynomial(surface2[(dist_y*i):
17                (dist_y*i+Messstreckenbreite)], 4)
18        else:
19            Messstrecke_x = surface2[:, (dist_x*i):(dist_x*i+Messstreckenbreite)]
20            Messstrecke_y = surface2[(dist_y*i):(dist_y*i+Messstreckenbreite), :]
21            Messstrecke_x = np.amax(np.abs(Messstrecke_x), axis = 1)
22            Messstrecke_y = np.amax(np.abs(Messstrecke_y), axis = 0)
23
24            Ra_array_x = np.append(Ra_array_x, np.trapz(np.abs(Messstrecke_x))/y_points)
25            Ra_array_y = np.append(Ra_array_y, np.trapz(np.abs(Messstrecke_y))/x_points)
26
27    Ra_x = np.mean(Ra_array_x)
28    Ra_y = np.mean(Ra_array_y)
29
30    return (Ra_x, Ra_y)

```

Listing 5: Funktion zur Berechnung der Mittenrauheit R_a einer Oberfläche

5.6 Antriebsleistung und Zustellung

Die Antriebsleistung und die Zustellung des Schleifbandes wurden als Zeitreihe parallel zueinander aufgenommen. Die Abtastrate betrug 4800 Hz, was über 22 Stunden eine große Datenmenge resultieren lässt. Außerdem wurden die Aufzeichnungen vor den Messungen gestoppt und danach eine neue gestartet. Um nun besser mit den Daten arbeiten zu können, wird aus der Zeitreihe jeder Wert genommen, welcher ein Vielfaches von 4800 ist. Dadurch wird die Abtastung auf 1 Hz reduziert und die Datenmenge stark reduziert. Die Schliffleistung sollte mit einer Messspannung von 10 V 30 kW ergeben und 0 V zeigen eine Leistung von 0 KW an. Daher wird die Schliffleistung in Volt mit drei multipliziert. Jedoch werden diese Werte nur unter Vorbehalt verwendet, da sich während der Aufzeichnungen einige Differenzen zwischen der Messung und der Anzeige an der Schleifmaschine zeigten. An der Leistung ist jedoch sehr gut der Zeitpunkt ablesbar, an dem das Schleifband das Stahlband berührt und somit die Leistung stark ansteigt. Um diesen Punkt und jene Punkte, an denen das Schleifband wieder vom Werkstück abhebt, automatisiert zu erkennen, wird die Änderungsrate der Leistung zwischen den in Sekundenintervall vorliegenden Abtastpunkten berechnet. Wenn sich nun die Leistung mehr als um den Faktor 10 erhöht, wird dieser Punkt als Kontaktpunkt abgespeichert. Wenn die Leistung um mehr als 95% abfällt, wird dieser Punkt als Schleifende angesehen.

Der Schleifvorgang läuft prinzipiell so ab, dass eine Zustellung zu Beginn eingestellt wird und diese über längere Zeit unverändert bleibt. Daher ist es von Vorteil den Erstkontaktpunkt zwischen Werkstück und Schleifband als Referenz für die tatsächliche Zustellung zu verwenden. Auch kann dadurch ein möglicher Drift der Messsensoren ausgeglichen werden. Um das zu bewerkstelligen, wird der gemessene Abstandswert zu dem Erstkontaktzeitpunkt von den Abstandsmesswerten subtrahiert und damit der Nullpunkt dorthin verschoben. Aus der Kalibrierung der Sensoren ist bekannt, dass jener, welcher an der Schleifbandrolle montiert ist, eine Sensitivität von 1,543 V/mm aufweist. Der zweite Sensor zeigt eine Sensitivität von 1,022 V/mm. Mit dieser Information ist es nun möglich, die in % angegebenen Messwerte in die Zustellung in mm umzurechnen.

Aus den Ergebnissen lässt sich ablesen, dass die Schleifrolle tatsächlich sehr starr gelagert ist und nahezu keine Ausschläge aufweist. Daher können diese Werte ignoriert werden. Um aus den restlichen Werten eine brauchbare Zustellkurve zu erhalten, werden die nahezu konstanten Zustellperioden gemittelt und zusammengefasst ausgegeben. Dabei werden noch jene Werte ausgenommen, die negativ sind und bei denen daher kein Kontakt auftritt. Solche Punkte sind in den Messreihen enthalten, da auch während des Schleifens teilweise kurzfristig der Schliff beendet wurde, um Verschmutzungen zu entfernen. Die exakte Implementierung der oben beschriebenen Methodik kann in Listing 6 nachvollzogen werden.

```

1  ascii_grid=p.read_table('Zeitreihen_Rohdaten\\15,5h.ASC',decimal=',',
   index_col=False)
2  ascii_grid_ds = ascii_grid[:,4800]
3  power_rate = np.zeros((len(ascii_grid_ds),1))
4  wege = np.zeros((len(ascii_grid_ds),2))
5  Leistung = ascii_grid_ds['Schleifkopf_Leistung [V]']*3
6
7  for i in range(0,len(ascii_grid_ds)-1):
8
9      power_rate[i] = (Leistung.iloc[i+1]-Leistung.iloc[i])/Leistung.iloc[i]
10 contact_start = np.argwhere(np.abs(power_rate)>10)[:,0]
11 contact_stop = np.argwhere(power_rate<-0.95)[:,0]
12
13 val1start = ascii_grid_ds['LVDT_Schleifrolle [%]'].iloc[contact_start+1]
14 val2start = ascii_grid_ds['LVDT_Spannrolle [%]'].iloc[contact_start+1]
15
16 wege[:,0] = np.asarray(ascii_grid_ds['LVDT_Schleifrolle [%]'])-val1start.iloc[0]
17 wege[:,0] = 1/1.543*wege[:,0]
18 wege[:,1] = np.asarray(ascii_grid_ds['LVDT_Spannrolle [%]'])-val2start.iloc[0]
19 wege[:,1] = 1/1.022*wege[:,1]
20 mittlere_Zustellung=np.mean(wege[contact_start[0]:contact_stop[0]-1],1)[wege[contact_start[0]:contact_stop[0]-1,1]>0])

```

Listing 6: Code zur Auswertung der Zeitreihen

6 Implementierung der Simulation

In Kapitel 5 wurde das methodische Vorgehen, sowie ausgewählter Python Code, zur Vorbereitung der gemessenen Daten behandelt. Die Ergebnisse daraus können nun als Basis für die Simulation betrachtet werden. Dabei müssen jedoch nicht unbedingt alle vorhandenen Daten verwendet werden, da diese zum Teil deckungsgleich sind oder die Qualität der Daten zu gering ist. Die Auswirkungen davon werden bei den Ergebnissen in Kapitel 7 diskutiert.

Der Abschnitt 6.1 fasst die in der Simulation berücksichtigten Parameter und die implementierten Modelle, welche verschiedene Mechanismen des Schleifprozesses abbilden sollen, zusammen. Anschließend wird in Abschnitt 6.2 die Logik der Simulation sowie der prinzipielle Ablauf aufgezeigt. Um ein tieferes Verständnis für die Teilmodelle zu erhalten, werden dessen Implementierungen genauer behandelt. Dazu widmet sich Abschnitt 6.3 der Abschätzung der Schnittkräfte. In Abschnitt 6.4 wird die Modellierung der elastischen Nachgiebigkeit der Korneinbettung und der Schleifbandwalze betrachtet. Beim Korneingriff kommt es auch zu plastisch verdrängtem Material, welches nicht zerspannt wird. Die mögliche Berücksichtigung dieses Effekts wird in Abschnitt 6.5 erläutert. Zuletzt werden noch die verschiedenen Möglichkeiten, die Zustellung in der Simulation zu berücksichtigen, erläutert.

6.1 Gewählte Simulationsparameter

Durch die Literaturrecherche in Abschnitt 2.1 können die Einflussparameter auf den generellen Schleifprozess erkannt werden. Diese sind die Schnittgeschwindigkeit, die Reibung zwischen Korn und Werkstück, das Werkstückmaterial selbst, der Kornwerkstoff, die Korneindringtiefen, die auftretenden Temperaturen, der Kornverschleiß, die Schleifmittelkörnung und die generellen geometrischen Abmessungen des Schleifmittels, des Werkstücks und etwaige zusätzliche Geschwindigkeiten, wie die Querbewegung.

Nun können nicht all diese Einflüsse mithilfe einer kinematischen Simulation abgebildet werden. Dies ist auch nicht notwendig, da einige Einflüsse von untergeordneter Größenordnung sind. Daher werden in der entwickelten Simulation einige Wirkmechanismen nicht modelliert. Darunter fallen die globalen und lokalen Temperaturen sowie Wärmeflüsse. Diese haben zwar einen Einfluss auf den Zerspanungsvorgang und die resultierenden Kräfte, jedoch ist eine derartige Betrachtung äußerst komplex und rechenaufwendig. Um diese Effekte genauer zu untersuchen, würde sich eine Finite-Elemente-Simulation auf Einzelkornebene gegenüber einer kinematischen Simulation besser eignen.

Der Aufbau des Schleifbandes und damit die Parameter der Körnung und des Verschleißes werden indirekt über die Generierung der Schleifbadoberfläche auf Basis der Messungen berücksichtigt. Die Einflüsse der Schnittgeschwindigkeit auf das globale Prozessgeschehen werden berücksichtigt, jedoch die lokalen Einflüsse auf die konkrete Zerspanung und damit auch wieder auf die Prozesskräfte können durch die komplexe Interaktion in dieser Simulation nicht modelliert werden.

Die geometrischen Abmessungen und Geschwindigkeiten aus Tab. 1 bilden die Basis für die Kornkinematik und sind daher alle so exakt wie möglich in der Simulation abgebildet. Darunter fällt insbesondere auch die Querbewegung des Schleifbandes. Später wird erkannt, dass diese Bewegung durch die hohen Schnittgeschwindigkeiten und den relativ geringen Quergeschwindigkeiten eine vernachlässigbare Rolle spielt. Aufgrund der Ausführungen kann bereits erkannt werden, dass eine Modellierung der Schnittkräfte nicht als exakt betrachtet werden kann. Trotzdem wird ein solches Modell in die Simulation implementiert, da diese Abschätzung auch für die Modellierung der elastischen Verformungen notwendig ist. Durch diese beiden Modelle fließen zu einem gewissen Ausmaß auch die Werkstoffparameter des Werkstücks und des Schleifbandes in die Simulation ein.

Die Korneindringtiefen haben einen großen Einfluss auf die Rauheit der simulierten Oberfläche, jedoch sind diese nicht eindeutig bekannt. Daher liegt ein starker Fokus bei der Entwicklung der Simulation auf der Modellierung der Zustellung. Dafür kommen mehrere Basisdaten und Modelle infrage, welche in Abschnitt 6.6 erläutert werden.

6.2 Schematischer Ablauf

Die grundlegende Simulationslogik ist in Abb. 15 graphisch dargestellt. Als Basisdaten für die Simulation stehen die Messdaten und die bekannten Prozessparameter zur Verfügung. Unbekannte, zu schätzende Parameter sind der Faktor Beta, welcher die plastische Verdrängung definiert, der Reibkoeffizient und die exakte Nachgiebigkeit des Systems Walze-Schleifband-Werkstück. Frei gewählt werden können die Abmessungen der simulierten Werkstückoberfläche sowie deren Gitterabstände unabhängig voneinander in x- und y-Richtung. Außerdem kann zur Reduktion der Rechenzeit auch der Gitterabstand der Schleifbadoberfläche in der x-Richtung definiert werden und die Schleifzeit, zu der die Simulation beginnt und endet, kann frei gewählt werden.

Nachdem diese Parameter alle festgelegt sind, muss es möglich sein, die Standardabweichung als Verschleißparameter zu jedem Zeitpunkt auszuwerten. Die entsprechenden Messdaten der gereinigten Schleifbadoberflächen zeigen einen Verlauf nahe einer Exponentialfunktion mit negativem Exponenten. Daher wird mithilfe

einer linearen Regression eine solche Funktion als kontinuierliche Verschleißfunktion berechnet.

Folgend beginnt der tatsächliche Simulationskreislauf, welcher über die simulierte Schleifzeit gesteuert wird. Solange die gesetzte Endzeit noch nicht erreicht ist, wird die Simulation weitergeführt. Anhand der Werkstückoberflächenabmessung, den Prozessgeschwindigkeiten und der Stahlbandlänge lassen sich die Zeiten bestimmen, welche für einen einzelnen Schliffprozess über die simulierte Oberfläche benötigt werden. Auch kann die Dauer berechnet werden, bis das betrachtete Flächenstück wieder in Eingriff kommt. Nach jedem simulierten Schleifdurchgang wird die Zeitvariable um die Summe dieser beiden Prozesszeiten erhöht.

Anhand der aktuellen Zeitvariable wird nun der nächste Messzeitpunkt gefunden. Dieser wird benötigt, um den geeigneten Filter und die Eingangsverteilung für die zu generierende Schleifbandoberfläche zu wählen. Auch wird durch dieses Vorgehen garantiert, dass alle Messdaten in die Simulation einfließen. Grundsätzlich können nur quadratische Flächen generiert werden. Die Seitenlänge dieses Quadrats wird durch die hohe Schleifbandgeschwindigkeit und die niedrige Werkstückgeschwindigkeit von der nötigen Schleifbandlänge in x-Richtung vorgegeben. Die Flächen in y-Richtung sollen jedoch nicht einfach verworfen werden. Demgemäß wird bei jedem Schleifdurchgang kontrolliert, ob eine neue Oberfläche generiert werden muss, da ein neuer Messzeitpunkt als Basis dient, oder ob in y-Richtung noch genügend Schleifbandoberfläche vorhanden ist, um den folgenden Durchgang simulieren zu können. Dabei wird keine Schleifbandoberfläche doppelt verwendet, da es im realen Prozess durch die Querbewegung und das lange Schleifband auch sehr unwahrscheinlich ist, dass die exakt selbe Schleifbandfläche mit derselben betrachteten Werkstückoberfläche mehrmals in Eingriff kommt. Die benötigte Breite in y-Richtung wird dabei durch die zu simulierende Werkstückbreite und die maximal vorkommende Querbewegung bestimmt und die entsprechende Schleifbandoberfläche aus dem generierten Quadrat ausgeschnitten.

Die Standardabweichung der Schleifbandoberfläche verändert sich ständig. Um diesen kontinuierlichen Verschleißprozess bestmöglich abzubilden, wird die Fläche anhand der Verschleißfunktion ausgewertet am entsprechenden Zeitpunkt skaliert.

Mit diesen Definitionen und Randbedingungen ist es nun möglich, einen Zustellalgorithmus zu definieren. Dabei stellt der Erstkontakt des Schleifbandes mit dem Werkstück zu einem gewissen Zeitpunkt die Referenzposition dar und relativ dazu kann eine Zustellung definiert werden. Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten, wovon einige in Abschnitt 6.6 erläutert werden. Der Erstkontaktpunkt wird bei jedem Durchgang berechnet, indem entsprechend der Implementierung in Listing 7 alle Trajektorien der Schleifbandgitterpunkte berechnet und derart vereinigt werden, dass

an einem Gitterpunkt des Werkstücks der minimale Wert herangezogen wird. Damit kann eine Differenz zur betrachteten Werkstückoberfläche gebildet werden und der kleinste Abstand gibt den Erstkontakt vor.

Als nächstes wird die Materialabnahme am Werkstück simuliert. Dazu werden die Gitterpunkttrajektorien erneut berechnet und jede einzeln betrachtet. Nun werden die Werkstückgitterpunkte durch das Minimum zwischen der Trajektorie und den vorherigen Werten am Werkstück ersetzt, und damit eine Zerspanung abgebildet. Jedoch hat der erzeugte Schnitt die maximal mögliche Tiefe und muss entsprechend der elastischen Nachgiebigkeit korrigiert werden. Das geschieht durch ein iteratives Verfahren bei dem die Kraft mit der Verformung ins Gleichgewicht gebracht wird. Näheres dazu findet sich in den Abschnitten 6.3 und 6.4.

Die so erzeugte Oberfläche enthält noch keine plastischen Verdrängungen der einzelnen Körner, welche im Eingriff sind. Diese wird an dieser Stelle durch das Finden einer Vertiefung durch ein Korn und das Aufwerfen einer Parabel an beiden Seiten der Vertiefung modelliert. Näheres zu dieser Modellierung wird in Abschnitt 6.5 ausgeführt.

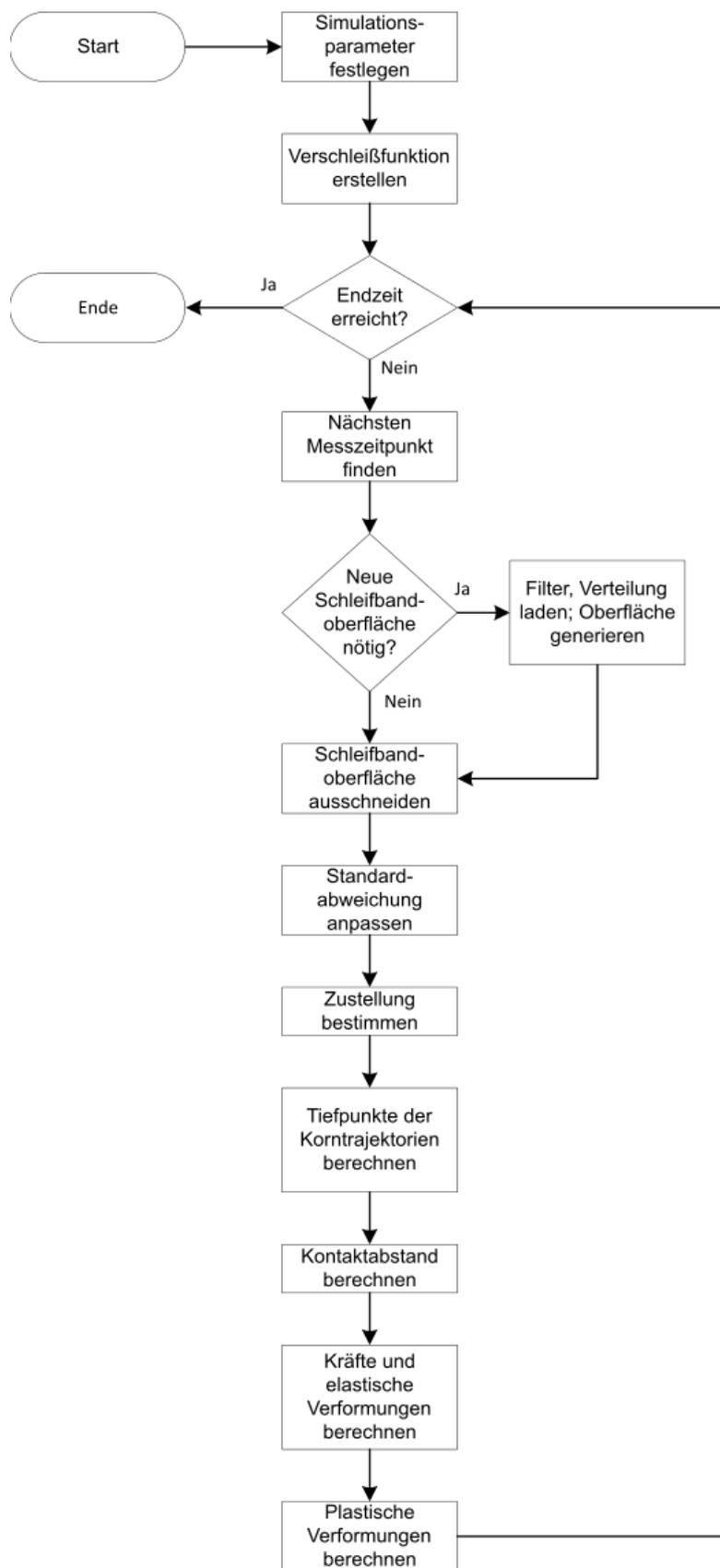


Abb. 15: Grundlegender Ablauf der Simulation

Als zentrale Gleichung für die kinematische Simulation ist Gleichung (23) anzusehen, welche die Trajektorie eines jeden Punktes der Schleifbandoberfläche angibt. Die Implementierung dieses Zusammenhangs ist besonders kritisch, da die Gleichung sehr oft ausgewertet werden muss und daher ein großer Einfluss auf die Rechenzeit besteht. Die Implementierung in der einfachsten Form ist in Listing 7 dargestellt. Um bei der Auswertung die Rechenoperationen den Aufwand zu minimieren, werden folgende Konstanten und eine Variable definiert. Dabei stellt C_1 die Länge dar, die vom Schleifwalzenmittelpunkt zurückgelegt wird, in der Zeit, bis ein Schleifbandgitterpunkt dieselbe x-Koordinate erreicht, wie sein unmittelbarer Nachbar in x-Richtung.

$$C_1 = \frac{v_W * \text{Gitterabstand}}{v_S} \quad (30)$$

C_1 ... Längenkonstante

v_W ... Vorschubgeschwindigkeit

v_S ... Bahngeschwindigkeit

Weiters wird C_2 definiert, wobei dieser Konstante keine unmittelbare physikalische Bedeutung zugeschrieben werden kann.

$$C_2 = 2 * R_0 * \left(1 + \frac{v_W}{v_S}\right)^2 \quad (31)$$

C_2 ... Konstante

R_0 ... Referenzradius

v_W ... Vorschubgeschwindigkeit

v_S ... Bahngeschwindigkeit

Die Variable z_{offset} kombiniert den Abstand zum Referenzpunkt, welcher am Walzenradius R_0 gewählt wird, mit der Zustellung. Diese Variable stellt für einen Durchgang auch eine Konstante dar und wird daher folgendermaßen definiert.

$$z_{offset} = R_0 + \text{Zustellung} \quad (32)$$

z_{offset} ... Konstante

R_0 ... Referenzradius

```

1 for i in range(0,SO_x_sampled):
2     for k in range(0,WS_x):
3         x=k*Werkstueck_x_grid
4         SO_delta_y_from = SO_exess + delta_y_index*k
5         SO_delta_y_to = SO_delta_y_from + WS_y
6         z_ji[:,k]=(x-C1*i)**2/C2-(SO_profil[SO_delta_y_from:SO_delta_y_to,i]-
7             z_offset)
8     if i == 0:
9         z_ji_combined = np.copy(z_ji)
10    else:
11        z_ji_combined = np.minimum(z_ji_combined,z_ji)

```

Listing 7: Implementierung von Gleichung (23)

Die Implementierung in Listing 7 folgt dabei der Logik, dass immer alle Gitterpunkte in y-Richtung an einer Reihe in x-Richtung gleichzeitig ausgewertet werden. Dadurch ergibt sich der Aufbau, dass die erste for-Schleife die Reihen in x-Richtung der Schleifbandoberfläche durchläuft. Für jede Schleifbandreihe werden die Höhenwerte der Trajektorien-Funktion an den x-Werten der Werkstückgitterpunkte ausgewertet und dadurch ein Gitter als Repräsentanz der Werkstückoberfläche erzeugt.

6.3 Kraftmodell

Um Verformungen abschätzen zu können sowie zur Plausibilitätskontrolle ist es notwendig, die aus einem Korneingriff resultierenden Kräfte zumindest in ihrer Größenordnung abzuschätzen. Dazu wird ein einzelnes Korn als Kugel angenähert [36]. In Abb. 16 ist der Querschnitt einer zerspannten Riefe durch ein Einzelkorn abgebildet. Die geometrischen Parameter t_{max} und b bestimmen eindeutig den Kornradius r_K , welcher durch folgende Gleichung (33) berechnet werden kann. Diese Gleichung kann durch eine einfache trigonometrische Betrachtung hergeleitet werden und wird daher nicht genauer ausgeführt.

$$r_K = \frac{b^2 + t_{max}^2}{2 * t_{max}} \quad (33)$$

r_K ... Kornradius

b ... Breite des Schnitts

t_{max} ... maximale Tiefe des Schnitts

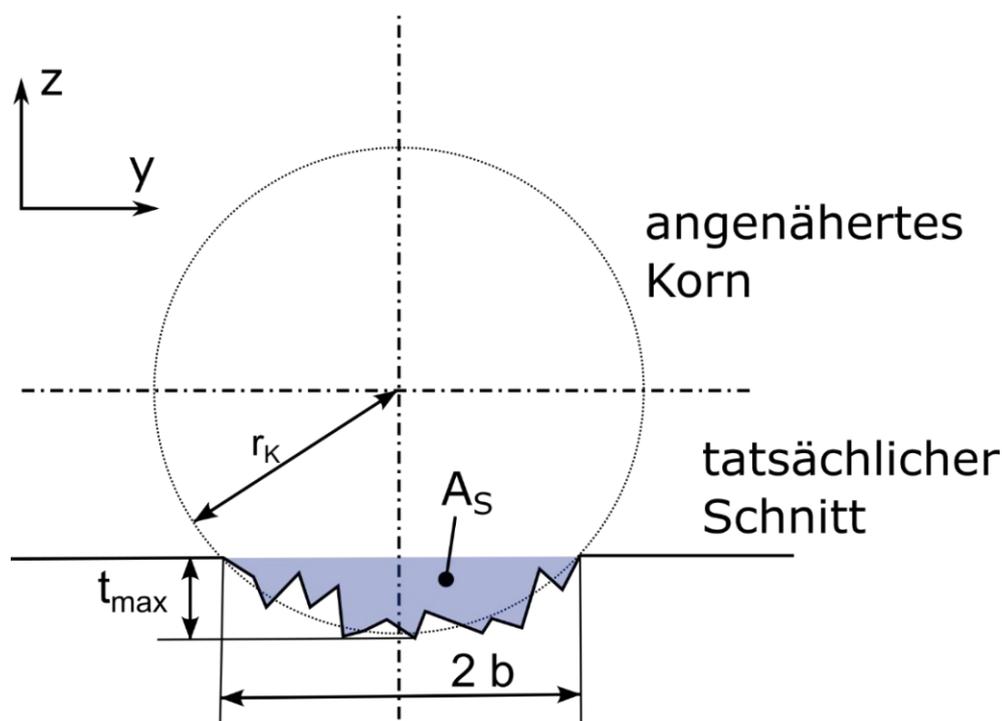


Abb. 16: Skizze zur Berechnung vom angenäherten Kornradius

Nun ist der Radius des Kugelkorns bekannt und die Schnittkraft F_R kann durch einen Ansatz entsprechend der Härteprüfung nach Brinell berechnet werden. Die Logik dafür ist in Abb. 17 ersichtlich. Das Korn bewegt sich durch das Werkstückmaterial und trägt einen Span ab. Dabei wird eine Riefe der Tiefe t erzeugt. Die projizierte Kreisfläche, welche nach Brinell den plastischen Eindruck hinterlässt, ist durch den Kreisradius b definiert. Damit lässt sich entsprechend Gleichung (34) die Schnittkraft F_R berechnen. Der Faktor C' kann dabei für diese Anwendung gleich 3 gesetzt werden [36].

$$F_R = \pi * b^2 * HB * 9,81 * \frac{C'}{3} \quad (34)$$

F_R ... Schnittkraft

b ... Breite des Schnitts

HB ... Brinellhärte

C' ... Parameter

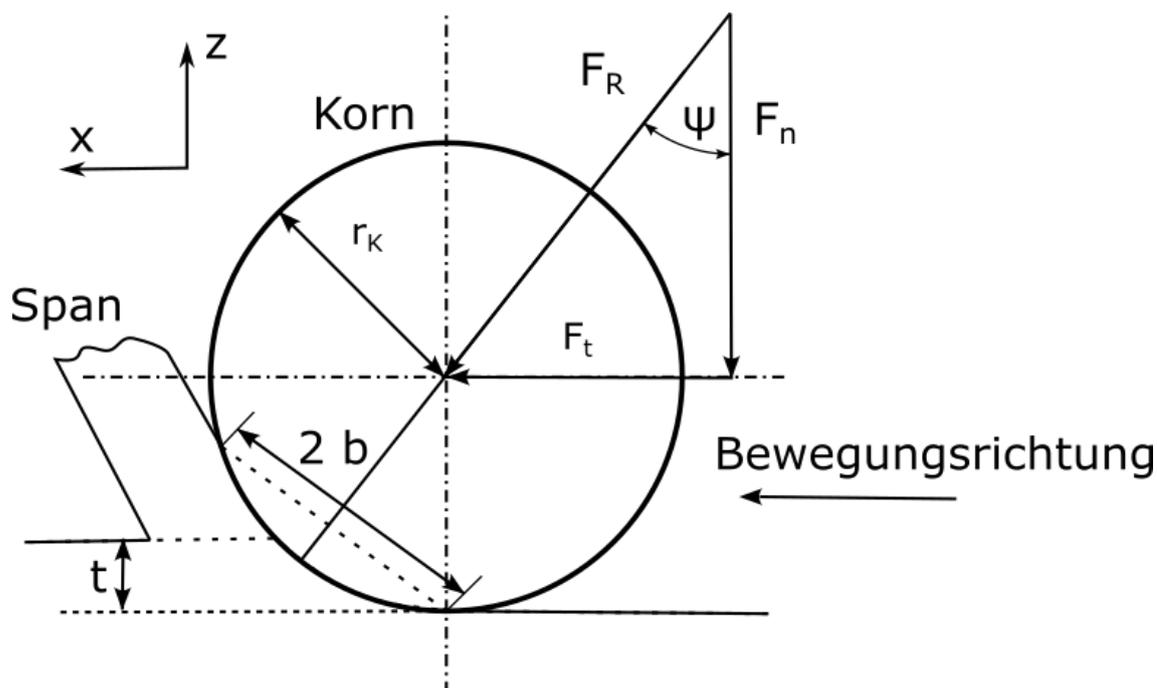


Abb. 17: Skizze für die Schnittkraftabschätzung

Um nun den Tangentialkraftanteil und den Normalkraftanteil zu erhalten, ist der Winkel ψ ausschlaggebend. Dieser kann durch Gleichung (35) bestimmt werden [36].

$$\psi = \sin^{-1}\left(\frac{b}{r_K}\right) \quad (35)$$

ψ ... Schnittkraftwinkel

b ... Kontaktlänge

r_K ... Kornradius

Dadurch ergibt sich die Normalkraft F_n durch Gleichung (36).

$$F_n = F_R * \cos(\psi) \quad (36)$$

F_n ... Normalkraft

F_R ... Schnittkraft

ψ ... Schnittkraftwinkel

Äquivalent wird auch der tangentielle Anteil der Schnittkraft berechnet. Für die gesamte wirkende Tangentialkraft $F_{t\text{Res}}$ kommt auch noch eine Reibkraft über den Reibkoeffizienten μ hinzu. $F_{t\text{Res}}$ kann daher nach Gleichung (37) berechnet werden.

$$F_{t\text{Res}} = F_R * \sin(\Psi) + F_n * \mu \quad (37)$$

$F_{t\text{Res}}$... resultierende Tangentialkraft

F_R ... Schnittkraft

Ψ ... Schnittkraftwinkel

F_n ... Normalkraft

μ ... Reibungskoeffizient

Diese Berechnungen beziehen sich auf die Zerspanung eines Einzelkornes. Diese Körner sind jedoch in der implementierten Form nicht sofort erkennbar, da die Schleifbandoberfläche sowie die Werkstückoberfläche durch ein diskretes Gitter repräsentiert werden. Die Werkstückoberfläche nach einem Schleifdurchgang wird unter Vernachlässigung von elastischen und plastischen Verformungen dadurch gebildet, dass die einzelnen, wie in Listing 7 berechneten, Trajektorien mit der aktuellen Werkstückoberfläche verglichen werden und von beiden Flächen für jeden Punkt jeweils der Punkt mit der kleinsten Höhe für die neue Werkstückoberfläche verwendet wird. Nun wird innerhalb der ersten for-Schleife in Listing 7 noch der Code aus Listing 8 ausgeführt. Zuvor wird noch die Differenz zwischen der Werkstückoberfläche vor dem Eingriff der einzelnen Trajektorie eines Querschnittes der Schleifbandoberfläche und der neuen Werkstückoberfläche berechnet. Dieser Code zeigt die Routine, welche die berechnete Differenzfläche für jede Reihe entlang der y-Achse nach Werten unterschiedlich zu Null durchsucht. Diese sind insofern von Interesse, da diese die Materialabnahme durch die betrachtete Trajektorie repräsentiert. Durch das Identifizieren des ersten Punktes, bei dem die Materialabnahme beginnt und dem nächsten Punkt, an dem keine Materialabnahme mehr simuliert wurde, kann der Abdruck eines einzelnen Kornes erkannt werden. Ein solches Querschnittsprofil weist eine Form ähnlich zu Abb. 16 auf und kann daher für die Berechnungen verwendet werden. Das gesamte Querschnittsprofil wird anschließend von dem zweiten Punkt beginnend weiter nach anderen Kornabdrücken durchsucht, bis keiner mehr gefunden wird. Anschließend wird mit der nächsten Reihe in y-Richtung fortgesetzt.

```

1 while kill==False:
2     cut_i1 = np.argwhere(WS_profil_diff_macro[cut_i2:,k]<0)
3     if cut_i1.size == 0:
4         kill = True
5     else:
6         cut_i1 = cut_i1[0,0] + cut_i2 - 1
7         if cut_i1 == -1: # Ausnahmebehandlung
8             cut_i1 = 0
9
10        cut_i2 = np.argwhere(WS_profil_diff_macro[(cut_i1+1):,k]>=0)
11
12        if cut_i2.size == 0:
13            cut_i2 = WS_y
14        else:
15            cut_i2 = cut_i2[0,0] + cut_i1 + 1

```

Listing 8: Code zum Suchen von einzelnen Kornabdrücken

6.4 Elastisches Verformungsmodell

Im Grundlagenteil in Abschnitt 2.1.1 werden bereits die elastischen Verformungen beim Korneingriff angeführt. Zum einen kommt es zu einer elastischen Rückfederung des Werkstückmaterials und auch wird das Korn durch die wirkenden Schnittkräfte in die Matrix eingedrückt. Beide Effekte führen zu einer niedrigeren effektiven Eindringtiefe des Kornes und daher auch zu einer geringeren Schnitttiefe. Um diese Effekte auch in der Simulation berücksichtigen zu können, werden die wirkenden Kräfte, insbesondere die Normalkräfte, benötigt [38]. Von Chen und Rowe [36], als Basiswerk für die Kraftabschätzung und die Verformungen verwendet, wird nur ein Effekt betrachtet. Das zurückweichen des Kornes wird mit einer Formel des Typs einer Herz'schen Pressung modelliert. Die elastische Werkstückverformung wird mit einem linearen Federmodell abgebildet. Die Federkonstanten beider Modelle sind nicht bekannt und können nur abgeschätzt werden. Daher wird in dieser Arbeit auch nur das Herz'sche Modell nach Gleichung (38) implementiert.

$$\Delta z = C_W * F_n^{2/3} \quad (38)$$

Δz ... elastische Verformung

C_W ... Federparameter

F_n ... Normalkraft

Die Eindringtiefe des Einzelkornes muss nun um diese elastische Verformung korrigiert werden. Dadurch ändert sich jedoch auch der Radius b des projizierten Abdruckes und damit auch die Schnittkraft und die Normalkraft F_n . Die Verformung und

die Kraft sind also gekoppelt und müssen zur Lösung miteinander ins Gleichgewicht gebracht werden. Dazu wird Gleichung (38) als Nullstellenproblem definiert und für jedes Korn mithilfe des Sekantenverfahrens gelöst. Auch wird der Lösungsraum beidseitig begrenzt. Einerseits darf die Eindringtiefe nicht negativ werden und andererseits darf sich der Projektionsradius b nicht mehr ändern, wenn die Eindringtiefe den Kornradius überschreitet. Die implementierte Funktion inklusive der Berechnung der Kornkräfte für die Nullstellensuche ist in Listing 9 dargestellt.

```

1  def inner_elast_Verformung (delta_z_W):
2      if (t_max-delta_z_W) < 0:
3          b = 10**(-6)
4      elif (t_max-delta_z_W) > r_Korn:
5          b = r_Korn
6      else:
7          b =math.sqrt(2*abs(t_max-delta_z_W)*r_Korn-(t_max-delta_z_W)**2)
8      Spanwinkel = math.asin(b/r_Korn)
9      Zerspankraft = math.pi/3*b**2*Brinell_H*9.81*C_Strich*Kraftkorrektur
10     Normalkraft = abs(Zerspankraft*math.cos(Spanwinkel))
11
12     return C_W *Normalkraft**(2/3)-delta_z_W

```

Listing 9: Implementierung des elastischen Verformungsmodells

6.5 Plastisches Verformungsmodell

Nachdem die Eindringtiefen der einzelnen Körner nun um die elastische Verformung korrigiert sind, sind die Geometrien der durch die Zerspannung erzeugten Riefen festgelegt. Jedoch wird nicht das gesamte Volumen aus diesen Riefen tatsächlich von dem Werkstück entfernt. Ein kleiner Teil beginnt plastisch zu fließen und wird durch das aktive Korn zu den Seiten hin verdrängt. Um diesen Effekt zu modellieren, wird der Parameter β eingeführt, der festlegt, welcher Anteil des Volumens tatsächlich vom Werkstück entfernt wird. Die Betrachtung in der Simulation erfolgt wieder auf Basis der einzelnen Gitterreihen in y -Richtung. Ein Algorithmus ähnlich zu jenem in Listing 8 durchsucht die Differenzfläche der Werkstückoberfläche vor dem Schleifdurchgang und danach nach einzelnen Riefen, welche abgetragen wurden. In Abb. 16 ist die zerspannte Fläche A_S ersichtlich, welche durch diskrete Integration berechnet wird. Mit dieser und dem Parameter β lässt sich mit Gleichung (39) die Fläche berechnen, welche an einer Seite der Riefe aufgeworfen wird [36].

$$A_P = \frac{1 - \beta}{2} * A_S \quad (39)$$

A_P ... aufgeworfene Fläche

β ... Parameter

A_S ... zerspante Fläche

Als angenäherte Form für den aufgeworfenen Wulst wird, wie in Abb. 18 dargestellt, eine Parabel gewählt. Diese wird durch die Parameter α , a und h definiert. Die Steigung, mit der die Parabel an das Korn anschließt kann nach Chen und Rowe [36], wie in Gleichung (40) folgt, angenähert werden.

$$\tan \alpha = \frac{t}{b} \quad (40)$$

α ... Steigungswinkel

t ... Eindringtiefe

b ... Breite des Schnitts

Der Parameter a gibt die Breite der Parabel an und wird [36] bestimmt.

$$a = \sqrt{\frac{3 * A_P}{2 * \tan \alpha}} \quad (41)$$

a ... Breite des Aufwurfs

A_P ... aufgeworfene Fläche

α ... Steigungswinkel

Die maximale Höhe der Parabel wird durch h festgelegt und wird durch Gleichung (42) bestimmt [36].

$$h = \sqrt{\frac{3 * A_P * \tan \alpha}{8}} \quad (42)$$

h ... Höhe des Aufwurfs

A_P ... aufgeworfene Fläche

α ... Steigungswinkel

Mit diesen Parametern lässt sich die jeweilige Parabel links und rechts der Riefe durch Gleichung (43) darstellen [36].

$$y^2 = \frac{a^2}{h} * (h - z) \quad (43)$$

y, z ... Ortsvariablen

a ... Breite des Aufwurfs

h ... Höhe des Aufwurfs

In der Simulation wird die Gleichung (43) an den entsprechenden Gitterpunkten ausgewertet und zu den Höhendaten der Werkstückoberfläche addiert.

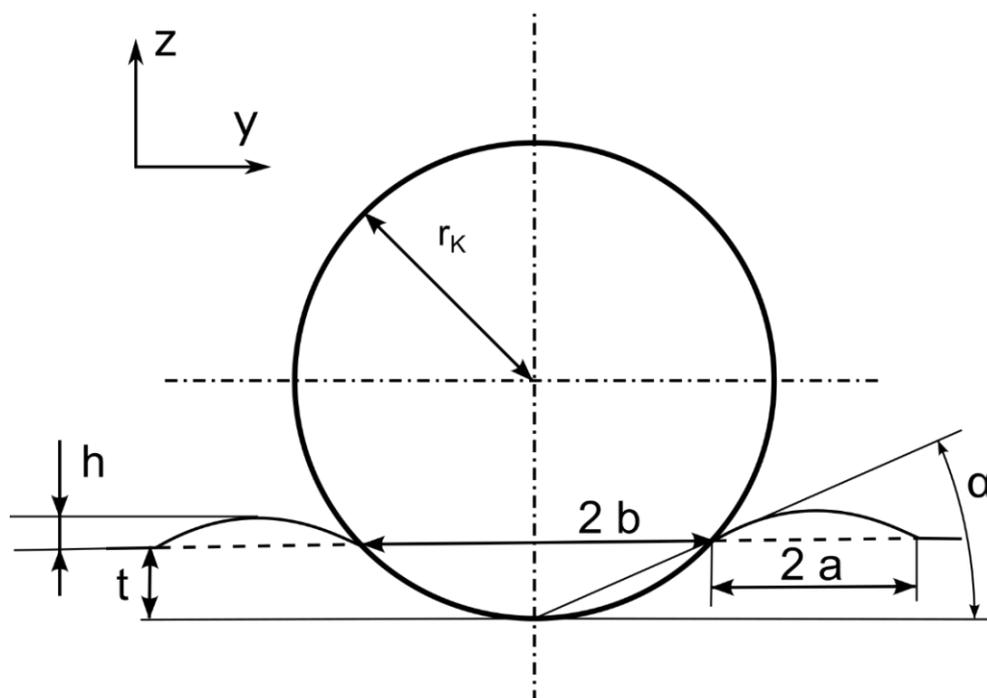


Abb. 18: Skizze der plastischen Verdrängung

6.6 Zustellalgorithmus

Die Zustellung des Schleifbandes zu dem Werkstück hat einen zentralen Einfluss auf die Materialabnahme sowie die Eindringtiefen der Einzelkörner. Außerdem besteht nicht nur dieser direkte Einfluss auf die erzeugte Oberflächenrauheit, sondern auch ein indirekter Effekt über den Schleifbandverschleiß. Ein sehr aggressives Zustellen des

Schleifbandes führt zu hohen Kräften an den Körnern und begünstigt daher den Verschleiß, welcher in Abschnitt 2.1.5 näher beschrieben wird. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass in dieser Simulation die Zustellung möglichst ähnlich zu jener aus der realen Referenz sein muss, um ähnliche Ergebnisse erhalten zu können. Dabei gilt der Schleifbandverschleiß, welcher auf Basis der Messungen kalibriert ist, nur für genau dieses Zustellbild.

Naheliegender ist daher die Verwendung der gemessenen Zustelldaten, beschrieben in Abschnitt 4.1. Die Idee dabei ist, dass jene Punkte, bei denen die Schleifleistung einen Sprung macht und daher einen Kontakt zwischen Werkstück und Schleifband anzeigt, als Referenzpunkt herangezogen werden. Von diesen Punkten aus kann anschließend für jeden Zeitraum zwischen zwei Messzeitpunkten eine Zustellung abgelesen werden. Bei der Auswertung der Daten ist jedoch auffällig, dass es teilweise zu großen Sprüngen kommt, welche eine unrealistische Eindringtiefe im Bereich der größten Korndurchmesser bedeuten würde. Erklärbar ist dieses Verhalten entweder durch einen Fehler in der Messung, oder dadurch, dass das System Walze-Lagerung eine nicht vernachlässigbare Nachgiebigkeit aufweist. Die Zustellung bleibt in dem realen Prozess über längere Zeit konstant, was auch in den Messdaten ersichtlich ist. Ein mögliches elastisches oder durch Gravitation induziertes Verhalten könnte dafür sorgen, dass es für den Schleifprozess zu keinem sprunghaften Zustellverhalten kommt, sondern der Schleifdruck vergleichsweise konstant gehalten wird. Mit den vorliegenden Daten ist es jedoch nicht möglich, ein solches Verhalten eindeutig zu identifizieren und zu quantifizieren, weshalb die gemessenen Zustelldaten nicht direkt in der Simulation verwendet werden können.

Als alternative Datenquelle können Messungen der Stahlbanddicke mithilfe einer Ultraschall-Dickenmessung herangezogen werden. Diese werden während des Schleifprozesses regelmäßig durchgeführt, um die Kundenspezifikationen erfüllen zu können. Auch im Zuge der Testmessungen wurden diese Dicken an jedem Messzeitpunkt im Zuge des Stillstandes durchgeführt und dokumentiert. Dieses Verfahren misst die Dicke von den Spitzen der Werkstückoberfläche aus. Darüber lässt sich annähernd festmachen, wie stark das Schleifband zugestellt wurde. Dabei ist jedoch zu beachten, dass darin der Schleifbandverschleiß nicht enthalten ist, was besonders zu Beginn des Schleifprozesses wichtig ist, da dort in kurzer Zeit die hohen Spitzen der Schleifkörner abbrechen. Auch sind darin keine elastischen Effekte abgebildet, weshalb auch diese Messungen keine eindeutige Auskunft über das Zustellverhalten geben können. In diesen Daten ist jedoch ersichtlich, dass die Abtragsrate über die Zeit nahezu konstant ist, was die These unterstützt, dass der Schleifdruck trotz der sprunghaften Zustellung nahezu konstant bleibt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse lässt sich argumentieren, dass die Zustellung in der Simulation einer stetigen Funktion folgt. Eine solche Funktion kann frei gewählt

werden. Die Absolutwerte der gemessenen Zustellung lassen auf eine Funktion nach Gleichung (44) schließen, welche zu den Messdaten durch das Least-Square-Verfahren parametrisiert wird. Diese Funktion wird bei jedem Schleifdurchgang ausgewertet und gibt die Zustellung δ des Schleifbandes relativ zu dem ersten Berührungspunkt des Schleifbandes mit dem Werkstück an. a, b sind die zu bestimmenden Parameter und t ist die Schleifzeit. Auch ist zu erkennen, dass die Dickenmessungen die gemessenen Zustelldaten bis auf einen Versatz zu Beginn, im Mittel, gut beschreiben. Deshalb werden diese Daten zur Parametrisierung der Zustellfunktion verwendet.

$$\delta = \sqrt{\frac{t}{a}} + b * t \quad (44)$$

δ ... absolute Zustellung

t ... Schleifzeit

a, b ... Parameter

Die so erhaltene Zustellfunktion gibt näherungsweise die absolute Zustellung an. Als zusätzliche Information während der Simulation wird auch die simulierte Dicke mit der real gemessenen Dicke nach jedem Schliffdurchgang verglichen. Auf Basis dieser Differenz wird die Zustellfunktion korrigiert. Dadurch ist es möglich, einen Verlauf der Zustellungen zu finden, welcher den Dickenverlauf des Werkstücks bestmöglich nachbildet.

7 Ergebnisse

In Kapitel 6 werden die implementierten Methoden der kinematischen Simulation beschreiben und anhand von Codeausschnitten dargestellt. Nun soll auf dieser Basis eine Parameterkonfiguration gefunden werden, welche die Messwerte des realen Prozesses so gut als möglich nachbildet. Dazu werden in Abschnitt 7.1 zuerst die gemessenen Werte dargestellt und diskutiert. Abschnitt 7.2 beinhaltet anschließend den Vergleich von simulierten Ergebnissen zu den gemessenen Rauheitswerten und der Dickenmessung.

7.1 Gemessene Werte

Das Ziel ist eine kinematische Simulation, welche die Realität ausreichend genau widerspiegeln kann. Die zentralen Größen sind dabei die Rauheitswerte R_z und R_a . Um die Einflüsse der Parameter richtig interpretieren zu können, ist es wichtig, die Messwerte zu verstehen. Daher wird in Abschnitt 7.1.1 die bereits vereinfachte gemessene Zustellung dargestellt. Abschnitt 7.1.2 zeigt die Dickenmessungen über die Zeit. In Abschnitt 7.1.3 sind ausgewählte Schleifbandoberflächen, deren Verteilungsparameter sowie deren Repräsentation in der Simulation angeführt. Abschließend behandelt Abschnitt 7.1.4 die Rauheitswerte der gemessenen Werkstückoberflächen, welche als Zielgrößen der Simulation dienen.

7.1.1 Zustellung

Die gemessenen Zustellungen liegen in einer Zeitreihe mit einer Abtastrate von 4800Hz vor. Entsprechend groß sind auch die Dateien, welche jeweils eine Periode zwischen den Messzeitpunkten abdecken. Die Zustellung wird vom Maschinenführer jedoch nur selten verändert und diese ist daher über längere Perioden konstant, was sich auch in den Messungen widerspiegelt. Daher können die Messwerte dadurch vereinfacht werden, dass nur die diskreten Punkte, welche anschließend konstant bleiben, herangezogen werden. Diese Punkte sind in Abb. 19 dargestellt und sollen als diskret betrachtet werden. Die strichlierte Linie ist dabei nur zur besseren Sichtbarkeit der Zusammenhänge eingeblendet und stellt keinen tatsächlichen Verlauf dar. Als Nullpunkt dient jener Punkt, an dem die Schleifleistung erstmals einen Ausschlag anzeigt. Es ist erkennbar, dass zu Beginn die Zustellung stark zunimmt, was dadurch erklärt werden kann, dass hier die sehr hohen Spitzen am Schleifband abbrechen und daher vom ersten Kontakt bis hin zu einem kontinuierlicheren Verschleiß verstärkt zugestellt werden muss. Folgend lässt sich global eine lineare Tendenz erkennen, mit der Ausnahme zwischen vier und sechs Stunden, wo die Ausreißer nach oben nicht eindeutig erklärbar sind. Dabei kann jedoch ein Fehler im Messaufbau ausgeschlossen werden, da die folgenden Messwerte wieder plausibel sind und in der Zwischenzeit keine Änderungen am Messaufbau vorgenommen

wurden. Ein möglicher Erklärungsansatz besteht darin, dass auf der Seite mit der Wegmessung stärker zugestellt wurde. Ein daraus resultierendes unterschiedliches Dickenprofil über die Stahlbandbreite kann zeitweise erkannt werden, was diese These unterstützt.

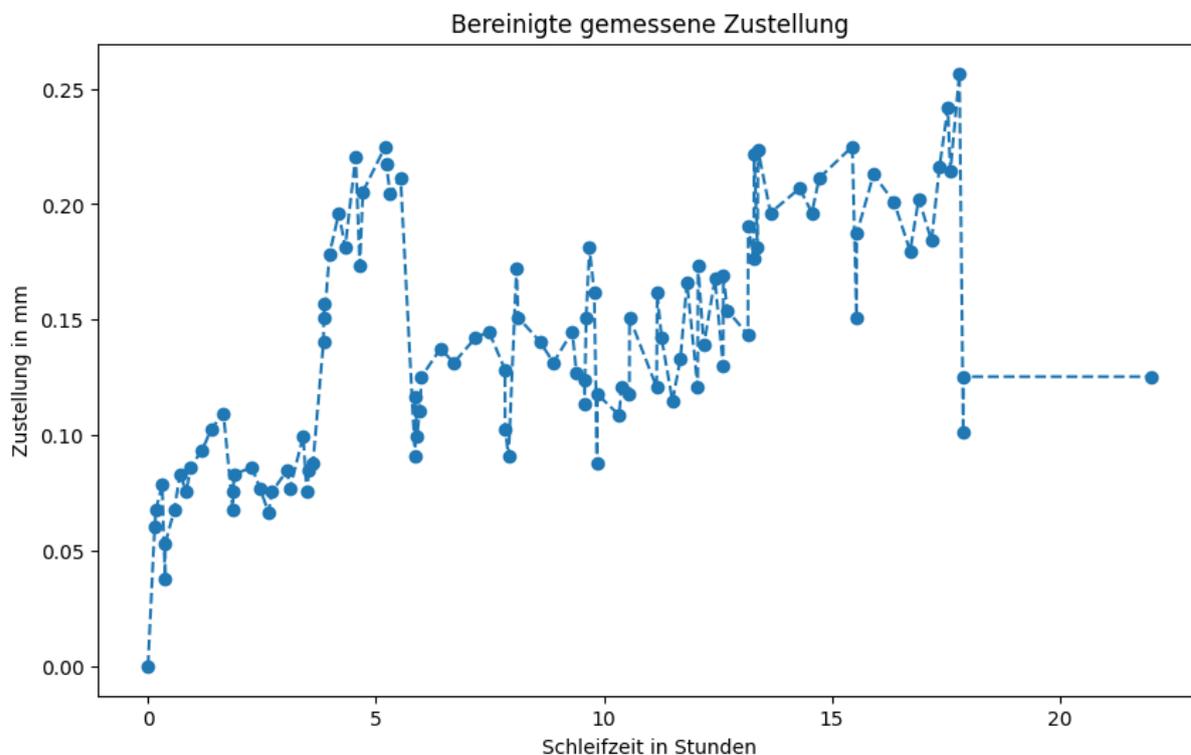


Abb. 19: Gemessene Zustellung aus dem realen Prozess

7.1.2 Ultraschall-Dickenmessung

Die Dicke des Werkstückes wurde zu jedem Messzeitpunkt nach Tab. 2 mithilfe eines Ultraschall-Dickenmessgerätes ermittelt. Daraus lässt sich die abgeschliffene Dicke berechnen. Diese ist in Abb. 20 ersichtlich und es ist erkennbar, dass die Materialabnahme nahezu konstant über die gesamte Schliffzeit ist. Einzig zu Beginn ist die Abnahmerate etwas geringer, was sich dadurch erklären lässt, dass zuvor eine gewalzte Oberfläche vorliegt und es daher mehr Schleifkörner im Eingriff benötigt, um auch die letzten Spitzen der Oberfläche zu entfernen. Auch nimmt die Abnahmerate ab etwa 15 Stunden ab, was durch das starke Verkleben der Kornzwischenräume ab diesem Zeitpunkt erklärt werden kann. Durch die Späne in den Zwischenräumen können neue Späne nicht mehr so gut abtransportiert werden. Dadurch verändern sich die Schnittkräfte und die Eindringtiefen sinken.

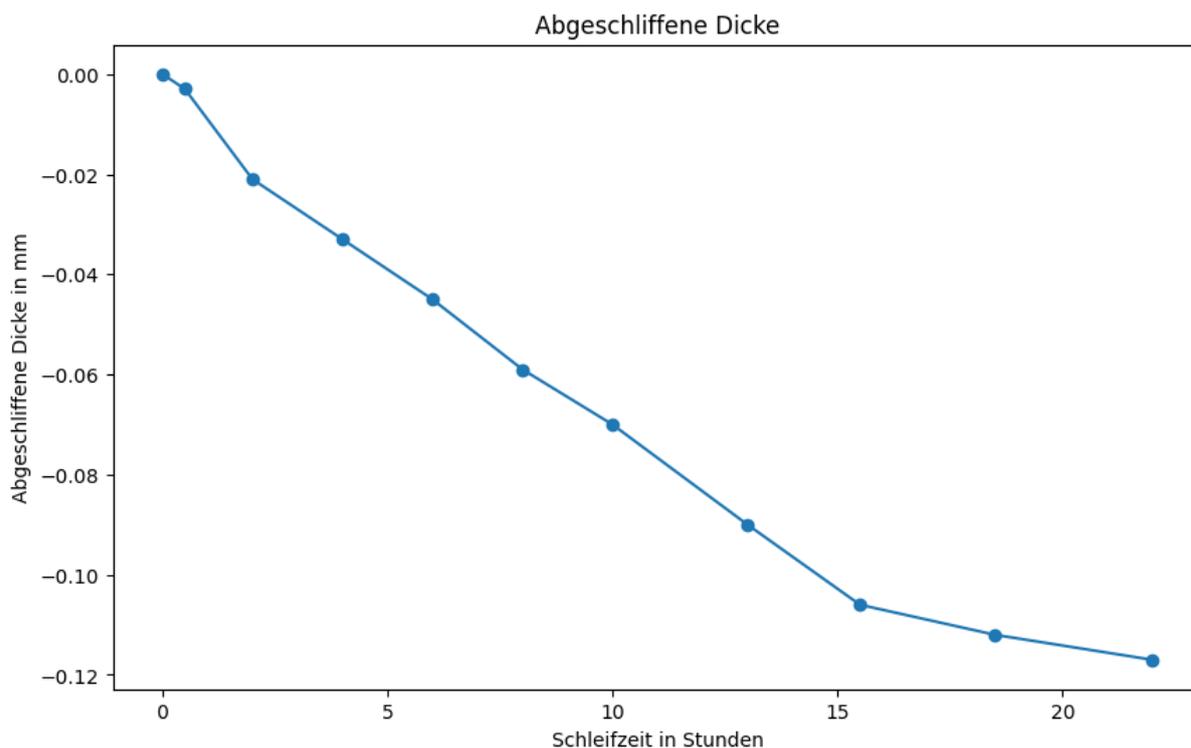


Abb. 20: Abgeschliffene Dicke aus dem realen Prozess

7.1.3 Schleifbandoberfläche

Die vermessenen Schleifbandoberflächen sollen vorwiegend Informationen über den Verschleiß mit fortlaufender Schleifzeit liefern. Dafür wurden, wie in 4.3 und 4.4 erläutert, zwei Methoden zur Vermessung herangezogen. Zum einen wurde das Schleifband direkt mithilfe eines Alicona Edgemaster optisch vermessen. Außerdem wurden Abformungen mit einer Abformmasse erstellt, die später im Labor vermessen wurden. Mit beiden Methoden wurde jeweils die mit Ethanol gereinigte und gespülte Schleifbandoberfläche vermessen, als auch jene mit allen Verschmutzungen in den Kornzwischenräumen.

Als erstes wichtiges Resultat dieser Messungen werden die Standardabweichungen der Höhenwerte in Abb. 21 dargestellt. Darin ist sehr gut der Vergleich zwischen gereinigten und verschmutzten Flächen sowie zwischen den Vermessungsmethoden ersichtlich. Zu Beginn der Schleifzeit bis etwa 15 Stunden zeigen alle Messungen einen ähnlichen Verlauf. Zwischen 0 Stunden und 6 Stunden wurde ausschließlich unter Zusatz von Petroleum geschliffen und ab 6 Stunden kommt als Schleifzusatz ein Petroleum/Schleiföl Gemisch zum Einsatz. Das zugesetzte Schleiföl begünstigt die Ablagerung von Spänen und Verschleißpartikel in den Kornzwischenräumen. Das führt anfänglich unter Verwendung einer geringen Menge an Schleifzusatz noch zu keinen Abweichungen in der Standardabweichung. Nach den Messungen bei 15,5 Stunden wird eine größere Menge an Schleifzusatz verwendet, mit dem Resultat, dass sich das Schleifband zu verkleben beginnt. Das ist auch in Abb. 21 ersichtlich, indem die

Messungen der gereinigten Oberflächen nahezu konstant bleiben und jene der verschmutzten Flächen stark abweichen. Auffällig ist dabei, dass nur die Standardabweichung der direkt vermessenen Oberfläche, wie erwartet, absinkt und jene der Abformungen ansteigen. Dieses Verhalten lässt sich jedoch dadurch erklären, dass mit der Abformmasse die Verschmutzungen zwar vom Schleifband abgenommen werden, diese jedoch nicht stark genug gebunden sind und es daher zu zusätzlichen Verformungen der Verschmutzungen kommt. Auch trocknet das abgenommene Späne/Partikel Gemisch aus und die Bindung geht teilweise verloren, dadurch können Teile der abgenommenen Verschmutzung von der Abformung abfallen und verfälschen auch die spätere Vermessung.

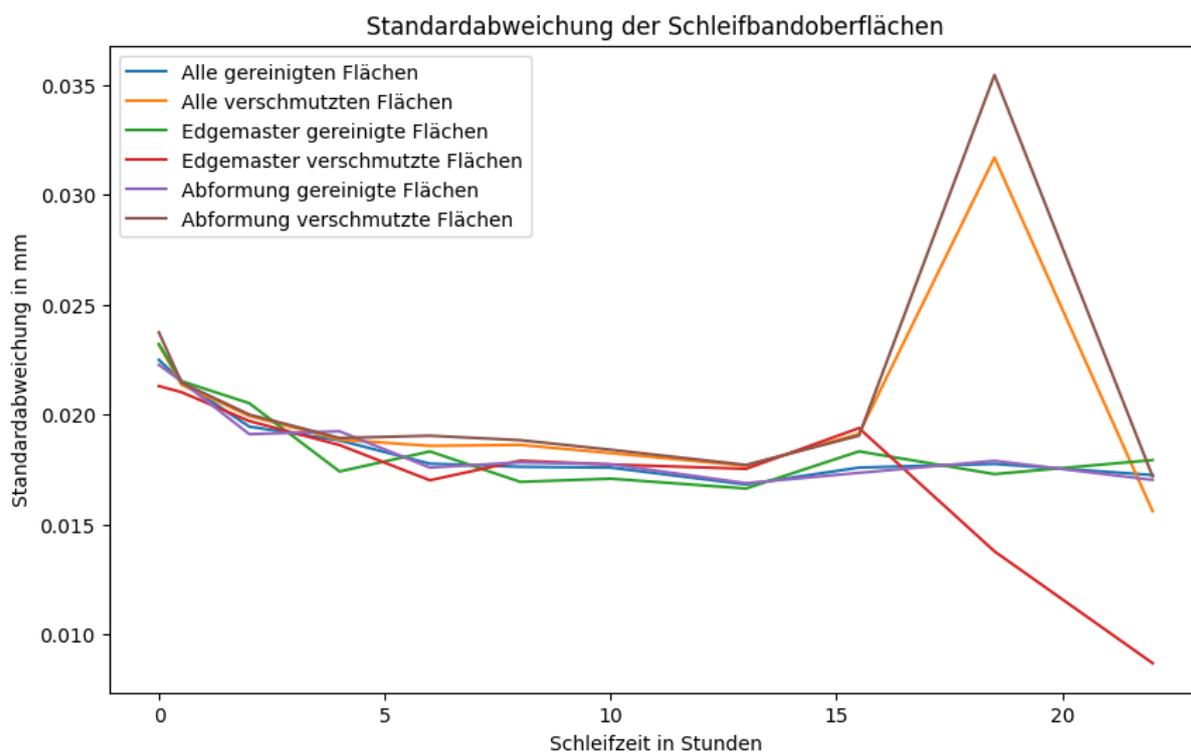


Abb. 21: Standardabweichung der gemessenen Schleifbandoberflächen

Als nächster statistischer Verteilungsparameter wird die Skewness der Schleifbandhöhendaten in Abb. 22 angeführt. Diese gibt Auskunft darüber, ob die größte Anzahl an Punkten über oder unterhalb des Mittelwertes liegen. Eine Skewness von Null entspricht daher einer Normalverteilung und gibt an, dass die größte Anzahl an Punkten nahe am Mittelwert liegen. Diese Information lässt sich in diesem Fall derart interpretieren, ob die Täler beziehungsweise die Kornspitzen einen größeren Anteil der Fläche einnehmen. Aus Abb. 22 ist ersichtlich, dass zu Beginn eine stark positive Skewness vorliegt. Das kommt daher, dass hier stark ausgeprägte Kornspitzen existieren und daher der Mittelwert der Höhendaten auch entsprechend nach oben verschoben ist. Das führt zu einer größeren Fläche unterhalb des

Mittelwertes. Dieser Effekt stabilisiert sich jedoch sehr schnell, da diese ausgeprägten Kornspitzen zu Schleifbeginn sehr schnell verschleifen und abbrechen. Dadurch stabilisiert sich der Mittelwert und die Skewness der gereinigten Flächen bleiben im Bereich zwischen 0,25 und 0,5 konstant. Das bedeutet jedoch auch, dass die Körner im eingeschliffenen Zustand tendenziell einen geringeren Flächenanteil einnehmen als die Kornzwischenräume. Im Hinblick auf die verschmutzten Flächen ist eine Abweichung wiederum speziell ab 15,5 Stunden ersichtlich. Die Skewness der verschmutzten Abformungen verändert sich auch bereits ab 6 Stunden, was sich vermutlich auf erste abgenommene Späne zurückführen lässt. Bei dieser Betrachtung ist jedoch auch die geringe beobachtete Fläche zu beachten, was zu einer entsprechend geringen Aussagekraft speziell in Hinsicht auf Parameter höherer Momente, wie der Skewness und der Kurtosis, führen kann.

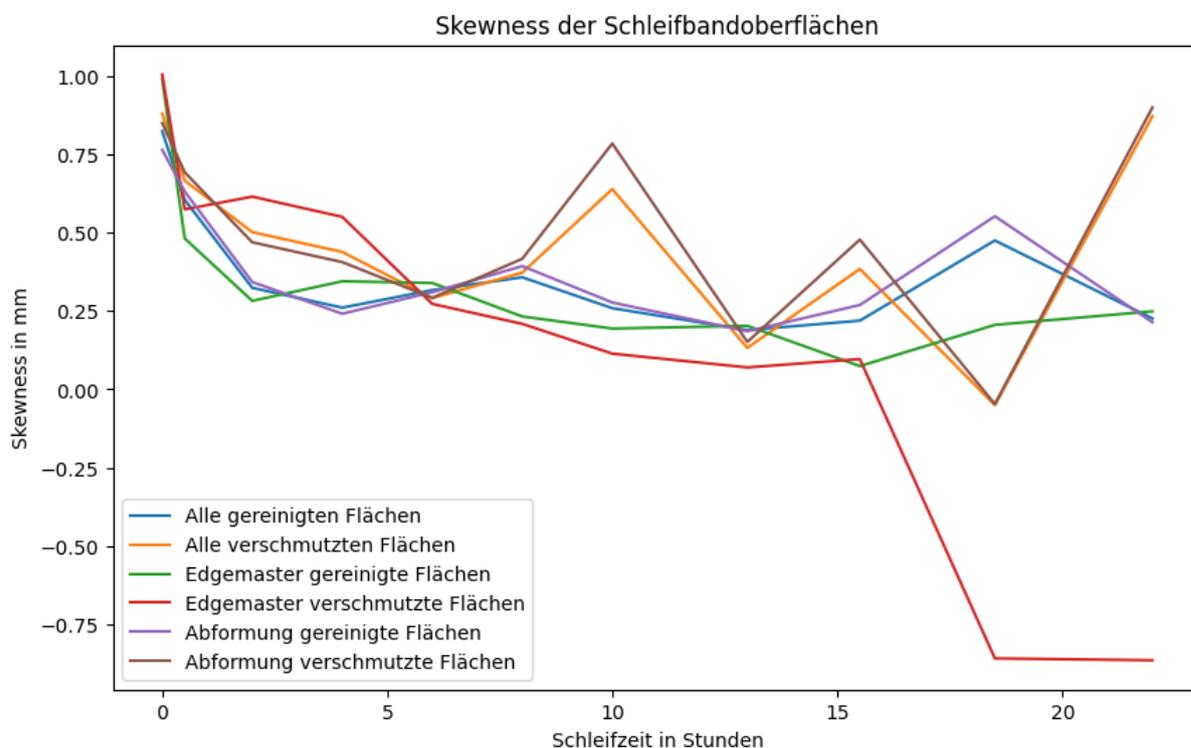


Abb. 22: Skewness der gemessenen Schleifbandoberflächen

Der letzte beschreibende Verteilungsparameter der Schleifbandoberflächen ist die Kurtosis. Auch hier werden in Abb. 23 die direkte Vermessung, die Abformung und die Kombination aus allen Daten, der verschmutzten und gereinigten Oberflächen gegenübergestellt. Die Kurtosis gibt allgemein Auskunft über die Menge an Ausreißern im Vergleich zu einer Normalverteilung. Eine Kurtosis von Drei entspricht hierbei einer Normalverteilung, ein Wert größer als Drei zeigt eine höhere Anzahl an Extremwerten an und ein Wert kleiner als Drei, im Umkehrschluss, eine niedrigere Anzahl an Ausreißern. In Abb. 23 lässt sich hier wieder der starke Abfall der Kurtosis zu Beginn

identifizieren. Dieser ist auf das Abbrechen und Verschleiß der ausgeprägten Kornspitzen zurückzuführen. Nach diesem Einschleifvorgang ist die Kurtosis konstant im Bereich der Normalverteilung. Die verschmutzten Flächen zeigen ab 15,5 Stunden einen Anstieg, was darauf hindeutet, dass die Späne viele scharfe Spitzen auf die Schleifbandoberfläche bringen. Auch hier ist wieder zu beachten, dass die Stichprobe sehr klein ist und daher die Aussagekraft auch entsprechend gemindert ist.

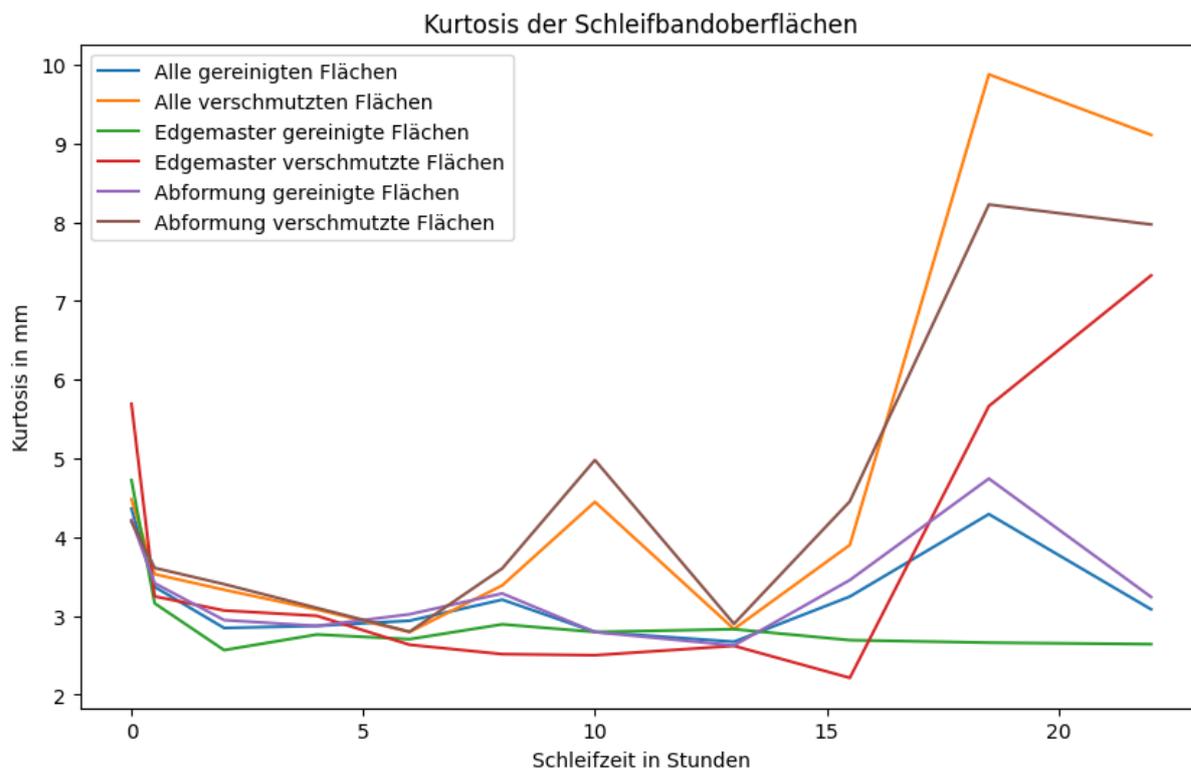


Abb. 23: Kurtosis der gemessenen Schleifbandoberflächen

In Abb. 21 sind die verschiedenen gemessenen Standardabweichungen gegenübergestellt. Die Zielsetzung ist es nun, eine Größe zu finden, die den tatsächlichen Verschleiß des Schleifbandes abbildet und parametrisiert. Dazu bieten sich die Messungen der Schleifbandoberfläche mithilfe des Alicona Edgemaster besonders gut an, da diese die stabilsten und plausibelsten Werte liefern. Außerdem sind die gereinigten Oberflächen größtenteils frei von Einflüssen der Späne und Verschleißpartikel, weshalb die Standardabweichungen der gereinigten Flächen durch direkte Vermessung als beschreibende Größe für den Verschleiß herangezogen werden kann. Die Standardabweichung an sich eignet sich vor allem für die Verschleißparametrisierung, da diese durch Skalierung der Höhendaten angepasst werden kann. Diese Werte sind nun zur besseren graphischen Darstellung erneut in Abb. 24 dargestellt. Darin ist der ausgeprägte Verschleiß zu Beginn durch das Abbrechen der scharfen Kornspitzen eindeutig ersichtlich. Dieser Effekt klingt bis etwa 5 Schleifstunden ab und erreicht anschließend einen nahezu stationären Zustand. In

diesem verändert sich die Form der Körner nicht mehr durch Ausbrüche, sondern es tritt vor allem Verschleiß durch Abrasion auf. Ab 15,5 Stunden kann ein leichter Anstieg der Standardabweichung festgestellt werden, was sich auf aus der Matrix ausbrechende Körner zurückführen lässt. Diese hinterlassen eine tiefe Mulde, welche die Standardabweichung leicht steigen lässt.

Für die Simulation ist es von Vorteil, statistische Schwankungen nicht direkt zu übersetzen. Daher werden die ermittelten Standardabweichungen nicht direkt verwendet, sondern es wird eine Verschleißfunktion der Form einer abklingenden Exponentialfunktion, durch lineare Regression, bestimmt. Diese ist auch in Abb. 24 dargestellt und liegt in analytischer Form vor, weshalb diese auch an jeder Stelle ohne Interpolation ausgewertet werden kann.

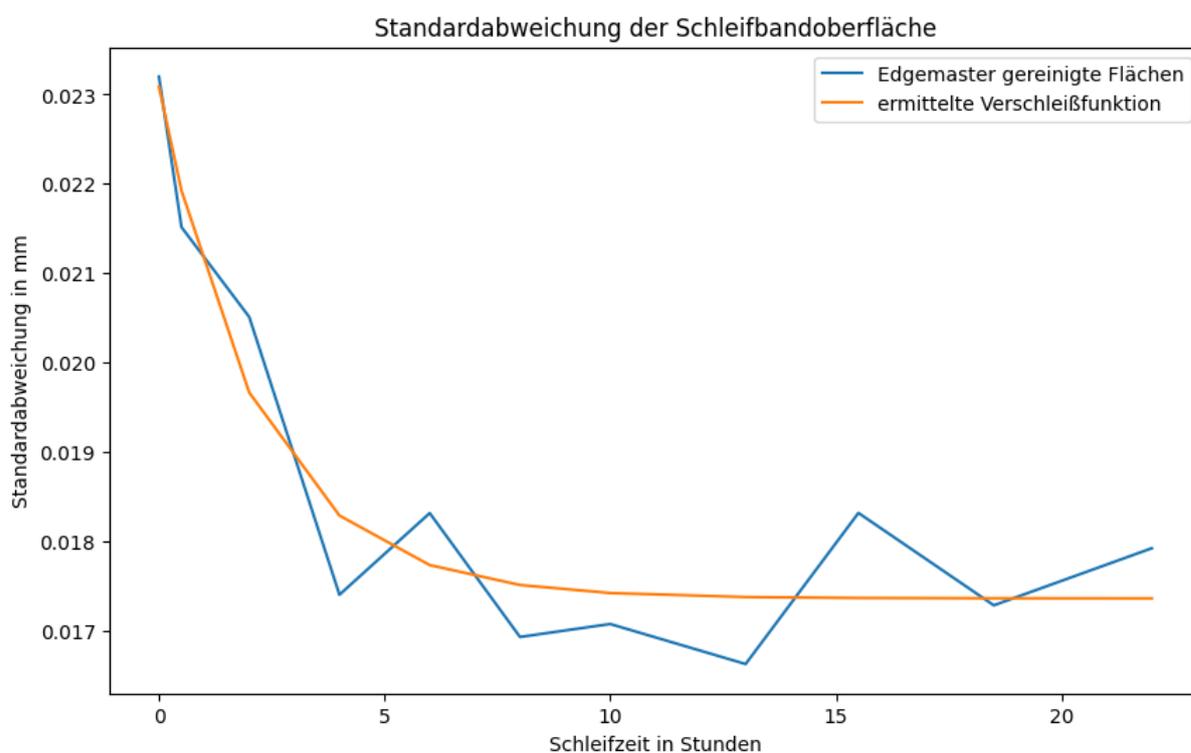


Abb. 24: Standardabweichung und Verschleißfunktion über die Zeit

Für die Erzeugung von neuen Schleifbandoberflächen nach der Methode beschrieben in 5.4 ist es notwendig, die Skewness und Kurtosis für jeden zu berechnenden Filter festzulegen. Der Filter bestimmt die Form der Eingangsverteilung und diese wird mittels Johnson-Transformation ermittelt. Dabei stellen jedoch sehr große Kurtosiswerte ein Problem dar und es gilt entsprechend [18] die Einschränkung, dass die Kurtosis dieser Verteilung maximal gleich der quadrierten Skewness nachgebildet werden kann. Die Kurtosis wird mit Ausnahme der initialen Oberfläche gleich Drei gesetzt und entspricht dementsprechend einer normalverteilten Oberfläche. Die

Skewness müsste entsprechend zu 0,25 mm gesetzt werden, um der Realität zu entsprechen. Das ist jedoch in dieser Kombination durch die oben genannte Einschränkung nicht möglich, da eine kleine Abweichung vom Wert einer Normalverteilung durch den Filter zu sehr großen Verzerrungen der Eingangsverteilung führt. Um dieses Problem zu umgehen, muss sichergestellt werden, dass diese Grenze nicht erreicht wird. Das wird dadurch realisiert, dass die Skewnesswerte, wenn notwendig, auf den maximal möglichen Wert reduziert werden. Dadurch wird die Kurtosis noch immer bestmöglich nachgebildet und die Skewness nimmt einen mehr oder weniger falschen Wert an. Dieser Fehler wird jedoch als weniger kritisch betrachtet, da in der Simulation nur die hohen Kornspitzen in Eingriff kommen können und daher die genauere Ausgestaltung der Werte unterhalb des Mittelwertes nur sehr wenig Einfluss auf das Resultat ausübt. In diesem Hinblick hat die Kurtosis einen stärkeren Einfluss auf das Simulationsergebnis, da diese genau jene Extremwerte beschreibt, welche auch tatsächlich für die Modellierung des Korneingriffs relevant sind. Daher ist bei diesem Vorgehen damit zu rechnen, dass zwar die Kornzwischenräume nicht immer perfekt nachgebildet werden können, jedoch die modellierten Kornspitzen möglichst nahe die Realität darstellen.

Um einen Einblick in den Ablauf der Reparatur der gemessenen Schleifbandoberflächen, nach 5.2, zu geben, sind in Abb. 25 als Beispiel die direkt vermessenen Höhendaten aus Position 1 (gesäubert) dargestellt. Es ist ersichtlich, dass einige Datenpunkte fehlen. Diese fehlerhaften Punkte können entweder durch Hinterschnitte entstehen oder aber bei der Aufnahme dieses Punktes war das System unter einem zu großen Schwingungseinfluss, was ebenfalls zu ungültigen Messungen führen kann. Auch ist erkennbar, dass die optische Linse nicht exakt parallel zu dem Schleifband positioniert werden konnte und dadurch eine generelle Schiefelage der Erhebungen im Raum entsteht.

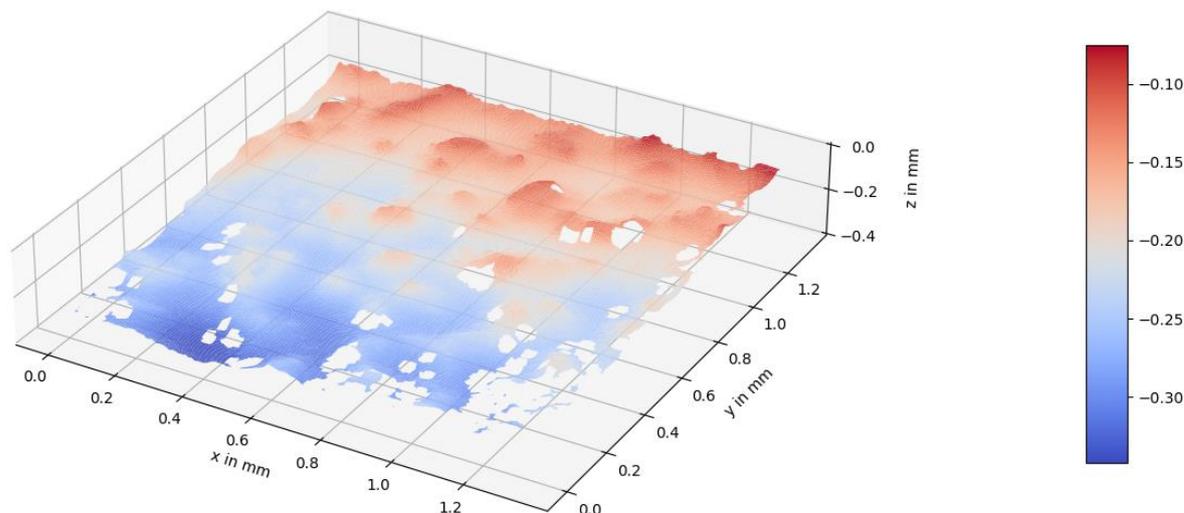


Abb. 25: Originalaufnahme der Schleifbandoberfläche nach 0,5 Stunden mittels Alicona Edgemaster

Die in Abb. 25 ersichtlichen Defekte müssen für die Auswertung der Verteilungsparameter und für die Berechnung des Filters für das Generieren von neuen Oberflächen behoben werden. Dazu wird der Reparaturalgorithmus aus Abschnitt 5.2 verwendet. Das Resultat für die gleiche Oberfläche, verglichen zu Abb. 25, ist in Abb. 26 dargestellt. Bei genauerer Betrachtung sind dieselben Körner erkennbar und die Fläche wurde in die x-y-Ebene gedreht. Dieses Verfahren (siehe Abschnitt 5.2) wird auf jede Messung der Schleifbandoberfläche angewendet und liefert stabil plausible Ergebnisse.

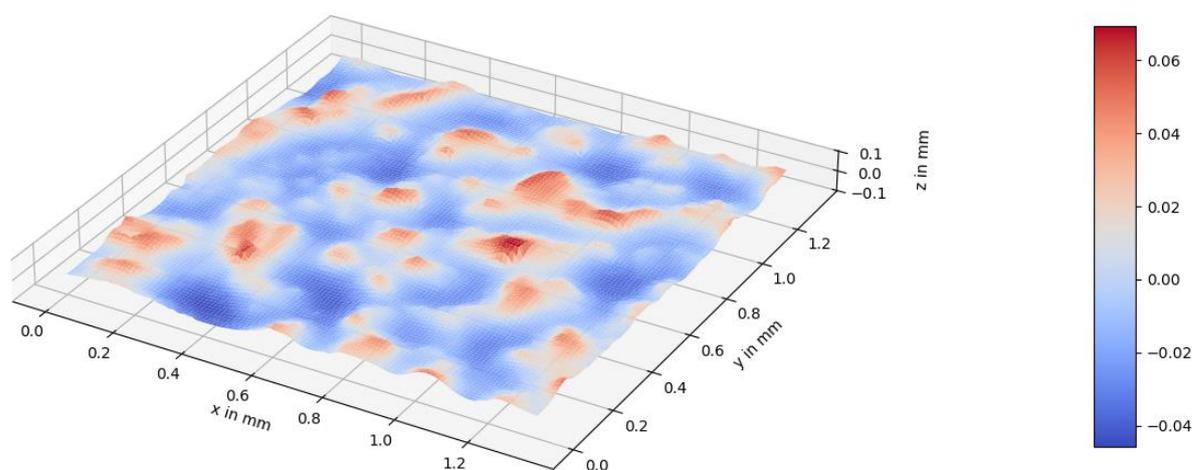


Abb. 26: Aufbereitetes Datenmodell zur Schleifbandoberfläche nach 0,5 Stunden aus Abb. 25

7.1.4 Werkstückoberfläche

Die zentrale Größe, welche simuliert werden soll, ist die Oberflächenrauheit der geschliffenen Oberfläche. Dazu werden die gemittelte Rautiefe Rz und die Mittenrauheit Ra (siehe Abschnitt 5.5) herangezogen. Ähnlich den Messungen der Schleifbandoberfläche wurden auch für die Messung der Oberflächenrauheiten am realen Prozess zwei verschiedene Methoden angewendet. Zum einen wurde ein tastendes Rauheitsmessgerät verwendet, welches auch im Standardprozess seine Anwendung findet. Weiters wurden auch Abformungen abgenommen, welche später im Labor vermessen wurden. Die Definition der Rauheitswerte ist in diesem Fall nur durch eine Messstrecke normal zur Schleifrichtung sinnvoll, da in Schleifrichtung einzelne Riefen verlaufen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abb. 27 zusammengefasst. Die Werkstückoberfläche ist in der Ausgangsform eine Walzoberfläche, welche geringe Rauheitswerte aufweist. Durch den Eingriff der nicht verschlissenen Kornspitzen hinterlassen diese tiefe Riefen, welche die Oberflächenrauheit stark ansteigen lassen. Diese Spitzen des Schleifbelags brechen jedoch schnell aus und es kommen mehrere Körner mit ähnlicher Höhe in Eingriff, was die Oberflächenrauheit verbessert. Auffällig ist neben dem Verlauf, der generell plausibel erscheint, dass das Maximum der per Abformung gewonnenen Rauheitsdaten einen Messzeitpunkt später auftritt als jenes der mit dem Rauheitsmessgerät aufgenommenen Daten. Anschließend entwickeln sich die Verläufe ähnlich, jedoch bleiben die Rauheitswerte der Abformungen stets über den direkt gemessenen. Ein möglicher Grund dafür könnte in dem tastenden Verfahren liegen, denn dieses ermittelt die Höhendaten der Messstrecke mithilfe einer Nadel, die über die Oberfläche gezogen wird. Die tiefsten Riefen, welche speziell für den Rz-Wert ausschlaggebend sind, laufen oft sehr spitz zusammen. In einem derartigen Fall kann es passieren, dass der Spitzendurchmesser der Tastnadel zu groß ist und daher nicht die ganze Riefe aufgelöst werden kann. Die große Differenz zu Schleifbeginn ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Messungen durch das Rauheitsmessgerät ein Mittel über die Stahlbandbreite repräsentieren. Die Abformungen wurden im Gegensatz nur an einer Stelle in Breitenrichtung durchgeführt. Das kann dazu führen, dass einzelne tiefe Riefen, welche die anfängliche Schleifoberfläche dominieren, nicht erkannt werden, wodurch die niedrigen Rauheitswerte der Abformungen erklärbar sind.

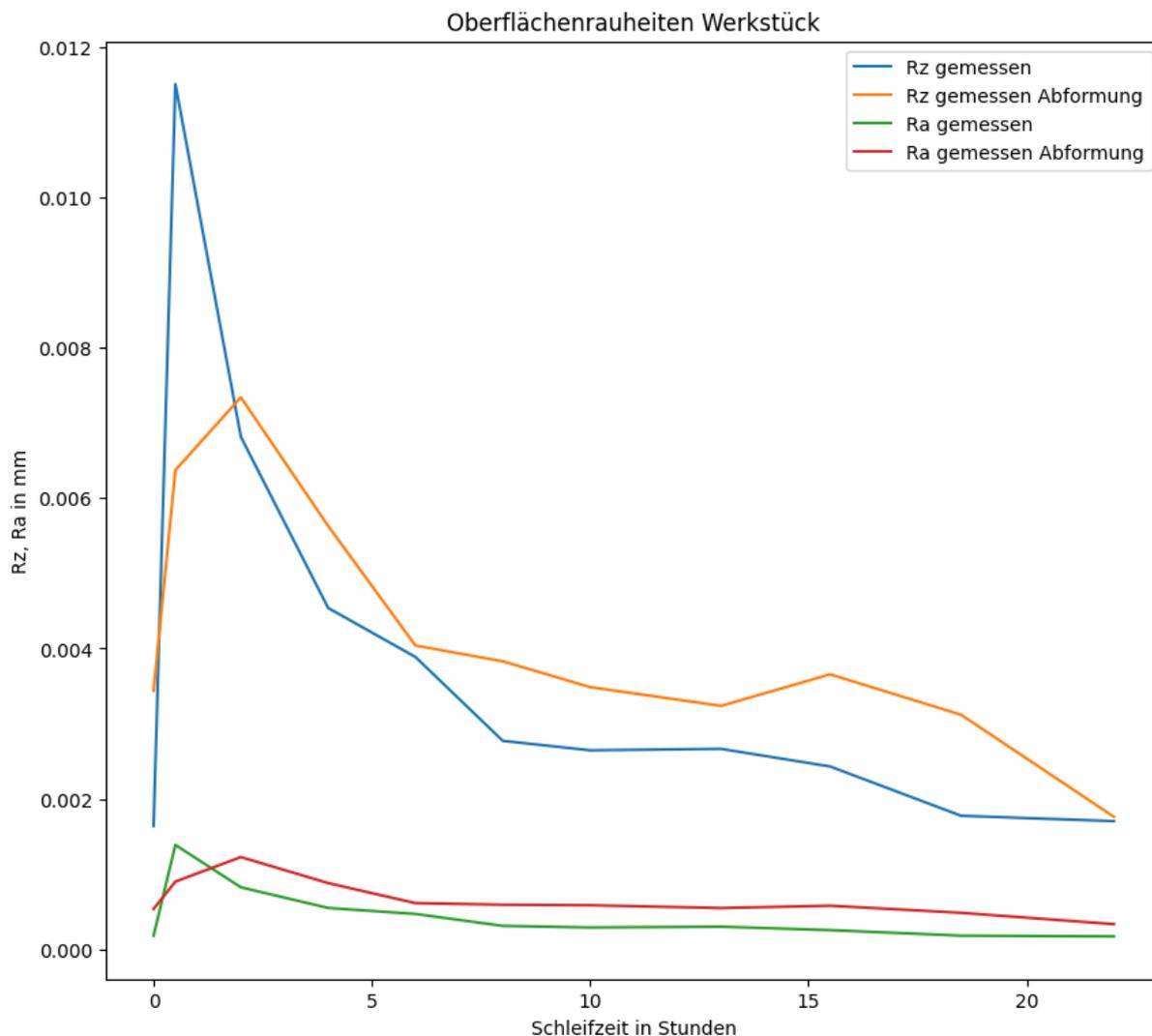


Abb. 27: Gemessene Rz und Ra Rauheitswerte des Werkstücks

7.2 Simulierte Oberflächen

In Abschnitt 7.1 wurden die gemessenen Größen vom realen Prozess angeführt und besprochen. Nun ist es das Ziel, die Simulation derart zu parametrieren, damit diese möglichst realitätsnahe Ergebnisse liefert. Dazu werden in Abschnitt 7.2.1 generierte Schleifbandoberflächen betrachtet und zu deren realen Äquivalenten verglichen. Dadurch kann die prinzipielle Eignung der gewählten Methode aus 5.4 festgestellt werden. Anschließend werden in 7.2.2 einige simulierte Werkstückoberflächen gezeigt und analysiert. Dabei stehen die simulierten Rauheitskennwerte und das zerspannte Volumen im Zentrum der Betrachtungen.

7.2.1 Generierte Schleifbandoberfläche

Die nachgebildeten Schleifbandoberflächen sind die Grundlage der kinematischen Simulation und sollten daher die wichtigsten Charakteristika widerspiegeln. Dazu zählen vor allem die Anzahl der Kornspitzen und die Form der Körner. Um nun einen optischen Vergleich anstellen zu können, ist in Abb. 28 eine Initialmessung des Schleifbandes dargestellt. Hervorzuheben sind die scharfen Kanten und die einzelnen sehr hohen Kornflanken, welche zu Beginn der Schleifbearbeitung eine große Schnitttiefe aufweisen und daher einzelne tiefe Riefen hinterlassen. Genau diese Spitzen brechen jedoch sehr schnell aus und dadurch verlieren gerade diese Körner an Höhe und werden an den Spitze abgerundet. Dieser Effekt ist bereits sehr gut ersichtlich durch den Vergleich von Abb. 28 (0 Stunden) mit Abb. 26 (0,5 Stunden).

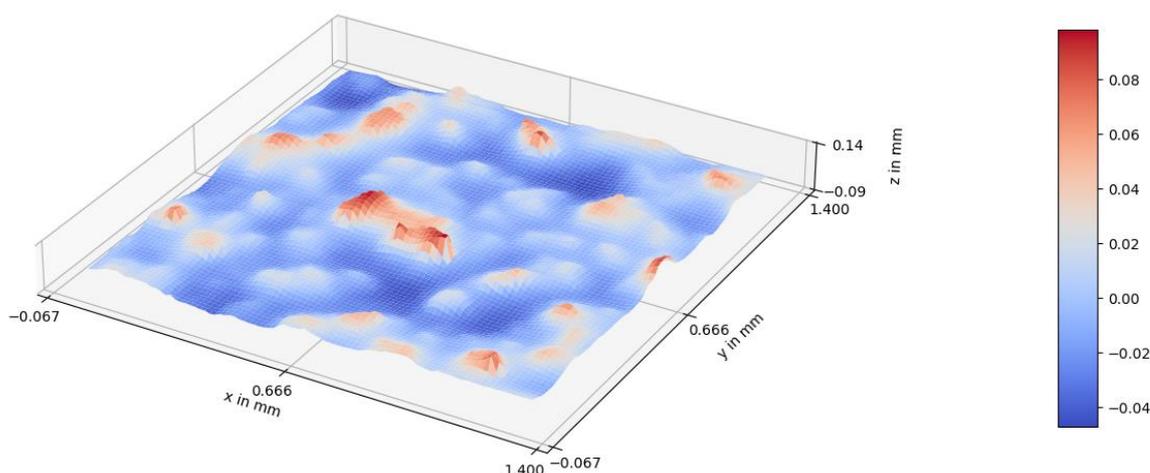


Abb. 28: Initialmessung Schleifband

Abb. 29 zeigt den Ausschnitt eines nachgebildeten Schleifbandes unter Anwendung der Methode nach Patir. Anhand der Skalierung und Einfärbung lässt sich erkennen, dass das prinzipielle Höhenprofil richtig nachgebildet wird. Jedoch erscheinen die einzelnen Körner relativ groß und infolgedessen gibt es auch weniger Tiefpunkte im Vergleich zu der vermessenen Oberfläche. Abb. 30 zeigt eine generierte Oberfläche durch das 2D-Filter-Verfahren. Mit den so erzeugten Filtern lassen sich in den meisten Fällen die geforderten Kurtosis- und Skewnesswerte besser realisieren. Als Resultat daraus ergibt sich eine bessere Nachbildung der Korndurchmesser und auch die Kornzwischenräume werden besser nachgebildet. Aus diesen Gründen werden für die weiteren Simulationen nur mehr die Schleifbandoberflächen nach dem 2D-Filter-Verfahren verwendet. Bei der Betrachtung von Abb. 26 und Abb. 28 ist jedoch auch eine weitere Problematik erkennbar, welche die Aussagekraft einzelner Messungen im Hinblick auf die Streudichte der Körner schwächt. Denn innerhalb der vermessenen

Fläche mit ca. 1,2 mm x 1,2 mm sind meist ca. 10 bis 20 Körner erkennbar und je nach Messung unterscheidet sich daher auch die Schüttdichte deutlich.

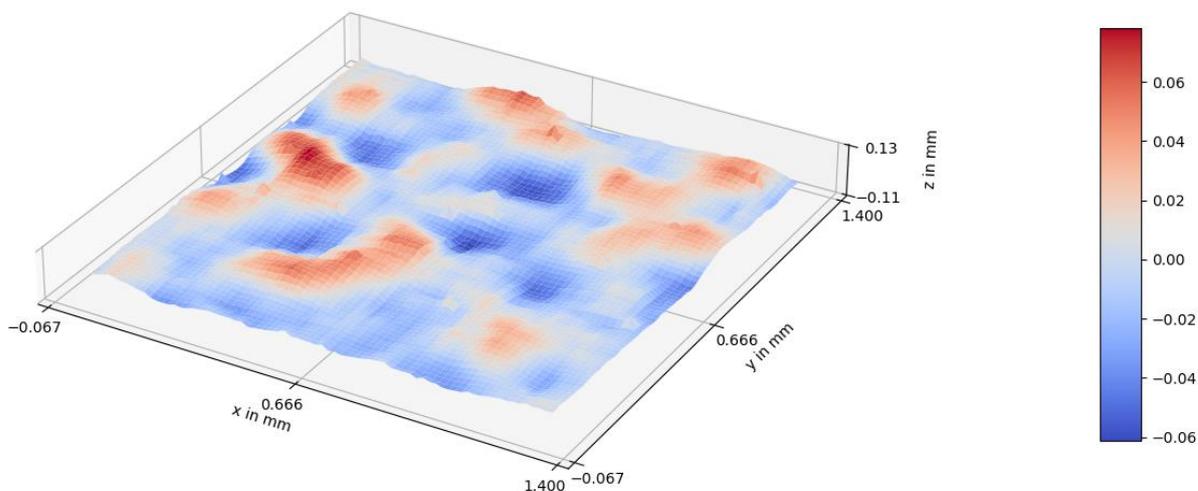


Abb. 29: Nachgebildete Schleifbandoberfläche mittels Patir's Methode

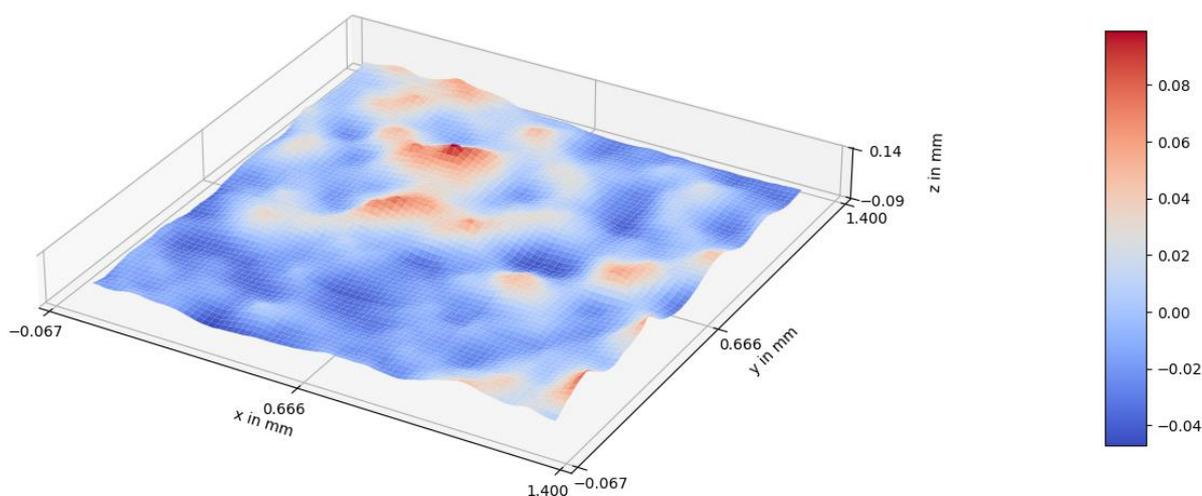


Abb. 30: Nachgebildete Schleifbandoberfläche mittels 2D-Filter-Methode

Bei der Erzeugung der Schleifbandoberflächen mithilfe von statistischen Methoden kommt es auch zu Ausreißern, welche in dieser Form in der Realität nicht auftreten können, da diese meist nur einzelne Punkte sind, welche eine sehr dünne Spitze bilden und daher sofort abbrechen würden. In Abb. 29 und Abb. 30 sind solche Artefakte nicht vorhanden, da diese Oberflächen und daher auch die Anzahl ihrer beschreibenden Punkte klein sind. Bei sehr großen Oberflächen treten diese Ausreißer jedoch häufiger auf, weshalb diese, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, im Modell entfernt werden.

7.2.2 Simulierte Werkstückoberflächen

Das größte Problem beim Simulieren der Werkstückoberflächen stellen die unbekanntem beziehungsweise nur annähernd bekannten Parameter dar. Den größten Einfluss auf die Oberflächenrauheiten haben dabei der Verlauf der Zustellung, sowie der Filterparameter, welcher bestimmt, wie viele Ausreißer der generierten Schleifbandoberfläche entfernt werden. Den stärksten Einfluss auf die abgetragene Dicke hat die Zustellung. Daher wird die Zustellung als zentrale Größe betrachtet und entsprechend wird diese während der Simulation angepasst, sodass das Abtragsverhalten möglichst gut nachgebildet wird. Die restlichen unbekanntem Parameter werden derart gewählt, sodass diese plausibel sind und die Simulation möglichst gute Ergebnisse liefert. Dazu werden folgend auch einige Beispiele angeführt.

Als Basis für die Zustellfunktion dienen die Daten aus den Dickenmessungen. Diese werden mit Ausnahme des Nullpunktes um 0,05 mm angehoben, wodurch sich diese Linie im Mittel gut an die gemessenen Zustellwerte anschmiegt. Der genaue Wert dieser Verschiebung ist auch abhängig von der gewählten Menge an Ausreißern, welche von der Schleifbandoberfläche entfernt werden. Entsprechend dieser Daten wird die Zustellfunktion entsprechend Gleichung (44) berechnet. Zum Vergleich sind diese Daten in der folgenden Abb. 31 dargestellt und diese Zustellfunktion wird für alle folgenden Simulationen verwendet. Die Filterparameter der generierten Schleifbandoberflächen werden mit 0,2% der Punkte, für die Fläche bei 0 Stunden, 0,1% für jene bei 0,5 Stunden und 0,01% für die restlichen Schleifbandoberflächen gewählt. Der höhere Wert bei den anfänglichen Flächen wird benötigt, da diese noch eine spitzere Struktur aufweisen und daher eine höhere Anzahl an Ausreißern beinhalten.

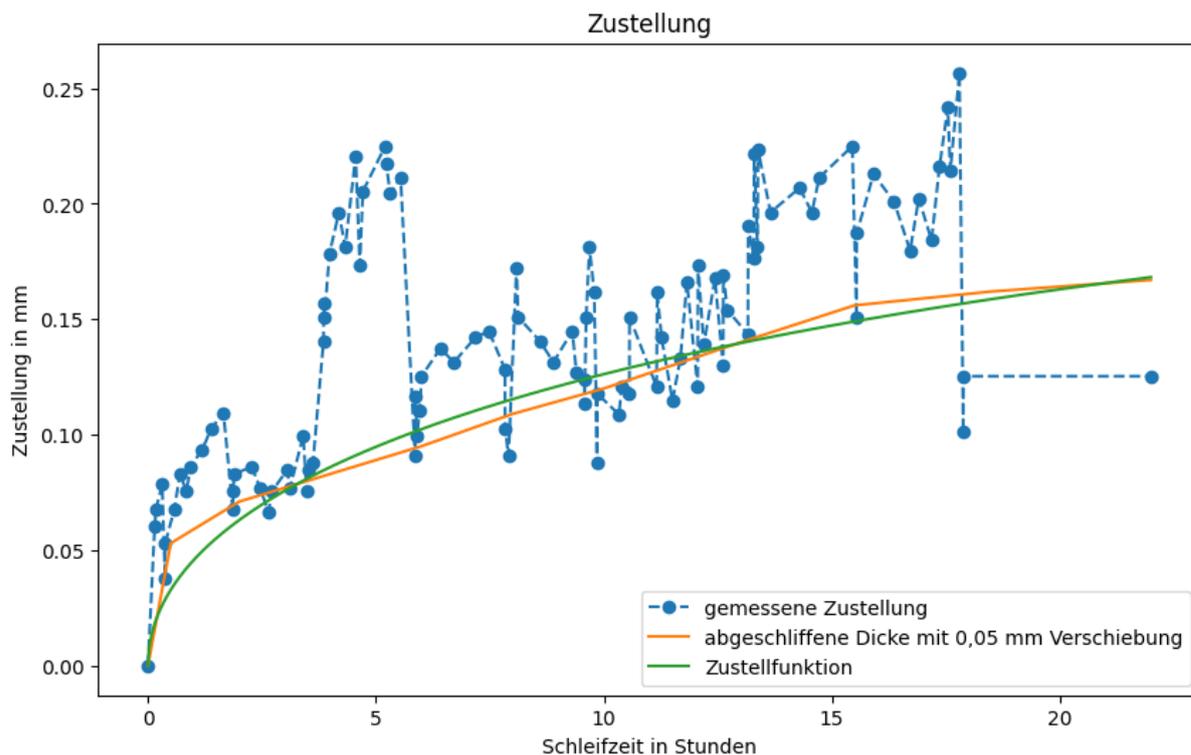


Abb. 31: Entwicklung der Zustellfunktion

Auf dieser Basis werden nun einige Simulationen durchgeführt, um eine geeignete Parameterkonfiguration zu finden. Das beste Ergebnis konnte hierbei mit $C_W = 0,023$ für die elastische Verformung in Gleichung (38) und $\beta = 0,95$ für die plastische Verdrängung in Gleichung (39) erreicht werden. Die Ergebnisse dieser Simulation sind folgend angeführt. Abb. 32 zeigt den Vergleich zwischen der analytischen Zustellfunktion und der während der Simulation tatsächlich verwendeten Zustellung. Der Unterschied entspricht den Differenzen zwischen der gemessenen abgeschliffenen Dicke und jener, die in der Simulation berechnet wird. Dadurch wird diesen Abweichungen entgegengewirkt und der Fehler in der zerspannten Werkstückdicke wird verringert. Der Vergleich zwischen genau diesen Dicken ist in Abb. 33 dargestellt. Bis zum Punkt nach 2 Stunden Schleifzeit ist der Fehler sehr gering. Anschließend nimmt die Simulation etwas mehr Material ab, als dies beim realen Versuch gemessen wurde. Der Fehler wird bis etwa 12 Stunden wieder geringer und überschießt anschließend in die entgegengesetzte Richtung. Bis die abgetragene Dicke nach 22 Stunden wieder sehr gut mit den Messungen übereinstimmt.

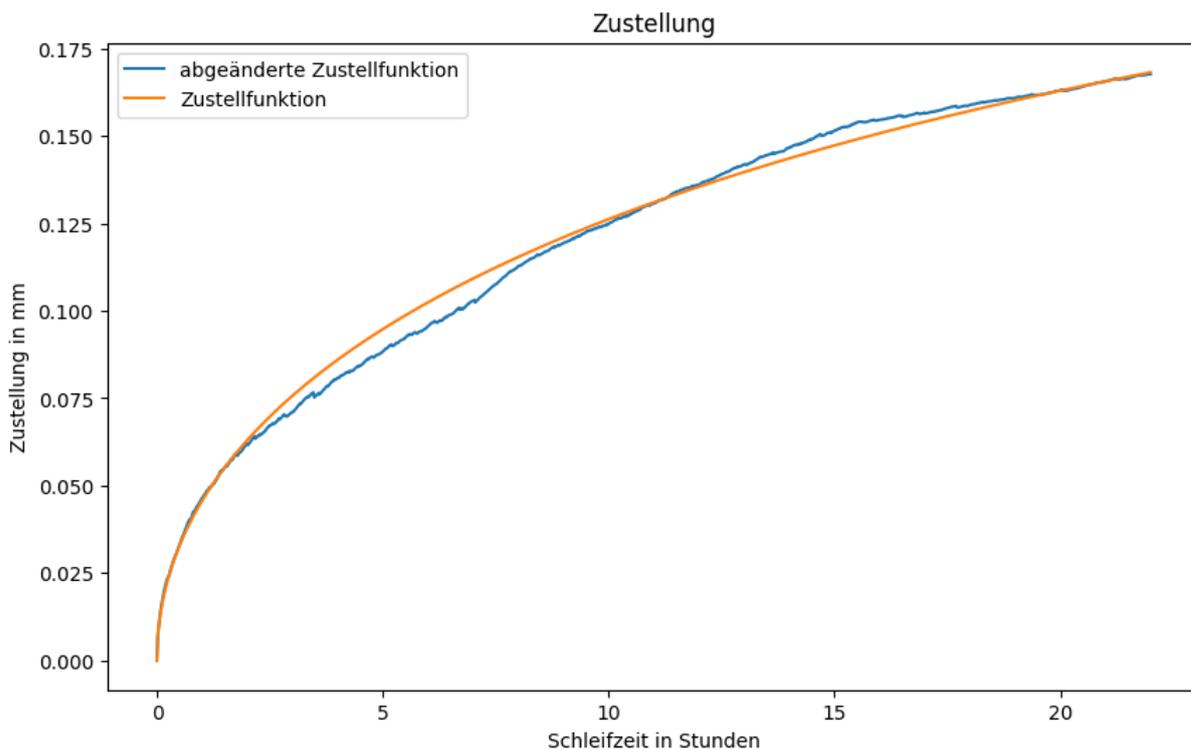


Abb. 32: Zustellung in der Simulation $C_W = 0,023$; $\beta = 0,95$

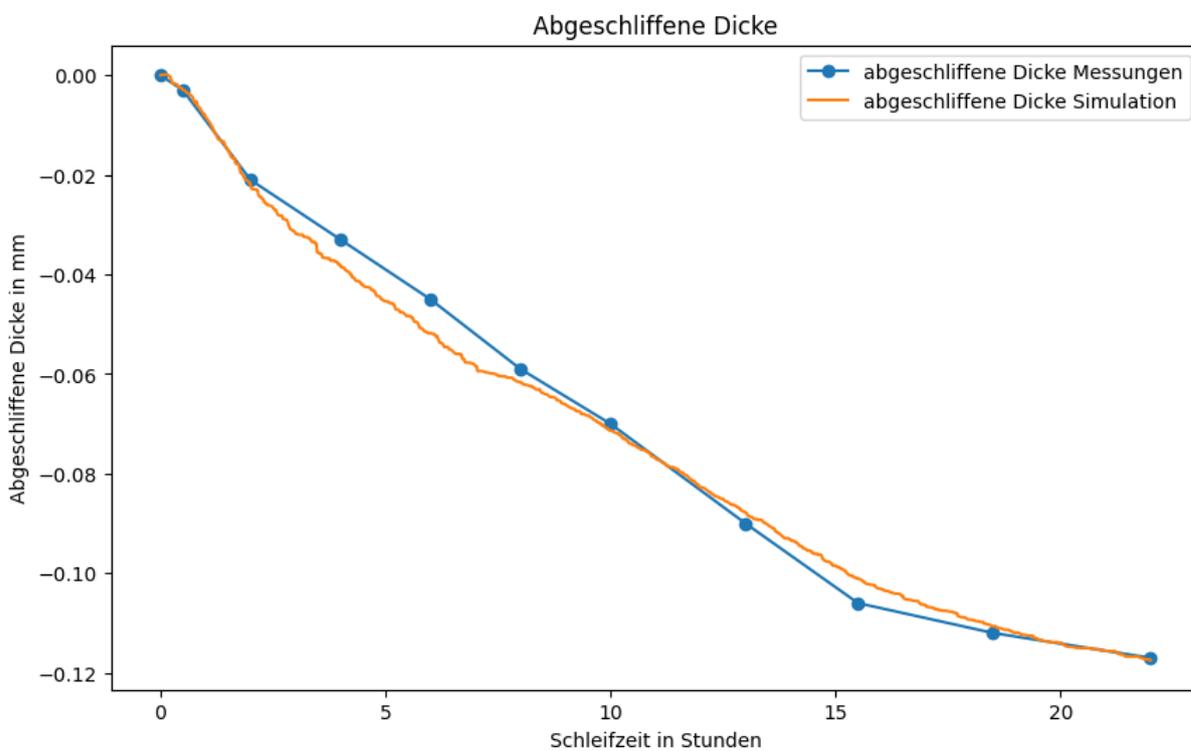


Abb. 33: Abgeschliffene Dicke $C_W = 0,023$; $\beta = 0,95$

Abb. 34 zeigt die simulierten Oberflächenrauheiten im Vergleich zu den gemessenen Rz- und Ra-Werten. Daraus wird ersichtlich, dass sich die ermittelten Rz-Rauheiten meist zwischen jenen der direkten Messungen und jenen der Abformungen bewegen. Zu Beginn ist ersichtlich, dass die Rauheiten nicht exakt der einen oder anderen Messung folgen, da es sich hier um lokale Effekte durch vereinzelt hohe Kornspitzen handelt. Daher sind diese Rauheitsspitzen sehr stark von der aktuell verwendeten, beziehungsweise generierten Schleifbandoberfläche abhängig und variieren von Fall zu Fall stark. Etwas aussagekräftiger in dieser Hinsicht sind die Mittenrauhwerte Ra, da diese nicht so sensibel auf einzelne tiefe Riefen sind. Hier ist ersichtlich, dass die simulierten Werte in den ersten 30 Minuten dem Verlauf der direkten Messungen folgen und sich anschließend eher den Werten aus den Abformungen annähern. Die Abweichungen der simulierten Werte von den Messungen erscheinen im Hinblick auf die Variabilität plausibel, weshalb die Simulationsmethodik als geeignet betrachtet wird.

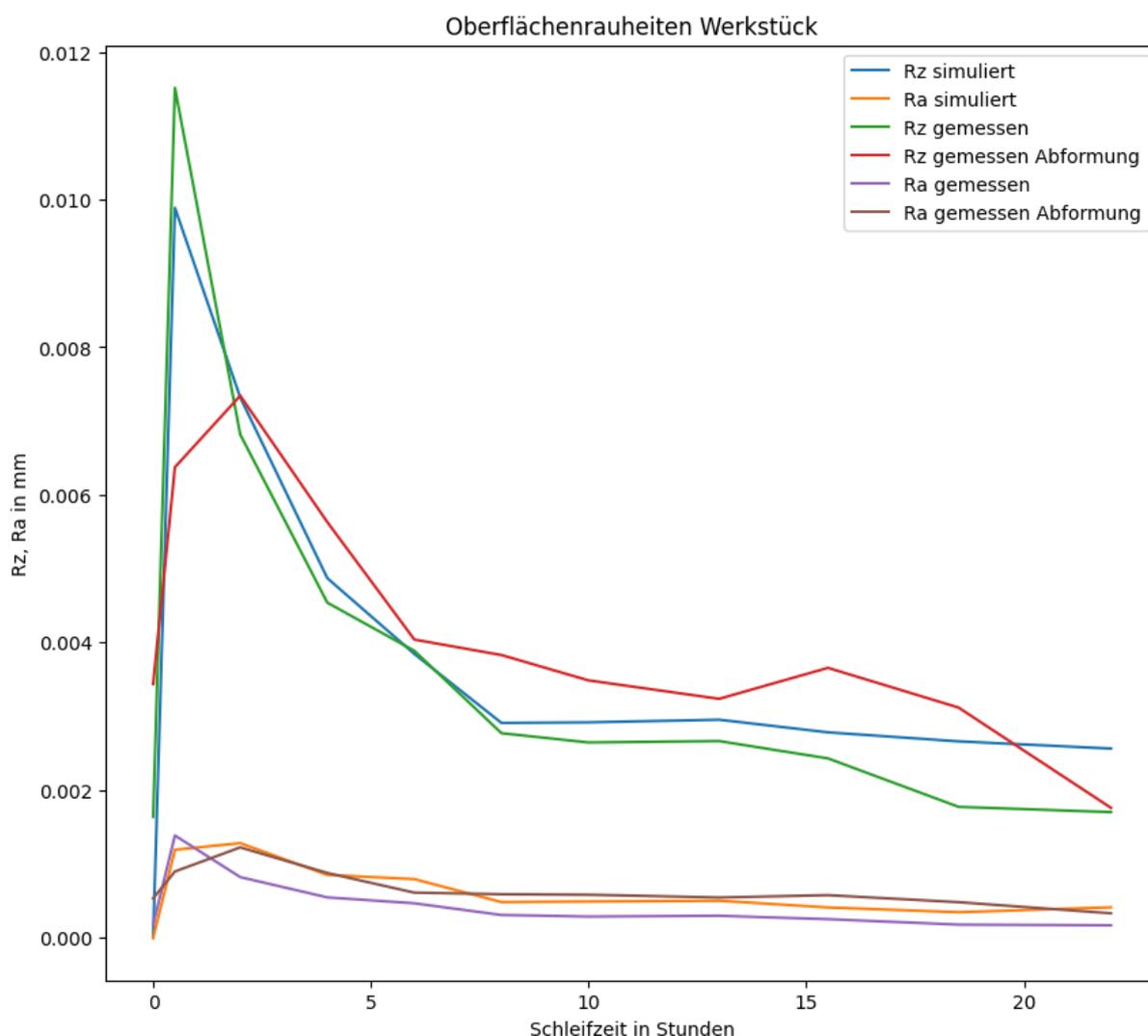


Abb. 34: Oberflächenrauheiten des Werkstücks $C_W = 0,023$; $\beta = 0,95$

Als zusätzliches Ergebnis der Simulation können auch die simulierten Werkstückoberflächen zu beliebigen Zeitpunkten ausgegeben werden. Um einen Überblick zu den Oberflächen über die Schleifzeit zu erhalten, können Abb. 35, Abb. 36 und Abb. 37 betrachtet werden. Darin sind die simulierten Werkstückoberflächen nach 0,5 Stunden, 10 Stunden und 22 Stunden abgebildet. In Abb. 35 stechen vor allem die beiden tiefen Riefen hervor. Diese werden durch Spitze und hohe Körner hervorgerufen und treten nur vereinzelt auf. Genau diese Spitzen verschleifen jedoch sehr schnell oder brechen nach kurzer Zeit ab, weshalb in weiterer Folge keine derartigen Ausreißer mehr auftreten. Mit voranschreitender Einsatzzeit des Schleifbandes verschleifen die Körner zusehends, wodurch immer mehr Schleifkörner in den Eingriff kommen. In Abb. 36 ist daher bereits eine gleichmäßigere Oberfläche ersichtlich, welche jedoch noch hohe Differenzen zwischen Profiltälern und Profilhüpfeln aufweist. Auch sind bereits die Randeffekte bemerkbar, welche daraus resultieren, dass dort der Korndurchmesser nicht mehr gut abgeschätzt werden kann und die elastische Verformung daher meist zu gering ausfällt. Das Resultat daraus ist besser noch in Abb. 37 ersichtlich, da nach 22 Stunden die Oberflächenrauheiten noch weiter abgenommen haben. Diese Randeffekte verfälschen bei der Berechnung der Rauheiten das Ergebnis, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die tatsächlichen simulierten Oberflächenrauheiten etwas geringer ausfallen als in Abb. 34 angegeben.

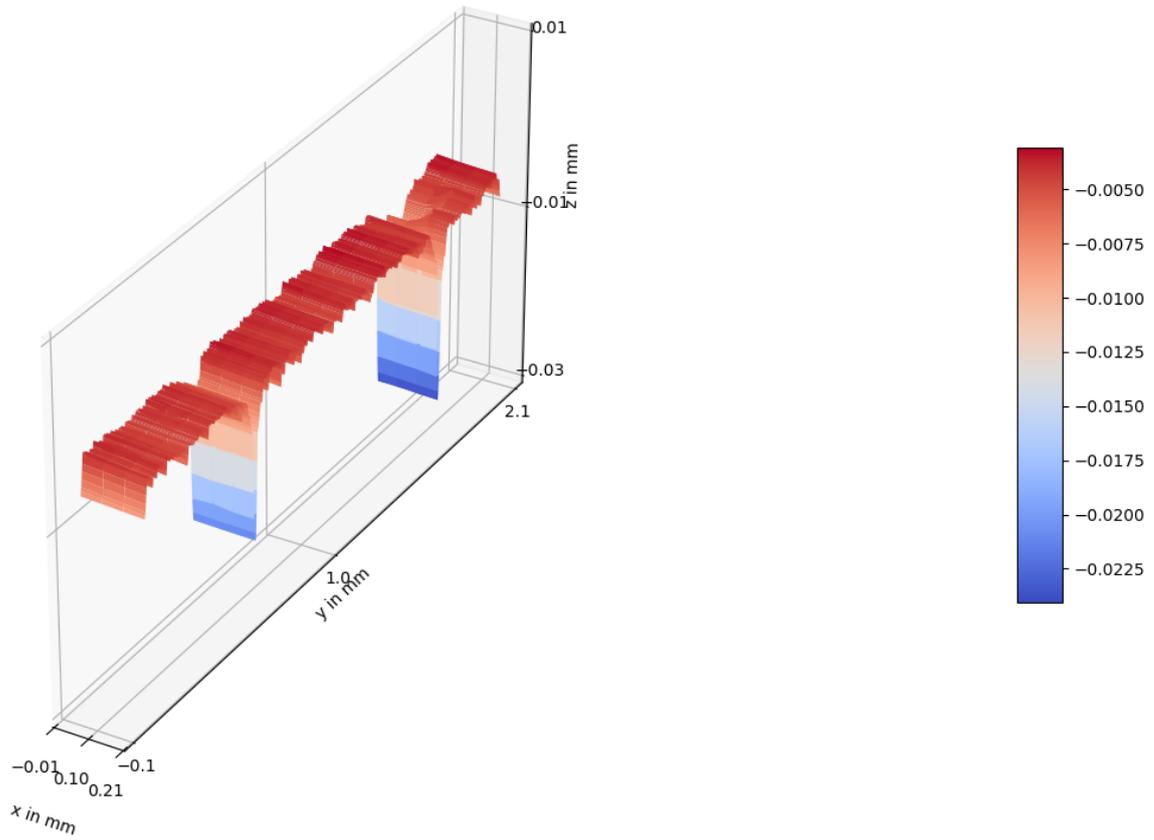


Abb. 35: Simulierte Werkstückoberfläche nach 0,5 Stunden $C_W = 0,023$; $\beta = 0,95$

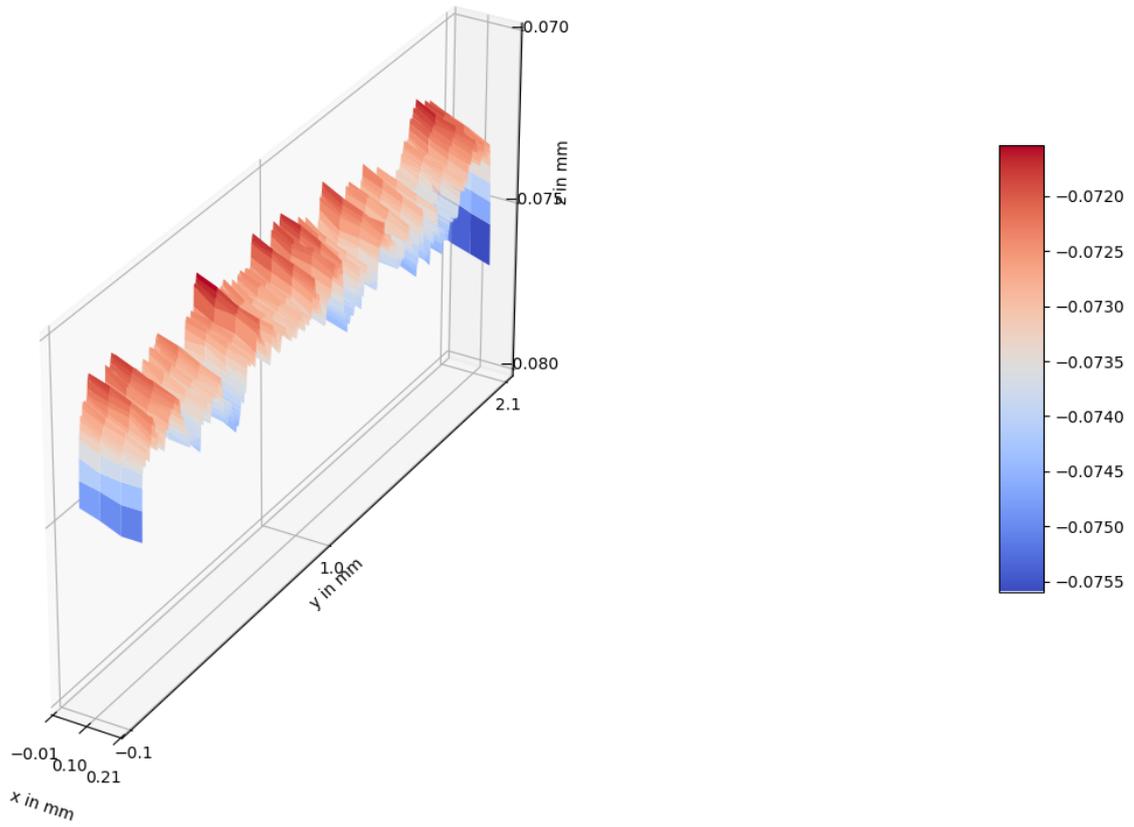


Abb. 36: Simulierte Werkstückoberfläche nach 10 Stunden $C_W = 0,023$; $\beta = 0,95$

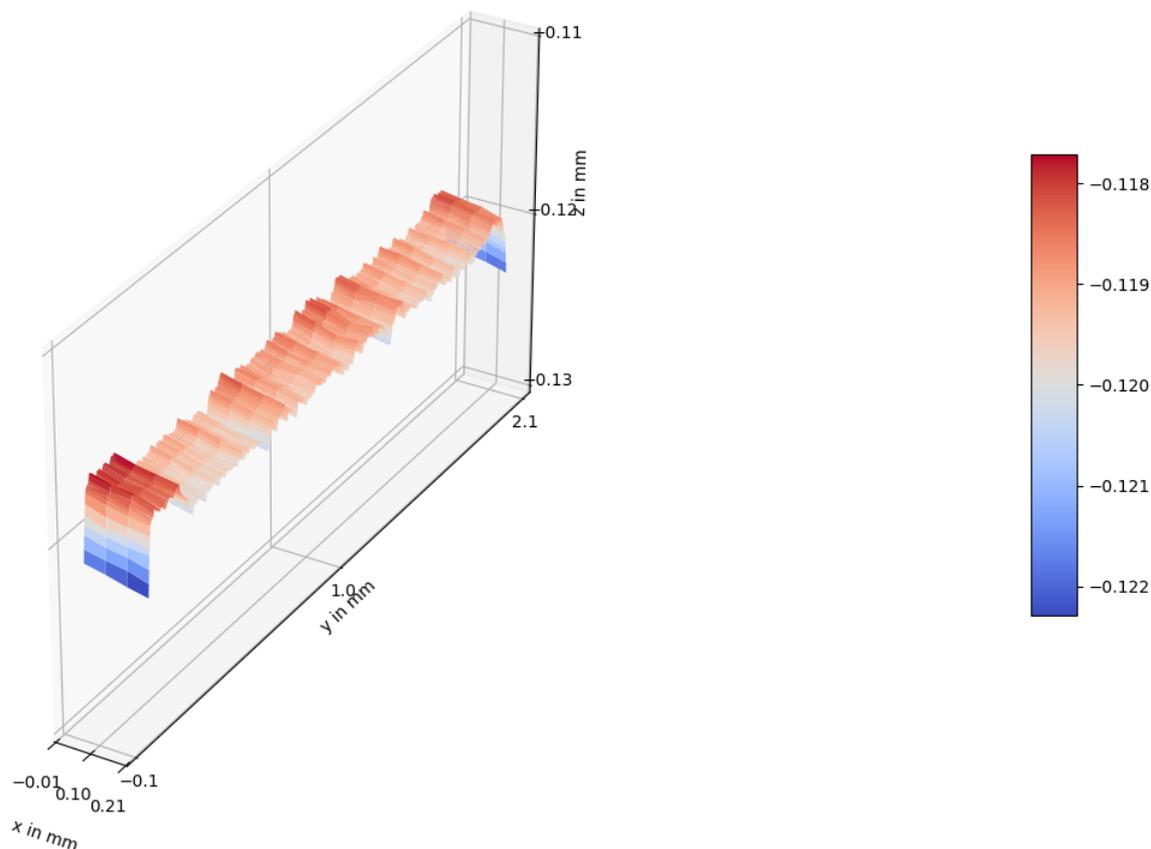


Abb. 37: Simulierte Werkstückoberfläche nach 22 Stunden $C_W = 0,023$; $\beta = 0,95$

Um nun die Einflüsse der elastischen Nachgiebigkeit und des Parameters β auf das Ergebnis zu untersuchen, werden anschließend die Rauheitsresultate von drei weiteren Simulationen dargestellt. In der in Abb. 38 dargestellten Simulation wurde die elastische Steifigkeit eines Schleifkornes erhöht und der Parameter $C_W = 0,015$ gewählt. Dies führt anfänglich zu einer Reduktion der Rauheit, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass die Korndurchmesser der tiefen Riefen sehr klein sind und die Eindringtiefe groß. Dadurch kann sich ein Gleichgewicht zwischen Verschiebung und Kraft einstellen, welches der Intuition widerspricht. Demnach müsste die die Eindringtiefe größer werden. Im späteren Verlauf entwickeln sich die Rauheiten in die andere Richtung und sind im Vergleich zu Abb. 34 tendenziell höher.

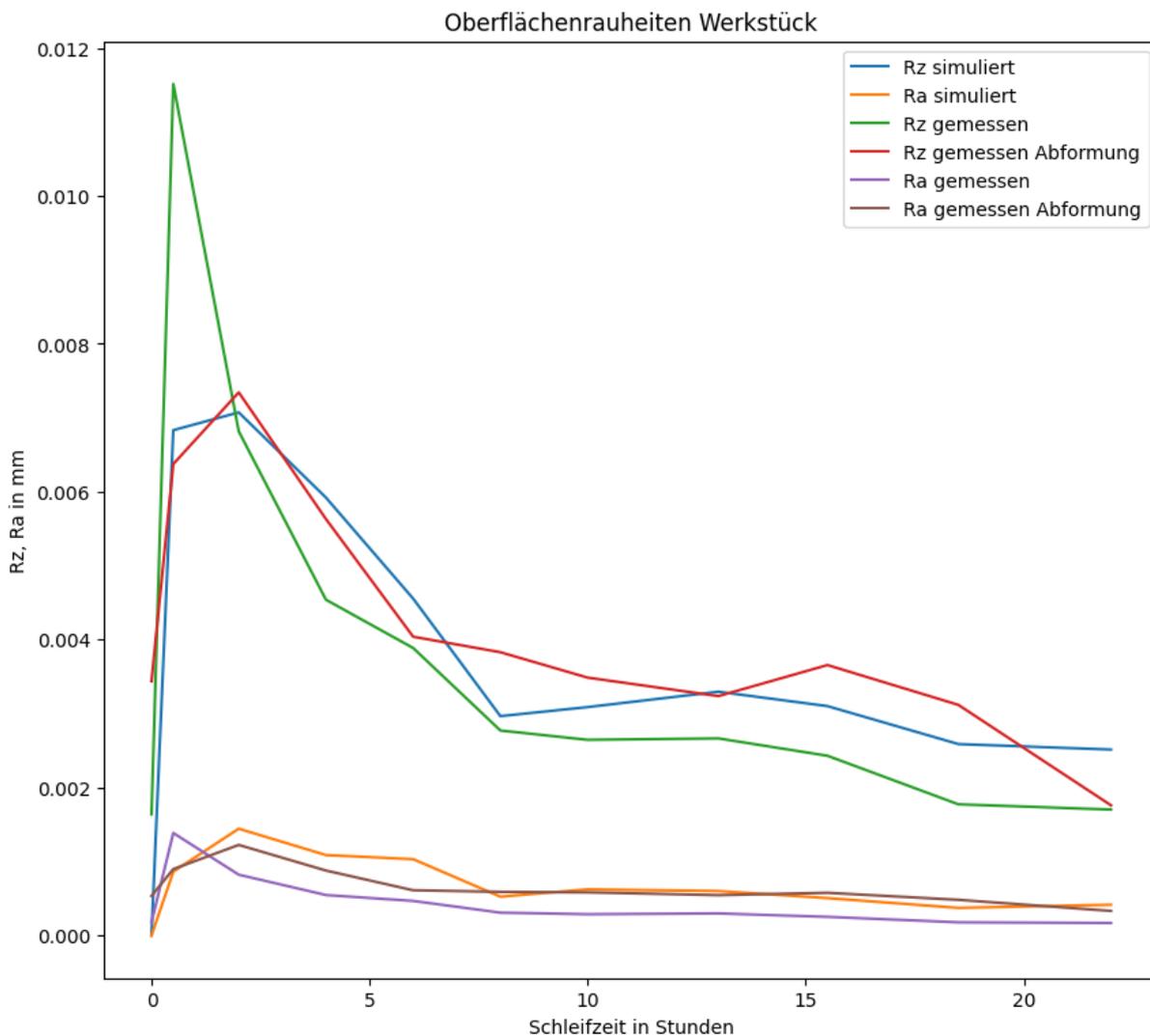


Abb. 38: Oberflächenrauheiten des Werkstücks $C_W = 0,015$; $\beta = 0,95$

In Abb. 39 sind die Ergebnisse einer Simulation dargestellt, in der die Federsteifigkeit auf $C_W = 0,03$ verringert wurde. Es zeigt sich eine inverse Reaktion im Vergleich zu Abb. 38. Zu Beginn steigen die Rauheiten stärker an und später werden diese geringer, als man es aus der Intuition heraus erwarten würde.

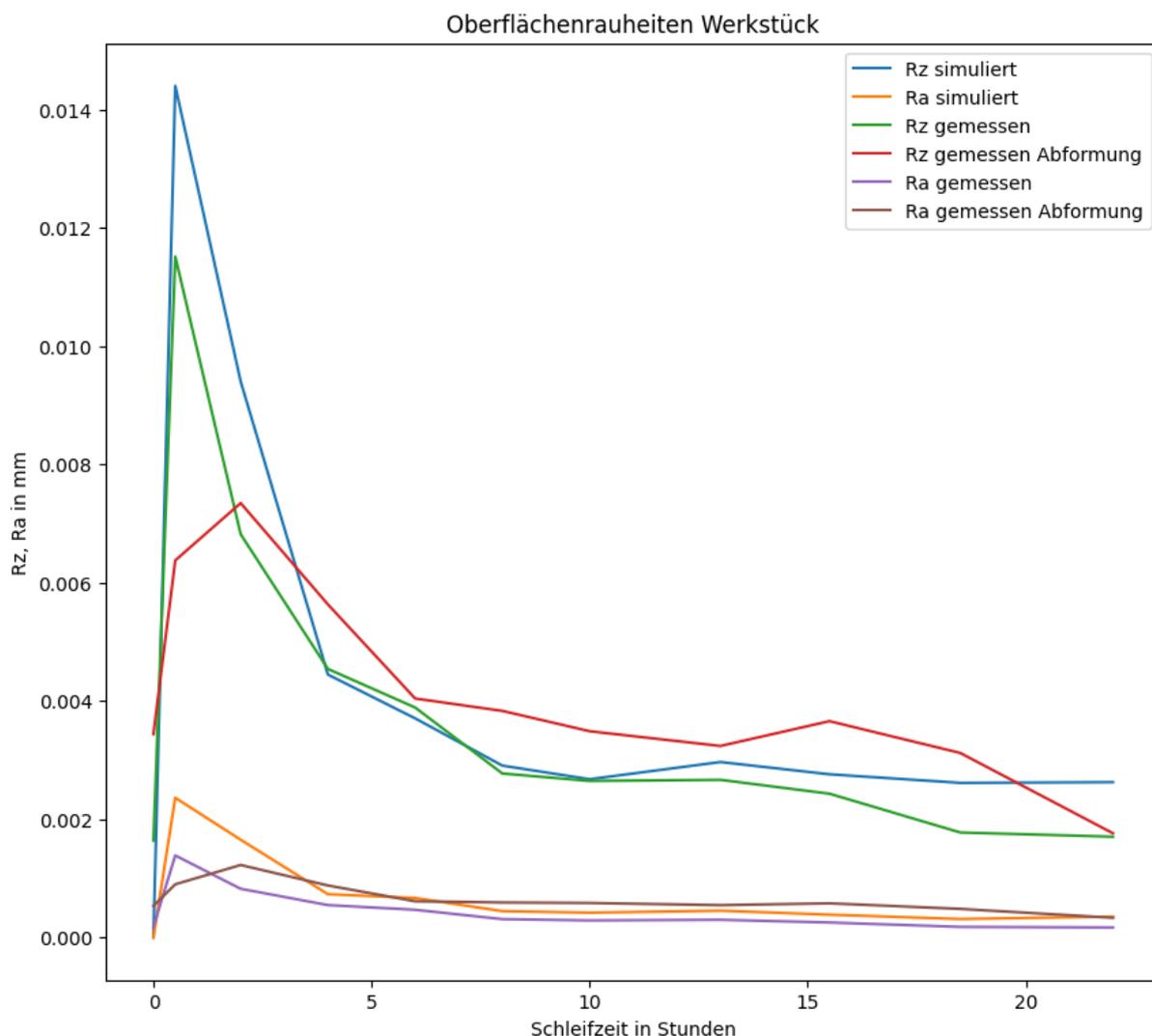


Abb. 39: Oberflächenrauheiten des Werkstücks $C_W = 0,030$; $\beta = 0,95$

Als letztes Beispiel wird eine Simulation angeführt, bei der der Parameter $\beta = 0,8$ gesetzt wird. Dies führt dazu, dass ein größerer Anteil des vom Korn verdrängten Materials nicht zerspant wird, sondern plastisch zu den Seiten hinfließt. Als Resultat ist eine Erhöhung der Rauheiten plausibel, was auch durch die Ergebnisse in Abb. 40 bestätigt wird. Eine Reduktion von β könnte zum Beispiel durch ein weicherer Werkstückmaterial herbeigeführt werden.

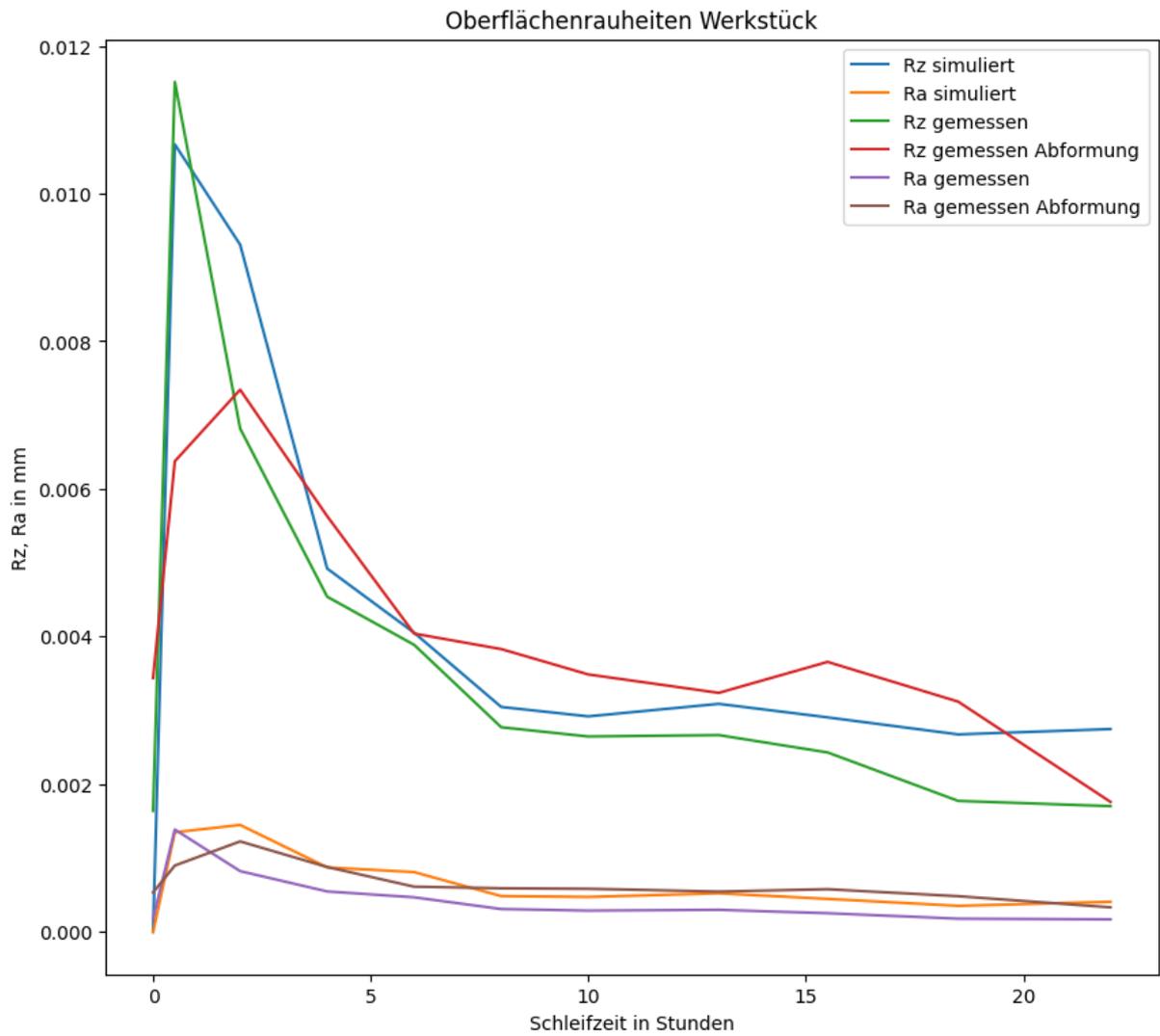


Abb. 40: Oberflächenrauheiten des Werkstücks $C_W = 0,023$; $\beta = 0,8$

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine kinematische Simulation eines Bandschleifprozesses zu entwickeln. Dafür sollen die wichtigsten Parameter identifiziert und analysiert werden. Als Grundlage dient die entsprechende Literatur, welche die Grundlagen des Schleifens behandelt. Anschließend wird eine Literaturrecherche bezüglich vorhandener Methoden zur Simulation durchgeführt. Dabei ist erkennbar, dass die meisten Versuche auf den Prinzipien weniger Autoren beruhen. Es kann festgestellt werden, dass der Modellierung der Schleifbandoberfläche eine große Bedeutung zukommt. Aufgrund des statistischen Charakters solcher Oberflächen wird auf eine Repräsentation durch Zufallsflächen zurückgegriffen. Den Kern der Simulation stellt eine Formel dar, welche die Bewegungsbahnen einzelner Punkte der Schleifbandoberfläche beschreibt. Das zerspannte Material wird durch die Schnittfläche einzelner Schleifbandquerschnitte mit den Werkstückquerschnitten bestimmt. Zusätzlich wird ein elastisches Rückweichen einzelner Körner und eine plastische Verdrängung von Material zu den Kornseiten, das sogenannte Pflügen, modelliert.

Um die Simulationsparameter bestimmen zu können sowie die Gültigkeit der Simulation zu bestätigen, ist es notwendig, auf Messungen aus der realen Fertigung zurückzugreifen. Dazu dient ein Referenzprozess der Berndorf Band GmbH, an welchem mehrere Messungen durchgeführt werden konnten. Bei der Betrachtung der gemessenen Schleifbandzustellung konnte erkannt werden, dass es in den Messdaten unrealistische Sprünge gibt, welche nicht direkt als Zustellung gewertet werden können. Dies ist vermutlich auf einen weiteren Freiheitsgrad im System oder ein globales elastisches Verhalten zurückzuführen. Ein solches erlaubt eine große Zustellung des Maschinenführers, welche anschließend konstant gehalten wird, wobei die tatsächliche Eindringtiefe des Schleifbandes nicht sprunghaft folgt, sondern der Anpressdruck annähernd konstant gehalten wird. Auf der gegebenen Datengrundlage konnte eine kontinuierliche Zustellfunktion gefunden werden, welche dieses Verhalten nachbildet und womit es ermöglicht werden konnte, das gemessene Verhalten in der Simulation nachzubilden.

In einem abschließenden Vergleich konnte festgestellt werden, dass der weitaus wichtigste Parameter für die Rauheit der Werkstückoberfläche die Zustellung ist. Neben diesem Parameter hat auch die elastische Lagerung der einzelnen Körner sowie das Fließverhalten des Werkstückmaterials Einfluss auf die Simulationsergebnisse.

Mit der vorliegenden Simulation ist es möglich, das gemessene Verhalten des Bandschleifprozesses nachzubilden und Einflüsse einzelner Parameter zu untersuchen. Das größte Problem stellt jedoch die fehlende Datenlage zu genau diesen Parametern dar. Dadurch ist es nicht möglich, die wichtigsten

Simulationsparameter direkt durch physikalische Systemeigenschaften zu beschreiben. Auch ist das Verschleißmodell nur für genau das vermessene Vorgehen gültig. Daher wäre es zum besseren Verständnis des Bandschleifprozesses nötig, weitere Messungen bei verschiedenen Kühlschmierbedingungen vorzunehmen. Auch sollten die Prozesskräfte untersucht werden, womit das verwendete Kraftmodell in der Simulation verifiziert werden könnte. Dazu wäre eine mit Sensoren bestückte Schleifwalze denkbar. Eine weitere Verbesserung könnte möglicherweise durch eine gekoppelte Simulation mit einer Gefügemodellierung erreicht werden. Eine direkte Messung der Zustellung zwischen den beiden Walzen wäre insofern auch wünschenswert, da dadurch ein etwaiges Lagerspiel und eine globale Elastizität erkannt und im Modell berücksichtigt werden könnte. Auf einer solchen Basis beruhend wäre der nächste Schritt zur Verbesserung der Simulation ein Modell, welches auch die globale Verformung der Walzen miteinbezieht, wofür jedoch genauere Kenntnisse zu den Prozesskräften notwendig wären.

Literaturverzeichnis

- [1] F. Klocke, *Fertigungsverfahren 2: Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide*. in VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-53310-9.
- [2] X. Ren u. a., „A study of dynamic energy partition in belt grinding based on grinding effects and temperature dependent mechanical properties“, *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 294, S. 117112, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117112.
- [3] L. Zou, X. Liu, Y. Huang, und Y. Fei, „A numerical approach to predict the machined surface topography of abrasive belt flexible grinding“, *Int J Adv Manuf Technol*, Bd. 104, Nr. 5–8, S. 2961–2970, Okt. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04032-2.
- [4] Y. Wang, Y. Liu, G. Zhang, und Y. Wang, „A Simulation Method for Non-Gaussian Rough Surfaces Using Fast Fourier Transform and Translation Process Theory“, *Journal of Tribology*, Bd. 140, Nr. 2, S. 021403, März 2018, doi: 10.1115/1.4037793.
- [5] D. Liao, W. Shao, J. Tang, und J. Li, „An improved rough surface modeling method based on linear transformation technique“, *Tribology International*, Bd. 119, S. 786–794, März 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2017.12.008.
- [6] I. Inasaki, „Grinding Process Simulation Based on the Wheel Topography Measurement“, *CIRP Annals*, Bd. 45, Nr. 1, S. 347–350, 1996, doi: 10.1016/S0007-8506(07)63077-7.
- [7] W.-L. Zhu, Y. Yang, H. N. Li, D. Axinte, und A. Beaucamp, „Theoretical and experimental investigation of material removal mechanism in compliant shape adaptive grinding process“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 142, S. 76–97, Juli 2019, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2019.04.011.
- [8] W. Wang, J. Li, W. Fan, X. Song, und L. Wang, „Characteristic quantitative evaluation and stochastic modeling of surface topography for zirconia alumina abrasive belt“, *Int J Adv Manuf Technol*, Bd. 89, Nr. 9–12, S. 3059–3069, Apr. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9242-8.
- [9] Y. Liu, S. Song, G. Xiao, Y. Huang, und K. Zhou, „A high-precision prediction model for surface topography of abrasive belt grinding considering elastic contact“, *Int J Adv Manuf Technol*, Bd. 125, Nr. 1–2, S. 777–792, März 2023, doi: 10.1007/s00170-022-10757-4.
- [10] X. Chen und W. B. Rowe, „Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of the grinding wheel surface“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 36, Nr. 8, S. 871–882, Aug. 1996, doi: 10.1016/0890-6955(96)00116-2.
- [11] G. Warnecke und U. Zitt, „Kinematic Simulation for Analyzing and Predicting High-Performance Grinding Processes“, *CIRP Annals*, Bd. 47, Nr. 1, S. 265–270, 1998, doi: 10.1016/S0007-8506(07)62831-5.
- [12] X. Wang, T. Yu, Y. Dai, Y. Shi, und W. Wang, „Kinematics modeling and simulating of grinding surface topography considering machining parameters and vibration characteristics“, *Int J Adv Manuf Technol*, Bd. 87, Nr. 9–12, S. 2459–2470, Dez. 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8660-y.
- [13] H. Li, X. Li, Z. Chen, X. Liu, L. Wang, und Y. Rong, „The simulation of surface topography generation in multi-pass sanding processes through virtual belt and

- kinetics model“, *Int J Adv Manuf Technol*, Bd. 97, Nr. 5–8, S. 2125–2140, Juli 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2004-z.
- [14] Y. Liu, A. Warkentin, R. Bauer, und Y. Gong, „Investigation of different grain shapes and dressing to predict surface roughness in grinding using kinematic simulations“, *Precision Engineering*, Bd. 37, Nr. 3, S. 758–764, Juli 2013, doi: 10.1016/j.precisioneng.2013.02.009.
- [15] Z. Yang u. a., „Prediction and analysis of material removal characteristics for robotic belt grinding based on single spherical abrasive grain model“, *International Journal of Mechanical Sciences*, Bd. 190, S. 106005, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106005.
- [16] W. Liu, Z. Deng, Y. Shang, und L. Wan, „Parametric evaluation and three-dimensional modelling for surface topography of grinding wheel“, *International Journal of Mechanical Sciences*, Bd. 155, S. 334–342, Mai 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.03.006.
- [17] N. L. Johnson, „Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation“, *Biometrika*, Bd. 36, Nr. 1/2, S. 149, Juni 1949, doi: 10.2307/2332539.
- [18] I. D. Hill, R. Hill, und R. L. Holder, „Algorithm AS 99: Fitting Johnson Curves by Moments“, *Applied Statistics*, Bd. 25, Nr. 2, S. 180, 1976, doi: 10.2307/2346692.
- [19] N. Patir, „A numerical procedure for random generation of rough surfaces“, *Wear*, Bd. 47, Nr. 2, S. 263–277, Apr. 1978, doi: 10.1016/0043-1648(78)90157-6.
- [20] W. Watson und T. A. Spedding, „The time series modelling of non-gaussian engineering processes“, *Wear*, Bd. 83, Nr. 2, S. 215–231, Dez. 1982, doi: 10.1016/0043-1648(82)90178-8.
- [21] Y. Z. Hu und K. Tonder, „Simulation of 3-D random rough surface by 2-D digital filter and fourier analysis“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 32, Nr. 1–2, S. 83–90, Feb. 1992, doi: 10.1016/0890-6955(92)90064-N.
- [22] J.-J. Wu, „Simulation of rough surfaces with FFT“, *Tribology International*, Bd. 33, Nr. 1, S. 47–58, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0301-679X(00)00016-5.
- [23] J.-J. Wu, „Simulation of non-Gaussian surfaces with FFT“, *Tribology International*, Bd. 37, Nr. 4, S. 339–346, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.triboint.2003.11.005.
- [24] Y. Wang, A. Azam, M. C. T. Wilson, A. Neville, und A. Morina, „A comparative study for selecting and using simulation methods of Gaussian random surfaces“, *Tribology International*, Bd. 166, S. 107347, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107347.
- [25] X. Zhou und F. Xi, „Modeling and predicting surface roughness of the grinding process“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 42, Nr. 8, S. 969–977, Juni 2002, doi: 10.1016/S0890-6955(02)00011-1.
- [26] T. A. Nguyen und D. L. Butler, „Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 45, Nr. 11, S. 1321–1328, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.005.
- [27] C. Chen, J. Tang, H. Chen, und C. Zhu, „Research about modeling of grinding workpiece surface topography based on real topography of grinding wheel“, *Int J Adv Manuf Technol*, Bd. 93, Nr. 5–8, S. 2411–2421, Nov. 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0668-4.
- [28] C. Zhao, J. Li, und W. Wang, „Forming mechanisms based simulation and prediction of grinding surface roughness for abrasive belt rail grinding“, *Procedia CIRP*, Bd. 87, S. 503–508, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.077.
- [29] T. Wang, L. Zou, Q. Wan, X. Zhang, Y. Li, und Y. Huang, „A high-precision prediction model of surface roughness in abrasive belt flexible grinding of aero-

- engine blade“, *Journal of Manufacturing Processes*, Bd. 66, S. 364–375, Juni 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.04.002.
- [30] W. X. Wang, J. Y. Li, Y. M. Liu, R. Q. Wang, und B. Sun, „Simulation of Abrasive Belt Topography Based on Generation of Random Rough Surface“, *KEM*, Bd. 693, S. 892–899, Mai 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.693.892.
- [31] V. Bakolas, „Numerical generation of arbitrarily oriented non-Gaussian three-dimensional rough surfaces“, *Wear*, Bd. 254, Nr. 5–6, S. 546–554, März 2003, doi: 10.1016/S0043-1648(03)00133-9.
- [32] K. K. Manesh, B. Ramamoorthy, und M. Singaperumal, „Numerical generation of anisotropic 3D non-Gaussian engineering surfaces with specified 3D surface roughness parameters“, *Wear*, Bd. 268, Nr. 11–12, S. 1371–1379, Mai 2010, doi: 10.1016/j.wear.2010.02.005.
- [33] S. Malkin und C. Guo, *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives*, 2. ed. New York, NY: Industrial Press, 2008.
- [34] R. L. Hecker und S. Y. Liang, „Predictive modeling of surface roughness in grinding“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 43, Nr. 8, S. 755–761, Juni 2003, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00055-5.
- [35] H. Li, L. Zou, W. Wang, und H. Li, „Introducing abrasive wear into undeformed chip thickness modeling with improved grain kinematics in belt grinding“, *Journal of Manufacturing Processes*, Bd. 108, S. 903–915, Dez. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.11.039.
- [36] X. Chen und W. Brian Rowe, „Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 36, Nr. 8, S. 883–896, Aug. 1996, doi: 10.1016/0890-6955(96)00117-4.
- [37] T. A. Nguyen und D. L. Butler, „Simulation of surface grinding process, part 2: interaction of the abrasive grain with the workpiece“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 45, Nr. 11, S. 1329–1336, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.006.
- [38] H. Chen und F. Jin, „A Novel Approach for Surface Topography Simulation Considering the Elastic-Plastic Deformation of a Material During a High-precision Grinding Process“, in *Proceeding of 2021 International Conference on Wireless Communications, Networking and Applications*, Z. Qian, M. A. Jabbar, und X. Li, Hrsg., in *Lecture Notes in Electrical Engineering*. , Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, S. 1176–1193. doi: 10.1007/978-981-19-2456-9_118.
- [39] H.-L. Xie, Q.-H. Wang, J.-L. Ni, und J.-R. Li, „A GPU-based prediction and simulation method of grinding surface topography for belt grinding process“, *Int J Adv Manuf Technol*, Bd. 106, Nr. 11–12, S. 5175–5186, Feb. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-04952-4.
- [40] M. Watson, A. Azam, und A. Ghanbarzadeh, *SlipPy*. python. [Online]. Verfügbar unter: <https://slippy.readthedocs.io/en/latest/>
- [41] C. R. Harris u. a., „Array programming with NumPy“, *Nature*, Bd. 585, Nr. 7825, S. 357–362, Sep. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [42] P. Virtanen u. a., „SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python“, *Nat Methods*, Bd. 17, Nr. 3, S. 261–272, März 2020, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [43] S. B. Damelin und N. S. Hoang, „On Surface Completion and Image Inpainting by Biharmonic Functions: Numerical Aspects“, *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, Bd. 2018, S. 1–8, 2018, doi: 10.1155/2018/3950312.
- [44] J. D. Hunter, „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“, *Comput. Sci. Eng.*, Bd. 9, Nr. 3, S. 90–95, 2007, doi: 10.1109/MCSE.2007.55.

- [45] *Schleifmittel auf Unterlagen Korngrößenanalyse Teil 1: Prüfung der Korngrößenverteilung (ISO 6344-1 : 1999)*.
- [46] E. Macherauch und H.-W. Zoch, *Praktikum in Werkstoffkunde: 91 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik*, 11., Vollst. überarb. und erw. Aufl. in Studium Werkstofftechnik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.

Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Einzelkorneingriff in das Werkstück; angelehnt an [1]</i>	10
<i>Abb. 2: Energiebilanz am Einzelkorn; angelehnt an [1], [2]</i>	11
<i>Abb. 3: Aufbau von Schleifmittel auf Unterlage; angelehnt an [1]</i>	14
<i>Abb. 4: Schemaskizze Bandschleifprozess</i>	17
<i>Abb. 5: Oberflächensimulation durch Einzelkörner</i>	22
<i>Abb. 6: Schematische Darstellung der Kornbewegung; angelehnt an [25]</i>	27
<i>Abb. 7: Aufbau der Wegmessung mithilfe von Magenthalern</i>	37
<i>Abb. 8: Abgestützter Querbalken mit dem Alicona Edgemaster</i>	38
<i>Abb. 9: Montierte Schablone zur Positionierung des Alicona Edgemaster</i>	39
<i>Abb. 10: Schematisches Flussdiagramm der Datenaufbereitung</i>	44
<i>Abb. 11: Algorithmus zum Reparieren der gemessenen Oberflächendaten</i>	46
<i>Abb. 12: Exponentielle Autokorrelationsfunktion, $\sigma^2 = 1$ und $\beta_x = \beta_y = 0,2$</i>	49
<i>Abb. 13: Autokorrelationsfunktion der Initialmessung mit dem Alicona Edgemaster an Position 8</i>	51
<i>Abb. 14: Nachbildung der Funktion in Abb. 12 nach Gleichung (28)</i>	51
<i>Abb. 15: Grundlegender Ablauf der Simulation</i>	64
<i>Abb. 16: Skizze zur Berechnung vom angenäherten Kornradius</i>	67
<i>Abb. 17: Skizze für die Schnittkraftabschätzung</i>	68
<i>Abb. 18: Skizze der plastischen Verdrängung</i>	73
<i>Abb. 19: Gemessene Zustellung aus dem realen Prozess</i>	77
<i>Abb. 20: Abgeschliffene Dicke aus dem realen Prozess</i>	78
<i>Abb. 21: Standardabweichung der gemessenen Schleifbandoberflächen</i>	79
<i>Abb. 22: Skewness der gemessenen Schleifbandoberflächen</i>	80
<i>Abb. 23: Kurtosis der gemessenen Schleifbandoberflächen</i>	81
<i>Abb. 24: Standardabweichung und Verschleißfunktion über die Zeit</i>	82
<i>Abb. 25: Originalaufnahme der Schleifbandoberfläche nach 0,5 Stunden mittels Alicona Edgemaster</i>	84
<i>Abb. 26: Aufbereitetes Datenmodell zur Schleifbandoberfläche nach 0,5 Stunden aus Abb. 24</i>	84
<i>Abb. 27: Gemessene Rz und Ra Rauheitswerte des Werkstücks</i>	86

<i>Abb. 28: Initialmessung Schleifband</i>	87
<i>Abb. 29: Nachgebildete Schleifbandoberfläche mittels Patir's Methode</i>	88
<i>Abb. 30: Nachgebildete Schleifbandoberfläche mittels 2D-Filter-Methode</i>	88
<i>Abb. 31: Entwicklung der Zustellfunktion</i>	90
<i>Abb. 32: Zustellung in der Simulation $CW = 0,023$; $\beta = 0,95$</i>	91
<i>Abb. 33: Abgeschliffene Dicke $CW = 0,023$; $\beta = 0,95$</i>	91
<i>Abb. 34: Oberflächenrauheiten des Werkstücks $CW = 0,023$; $\beta = 0,95$</i>	92
<i>Abb. 35: Simulierte Werkstückoberfläche nach 0,5 Stunden $CW = 0,023$; $\beta = 0,95$</i>	94
<i>Abb. 36: Simulierte Werkstückoberfläche nach 10 Stunden $CW = 0,023$; $\beta = 0,95$</i>	95
<i>Abb. 37: Simulierte Werkstückoberfläche nach 22 Stunden $CW = 0,023$; $\beta = 0,95$</i>	96
<i>Abb. 38: Oberflächenrauheiten des Werkstücks $CW = 0,015$; $\beta = 0,95$</i>	97
<i>Abb. 39: Oberflächenrauheiten des Werkstücks $CW = 0,030$; $\beta = 0,95$</i>	98
<i>Abb. 40: Oberflächenrauheiten des Werkstücks $CW = 0,023$; $\beta = 0,8$</i>	99

Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 1: Prozessparameter des untersuchten Schleifprozesses.....</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 2: Messzeitpunkte in Stunden</i>	<i>35</i>

Verzeichnis Codeausschnitte

<i>Listing 1: Funktion zur Skalierung von Tiefendaten</i>	47
<i>Listing 2: Funktion zur Bestimmung der Autokorrelationslängen</i>	48
<i>Listing 3: Implementierung des 2D-Filter-Verfahrens</i>	53
<i>Listing 4: Funktion zur Berechnung der Spitzenrauheit Rz einer Oberfläche</i>	56
<i>Listing 5: Funktion zur Berechnung der Mittenrauheit Ra einer Oberfläche</i>	57
<i>Listing 6: Code zur Auswertung der Zeitreihen</i>	59
<i>Listing 7: Implementierung von Gleichung (23)</i>	66
<i>Listing 8: Code zum Suchen von einzelnen Kornabdrücken</i>	70
<i>Listing 9: Implementierung des elastischen Verformungsmodells</i>	71