



Hochschule Anhalt
Anhalt University of Applied Sciences

emw

Fachbereich
Elektrotechnik, Maschinenbau
und Wirtschaftsingenieurwesen

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

Schmidt Christian

Vorname Nachname

Solartechnik, 2011, 4054116

Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer

Thema:

**Verschleißcharakterisierung an
Diamantsägedrähten**

Prof. Dr. Jörg Bagdahn

Vorsitzende(r) der Bachelorprüfungskommission/1. Prüfer(in)

Dipl. Ing. Ringo Köpge

Betreuer

19. 09. 2014

Abgabe am

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Grundlagen.....	3
2.1	Tribologie – Einführung	3
2.1.1	Reibung	4
2.1.2	Verschleiß	7
3	Durchführung.....	9
3.1	Probenbeschreibung	9
3.2	Planung der Sägeexperimente.....	12
3.3	Sägeversuche.....	17
3.4	Mikroskopische Analyse.....	20
4	Ergebnisse	23
5	Diskussion.....	39
6	Zusammenfassung	44
I	Abbildungsverzeichnis	46
II	Tabellenverzeichnis	47
III	Literaturverzeichnis	47
IV	Symbolverzeichnis.....	48
V	Danksagung.....	49
VI	Selbstständigkeitserklärung	49
VII	Anhang	50

1 Einleitung

Bei der industriellen Herstellung von kristallinen Siliziumsolarzellen sind zahlreiche Prozessschritte nötig, um ein fertiges Produkt zu erhalten. In all den Produktionsabschnitten gilt es dabei, die Kosten für die Herstellung weitgehend zu optimieren, damit ein Produktionsunternehmen wettbewerbsfähig bleibt. Diesbezüglich wurde eine Vielzahl von Anstrengungen unternommen, um Einsparungen in der Produktion vorzunehmen. Der Prozess, bei dem aus einem Siliziumingot die Rohlinge der Solarzellen (Wafer) gesägt werden, beherbergt ein weiteres Potenzial zur Kostenreduktion inne. Gegenwertig werden häufig Multidrahtsägen eingesetzt, bei denen ein Stahldraht von einer Führungsrolle auf die andere, gegenüberliegende Rolle abgewickelt wird. Der Stahldraht wird in mehreren auf den Rollen befindlichen Kerben entlang geführt. Diese ermöglichen einerseits mehrere Siliziumwafer aus einem Block zu sägen. Andererseits erfüllen sie den Zweck die Dicke des Wafers vorzugeben, da diese durch den Abstand der Kerben (Pitch) auf der Rolle bestimmt wird. Durch das Beimengen eines Gemisches aus Glykol und darin befindlichen, losen Reibpartikeln (Slurry) wird das kristalline Silizium spanend abgetragen. Dieser Produktionsschritt wird als Trennläppprozess bezeichnet. [1]

Bei dem Einsatz von Diamantdrähten, anstelle der Stahldrähte, ließe sich das Glykologemisch, welches Reibpartikel aus Siliziumcarbid enthält, einsparen. Dieses muss dem Prozess nicht kontinuierlich zugeführt werden, da die Diamantpartikel das Silizium abtragen. Die Diamantpartikel sind durch eine Nickelschicht galvanisch auf dem Stahldraht befestigt und ragen zu einem Teil ihrer Oberfläche heraus. Der Vorteil bei diesem Verfahren ist, dass der Siliziumingot mit einer höheren Sägeschwindigkeit gesägt werden kann. Außerdem kann das beim Diamantdrahtsägen eingesetzte Kühlmittel einfacher von Siliziumspänen gereinigt werden als das Slurry Gemisch. [2]

Es lässt sich die Frage formulieren, inwiefern die Diamantkörner bei dem Sägeprozess von Siliziumwafern geschädigt werden. Die folgende Arbeit soll dieser Frage nachgehen und mittels industrienahen Experimenten die Art und den Grad des Verschleißes eines Diamantdrahtes mit zunehmender Sägezeit aufzeigen. Dazu wurden die Diamantdrähte zu Endlosdrahtschlaufen geschweißt und diese an einer am Institut vorhandenen Eindrahtsäge eingesetzt. Damit solle eine Orientierung über die Standzeit der Diamantdrähte gegeben werden, um eine genauere Einsatzdauer der Sägedrähte zu entwickeln. Aktuell wird der benutzte Diamantdraht nach Verlassen des Drahtfeldes nicht weiterverwendet. Die folgenden Untersuchungen sollen zusätzlich aufzeigen, ob dafür eine Notwendigkeit besteht oder ob der Diamantsägedraht weiterhin eingesetzt werden könnte.

2 Grundlagen

2.1 Tribologie – Einführung

Der Begriff Tribologie leitet sich aus den griechischen Wörtern „tribein“ = reiben und „logia“ = Lehre ab und bedeutet übersetzt Reibungslehre. Sie ist die Wissenschaft und Technik von Oberflächen, die in Relativbewegung aufeinander wirken und setzt sich aus den Teilgebieten von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung zusammen. Weiterhin werden Grenzflächenwechselwirkungen, sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen mit einbezogen. Ziel ist es, durch Minderung von Verschleiß und Optimierung von Reibungsbedingungen, der Erhaltung von Werten beizutragen. [3] Die Tribologie zielt darauf ab, Bewegungssysteme funktionell, ökonomisch und ökologisch zu optimieren. Dies bedeutet genauer, dass die Sicherheit im Betrieb von Maschinen und Anlagen erhöht wird, Produktionskosten gesenkt und Ressourcen geschont werden können. Die Anwendung des aus der Tribologie generierten Wissens führt weiterhin zu einer Einsparung von Energie und dazu, dass Emissionen gemindert werden können. Außerdem entstehen in den Industrieländern durch die Mechanismen von Reibung und Verschleiß jährliche Verluste von circa 5 % des Bruttosozialproduktes. Für Deutschland entsteht damit ein finanzieller Schaden von 35 Milliarden EUR/Jahr. Wenn die aktuellen Kenntnisse der Tribologie umgesetzt werden, dann könnten 5 Milliarden EUR/Jahr eingespart werden. Das Einsparpotenzial könnte durch tribologische Forschung gesteigert werden. [3]

Ein System, das alle Komponenten, Größen und Eigenschaften einer tribologischen Beanspruchung beschreibt, wird als tribologisches System bezeichnet. Die Aufgabe tribotechnischer Systeme ist es, die Eingangsgröße $\{x\}$ in für die Technik entsprechend nutzbare Ausgangsgrößen $\{y\}$ umzuwandeln. Dadurch, dass in dem betrachteten Systemen Reibung und Verschleiß auftreten, wird eine Verlustgröße $\{z\}$ als weitere Ausgangsgröße definiert. Hinzu kommt eine weitere Störgröße als Eingangsgröße, die einen Einfluss auf die Ausgangs- und Verlustgröße nimmt. Das System besteht aus einem Grundkörper (1), der über einen Zwischenstoff (3) und unter Berücksichtigung von Umgebungsbedingungen (4) in Wechselwirkung mit einem Gegenkörper (2) tritt (vgl. Abb. 1). [4]

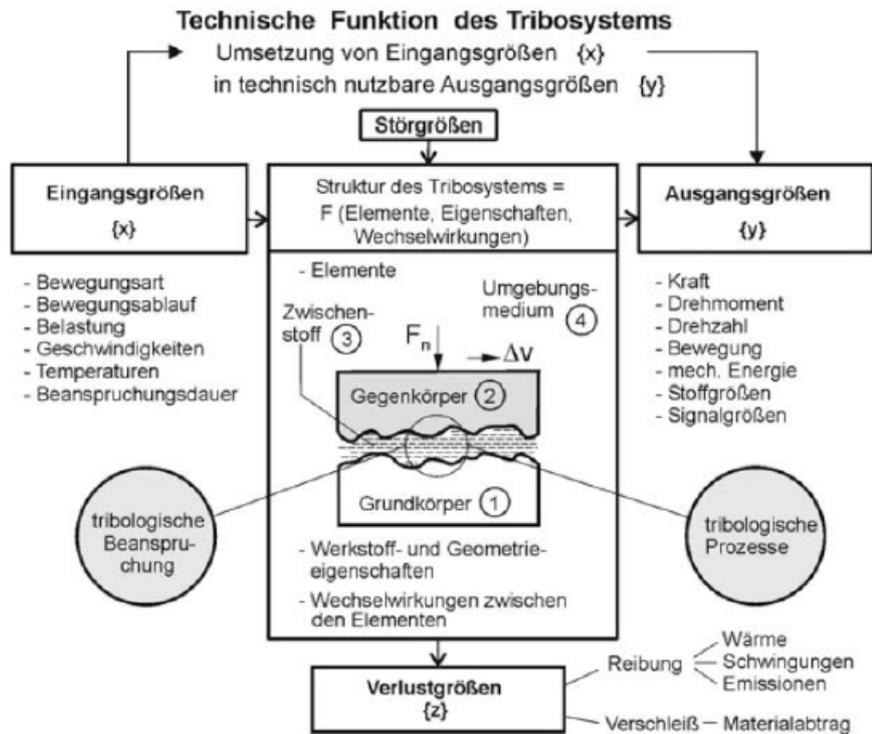


Abbildung 1: Beschreibung der technischen Funktion eines Tribosystems [4]

Im Vordergrund bei der Auswertung von Tribosystemen stehen die Parameter, die mit Messverfahren zu erfassen sind. Diese geben Aussagen darüber, welche Veränderungen sich durch die tribologischen Beanspruchungen ergeben zum Beispiel Stoff- und Formänderungen an dem Grund- oder Gegenkörper. Ebenfalls kennzeichnen sie die Verlustgrößen {z} durch Reibungs- und Verschleißgrößen. Zu den Reibungsgrößen zählen Reibungszahl, Reibungsenergie oder Reibungskraft, wohingegen die Verschleißgrößen durch Dimensions- oder Masseänderungen gekennzeichnet sind.

2.1.1 Reibung

Reibung ist „ein Bewegungszustand, der eine Relativbewegung kontaktierender Körper verhindert.“[5] Der Begriff wird in innere und äußere Reibung unterschieden. Die innere Reibung beschreibt den Widerstand eines Körpers gegen die Relativbewegung seiner inneren Volumenbestandteile. Sie wird mit dem Begriff der Viskosität gekennzeichnet. Die äußere Reibung hingegen beschreibt die Reibung zwischen den sich berührenden Grenzflächen der aufeinander wirkenden Körper. Damit ein Körper in Bewegung gesetzt werden kann, muss zunächst eine Reibungskraft F_R überwunden werden. Diese ist abhängig

von den Materialpaarungen und deren Oberflächenbeschaffenheit. Die Normalkraft F_N ist direkt proportional zu der Reibungskraft F_R . Das Verhältnis dieser beiden Größen wird durch den Reibungskoeffizienten ausgedrückt:

$$\mu = \frac{F_R}{F_N}. \quad (1)$$

Es werden Kontaktzustände zwischen Reibpartnern folgend unterschieden und definiert. Die *Festkörperreibung* tritt bei festen Körpern auf, die sich unmittelbar berühren. Bei der *Flüssigkeitsreibung* entsteht ein flüssiger Film, der hydrostatisch oder hydrodynamisch erzeugt werden kann. Die *Gasreibung* entsteht in einem aerostatisch oder aerodynamisch erzeugten Film, der die Reibpartner lückenlos voneinander trennt. Bei der *Grenzreibung* bedeckt ein molekularer Film eines Schmierstoffes die Oberfläche der Reibpartner. Die *Mischreibung* ergibt sich hingegen, wenn Festkörperreibung und Flüssigkeits- oder Gasreibung nebeneinander vorliegen.

Weiterhin werden verschiedene Reibungsmechanismen unterteilt, die in Abbildung 2 aufgezeigt sind. „Als Reibungsmechanismen werden die im Kontaktbereich eines tribologischen Systems auftretenden, bewegungshemmenden und energiedissipierenden Elementarprozesse der Reibung bezeichnet.“ Sie gehen von den im Kontaktbereich örtlich und zeitlich stochastisch verteilten Mikrokontakten aus. Nach den Ergebnissen der Kontaktmechanik nimmt bei einer Berührung technischer Oberflächen die Anzahl der Mikrokontakte etwa linear mit der Normalkraft F_N zu. „Wird davon ausgegangen, dass jeder Mikrokontakt einen elementaren Bewegungswiderstand darstellt, so ergibt sich für die makroskopische Reibungskraft näherungsweise der folgende Ansatz: Reibungskraft $F_R \sim$ Anzahl der Mikrokontakte \sim Normalkraft F_N .“ [4] Darin werden vier Mechanismen typisiert: Adhäsion/Scheren, plastische Deformation, Furchung beziehungsweise elastische Hysterese (Dämpfung).

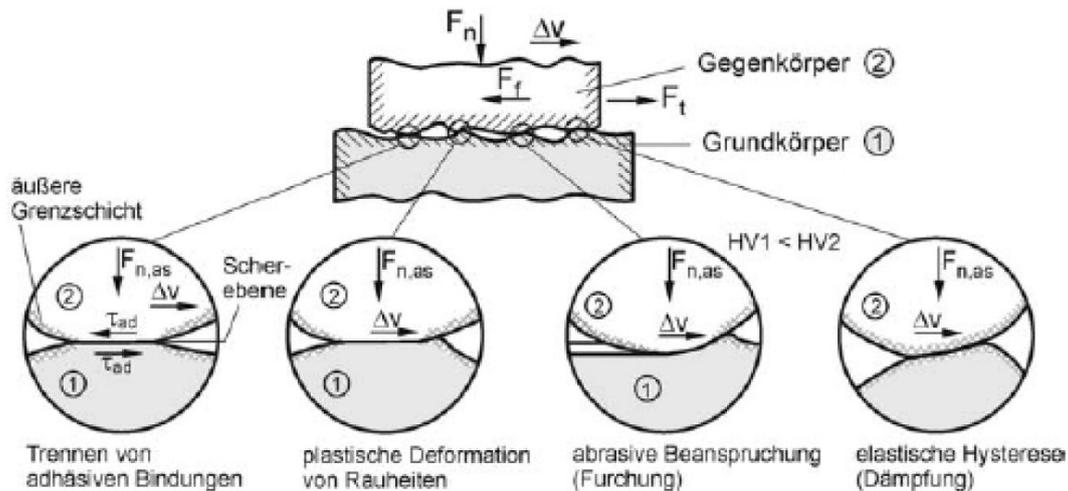


Abbildung 2: Überblick der vier grundlegenden Reibungsmechanismen [6]

Die Adhäsion beschreibt den Reibungsmechanismus auf atomarer beziehungsweise molekularer Ebene. Bei der Relativbewegung werden die aus Atomen aufgebauten Kontaktflächen voneinander getrennt, was einen Energieverlust (Reibung) hervorruft. Dabei entstehen Risse und Einschnürungen im Kontaktbereich, was letztendlich zu Abscherungen in den Bereichen der geringsten Trennfestigkeit führt. Dagegen entsteht bei der plastischen Deformation zweier sich in Relativbewegung befindlichen und sich berührender Körper eine Kontaktdeformation, wodurch die Energie dissipiert wird. Die Furchung entsteht dagegen bei dem Kontakt von Körpern mit unterschiedlicher Härte. In der Abbildung 2 des dritten Piktogramms (von links beginnend) sind die Angaben über die Härte Vickers (HV) illustriert. Dabei dringen die Oberflächenberge des härteren Materials (HV2), bedingt durch die Oberflächenrauigkeit, in den weicheren Gegenkörper (HV1) ein. Bei der tangentialen Verschiebung der Körper entstehen dadurch Reibungseffekte. Es werden zwei wesentliche Reibungsarten differenziert, zum einen wird in statische Reibung (Haftreibung, Ruhreibung) und zum anderen in kinematische Reibung unterschieden. Für Tribosysteme erfolgt häufig die Unterteilung der kinematischen Reibung. Sie wird in Gleitreibung, Rollreibung und Bohrreibung klassifiziert, wobei die Unterteilung von der Art der Relativbewegung von den Kontaktpartnern abhängt. Die Reibung, bei der eine translatorische Bewegung im Kontaktbereich von zwei Körpern auftritt, wird als Gleitreibung deklariert. Um einen Körper in Bewegung zu versetzen, ist eine Kraft notwendig, die den Reibwiderstand μ überwindet. Im Verhältnis zu den anderen Reibungsarten treten bei der Gleitreibung die größten tribologischen Beanspruchungen auf. Das bedeutet, dass thermische Vorgänge hierbei besonders aktiviert werden und der Verschleiß höher ist. Dies wird nachvollziehbar, wenn

die Reibung energetisch betrachtet wird. Die Energie W_R ist das Produkt aus der Reibungskraft F_R und des Reibungsweges s_R [7]:

$$W_R = F_R * s_R. \quad (2)$$

2.1.2 Verschleiß

Als Verschleiß wird der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers bezeichnet. [5] Die Ursache hierfür ist der Kontakt und die Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Der Verschleiß ist ein unerwünschter Vorgang, der sich mindernd auf den Wert des Produktes auswirkt. Dagegen wird der Ablauf bei Bearbeitungsvorgängen, die sich wertbildend auf ein Werkstück auswirken, nicht als Verschleiß angesehen. Nach Fleischer [7] ist der Verschleiß eine „infolge Reibung eintretende, bleibende Form-, Größen- und Stoffänderung, der die Oberfläche von Festkörpern bildenden Stoffbereiche.“ Ändert ein Körper infolge von Verschleiß seine Gestalt oder Masse, dann lassen sich diese durch direkt bezogene oder indirekte Verschleißmessgrößen bestimmen. Unter den direkten Verschleißmessgrößen werden die Maßzahlen zusammengefasst, die eine Längen-, Flächen-, Volumen- oder Masseänderung an dem verschleißenden Körper hervorrufen. Weiterhin wird in den linearen, planimetrischen, volumetrischen und massemäßigen Verschleißbetrag unterteilt, wobei die Reziprokwerte dieser Kennzahlen den Verschleißwiderstand beschreiben. [7] Die nachfolgende Tabelle 1 vermittelt einen Überblick über die genannten Größen und zeigt deren Definitionen und Einheiten auf.

Tabelle 1: Übersicht der direkten Verschleißmessgrößen [8]

Verschleiß-Messgröße		Zeichen	Einheit
Verschleißbetrag	Längen-, Flächen, Volumen oder Massenänderung des verschleißenden Körpers	W	$[m]; [m^2]; [m^3]; [kg]$
linearer Verschleißbetrag	Längenänderung senkrecht zur verschleißenden Fläche	W_l	$[m]$
Planimetrischer Verschleißbetrag	Größe der Schnittfläche, die senkrecht zur verschleißenden Fläche abgetragen wird	W_q	$[m^2]$
Volumetrischer Verschleißbetrag		W_v	$[m^3]$
Massenmäßiger Verschleißbetrag		W_m	$[kg]$
Relativer Verschleißbetrag	Verhältnis der Verschleißbeträge des verschleißenden Körpers und eines unter den gleichen Bedingungen verschleißenden Referenzkörpers	W_r	$[-]$
Verschleißwiderstand	Reziprokwert des Verschleißbetrages	$\frac{1}{W}$	$\left[\frac{1}{m}\right]; \left[\frac{1}{m^2}\right]; \left[\frac{1}{m^3}\right]; \left[\frac{1}{kg}\right]$
relativer Verschleißwiderstand	Reziprokwert des relativen Verschleißbetrages	$\frac{1}{W_r}$	$[-]$

Bei den indirekt bezogenen Verschleißgrößen hingegen wird der Verschleiß eines Körpers in das Verhältnis zu einer Bezugsgröße gesetzt. Sie werden ermittelt, indem die Verschleißgröße nach der Bezugsgröße abgeleitet wird. Die mathematische Ableitung kennzeichnet den Anstieg der in Abbildung 3 dargestellten Kurve. Sie beschreibt, dass sich der Verschleißbetrag in Abhängigkeit der Bezugsgröße linear, progressiv oder degressiv verändern kann. Als Bezugsgrößen werden vordergründig die Dauer der Beanspruchung, der Beanspruchungsweg oder der Durchsatz verwendet.

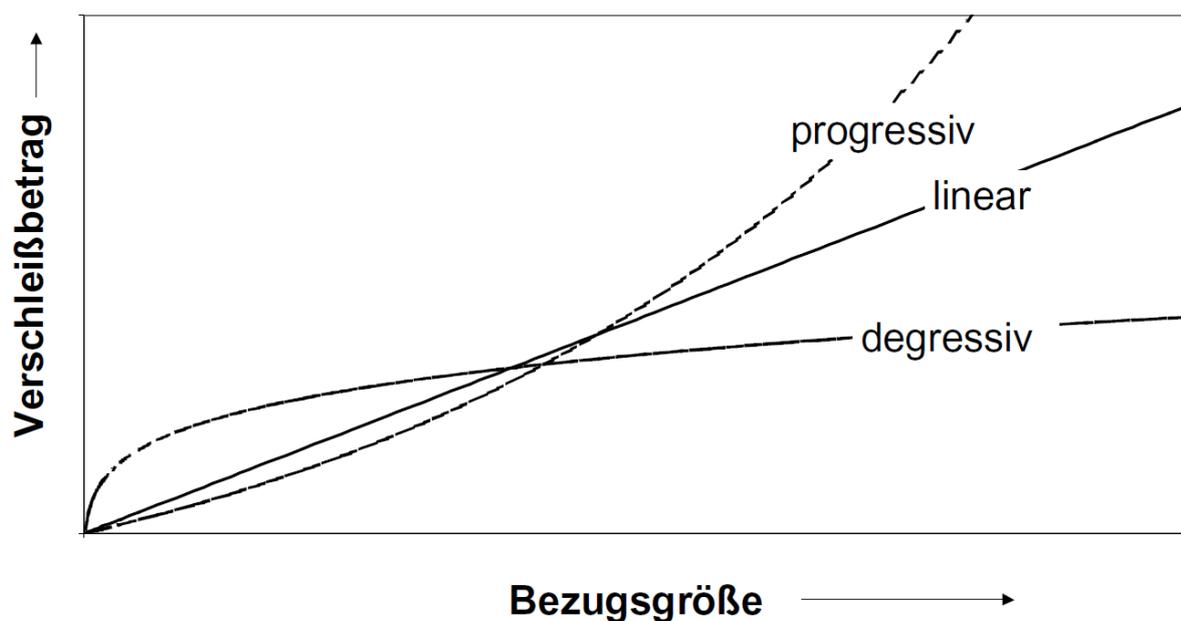


Abbildung 3: Kurven der Verschleißbeträge nach einer Bezugsgröße aufgetragen [3]

Häufig wird die Verschleißgeschwindigkeit eines Werkstückes bestimmt. Dies bedeutet, dass der Verschleißbetrag nach der Zeit abgeleitet wird. In Tabelle 1 wurde bereits auf die Verschleißbeträge eingegangen. Die folgenden Formeln kennzeichnen die Verschleißgeschwindigkeit nach der Zeit, wobei der Verschleiß längen-, flächen-, volumen-, und massenmäßig erfasst wird.

$$W_{l/t} = \frac{dW_l}{dt} \quad [\text{m/h}] \quad (3)$$

$$W_{q/t} = \frac{dW_q}{dt} \quad [\text{m}^2/\text{h}] \quad (4)$$

$$W_{V/t} = \frac{dW_V}{dt} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (5)$$

$$W_{m/t} = \frac{dW_m}{dt} \quad [\text{Kg/h}] \quad (6)$$

Die indirekten Verschleißgrößen dienen dazu, die Dauer und den Durchsatz eines tribologischen Systems zu bestimmen, bis zu dem Zeitpunkt, ab welchen es seine Funktionalität verliert. Hierzu ist es notwendig den Neuzustand des Tribosystems zu erfassen und einen Grenzwert zu ermitteln, ab wann eine Leistungsminderung eintritt.

3 Durchführung

3.1 Probenbeschreibung

Es soll das Verschleißverhalten an Diamantsägedrähten mit zunehmender Beanspruchungsdauer charakterisiert werden. Als Ausgangssituation lagen die mit Diamanten besetzten Sägedrähte des Herstellers A und B vor. Diese mussten zunächst präpariert werden, damit sie unter industrienahen Bedingungen an einer Eindrahtsäge eingesetzt werden konnten. Als erster Schritt musste die Strecke zwischen den Rollen der Eindrahtsäge bestimmt werden auf denen der herzustellende Endlosdraht in einer Kerbe geführt wird. Durch Messen des bereits montierten Drahtes wurde eine notwendige Länge von 1,60 m ermittelt. Danach wurden jeweils zehn Diamantsägedrähte von beiden Herstellern auf diese Länge gebracht und die Drahtenden für das Schweißen von insgesamt zwanzig Endlosdrahtschlaufen vorbereitet. Die Diamanten der Sägedrähte sind mit einer Nickelschicht auf einem Stahldraht eines Durchmessers von 120 µm befestigt. Damit der

Draht geschweißt werden konnte, mussten die beiden Enden eines Drahtes von den Diamanten und der Nickelschicht befreit werden. Die dargestellte Abbildung 4 zeigt den Versuchsaufbau eines zu ätzenden Drahtes, der am oberen Rand des Glasgefäßes fixiert wurde und somit in der Lösung eintauchte. Um den Versuchsaufwand zu minimieren, wurden zur Herstellung der zwanzig Drahtschlaufen jeweils die Enden von zehn Diamantdrähten zu einem Bündel zusammengefasst und in das Ätzbad eingetaucht. Dazu wurden zuerst die Drahtenden der zehn abgelängten Drähte des Herstellers A circa 1 cm tief in 50 ml Lösung mit der Bezeichnung Nickelstripper 120 des Herstellers RIAG eingetaucht. Die verwendete Lösung setzte sich aus 7,5 ml (Nickelstripper 121), 5 ml (Nickelstripper 122) und 37,5 ml Wasser zusammen. Das Glasgefäß wurde auf eine Heizplatte platziert und das Gemisch, indem sich die Drähte befanden, auf eine Temperatur von 100 °C unter einem Abzug erwärmt. Unter ständigem Rühren wurden die Diamantdrähte für fünf Minuten geätzt. Dafür wurde die ebenfalls in Abbildung 4 dargestellte Heizplatte verwendet, die ein magnetisches Drehfeld erzeugt, was einem Magnetrührer im Glasgefäß anregt die Drehbewegung auszuführen. Aufgrund der mechanischen Bewegung ließen sich nahezu alle Diamantkörner ablösen. In Vorversuchen wurde während des Ätzvorganges nicht kontinuierlich umgerührt, mit dem Ergebnis, dass vereinzelt Diamantkörner auf dem Stahldraht zurückblieben.

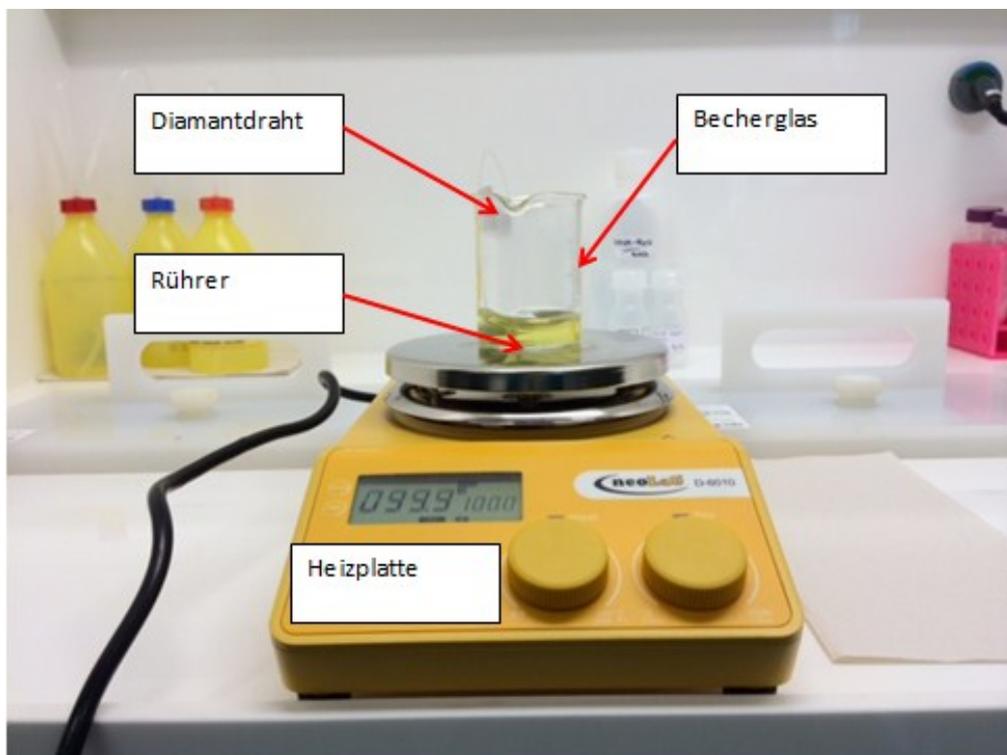


Abbildung 4: Ätzen des Diamantdrahtes in der Nickelstripper Lösung auf einer Heizplatte

Die zehn Drähte des Herstellers B wurden unter Verwendung einer neuen Lösung analog zum beschriebenen Verfahren behandelt. Die nach dem Ätzen verbleibenden Rückstände wurden anschließend von dem blanken Stahldraht entfernt. Dazu tauchten die Drahtenden für fünf Minuten bei 65 °C in ein Ultraschallbad ein. Die nachfolgende Abbildung 5 stellt den geätzten Draht und den originalen Diamantdraht des Herstellers A gegenüber.

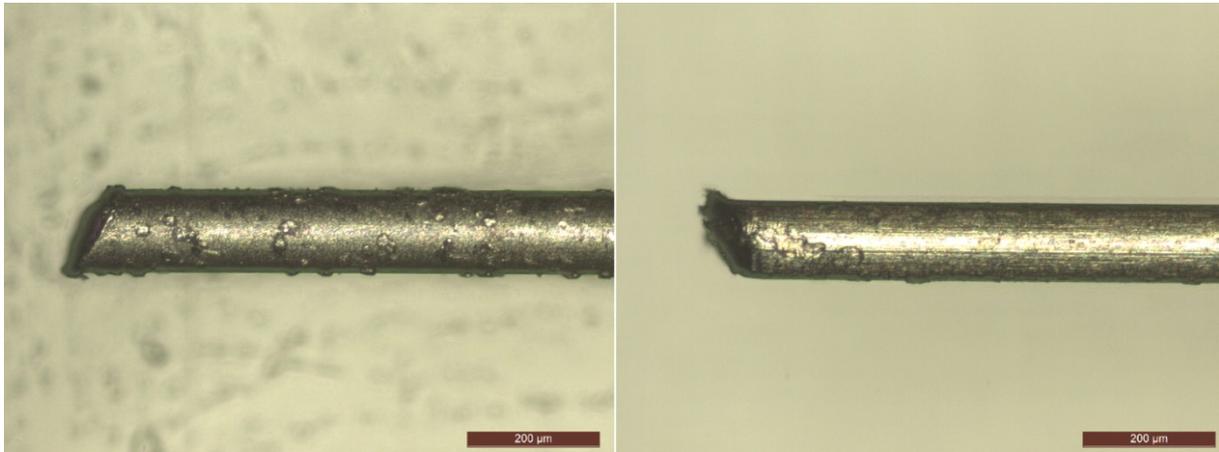


Abbildung 5: Vergleich des ungeätzten Diamantdrahtes (links) mit dem geätzten (rechts)

Im zweiten Schritt wurden die beiden Enden eines Diamantdrahtes mit Schleifpapier entgratet und als Vorbereitung für den Schweißvorgang in jeweils ein Glasröhrchen eingeführt, sodass etwa 1 mm der Drahtenden auf einer Seite der Glasröhrchenöffnung herausragte. Beide vom Glasröhrchen umhüllte Enden des Diamantdrahtes wurden in die Halterung des Laserschweißgerät „Vision LSG LWI IV“ der Firma Lasertech GmbH eingespannt. Die beiden Enden der Diamantdrähte wurden sich fluchtend gegenüber positioniert und konnten mit einem Drehregler aufeinander zu oder voneinander weg bewegt werden. Über einen Fußschalter konnten Laserimpulse einer bestimmten Energie auf den Draht fokussiert werden. Der Laser wurde auf das jeweilige Drahtende gerichtet, wodurch die Laserimpulse daraus eine kugelhähnliche Form erzeugten. Die Positionierung des Laserstrahls erfolgte mit Hilfe eines Lichtmikroskops mit dem der Prozess zu beobachten war. Anschließend wurden die beiden kugelförmigen Drahtenden aufeinander bewegt bis sie sich berührten. Dann wurde im Programm die Energie des Lasers erhöht und vom vorher verwendeten Dauerimpuls- auf den Einzelimpulsbetrieb umgestellt. Somit wurden die beiden Drahtenden durch einen einzigen Laserimpuls miteinander verschweißt. Auf diese Weise wurden jeweils zehn Endlosdrahtschlaufen beider Hersteller vorbereitet.

Aus vorigen Schweißversuchen war bekannt, dass die Diamantdrähte unter den gewählten Schweißparametern mit anschließender Wärmebehandlung einer Zugkraft von im Mittel 22 N widerstehen. In der vorangestellten Versuchsplanung sollte ein Diamantdraht mit 15 N während des Säge- bzw. Verschleißversuches belastet werden. Für eine Gewährleistung

dieser Haltekraft wurde der geschweißte Diamantdraht an einer Prüfmaschine „Zwick/Roell 050“ auf eine Kraft von 18 N getestet. Die Kraftmessung erfolgte über die Prüfdose 1 KN x-force und die Wegmessung wurde von der Traverse durchgeführt. Die Drahtschlaufen wurden in zwei sich gegenüberstehenden, rollengeführten Spannbacken pneumatisch befestigt. Der Abstand der Einspannbacken wurde auf 50 mm gewählt. Zusätzlich musste der Weg von 83 mm für die beiden Umlenkrollen, auf denen der Draht geführt wurde, beaufschlagt werden. Daraus resultierte eine Gesamteinspannlänge von 133 mm. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,05 mm/s und die Vorkraft wurde auf 0,5 N justiert.

3.2 Planung der Sägeexperimente

Die Eindrahtsäge des Fabrikats „Well Murg 24 A“ wurde im Vorfeld annähernd an die Anforderungen von Industriesägen angepasst. In der Tabelle 2 sind die Vorgaben einer Multidrahtsäge aufgezeigt, unter denen ein multikristalliner Siliziumingot in Wafer geteilt wird.

Tabelle 2: Sägeparameter einer Multidrahtsäge im industriellen Einsatz

Sägeparameter	Einstellung
Vorschubgeschwindigkeit	1 mm/min
Drahtspannkraft	25 N
Sägegeschwindigkeit (Drahtlaufgeschwindigkeit)	15 m/s

In der Probenbeschreibung wurde darauf eingegangen, dass die Schweißnähte nach dem Laserschweißen einer Zugkraft von circa 22 N widerstehen. Somit konnte die Kraft auf den Draht nicht nach der Vorgabe des Industrieprozesses eingestellt werden. Um dennoch möglichst industriennahe Versuchsparameter zu verwenden, sollten Vorversuche durchgeführt werden, wobei der Sägedraht bei 15 N und 10 N unter den sonst gleichbleibenden Industrieparametern getestet werden sollte. In der folgenden Tabelle 3 sind die Sägezeiten, Zeit vom Start des Verschleißversuchs bis zum Riss des Drahtes, von Endlosdrahtschlaufen beider Hersteller eingetragen.

Tabelle 3: Sägezeiten aus den Vorversuchen für beide Drahthersteller

Drahtnummer	Kraft [N]	Vorschub [mm/min]	Sägezeit Hersteller A	Sägezeit Hersteller B
1	15	1	0 min 15 s	4 min 58 s
2	15	1	2 min 0 s	2 min 09 s
3	10	1	4 min 21 s	3 min 56 s
4	10	0,5	11 min 19 s	15 min 03 s
5	10	0,3	24 min 32 s	29 min 44 s

Aus den Vorversuchen wurde abgeleitet, dass der Diamantdraht bei einer Kraft von 10 N mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,2 mm/min in den festgelegten Zeitintervallen sägen soll. Die Drahtlaufgeschwindigkeit sollte konstant bei 15 m/s bleiben, da sich an ihr die Analogie zum Multidrahtsägeprozess herstellen ließ und sich daraus die zeitlichen Etappen für die Drahtanalyse einteilen konnten. Dazu wurden an einem konkreten Beispiel (vgl. Tabelle 4) einer Multidrahtsäge folgende Überlegungen angestellt. Die gewählte Multidrahtsäge (Meyer Burger DS265) verfügt über zwei Rollen, in denen sich 909 Kerben befinden, worin der Diamantdraht entlang geführt wird. Die Anzahl der Kerben ist gleich der gesägten Menge an Wafern aus einem Siliziumblock. In dem Beispiel werden in einem Sägezyklus erst 610 m auf die eine Rolle aufgewickelt und danach 590 m von dieser Rolle abgewickelt. Dies bedeutet, dass pro Sägezyklus 20 m auf der Aufwickelpule verbleiben. Es wurde ein Diamantkorn betrachtet, das als Ausgangspunkt gerade in das Drahtfeld einfährt. Anschließend sollte festgestellt werden, nach welchem Weg es sich auf der Aufwickelpule befindet, sodass es nicht mehr sägt. Dieser Weg wird im Folgenden als Sägestrecke s bezeichnet. In der Abbildung 6 ist der Startpunkt des Kornes mit dem Buchstaben A gekennzeichnet und das Ende der Sägestrecke mit B deklariert. (Richtung des Drahtlaufes von A nach B)

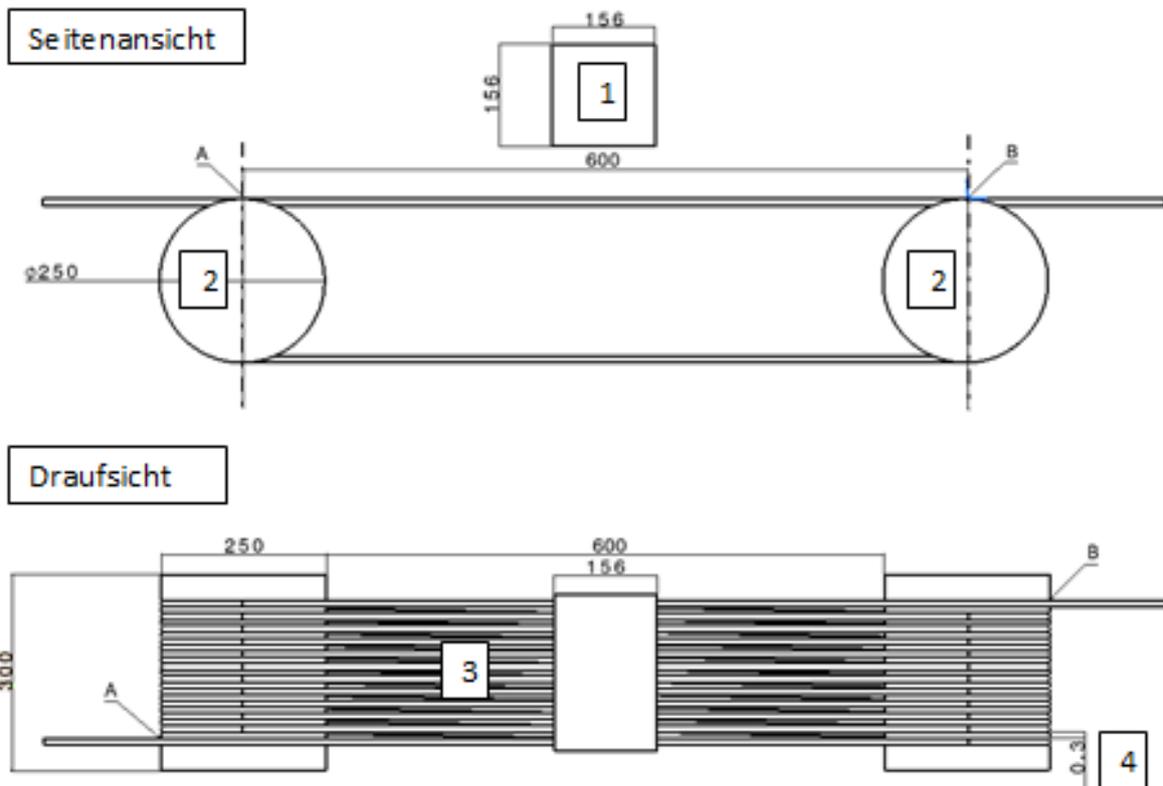


Abbildung 6: technische Darstellung einer Multidrahtsäge: Siliziumbrick (1), Führungsrollen (2), Drahtfeld (3), Kerbenabstand (4)

Der Weg mit dem das einzelne Korn in Kontakt mit dem Siliziumingot steht wird in dieser Arbeit als Verschleißweg bezeichnet. Das Ziel der angestellten Rechnung war es, herauszufinden, wie lange der Diamantdraht an der Eindrahtsäge sägen muss, um genau diesen Verschleißweg s_V wiederzugeben.

Tabelle 4: Daten der gewählten Multidrahtsäge

Aufwickellänge des Drahtfeldes	590 m
Abwickellänge des Drahtfeldes	610 m
Abstand der Kerben (Pitch)	0,33 mm
Durchmesser der Führungsrollen	250 mm
Abstand der Führungsrollen	600 mm
Abmessung des Siliziumblockes	156x156 mm
Länge der Führungsrollen	300 mm

Dazu wurde zu Beginn der Umfang U der Führungsrollen bestimmt.

$$U = \pi d = 3,14 * 250 \text{ mm} = 785 \text{ mm} \quad (7)$$

Wenn der Umfang U mit dem doppelten Abstand der Führungsrollen d addiert wird, dann ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$l = U + 2d = 785 \text{ mm} + 2 * (600 \text{ mm}) = 1985 \text{ mm}. \quad (8)$$

Nach dieser Strecke hat sich das Diamantkorn genau eine Kerbe weiter bewegt. Bei der betrachteten Multidrahtsäge sind 909 Kerben auf der Rolle vorhanden. Die Sägestrecke s lässt sich berechnen, indem die Strecke l mit der Kerbenanzahl K multipliziert wird.

$$s = K * l = 909 * 1985 \text{ mm} = 1804365 \text{ mm} = 1804,4 \text{ m} \quad (9)$$

Für die Sägestrecke s eines betrachteten Diamantkorns ergibt sich ein Weg von 1804,4 m. Daraus soll der Verschleißweg s_v bestimmt werden, das heißt wie viel Meter hat das Korn während seines Sägeweges an Silizium gesägt. Als erstes wird der Abwickelprozess betrachtet. Es soll bestimmt werden, wie viel Kerben sich das Diamantkorn beim Abwickeln von 610 m bewegt hat.

$$\frac{K_{ab}}{s_{ab}} = \frac{K_{ges}}{s_{ges}}$$

$$K_{ab} = \frac{K_{ges}}{s_{ges}} * s_{ab} = \frac{909 \text{ Kerben}}{1804,4 \text{ m}} * 610 \text{ m} = 307 \text{ Kerben} \quad (10)$$

Das Diamantkorn bewegt sich beim Abwickeln 307 Kerben. Zu Beginn wurde erwähnt, dass jede Kerbe einem Wafer zuzuordnen ist. Das bedeutet, dass ein Korn pro Kerbe mit 156 mm Siliziummaterial wechselwirkt. Um den Verschleißweg für das Abwickeln zu ermitteln, muss die soeben errechnete Kerbenanzahl K_{ab} mit der Waferlänge l_w multipliziert werden.

$$s_{vab} = 156 \text{ mm} * 307 = 47892 \text{ mm} = 47,9 \text{ m} \quad (11)$$

Analog dazu wird diese Rechnung für das Aufwickeln angestellt. Dazu wird erneut das Verhältnis der Aufwickellänge aufgestellt.

$$\frac{K_{auf}}{s_{auf}} = \frac{K_{ges}}{s_{ges}}$$

$$K_{auf} = \frac{K_{ges}}{s_{ges}} * s_{auf} = \frac{909 \text{ Kerben}}{1804,4 \text{ m}} * 590 \text{ m} = 297 \text{ Kerben} \quad (12)$$

Beim Aufwickeln bewegt sich das Korn wieder 297 Kerben zurück und sägt pro Kerbe erneut 156 mm des Siliziumwafers.

$$s_{Vauf} = 156 \text{ mm} * 297 = 46332 \text{ mm} = 46,3 \text{ m} \quad (13)$$

Wenn die Verschleißwege des Ab- und Aufwickelns addiert werden, dann ergibt sich ein Weg von 94,2 m. Dabei hat das betrachtete Diamantkorn genau 10 Kerben zurückgelegt (307 - 297 Kerben). Nun soll der Verschleißweg bestimmt werden, den das Diamantkorn zurücklegt, bis es die Aufwickelspule nach 909 Kerben erreicht und nicht mehr am Sägeprozess beteiligt ist.

$$s_{Vges} = \frac{909 \text{ Kerben}}{10 \text{ Kerben}} * 94,2 \text{ m} = 8562,8 \text{ m} \quad (14)$$

Dieses Ergebnis verdeutlicht die Strecke des von einem Diamantkorn gesägten Siliziums vom Anfang der Abwickelspule bis zum Ende der Aufwickelspule. Dieser Verschleißweg soll an der Eindrahtsäge in identischer Form abgebildet werden und somit die Standzeit der Diamantkörner auf dem Draht übereinstimmend repräsentieren. Dazu ist eine weitere Rechnung notwendig, in der bestimmt werden soll, wie lange der Diamantdraht auf der Eindrahtsäge in Betrieb sein muss, damit ein Diamantkorn 8562,8 m an Verschleißweg auf dem Silizium zurückgelegt hat. Die Drahtlaufgeschwindigkeit von 15 m/s als Parameter der Multidrahtsäge soll dabei übernommen werden. Das bedeutet, wenn die Drahtlänge an der Eindrahtsäge 1,60 m beträgt und sich dieser mit 15 m/s bewegt, so lässt sich die Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde bestimmen.

$$N = \frac{v}{l} = \frac{15 \text{ m/s}}{1,6 \text{ m}} = 9,375 \text{ s}^{-1} \quad (15)$$

Ein Diamantkorn auf dem Draht führt in einer Sekunde 9,375 Umdrehungen aus. Pro Umdrehung sägt das Korn 156 mm Siliziummaterial eines Siliziumingots. Das bedeutet die Anzahl der Umdrehungen muss mit der Höhe des Siliziumblockes multipliziert werden. So ergibt sich ein Weg von 1462,5 mm pro Sekunde. Aus der Rechnung für die Multidrahtsäge ging hervor, dass der Verschleißweg 8562,8 m beträgt. Wenn der Weg der Eindrahtsäge durch den Verschleißweg der Multidrahtsäge dividiert wird, dann ergibt sich die Sägedauer t , die der Diamantdraht an der Eindrahtsäge im Einsatz sein muss.

$$t = \frac{8562,8 \text{ mm} * 10^3}{1462,5 \text{ mm/s}} = 5854,9 \text{ s} = 98 \text{ min} \quad (16)$$

Diese Rechnung und die zuvor durchgeführten Sägeversuche wurden angestellt, um die Sägeexperimente mit denen der Verschleiß bestimmt werden sollte, zu planen. Daraus hat sich der folgende Versuchsplan im Abschnitt 3.3 entwickeln lassen.

3.3 Sägeversuche

Die Sägeversuche lieferten die Daten, die zum Messen des Verschleißes an dem Diamantdraht notwendig waren. Da diese möglichst unter den Bedingungen einer Multidrahtsäge erhoben werden sollten, mussten die Versuchsparameter der Eindrahtsäge überprüft werden. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde an der Säge über ein Potenziometer eingestellt, das die Geschwindigkeit des Sägefisches im Bereich von 0,2 mm/min bis 40 mm/min einstellen ließ. Der in der Industrie gewählte Vorschub von 1 mm/min führte in den Vorversuchen an der Eindrahtsäge zum Drahtriss, sodass der Vorschub auf 0,2 mm/min verändert werden musste. Da das Potenziometer im unteren Anzeigebereich eingestellt und die Skaleneinteilung in 10 mm/min Schritten eingeteilt war, musste der Vorschub gemessen werden. Dazu wurde neben dem Sägefisch ein Stahlmaß angebracht und ein bestimmter Weg, bei gleichzeitiger Zeitmessung, aufgenommen. Damit wurde die Geschwindigkeit des Vorschubes errechnet, indem der Weg durch die Zeit dividiert wurde. Die Zugkraft auf den Diamantdraht konnte nur bedingt an den in der Industrie verwendeten Betrag von 25 N angenähert werden, da die Schweißnaht der Endlosschleife wie eine Sollbruchstelle betrachtet werden musste. Deshalb wurde die Kraft auf die Endlosschleife an der Eindrahtsäge auf 10 N gewählt. Diese Kraft ergab sich ebenfalls aus den Vorversuchen, da bei höheren Kräften die minimale Sägezeit von 38 Minuten nicht erreicht wurde. In der Abbildung 7 ist dargestellt wie die Zugkraft bei einem Vorversuch mit einem Drahtspannungsmessgerät bestimmt wurde. Der Draht wurde in ein rollengeführten Führungsschlitten eingespannt und an der Skala ließ sich die Kraft (angegeben in cN) ablesen. Die untere Spannrolle der Eindrahtsäge wurde über eine Wippe mit Gewichtsscheiben bestückt, da bereits ihr Eigengewicht eine Drahtspannung von 40 N ergab. Dadurch ließ sich die Spannung auf den Diamantdraht beliebig verändern.

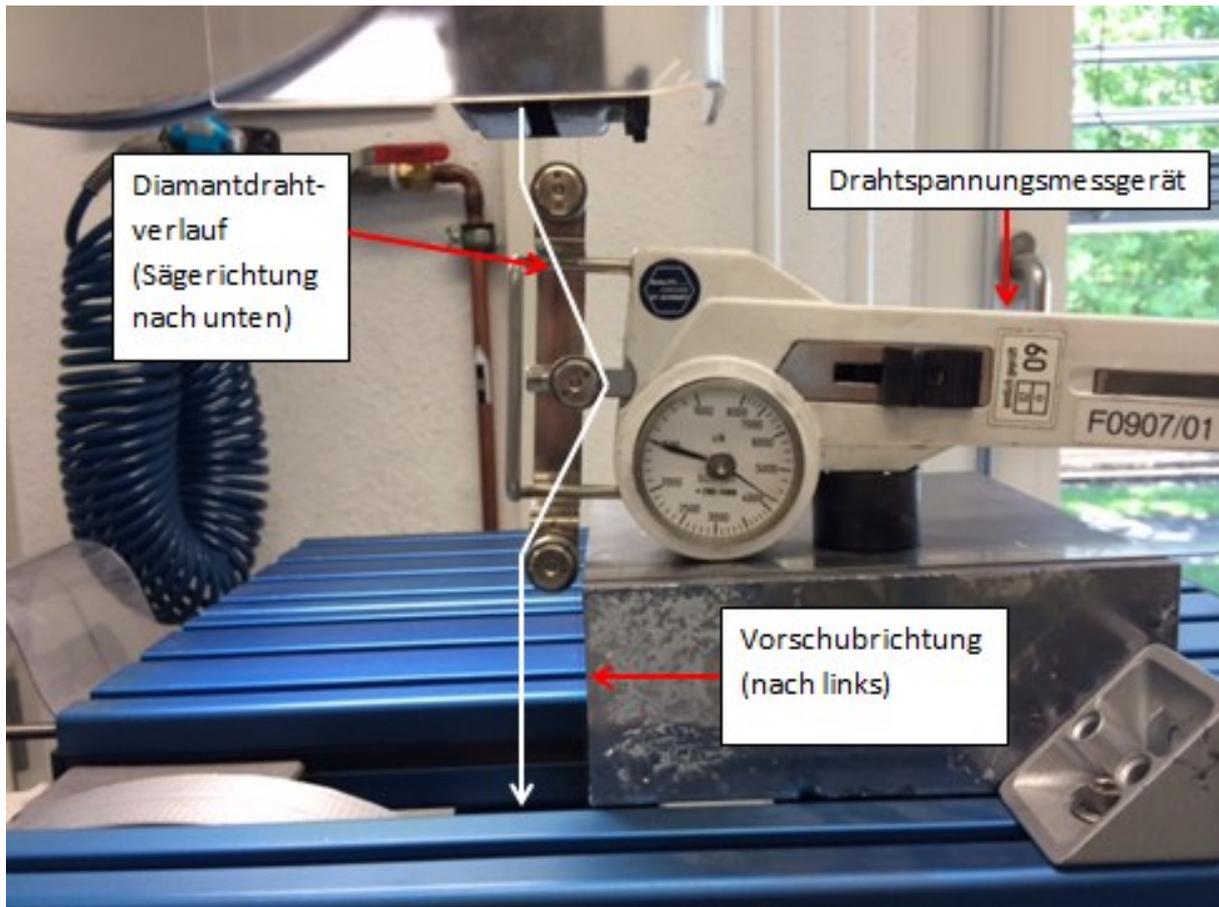


Abbildung 7: Messung der Kraft auf den Diamantdraht mit einem Drahtspannungsmessgerät

Die beiden Parameter (Vorschub und Kraft) wurden so gewählt, dass die Sägeschwindigkeit von 15 m/s und damit der Verschleißweg von 8562,8 m gewahrt wurden. Ein weiteres Kennzeichen der Sägeversuche war die Verschleißcharakterisierung nach der Zeit vorzunehmen. Demnach wurde festgelegt, dass je eine Diamantdrahtschleife pro Hersteller in verschiedenen Zeitintervallen sägen sollte. Dazu erwies sich die folgende Zeiteinteilung als praktikabel. Die Intervalle wurden eingeteilt in 30 Minuten, 60 Minuten und 98 Minuten. In Tabelle 5 sind die an der Eindrahtsäge eingestellten Parameter zusammengefasst.

Tabelle 5: Übersicht der gewählten Parameter an der Eindrahtsäge für alle durchgeführten Verschleißversuche

Parameter	Eindrahtsäge	Multidrahtsäge	Übereinstimmung in %
Vorschub	0,2 mm/min	1 mm/min	20
Sägeschwindigkeit	15 m/s	15 m/s	100
Kraft	10 N	25 N	40
Verschleißweg	8562,8 m	8562,8 m	100

Zuerst wurde die Diamantdrahtschleife des Herstellers A in die Eindrahtsäge eingespannt und für 30 Minuten ein multikristalliner Siliziumingot gesägt. Dieser war hochkant auf dem beweglichen Sägetisch befestigt, sodass pro Umdrehung der Drahtschleife jedes dem Ingot zugewandte Korn einen Verschleißweg von 156 mm auf dem Silizium zurückgelegt hatte (vgl. Abb. 8).

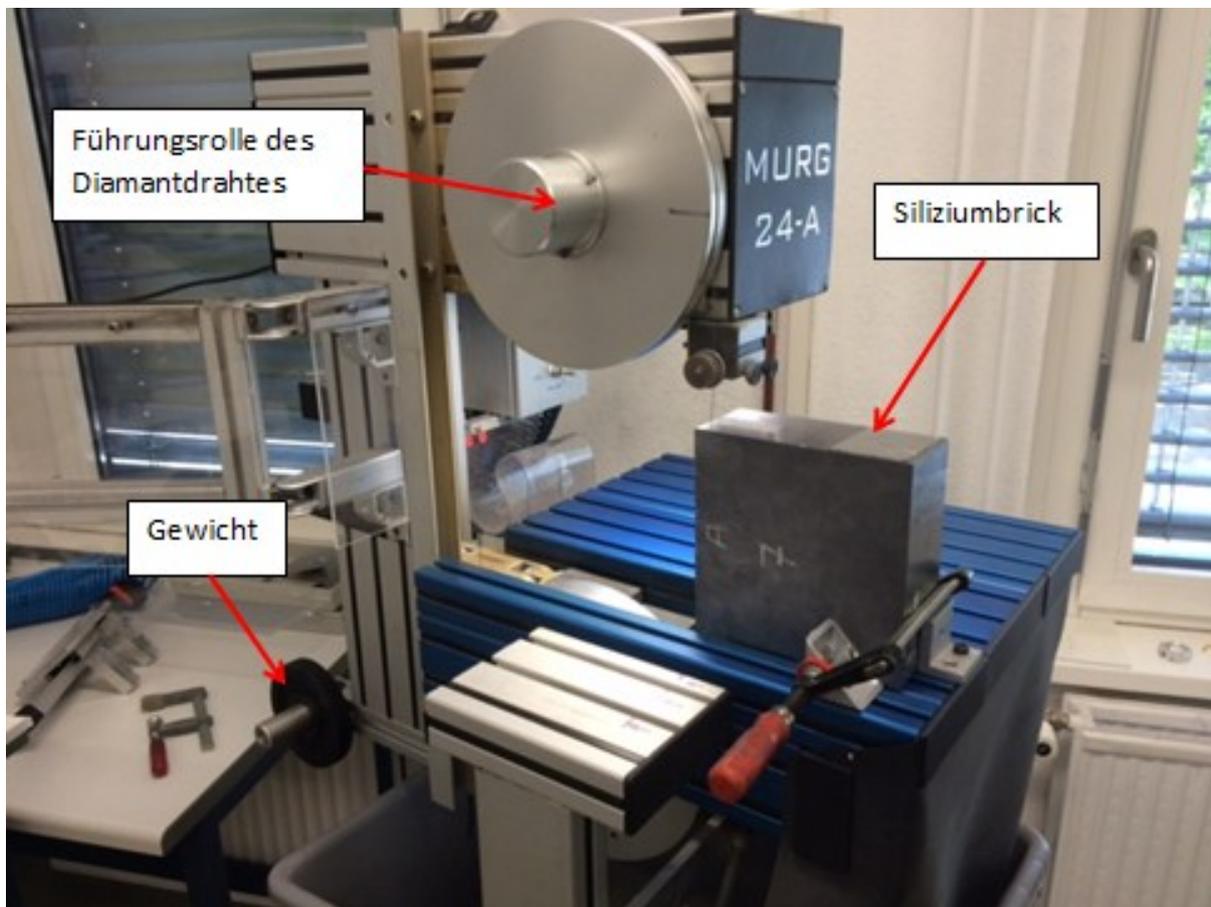


Abbildung 8: Sägen eines Siliziumblockes im Verschleißexperiment

Dann wurde die Endlosdrahtschleife des zweiten Herstellers B eingespannt und ebenfalls 30 Minuten gesägt. Für diese Standzeit wurde der Verschleiß unter dem Lichtmikroskop (vgl. Abs. 3.4) analysiert. Danach wurde der Versuch erneut unter gleichen Sägeparametern durchgeführt und die Drähte beider Hersteller wiederholt für 30 Minuten gesägt. Dies entspricht der Standzeit von einer Stunde, wonach die Drahtschlaufen nochmals untersucht wurden. Um die Sägezeit von 98 Minuten zu erfüllen und damit den Verschleißweg eines Kornes wie bei der Mehrdrahtsäge zu erreichen, sägten in den letzten Sägeversuchen die Drähte beider Hersteller für 38 Minuten.

In einem folgenden, zweiten Sägeexperiment wurde eine neu hergestellte Diamantdrahtschleife (Hersteller A) in die Eindrahtsäge eingespannt und in 10 Minuten Intervallen die Schnitttiefe gemessen. Die Sägeparameter waren analog zu den bisher

verwendeten eingestellt mit dem Unterschied, dass der Vorschub auf 1 mm/min verändert wurde. Die Drahtlaufgeschwindigkeit von 15 m/s und die Kraft von 10 N wurden konstant gehalten. Die Schnitttiefen der 10 Minuten Intervalle wurden für eine Sägedauer von 0 bis 100 Minuten aufgenommen. Dabei wurde die Probe, aufgrund des erhöhten Vorschubes nicht hochkant, sondern flach auf dem Vorschubtisch der Eindrahtsäge befestigt. Der Verschleißweg eines Diamantkorns pro Umlauf wurde damit reduziert und betrug 62 mm. In der folgenden Tabelle sind noch einmal die Parameter zusammengefasst, die für das zweite Telexperiment zur Bestimmung der Abtragsfähigkeit des Diamantdrahtes relevant waren.

Tabelle 6: Angaben der Einstellwerte zum zweiten Experiment Schnittgeschwindigkeitsversuche

Sägeparameter	Einstellung
Vorschubgeschwindigkeit	1 mm/min
Sägegeschwindigkeit	15 m/s
Drahtspannkraft	10 N
Verschleißweg pro Umdrehung	62 mm

3.4 Mikroskopische Analyse

Die Analyse des Diamantdrahtes diente dazu, den Grad des Verschleißes in Abhängigkeit der gewählten Zeitintervalle (Standzeit 0 min, 30 min, 60 min, 98 min) durch Messwerte zu erfassen. Als Hilfsmittel dazu wurden das Lichtmikroskop „DM6600“ der Firma Leica und die Software „Cell^F“ verwendet. Für die Datenanalyse wurden Verschleißgrößen definiert. Hierzu zählten die Messung des äußeren/inneren Drahtdurchmessers, die Diamantkorngrößen und die Anzahl der Diamantkörner auf dem Draht. Dabei sei erwähnt, dass der äußere Drahtdurchmesser die Strecke darstellt, die von der Spitze des oberen, größten Korns und von der Spitze des unteren, größten Korns auf dem Draht in der Draufsicht der Lichtmikroskopaufnahme gemessen werden konnte. Der innere Drahtdurchmesser beschreibt dagegen die Strecke von der oberen bis zu der unteren Grenzlinie des Drahtes, ohne Berücksichtigung der Körner. Hierbei sollte beachtet werden, dass es sich bei dem inneren Drahtdurchmesser nicht um den Kerndurchmesser des Drahtes handelt, da dort der Überzug von der Nickelschicht mitgemessen wird. Diese Verschleißmarker stellten die Grundlage dar, das Verschleißverhalten mit voranschreitender Standzeit der Endlosdrahtschlaufen beider Hersteller zu kennzeichnen. Da nicht die gesamte 1,60 m lange Drahtschlaufe unter dem Mikroskop betrachtet werden konnte, wurde eine Bildanzahl von 40 Aufnahmen pro Endlosschlaufe bestimmt. Damit mehrere Bereiche auf

dem Diamantdraht untersucht werden konnten, wurde dieser in vier Abschnitte unterteilt und aus jedem Teilabschnitt jeweils 10 Aufnahmen angefertigt.

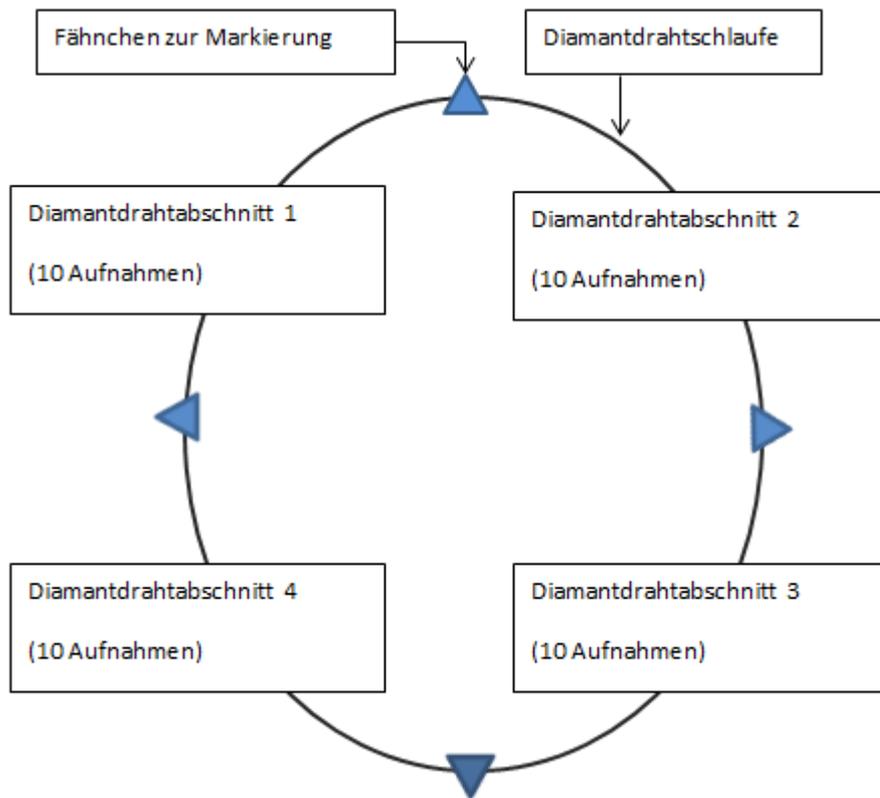


Abbildung 9: Schema zur Probenbeschreibung der Diamantdrahtschleife und Kennzeichnung der lichtmikroskopischen Untersuchungsbereiche

Zuerst wurden die geschweißten Diamantdrahtschleifen von den Herstellern A und B vor dem Sägen vermessen und unter den Gesichtspunkten der vorgestellten Verschleißmarker untersucht. Diese Daten galten als Referenzwerte und waren Ausgangspunkt für die anzustellenden Betrachtungen. Danach wurden beide Drahtschleifen im Sägeprozess für 30 Minuten eingesetzt und erneut unter der beschriebenen Vorgehensweise vermessen. Die Abbildung 10 zeigt am Beispiel des Diamantdrahtes vom Hersteller B im Neuzustand wie die genannten Verschleißgrößen bestimmt wurden.

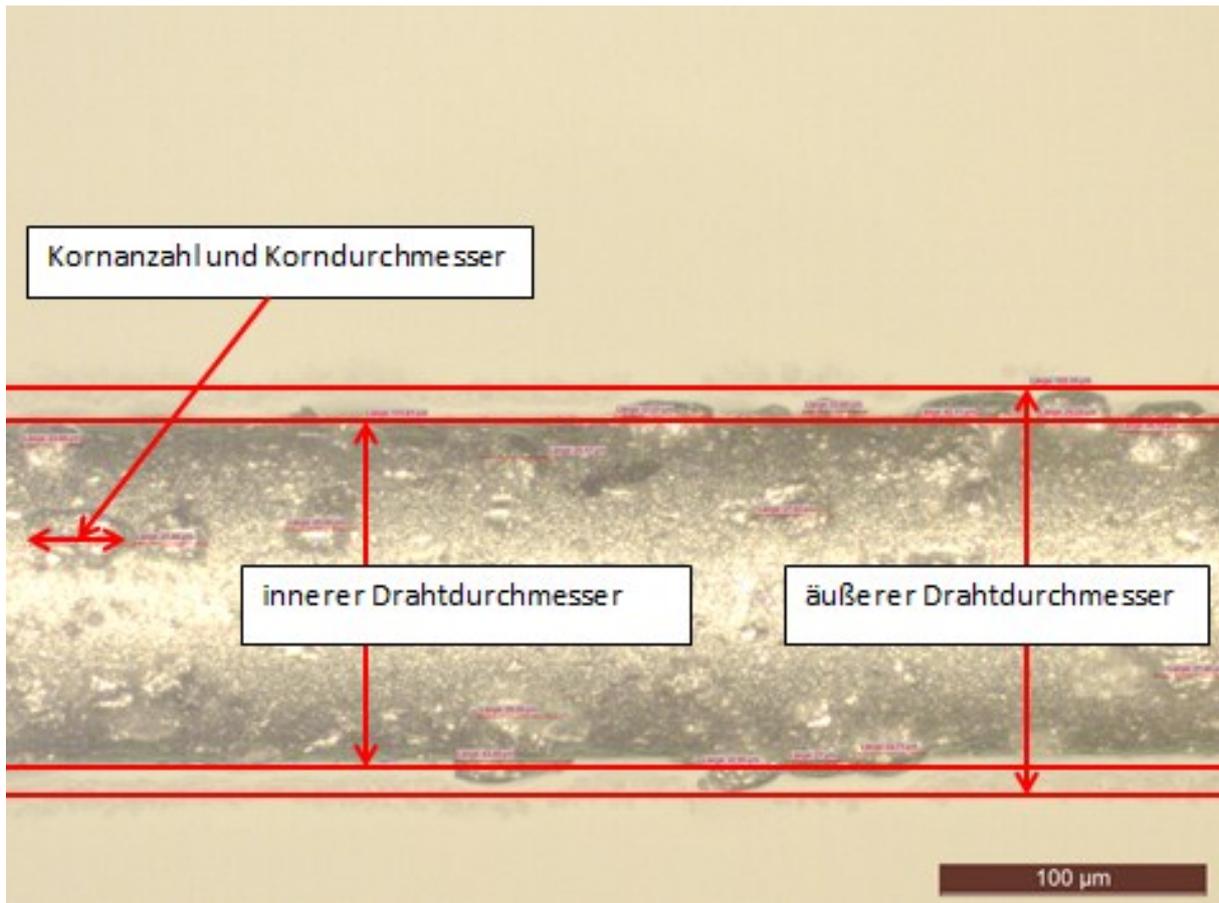


Abbildung 10: mikroskopische Auswertung des Diamantdrahtes vom Herstellers B (Neuzustand)

Wie bereits in dem Abschnitt 3.3 der Sägeversuche erwähnt, wurden die beiden Drähte anschließend für weitere 30 Minuten im Sägeprozess eingesetzt und danach erneut auf gleiche Weise untersucht. Im letzten Sägeintervall wurden die beiden Drähte für 38 Minuten, das heißt nach einer Gesamtsägedauer von einer Stunde und 38 Minuten analysiert. Die sich daraus ableitenden Ergebnisse sind im nachfolgenden Abschnitt zusammengefasst. Dort wird in den aufgestellten Histogrammen ersichtlich, dass sich die Werte von allen vier Verschleißparametern normal verteilen. Um sich dem wahren Wert anzunähern, wurde das Maximum der erstellten Glockenkurve herangezogen, was dem Mittelwert der Messreihe entspricht. Die Glockenkurve wurde mit einer mathematischen Bildungsvorschrift aus den Messdaten erstellt. Diese ist der folgenden Formel zu entnehmen.

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left\{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}} \quad (17)$$

4 Ergebnisse

Bevor die Ergebnisse aufgezeigt werden, sei noch einmal erwähnt, dass zwei Arten von Experimenten durchgeführt worden sind. Im Verschleißtest wurde der Diamantdraht hinsichtlich seiner Verschleißmarker analysiert. Im Gegensatz dazu diente der Schnittgeschwindigkeitstest im zweiten Experiment dazu, die Schnitttiefe nach der Zeit aufzunehmen, um daraus abzuleiten, ob beziehungsweise wie sich die Abtragungsgeschwindigkeit aufgrund des einsetzenden Verschleißes verändert.

Verschleißtests

In diesem Abschnitt werden die Daten, welche aus den Anstrengungen der mikroskopischen Untersuchungen gewonnen wurden, statistisch ausgewertet und durch Histogramme dargestellt. Damit wird in der folgenden Abhandlung das Verschleißverhalten an den deklarierten Verschleißmarkern in Abhängigkeit der festgelegten Standzeiten für die Diamantdrähte analysiert. Dies wird eingangs für den untersuchten Draht des Herstellers A unternommen und anschließend für den Fabrikanten B. Die Beurteilung des fortschreitenden Verschleißes nach der Zeit basierte für beide Diamantdrahtproduzenten auf der statistischen Auswertung der gemessenen Längen und Kornanzahlen. Das bedeutet, dass 40 Aufnahmen aus verschiedenen Bereichen auf dem Draht (vgl. Abs. 3.4) den Zustand der Endlosdrahtschleife beschreiben sollen. Die Häufigkeitsverteilungen der ermittelten Verschleißgrößen ließen es zu, eine Normalverteilung der Messwerte anzunehmen. Dabei ergab sich für jeden betrachteten Verschleißmarker ein Maximum der Glockenkurve, welches den Mittelwert verdeutlicht. Dieser Wert wird als Charakteristikum des jeweils betrachteten Parameters angesehen und bei zunehmender Standzeit mit dem Referenzwert verglichen. In Abbildung 11 ist das Histogramm für den Parameter *äußerer Drahtdurchmesser* des Herstellers A abgebildet. Daneben sei erwähnt, dass in dem Histogramm zusätzlich die Dichtefunktion der Normalverteilung verdeutlicht wird. Das Maximum dieser Glockenkurve entspricht in den folgenden Diagrammen dem Mittelwert.

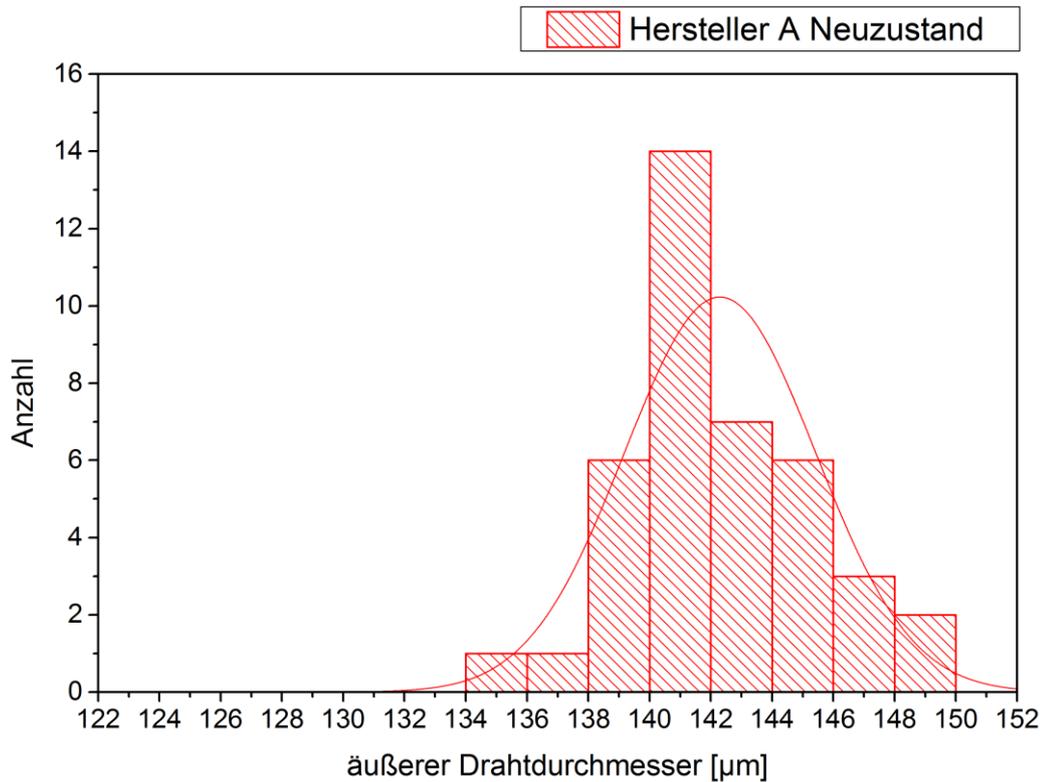


Abbildung 11: Histogramm/Dichtefunktion zum äußeren Drahtdurchmesser im Neuzustand (Hersteller A)

Das Maximum der Glockenkurve liegt bei 142,3 µm und wurde als Referenzwert für diesen Drahthersteller ermittelt, da mit dieser Endlosdrahtschleufe noch nicht gesägt wurde. Des Weiteren wurde ebenfalls für jede der 40 angefertigten Mikroskopaufnahmen der innere Durchmesser des Drahtes bestimmt. In Abbildung 12 wird die Verteilung der daraus gemessenen Daten veranschaulicht.

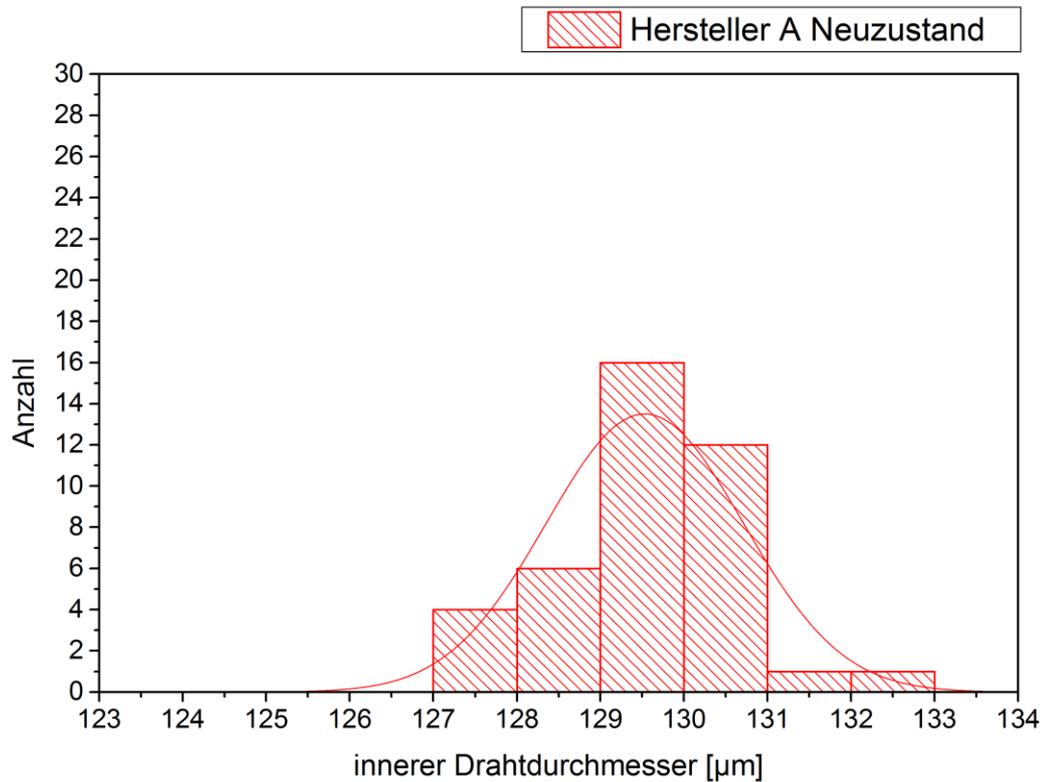


Abbildung 12: Histogramm/Dichtefunktion zum inneren Drahtdurchmesser im Neuzustand (Hersteller A)

Auch in diesem Histogramm wurde der Mittelwert des inneren Durchmessers von 129,5 µm als Referenzwert des ungesägten Drahtes festgelegt. Auf gleiche Weise wurden die folgenden beiden Verschleißmarker des Korndurchmessers in Abbildung 13 und der Kornanzahl in Abbildung 14 verdeutlicht. Da auf einer Aufnahme mehrere Körner vorhanden waren, konnten wesentlich mehr Daten für den Parameter *Korngröße* aufgenommen werden.

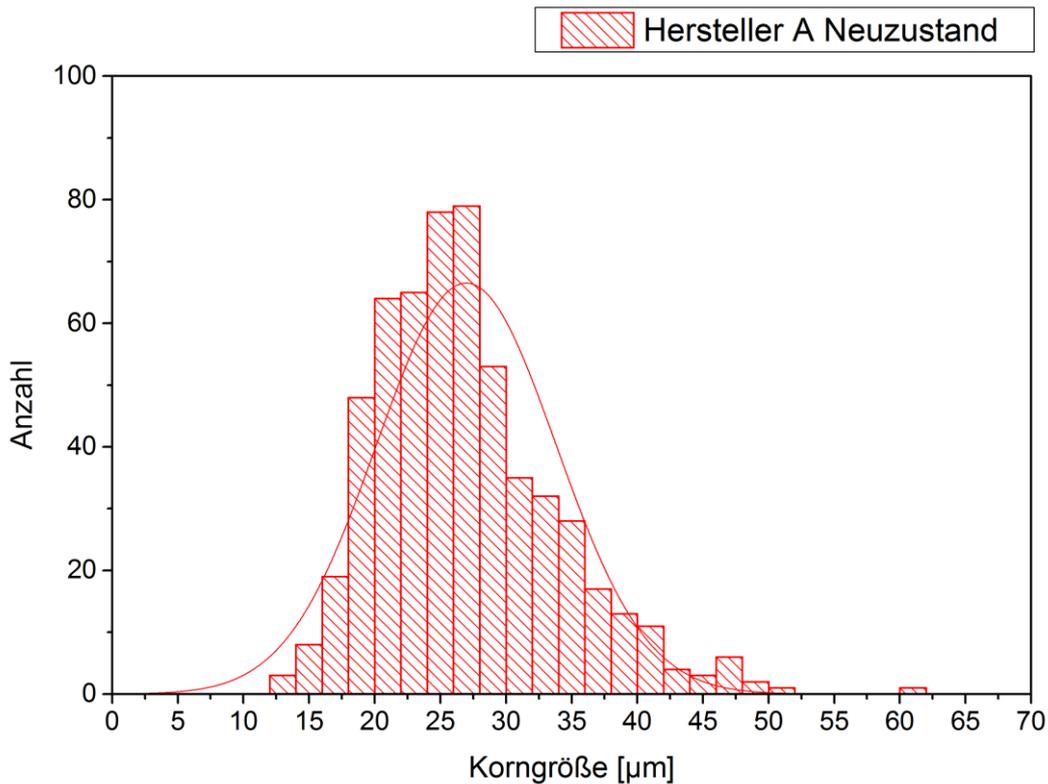


Abbildung 13: Histogramm/Dichtefunktion zur Korngröße im Neuzustand (Hersteller A)

Insgesamt konnten 570 Korndurchmesser bei 40 erstellten mikroskopischen Aufnahmen ausgewertet werden. Das nächste Histogramm zeigt die Verteilung der Kornanzahlen pro mm^2 . Das bedeutet, dass die der Silizium zugewandten Diamantdrahtfläche beim zuvor durchgeführten Sägeprozess auf die Anzahl der Diamantkörner hin untersucht wurde. Wenn der Diamantdraht als Zylinder betrachtet wird, so sind immer die Diamantkörner beim Sägen beteiligt, die zum Silizium zeigen. Die Länge des Diamantdrahtes in einem betrachteten Bild mit 20-facher Vergrößerung betrug $467,96 \mu\text{m}$. Die Mantelfläche eines Zylinders lässt sich mit der folgenden Formel berechnen.

$$M = 2\pi r h \quad (18)$$

Die Multiplikation mit zwei wird in der folgenden Formel nicht vorgenommen, da die Kornanzahl nur der einen Hälfte der Zylinderfläche bestimmt wurde.

$$M = \pi r h = \pi * 60 \mu\text{m} * 467,96 \mu\text{m} = 88208,4 \mu\text{m}^2 \quad (19)$$

Der Radius für den Diamantdraht ergibt sich aus der Angabe des Kerndurchmessers von $120 \mu\text{m}$. Die Fläche des untersuchten Drahtabschnittes auf einem Bild beträgt demnach $0,088$

mm². Die Anzahl der im Bild bestimmten Körner wurde folglich durch diesen Wert dividiert. Damit ergibt sich für das anschließende Histogramm die Einheit Kornanzahl pro 1 mm². Der Mittelwert und damit der Referenzwert für die ungesägte Diamantdrahtschleife beträgt 162 Körner pro mm². Die Fläche, die eine Hälfte des zylindrischen, untersuchten Drahtabschnittes beschreibt, wurde in Formel 19 bestimmt und betrug gerundet 88208 µm². Diese Fläche, die maßgeblich am Sägeprozess beteiligt ist, bezog sich auf eine Drahtlänge von gerundet 468 µm. Wird die Gesamtdrahtlänge der Drahtschleife von 1,60 m durch diese Drahtlänge dividiert, so ergibt sich der Faktor 3418, der mit der in Formel 19 bestimmten Fläche multipliziert werden kann. Dadurch errechnet sich die halbe Oberfläche der Drahtschleife, auf der die Diamantkörner beim Sägen des Siliziums befestigt sind. Das Ergebnis dieser halben Diamantdrahtfläche beträgt 301,6 mm². Für den Draht im Neuzustand mit einer Kornanzahl von 162 mm⁻² ergibt sich für die gesamte Sägefläche der Drahtschleife eine Anzahl von 48.900 Körnern.

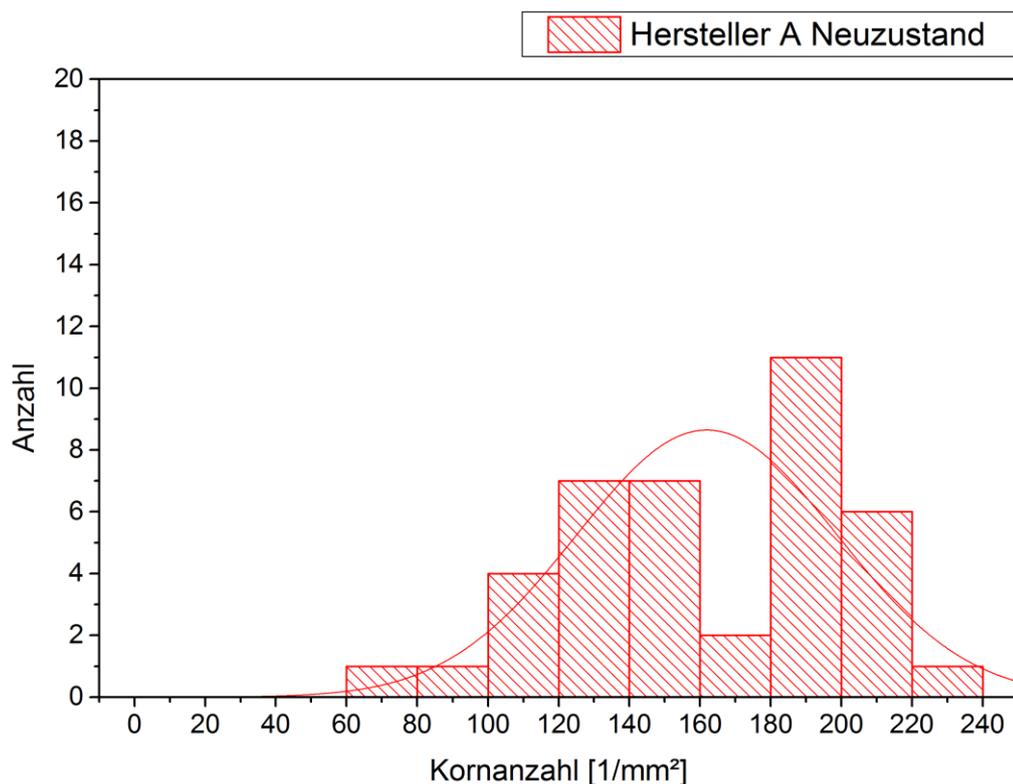


Abbildung 14: Histogramm/Dichtefunktion zur Kornanzahl im Neuzustand (Hersteller A)

Die Auswertung der geschweißten Diamantdrahtschleife des Herstellers B erfolgte nach dem gleichen Prinzip. Im Vergleich zu dem Diamantdraht des Herstellers A liegt der äußere Durchmesser, das heißt die Strecke von der Spitze des oberen, größten Kornes bis zur Spitze des unteren, größten Kornes bei 146,5 µm. Die Streuung der Messwerte für den äußeren

Drahtdurchmesser um den Mittelwert, die Standardabweichung, liegt bei $4,3 \mu\text{m}$. Im Abschnitt 5, dem Diskussionsteil, wird auf diese Verteilung noch einmal näher eingegangen. Der äußere Durchmesser wurde in der Abbildung 15 in einem Diagramm veranschaulicht. Aus diesem lässt sich ebenfalls erkennen, dass dieser Durchmesser des Drahtes zwischen $136 \mu\text{m}$ und $156 \mu\text{m}$ schwankt.

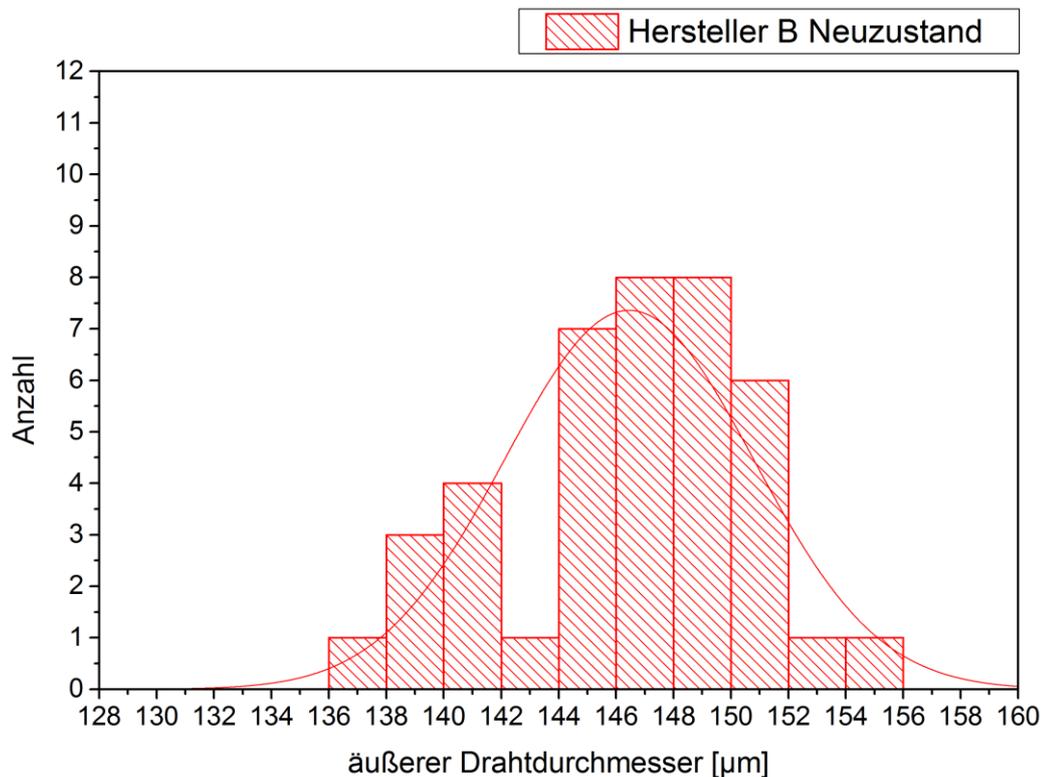


Abbildung 15: Histogramm/Dichtefunktion zum äußeren Drahtdurchmesser im Neuzustand (Hersteller B)

Der innere Durchmesser für den Draht B, das heißt der Querschnitt des Diamantdrahtes ohne Berücksichtigung der Körner, beträgt im Mittel $130,1 \mu\text{m}$. Hierbei ist die Standardabweichung wesentlich kleiner als beim zuvor betrachteten, äußeren Durchmesser. Diese liegt bei $1,3 \mu\text{m}$ und die gemessenen, inneren Durchmesser schwanken zwischen $126 \mu\text{m}$ und $133 \mu\text{m}$. In der folgenden Abbildung 16 lässt sich erkennen, dass sich die meisten Durchmesser, mit insgesamt 18 ermittelten Messwerten, in der Klasse von $129 \mu\text{m}$ bis $130 \mu\text{m}$ befinden. Die Mittelwerte beider Drahthersteller liegen sehr dicht zusammen und unterscheiden sich um $0,6 \mu\text{m}$. Damit ließ sich feststellen, dass der angegebene Drahtdurchmesser von $120 \mu\text{m}$ nicht mit dem gemessenen, inneren Drahtdurchmesser übereinstimmt, da dieser im Mittel um etwa $10 \mu\text{m}$ höher lag. Im Diagramm ist weiterhin zu erkennen, dass kein Messwert mit $120 \mu\text{m}$ Durchmesser bestimmt wurde.

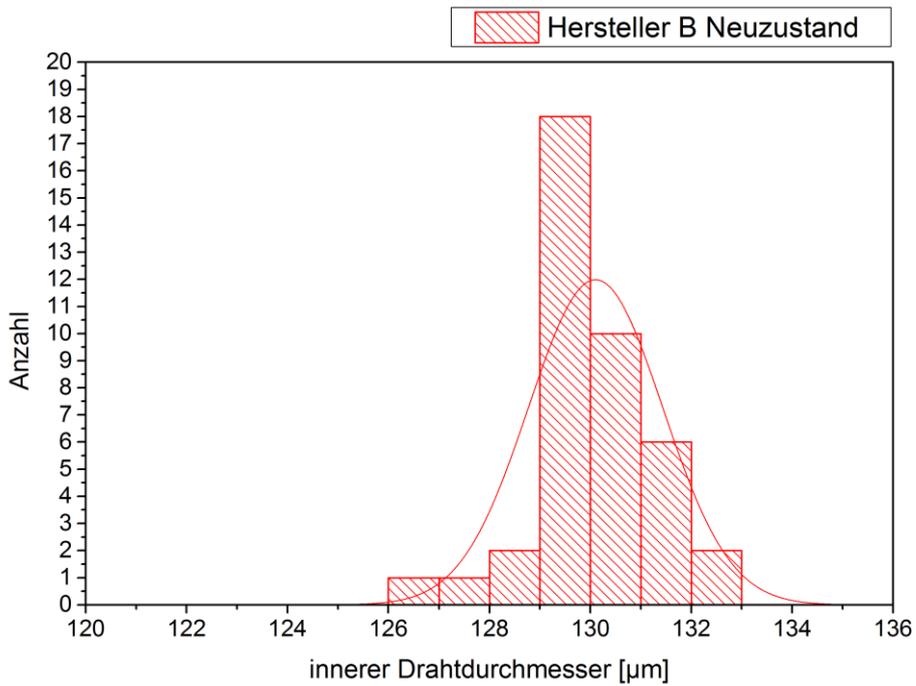


Abbildung 16: Histogramm/Dichtefunktion zum inneren Drahtdurchmesser im Neuzustand (Hersteller B)

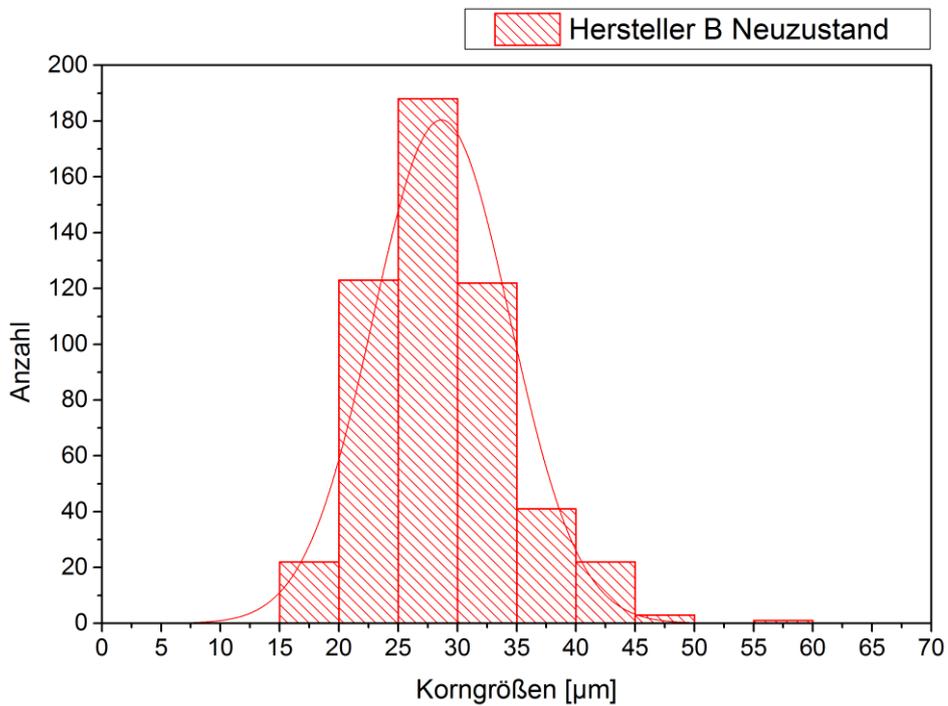


Abbildung 17: Histogramm/Dichtefunktion zur Korngröße im Neuzustand (Hersteller B)

Ebenfalls vor dem Sägen wurde bei der Diamantdrahtschleife B die Verteilung der Diamantkorngrößen (vgl. Abb. 17) dargestellt. Die mittlere Korngröße beträgt $28,7 \mu\text{m}$, wobei sich Körner eines horizontalen Korndurchmessers von $15 \mu\text{m}$ bis $60 \mu\text{m}$ auf dem Diamantdraht näherungsweise normal verteilen. Der Diamantdraht A spiegelt in etwa die gleichen Ergebnisse wider. Der von 40 Aufnahmen bestimmte Mittelwert lag bei einer Korngröße von $27 \mu\text{m}$. Das letzte Diagramm (vgl. Abb. 18) für die Referenzmessung zeigt die Kornanzahl pro 1 mm^2 Fläche auf dem Draht.

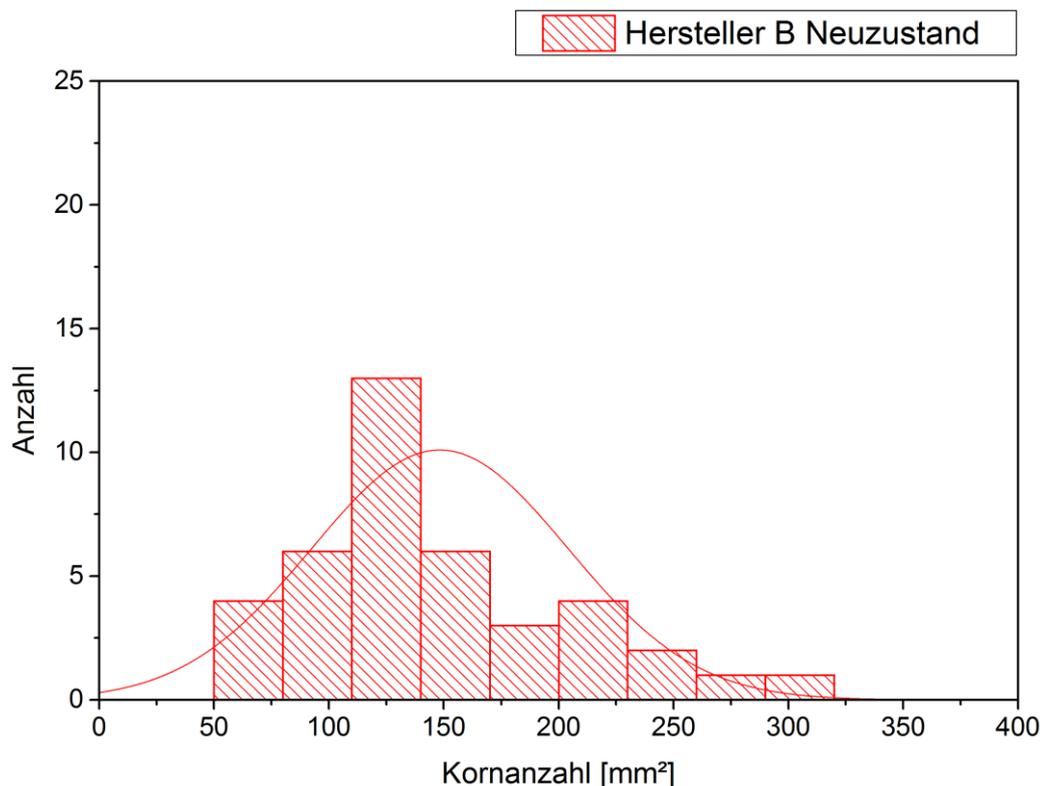


Abbildung 18: Histogramm/Dichtefunktion zur Kornanzahl im Neuzustand (Hersteller B)

Das Maximum der Glockenkurve in Abbildung 18 liegt bei 148 Körnern/mm^2 auf dem Diamantdraht. Damit sind im Mittel 14 Körner/mm^2 weniger auf dem Kerndraht befestigt als bei dem Drahthersteller A. Die nachfolgende Tabelle 7 fasst die Mittelwerte der betrachteten Verschleißmarker für beide Drahtproduzenten noch einmal zusammen.

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Referenzverschleißmarker für beide Drahthersteller

Hersteller:	A		B	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Verschleißmarker				
äußerer \varnothing [μm]	142,3	3,1	146,5	4,3
innerer \varnothing [μm]	129,5	1,2	130,1	1,3
Korndurchmesser [μm]	27,0	6,8	28,7	5,8
Kornzahl/ mm^2	162	36	148	55

Nach der Auswertung der Drahtschleife für die einzelnen Sägeintervalle wurden die vier in Abbildung 19 dargestellten Histogramme als Übersicht zu dem Verschleißverhalten an dem äußeren Durchmesser des Drahtherstellers A abgebildet. Die Verteilung im linken, oberen Histogramm zeigt die Referenzmessung bevor mit dem Diamantdraht gesägt wurde. In der oberen, rechten Verteilungsfunktion dagegen sind die 40 untersuchten Aufnahmen nach einer Sägezeit von 30 Minuten dargestellt. Der äußere Durchmesser hat sich in dieser Zeit auf einen Betrag von 136,5 μm bei einer Standardabweichung von 2,6 μm verringert. Nach der doppelten Sägezeit von 60 Minuten nimmt der Betrag kaum ab. Der dort gemessene Mittelwert liegt bei 136,3 μm , wobei die Streuung etwas breiter geworden ist und mit 3,4 μm bestimmt wurde. Erst nach weiterer Sägezeit von 38 Minuten lässt sich ein weiterer Rückgang des Durchmessers auf 133,6 μm feststellen. Die Streuung ist dabei in etwa gleich dem vorhergehenden Histogramm geblieben und liegt bei 3,3 μm . Wenn dieses Ergebnis auf den Multidrahtsägeprozess übertragen wird, dann würde dies bedeuten, dass sich der äußere Drahtdurchmesser des neuen Diamantdrahtes vom Beginn der Abwickelpule bis zum Ende der Aufwickelpule im Mittel um 8,7 μm reduziert hätte. Somit würde die Breite des Sägeschnittes vom Beginn bis zum Ende des Sägeprozesses prozentual um 6,1 % verringert werden.

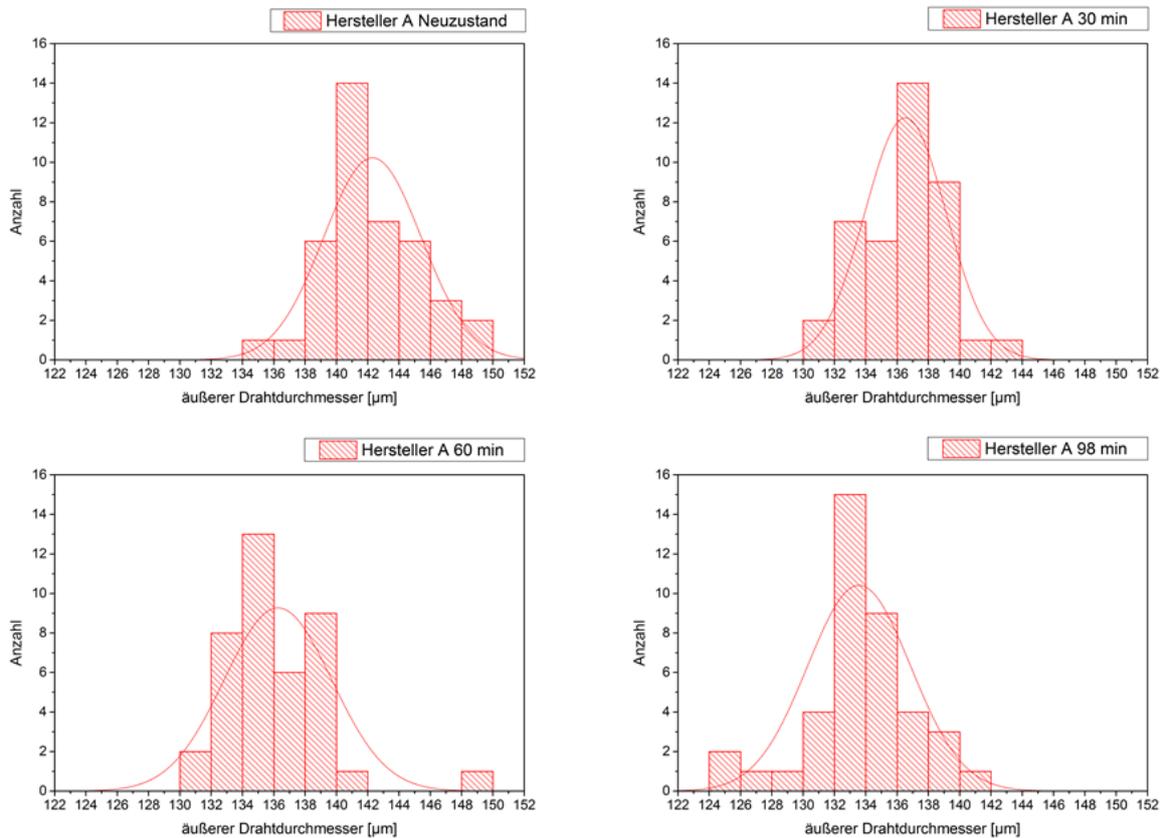


Abbildung 19: Übersicht der Histogramme mit Dichtefunktion zum äußeren Drahtdurchmesser für verschiedene Standzeiten des Drahtes A

Nebenher wurde der innere Drahtdurchmesser auf gleiche Weise analysiert. Eine leichte Veränderung mit fortschreitender Standzeit des Diamantdrahtes lässt sich hieraus erkennen. Die Abbildung 20 zeigt auch hier die vier Histogramme für jeweils 40 ausgewertete Aufnahmen für den inneren Drahtdurchmesser in Abhängigkeit der Zeit. Nach einer Sägezeit von 98 Minuten liegt der gemessene Mittelwert bei 128,7 µm. Damit hat sich dieser geringfügig vom Referenzwert 129,5 µm um 0,8 µm reduziert. Aus den Messwerten lässt sich die Dehnung wie folgt berechnen:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(-0,8) \mu m}{129,5 \mu m} = -6,1 * 10^{-3}. \quad (20)$$

Die errechnete Dehnung ist negativ, was bedeutet, dass der Diamantdrahtdurchmesser gestaucht wurde. Diese Stauchung kann mit dem Faktor 100 multipliziert und als prozentualer Betrag angegeben werden. Damit würde sich rechnerisch der innere Drahtdurchmesser um 0,61 % verringert haben.

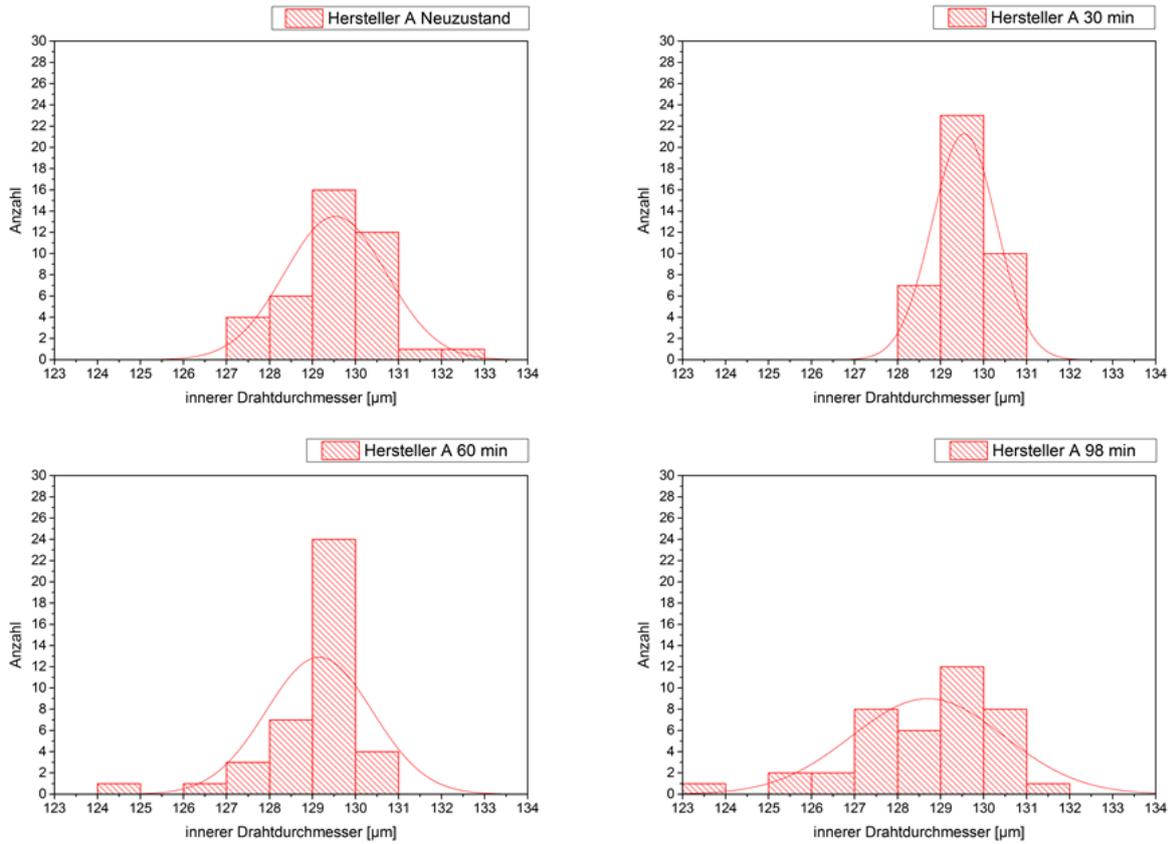


Abbildung 20: Übersicht der Histogramme mit Dichtefunktion zum inneren Drahtdurchmesser für verschiedene Standzeiten des Drahtes A

Als weiteres Kriterium für das Verschleißverhalten wurde bei der mikroskopischen Auswertung die Anzahl der Diamantkörner auf dem Draht pro Bildausschnitt bestimmt. Die Kornanzahlen der folgenden Histogramme sind für eine bessere Vergleichbarkeit der Histogramme untereinander auf eine Fläche von einem Quadratzentimeter bezogen.

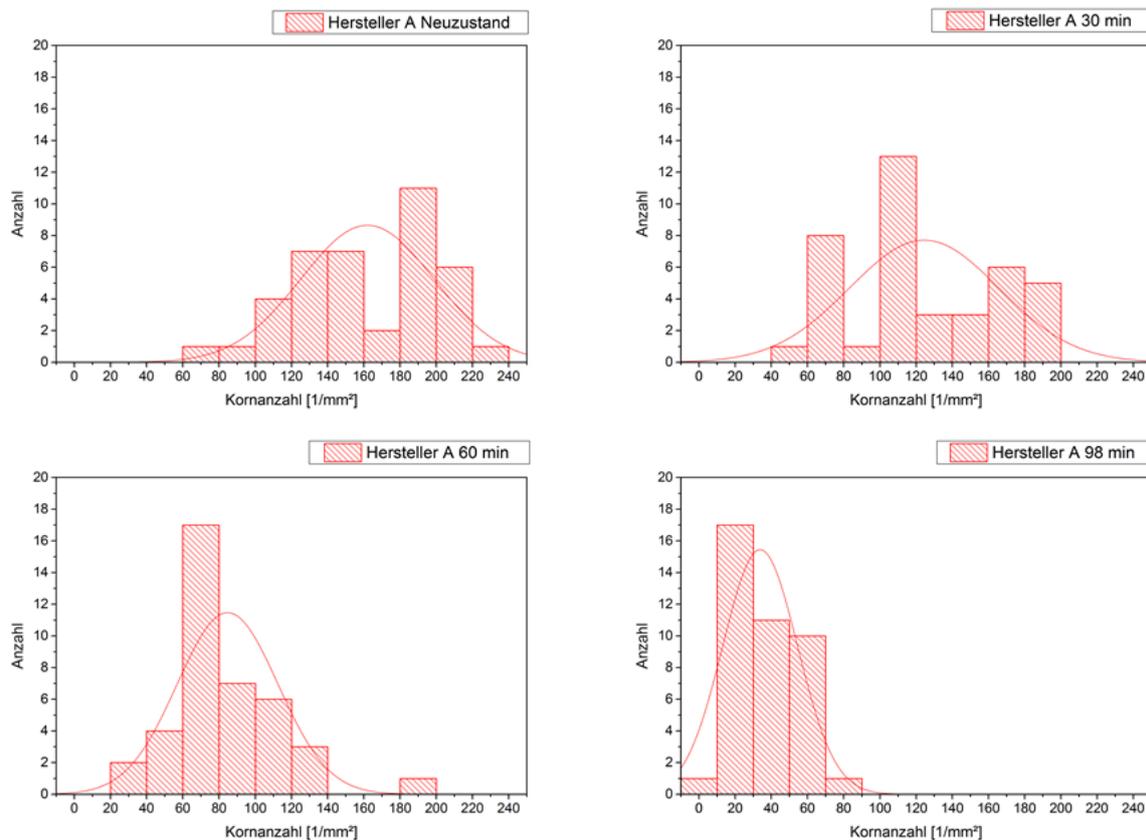


Abbildung 21: Übersicht der Histogramme mit Dichtefunktion zur Kornanzahl für verschiedene Standzeiten des Drahtes A

Während im Neuzustand die mittlere Kornanzahl bei 162 Körnern/mm² liegt (vgl. Abb. 21), befinden sich nach einer Verschleißzeit von 1 h 38 min durchschnittlich 34 Körner/mm² auf dem Draht (rechtes, unteres Histogramm). Es lässt sich anhand des Maximums der Glockenkurve erkennen, dass sich nach einem Zeitintervall von 30 Minuten circa 40 Körner pro angegebener Fläche vom Draht ablösen. Diese Anzahl reduziert sich nach der maximalen, durchgeführten Sägezeit auf 10.253 Körner pro Sägefläche. Prozentual betrachtet lösen sich während des Gesamtsägeprozesses 79 % der Diamantkörner von der Oberfläche der Sägeseite ab. Die Verringerung der Kornanzahl lässt sich auch in Abbildung 22 erkennen, da sich das Maximum der Glockenkurve in y - Richtung nach unten bewegt. Hierbei wurde die Korngröße der auf dem Draht befestigten Körner in horizontaler Ausrichtung gemessen. Die ermittelten Durchmesser liegen in einem Bereich zwischen 10 μm und 55 μm . Die Mittelwerte schwanken, innerhalb der einzelnen Zeitintervalle, die nach dem Sägen bestimmt wurden, zwischen 25 μm und 30 μm .

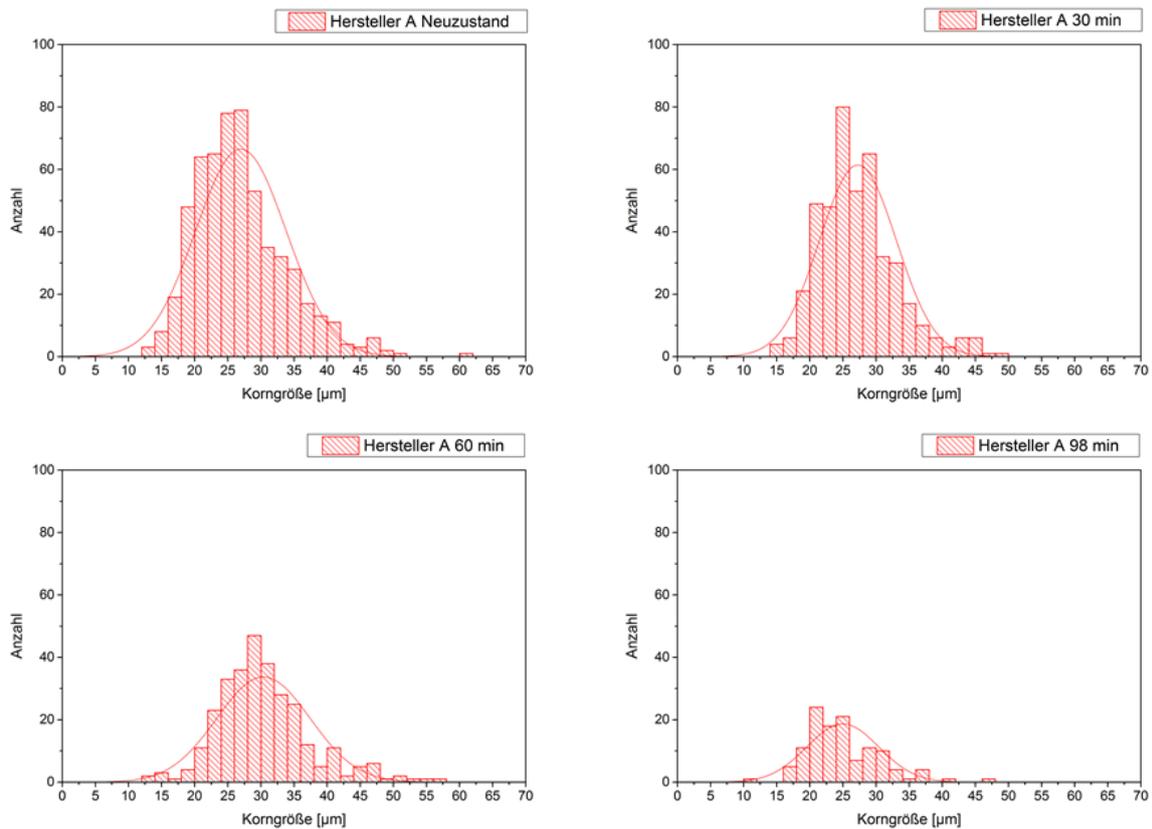


Abbildung 22: Übersicht der Histogramme mit Dichtefunktion zur Korngröße für verschiedene Standzeiten des Drahtes A

Die Vorgehensweise zur Auswertung der vier Verschleißmarker nach der Standzeit, anhand der Gegenüberstellung von Histogrammen, wurde auch für den zweiten Hersteller B beibehalten. Die Abbildungen dieser Verteilungen befinden sich im Anhang dieser Arbeit. Die Informationen daraus werden in der folgenden Tabelle 8 aufgeführt und als Vergleich zu dem soeben betrachteten Diamantdraht A dargestellt. Die Ergebnisse wurden dazu mit den bereits ausformulierten Formeln berechnet. Die Mittelwerte von jedem Parameter bei den gewählten Zeiteinheiten wurden immer aus der Probenanzahl von 40 Bildern errechnet und davon die sich ergebende Standardabweichung gebildet.

Tabelle 8: Auflistung der Verschleißmarker für verschiedene Standzeiten der beiden Hersteller

Hersteller:		A		B	
<i>Zeit</i>	<i>Parameter</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Standardabweichung</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Standardabweichung</i>
0 min	äußerer DM	142,3 µm	3,1 µm	146,5 µm	4,3 µm
	innerer DM	129,5 µm	1,2 µm	130,1 µm	1,3 µm
	Kornanzahl	162 mm ⁻²	36,4 mm ⁻²	148 mm ⁻²	55 mm ⁻²
	Korngröße	27 µm	6,8 µm	28,7 µm	5,8 µm
30 min	äußerer DM	136,5 µm	2,6 µm	140,6 µm	4,1 µm
	innerer DM	129,5 µm	0,7 µm	129 µm	3 µm
	Kornanzahl	124 mm ⁻²	41,4 mm ⁻²	91 mm ⁻²	34,8 mm ⁻²
	Korngröße	27,3 µm	5,8 µm	30,1 µm	7,1 µm
60 min	äußerer DM	136,3 µm	3,4 µm	140,7 µm	3,2 µm
	innerer DM	129,2 µm	1,2 µm	131	0,9 µm
	Kornanzahl	85 mm ⁻²	27,8 mm ⁻²	83 mm ⁻²	26 mm ⁻²
	Korngröße	30,4 µm	7,1 µm	32,2 µm	6,9 µm
98 min	äußerer DM	133,6 µm	3,3 µm	138,7 µm	3,1 µm
	innerer DM	128,7 µm	1,8 µm	129,5 µm	1,5 µm
	Kornanzahl	34 mm ⁻²	20,7 mm ⁻²	76 mm ⁻²	36,8 mm ⁻²
	Korngröße	25 µm	5,4 µm	30,8 µm	7,8 µm

Die Tabelle 8 beginnt mit dem Vergleich des äußeren Drahtdurchmessers der beiden Hersteller mit einer Sägezeit von null Minuten, das heißt es handelt sich um die Referenzmessung für den betrachteten Parameter. Beim Diamantdraht B wurde ein um 4,2 µm größerer, äußerer Durchmesser bestimmt als der des Drahtes A. Unter Berücksichtigung, dass der innere Drahtdurchmesser bei beiden Drähten nahezu gleich ist (der genaue Unterschied ist laut der Tabelle 600 nm), lässt sich das Ergebnis formulieren, dass die Diamantkörner entweder größer oder sie nicht so tief in der Nickelschicht befestigt sind. Weil die Korngrößen bestimmt wurden, lässt sich erst genanntes nahezu ausschließen, da die Korngrößen sich nur um 1,7 µm unterschieden bei einer Standardabweichung von 6,8 µm (A) und 5,8 µm (B). Das bedeutet, dass die Diamantkörner beider Drahthersteller im Mittel identisch sind. Als dritten Parameter wurde die Anzahl der Körner bei beiden

Herstellern bestimmt. Daraus lässt sich ableiten, dass beim Draht A im Mittel 14 Körner pro mm^2 mehr auf der sägeseitigen Oberfläche vorhanden sind als bei der des Drahtes B. Wenn die Verschleißmarker unter dem Gesichtspunkt der 30 minütigen Sägezeit betrachtet werden, dann sind deutliche Unterschiede zu den Referenzwerten zu erkennen. Beginnend mit dem äußeren Durchmesser liegt der gemessene Wert bei $136,5 \mu\text{m}$ (A), was eine quantitative Verringerung von $5,8 \mu\text{m}$ im Vergleich zum Grundzustand bedeutet. Der Draht B verhält sich ähnlich, da die Differenz der mittleren Durchmesser von den zu vergleichenden Zeitintervallen bei $5,9 \mu\text{m}$ liegt. Bei der Bewertung des inneren Durchmessers fällt bei dem Draht A auf, dass der Querschnitt sich nicht verringert hat und lediglich die Standardabweichung etwas geringer geworden ist. Hingegen ist bei dem Draht B ein Unterschied von $1,1 \mu\text{m}$ zu dem Referenzwert festzustellen. Die Streuung hierbei liegt bei $3 \mu\text{m}$ (vgl. Abs. 5). Die Kornanzahl hat sich bei beiden Diamantdrähten deutlich verringert. Bei dem Draht A sind es genau 38 Körner pro mm^2 , die von der sägeseitigen Oberfläche herausgebrochen sind. Die analysierte Fläche des Drahtes B hat hingegen 57 Körner im Mittel verloren. Die Mittelwerte der Korngrößen dagegen haben sich weder nach 30 Minuten noch nach der maximalen Sägezeit verändert und liegen damit innerhalb der Streuung. Nach dem nächsten, untersuchten Zeitintervall von 60 Minuten lässt sich erkennen, dass sich der äußere Drahtdurchmesser, im Vergleich zu den nach 30 Minuten analysierten Drähten, bei beiden Herstellern quantitativ leicht verändert hat. Bei dem Draht A ist dieser um $0,2 \mu\text{m}$ kleiner und bei dem Draht B um $0,1 \mu\text{m}$ größer. Anknüpfend verhalten sich die Mittelwerte der inneren Drahtdurchmesser, die sich ebenfalls um eine geringe Differenz verändert haben. In Zahlen ausgedrückt, verringert sich dieser bei dem Draht A um $0,3 \mu\text{m}$ und der des Drahtes B dagegen erhöht sich um $2 \mu\text{m}$. Als letzter Parameter in diesem Zeitintervall wird die Kornanzahl ausgewertet, die sich im Vergleich zur 30 minütigen Standzeit erneut verändert hat. Allerdings ist der Unterschied bei dem Draht A nicht so deutlich wie bei dem Draht B. Das bedeutet genau, dass bei dem Draht A nach einer weiteren halben Stunde Sägezeit 39 Körner und bei dem Draht B 46 Körner herausgebrochen sind. Das letzte Sägeintervall muss herausgelöst von den bereits ausgewerteten Sägezeiten betrachtet werden, da nach einer Standzeit von 60 Minuten mit den Drahtschlaufen der beiden Hersteller für 38 Minuten gesägt wurde. Die Linearität der Zeitintervalle ist damit unterbrochen und der Rückschluss zu der vorherigen Zeit muss gesondert betrachtet werden, da 8 Minuten länger gesägt wurde. Dennoch werden die Mittelwerte aus dem Sägeintervall von 60 Minuten für den Vergleich herangezogen. Beginnend mit dem ersten Parameter verringert sich der äußere Durchmesser um $2,7 \mu\text{m}$ bei dem Draht A. Der Mittelwert bei dem Hersteller B reduziert sich für diesen

Verschleißmarker um 2 µm. Der innere Drahtdurchmesser verhält sich ebenso, allerdings reduziert sich dieser bei dem Draht A um 0,5 µm und bei dem Draht B um 1,5 µm. Die Kornanzahl auf der Sägefläche der beiden Drähte verringert sich nochmalig um den Wert von 51 Körnern pro mm² (A) und 7 Körner bei dem Hersteller B. Wie die Änderungen der Verschleißparameter in Abhängigkeit der Sägeintervalle zu interpretieren sind, kann dem Abschnitt 5 entnommen werden.

Schnittgeschwindigkeitstest

Im nächsten Versuch werden die Ergebnisse präsentiert, die nicht dem Zweck dienen das Verhalten des Verschleißes zu analysieren, sondern die Auswirkungen (die Änderung des Schnittverhaltens) des Verschleißes zu klären. Dazu wurde wie in Abschnitt 3.3 der Siliziumblock mit den dort genannten Sägeparametern gesägt und die Schnitttiefe jeweils nach 10 Minuten für eine Gesamtzeit von 100 Minuten gemessen. In Tabelle 9 sind die dabei aufgenommenen Messwerte veranschaulicht.

Tabelle 9: Messung der Schnitttiefen für die verschiedenen Sägezeiten des Drahtes (Hersteller A)

Sägezeit t in min	Differenz der Schnitttiefe in mm	Gesamtschnitttiefe in mm
0	0	0
10	8,5	8,5
20	8,5	17
30	10,5	27,5
40	10,5	38
50	10,5	48,5
60	10	58,5
70	9,5	68
80	9,5	77,5
90	7,5	85
100	7	92

In den ersten 20 Minuten Sägezeit war die Vorschubgeschwindigkeit größer als die Abtragsfähigkeit des Diamantdrahtes mit der die Diamantkörner das Silizium abtragen konnten. Dadurch stellte sich ein Sägewinkel ein, der als Bow bezeichnet wird. Nach der Einsägezeit von 20 Minuten hat sich die Schnitttiefe analog des eingestellten Vorschubes von 1,05 mm/min verhalten. Ab einer Zeit von 60 Minuten verringerte sich die Abtragungsgeschwindigkeit stetig und fiel letztendlich auf 0,7 mm/min. Das bedeutet, dass sich die Abtragungsgeschwindigkeit in 50 Minuten (beginnend bei Minute 50, Ende bei Minute 100) um 35 % reduziert hat.

5 Diskussion

In Tabelle 8 wurden die Daten der vier Verschleißmarker, die aus den Sägeversuchen des ersten Experiments erhoben wurden, für die beiden Drahthersteller aufbereitet. Dabei wurde mit den Werkzeugen der statistischen Auswertung von Messwerten gearbeitet. Die Vorgehensweise wurde klar strukturiert, da für jedes festgelegte Zeitintervall jeweils 40 Messergebnisse von jedem Verschleißparameter ermittelt wurden. Diese Anzahl von Daten und die Durchführung der Versuche für zwei Hersteller sollten den Anspruch erheben, dass die aus den veranschaulichenden Diagrammen ableitbaren Trends auf den Industrieprozess übertragbar sind. Der Modellsägeversuch an der Eindrahtsäge wurde demnach, unter Berücksichtigung der dem Experiment gegebenen Grenzen, an die Industriegaben angenähert. Die angestellten Interpretationen der Ergebnisse in dem folgenden Abschnitt basieren auf den Verteilungsverhältnissen der Messwerte in den jeweils erstellten Histogrammen. Auf dieser Grundlage werden nun die verschiedenen Verschleißmarker diskutiert. Begonnen soll mit dem äußeren Durchmesser, der wie auch in Tabelle 8 aufgezeigt wurde, immer geringer wird. Allerdings im ersten Sägeintervall viel ausgeprägter als in den darauffolgenden. Um diese Erkenntnis zu veranschaulichen, wurden für beide Hersteller die Diagramme 23 und 24 erstellt. Daraus lässt sich entnehmen, dass die Reduzierung des äußeren Durchmessers exponentiell verläuft. Eine Erklärung dafür wäre, dass im Neuzustand des Drahtes noch nicht alle Körner am Sägeprozess beteiligt sind, sondern nur die Diamanten, welche am weitesten herausragen beziehungsweise den größten Durchmesser besitzen. Dies erklärt gleich zwei Phänomene. Zum einen nimmt der pro Bild gemessene größte, äußere Drahtdurchmesser zu Beginn des Sägens stärker ab, weil bei konstanter Sägefläche wenige, große Körner einem höheren Verschleiß unterliegen als viele, großemäßig gleiche Körner. Dies hat mit der Verteilung des Druckes auf die Körner zu tun, da sich die konstant wirkende Kraft bei vielen Körnern auf eine größere Fläche verteilt. Zum anderen erklärt es das Phänomen, dass eine gewisse Zeit vergehen muss, bis der Diamantdraht die maximale Abtragsgeschwindigkeit erreicht. In Tabelle 9 des zweiten Sägeexperimentes zur Bestimmung der Sägegeschwindigkeit verging eine Zeit von 20 Minuten bis die Vorschubgeschwindigkeit von 1,05 mm/min und die Abtragsgeschwindigkeit identisch waren. Dies lässt sich daraus ableiten, dass nach dieser Zeit die Schnitttiefe aller 10 gemessenen Minuten genau bei 10,5 mm lag. Davor, das heißt in den ersten 20 Minuten, wurde nach einem 10 minütigen Intervall eine geringere Schnitttiefe von 8,5 mm bestimmt. Auch dies ist mit dem Ansatz zu interpretieren, dass wenige, große Körner weniger Siliziummaterial abtragen als viele, gleichgroße Körner, die anfänglich nicht im

Sägeprozess beteiligt sind. Dadurch wird es verständlich, dass sich zum Anfang ein Bow des Sägedrahtes einstellt, der sich bis zum Ende der fünfzigsten Sägeminute nicht verändert und sich erst ab dem Zeitpunkt der Sägewinkel weiter ausprägt. Dies lässt sich mit dem Verlust der Diamantkörner begründen. Darauf wird jedoch später näher eingegangen. Im Folgenden werden die Diagramme aufgeführt, die den exponentiell, abnehmenden Verlauf des äußeren Drahtdurchmessers beschreiben und soeben getätigte Aussagen stützen.

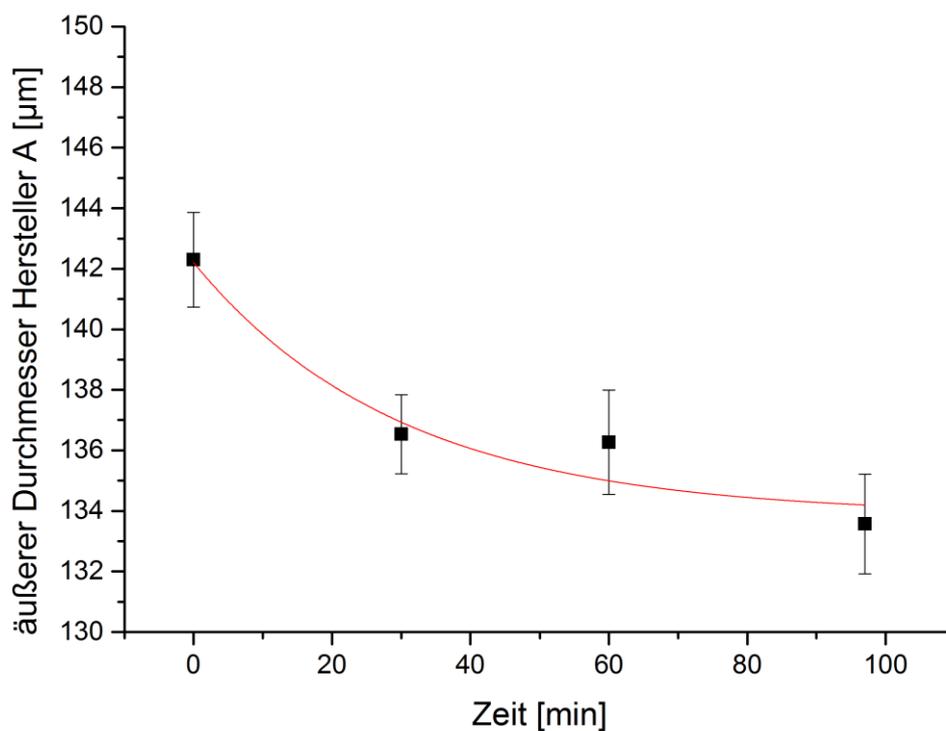


Abbildung 23: Diagramm des äußeren Drahtdurchmessers über der Zeit für den Draht A

Anhand der Kurve wird sichtbar, dass der äußere Durchmesser des Drahtes A in den ersten 30 Minuten deutlicher absinkt (142,3 µm auf 136,5 µm) als in der 68 minütigen Sägezeit danach (136,5 µm auf 133,6 µm). Diese Aussage wird durch das nochmalig durchgeführte Sägeexperiment des zweiten Herstellers B gestützt und in dem nachfolgenden Diagramm behandelt. Es sei erwähnt, dass für die vertikalen Fehlerbalken in beiden Diagrammen die Standardabweichungen der Mittelwerte aufgetragen sind.

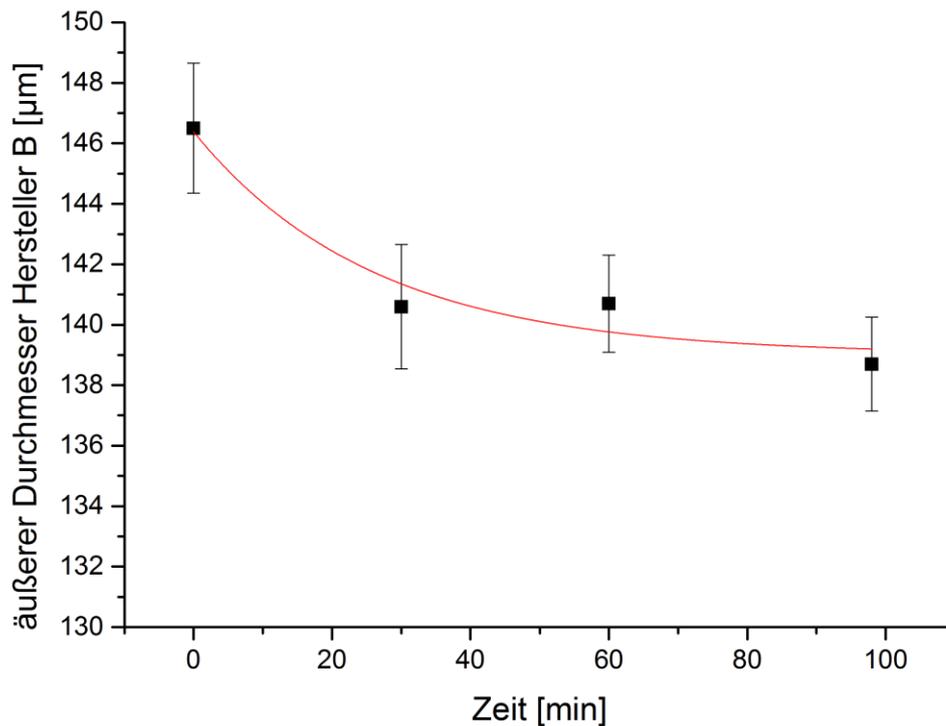


Abbildung 24: Diagramm des äußeren Drahtdurchmessers über der Zeit für den Draht B

Das Diagramm 24 gibt einen ähnlichen Verlauf wieder mit der Variation, dass die Kurve in y - Richtung höher verschoben ist, da der äußere Drahtdurchmesser bei dem Draht B im Mittel als größer bestimmt wurde. Dies lässt vermuten, dass die Diamantkörner größer sind als bei dem Draht A, jedoch wurde die Korngröße ebenfalls bestimmt. Das Ergebnis war, dass die Korndurchmesser nur gering unterschieden (Hersteller A 27 µm und Hersteller B 28,4 µm). Wenn zusätzlich die Standardabweichung dieser beiden Mittelwerte betrachtet wird, dann gibt es keinen signifikanten Unterschied der Korndurchmesser. Es wäre anzunehmen, dass die Körner des Drahtes B mit einer „dickeren“ Nickelschicht an den Stahldraht befestigt waren als die Diamanten des Drahtes A. Damit wäre es zu erklären, dass der Draht B weniger Körner im Gesamtsägeprozess verloren hat als der Draht A und sich bei beiden Herstellern dadurch ein ganz anderes Verschleißbild einstellte. Im Diagramm 25 des Drahtes A lässt sich erkennen, dass die Diamantkörner während des Sägeprozesses relativ linear nach jedem Zeitintervall vom Stahldraht abgefallen sind. Die Kornanzahl pro mm² nimmt nach einer Standzeit von 98 Minuten um 128 Körner ab (von 162 Körnern auf 34 Körner pro mm²).

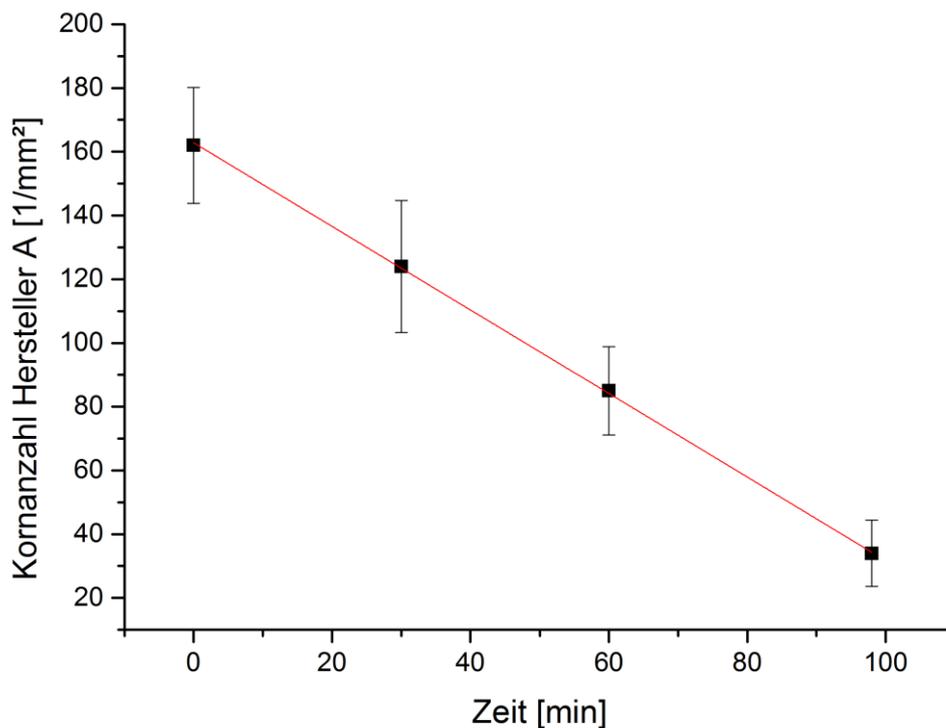


Abbildung 25: Diagramm der Kornanzahl über der Zeit für den Draht A

Obwohl der Draht A im Neuzustand mehr Diamantkörner pro betrachtete Fläche besitzt, hat er nach der maximalen Standzeit weniger Körner auf dem Stahldraht als der Draht B. Dies lässt sich anhand des Diagrammes 25 veranschaulichen. Bei dem Draht B ergab die Referenzmessung eine Kornanzahl von 148 Körnern pro mm^2 und nach einer Sägezeit von 98 Minuten wurde eine mittlere Kornanzahl von 76 Körner/ mm^2 erfasst. Das bedeutet, dass in dieser Zeit im Mittel 72 Körner/ mm^2 vom Stahldraht abfielen und damit prozentual zu dem Draht A gesehen, ein 59 % geringerer Verschleiß (bezogen auf den Verschleißmarker Kornanzahl) entstanden ist. Während beim Draht A circa die gleiche, mittlere Kornanzahl pro Zeiteinheit vom Stahldraht herausbricht, ist bei dem Draht B ein anderes Verschleißverhalten charakteristisch. Hierbei lässt sich erkennen, dass die Kornanzahl annähernd exponentiell absinkt, da die Diamantkörner in der ersten halben Stunde um eine Differenz von 57 (148 auf 91 Körner/ mm^2) abnehmen. Nach dieser Standzeit ist die Abnahme der Kornanzahl bis zur maximalen Sägedauer vergleichsweise geringer, da in den verbliebenden 68 Minuten die Kornanzahl nur um 15 Körner pro mm^2 sinkt. Dies ließe sich durch mögliche, herstellungsbedingte Variationen unter den beiden Drahthersteller erklären, wodurch unterschiedliche, materialbedingte Verhalten im Verschleiß zustande kommen. Wie bei dem

Draht B bereits vermutet wurde, könnte eine vergleichsweise, größere Nickelschicht die Diamantkörner besser an den Stahldraht binden, wodurch die Kornanzahl im Sägeprozess weniger abnimmt.

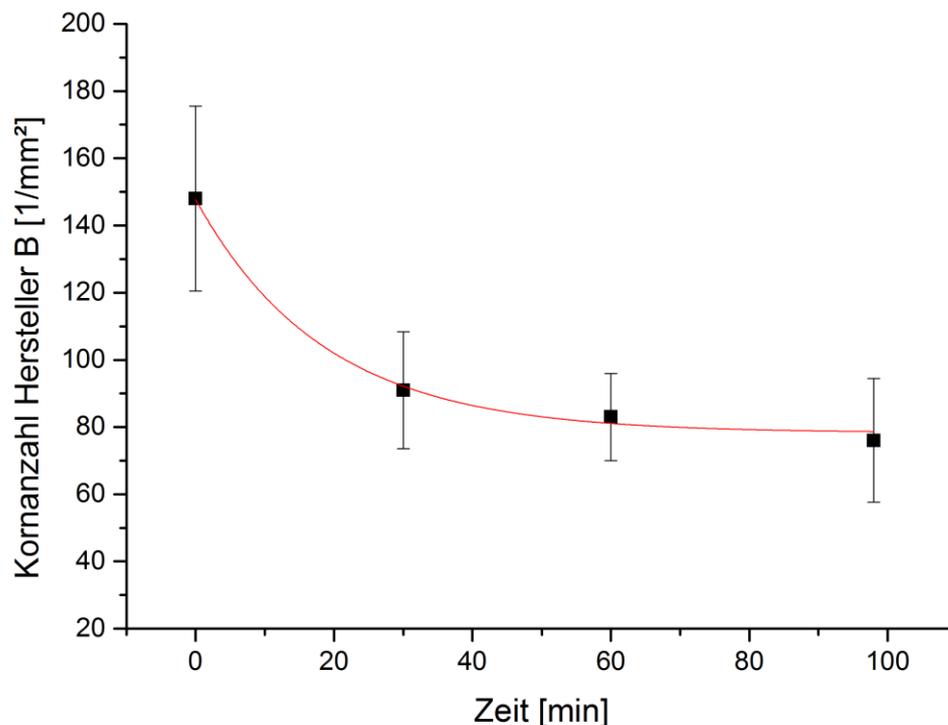


Abbildung 26: Punktdiagramm der Kornanzahl über der Zeit für den Draht B

Mit den aufgezeigten Diagrammen wurde das Verschleißverhalten der beiden Diamantdrahthersteller aus den Verschleißtests analysiert. In dem Versuch des zweiten Experimentes zur Sägegeschwindigkeit wurde festgestellt, dass die Sägegeschwindigkeit nach 50 Minuten stetig abnimmt. In diesem Experiment wurde bei dem Diamantdraht des Herstellers A eine Verringerung der Abtragsfähigkeit um 35 % nach einer Sägezeit von einhundert Minuten festgestellt. Als Ergebnis der Experimente ließe sich ableiten, dass das anfängliche Verschleißverhalten des neuen Diamantdrahtes eine positive Auswirkung auf die Schnittgeschwindigkeit hat, da mit zunehmender Zeit mehrere Körner am Sägen beteiligt sind. Anhand der folgenden Abbildung solle diese Erkenntnis qualitativ auf den Multidrahtsägeprozess bezogen werden. In Abschnitt 1 der Abbildung 27 (mittlere Abtragsfähigkeit = orange dargestellt) ist die Abtragungsgeschwindigkeit geringer als in Abschnitt 2 (hohe Abtragsfähigkeit = grün dargestellt). Dies lässt sich dadurch erklären, dass ausschließlich die Körner mit einem großen Durchmesser sägen. Erst nachdem diese abgeschliffen sind, werden auch kleinere Körner in den Sägeprozess miteinbezogen. In

Abschnitt 3 (geringe Abtragsfähigkeit = rot dargestellt) nimmt die Sägegeschwindigkeit wieder ab und der Sägewinkel (Bow) zu. Dies rührt daher, dass die Kornanzahl auf dem Draht verringert wird und zusätzlich die Abtragsgeschwindigkeit durch das Abschleifen der Körner wieder reduziert wird. Das Risiko eines Drahttrisses ist in den Abschnitten 1 und 3 am größten, da die Abtragsfähigkeit des Diamantdrahtes geringer ist als die Vorschubgeschwindigkeit des Siliziumblocks.

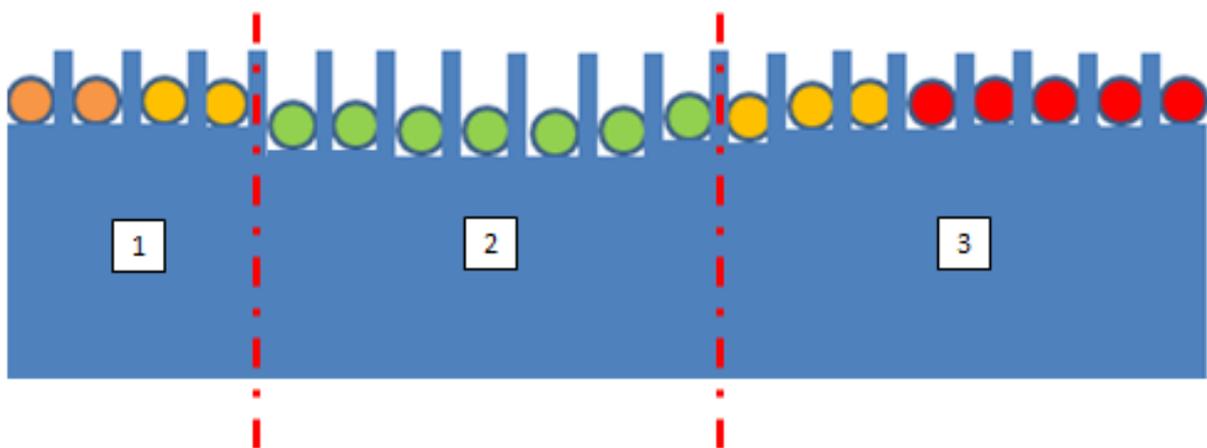


Abbildung 27: Verschleiß bezogen auf die Abtragsgeschwindigkeit des Diamantdrahtnetzwerkes an einem Siliziumblock

6 Zusammenfassung

Die in der Arbeit durchgeführten und ausgewerteten Experimente dienten dazu einen Überblick zur Verschleißcharakteristik von Diamantdrähten zu erhalten und wurden erfolgreich durchgeführt. Die Diamantdrähte besitzen im Vergleich zu den Slurry Sägedrähten fest angebrachte Körner auf dem Stahldraht. Diese unterliegen einem abrasiven Verschleiß während des Sägeprozesses. Um diesen analysieren zu können, wurden im Vorfeld vier verschiedenen Verschleißmarker definiert, die bezüglich unterschiedlicher Belastungsdauern ausgewertet wurden. Damit eine Übertragung der aus der Eindrahtsäge gewonnenen Ergebnisse auf die Multidrahtsäge stattfinden konnte, wurde eine statistische Auswertung der Verschleißparameter unter industrienahen Bedingungen

durchgeführt. Dabei konnten die Sägevorgaben einer in der Produktion verwendeten Multidrahtsäge nicht vollständig übertragen werden. Dennoch konnten die Trends aus den erstellten Histogrammen und die Herangehensweise an die gestellte Aufgabenstellung der Analyse zum Verschleißverhalten einige, wichtige Erkenntnisse hervorbringen. Zum einen wird deutlich, dass sich der äußere Durchmesser des Diamantdrahtes, während der untersuchten Zeitabschnitte degressiv verhält. Das bedeutet, dass sich die Diamantkörner anfänglich stärker abschleifen (im Experiment in den ersten 30 Minuten) als zum Ende des Sägens. Weiterhin ändert sich die verschleißcharakterisierende Größe *Kornanzahl* deutlich, da bei beiden Herstellern nach einer Sägezeit von 98 Minuten die Anzahl der ausgezählten Körner pro mm² verglichen mit dem Referenzdraht weniger war. Der Draht des Herstellers A verlor im Mittel 128 Körner/mm² und der Draht des Herstellers B dagegen 72 Körner/mm². Um zu ermitteln, wie sich der Diamantdraht mit einer geringeren Kornanzahl verhält, wurde ein weiteres Experiment angestellt. Es wurde dazu der Draht des Herstellers A verwendet, da diesem mehr Körner ausgebrochen waren als dem Draht vom Hersteller B (worst case) und analysiert, welche Auswirkung diese Kornreduktion auf die Abtragsfähigkeit des Diamantdrahtes nimmt. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Abtragungsgeschwindigkeit, das bedeutet das abgetragene Volumen des Siliziummaterials pro Zeiteinheit, deutlich reduziert und damit die Sägeschwindigkeit abnimmt. Die Versuchsreihen an der Eindrahtsäge eigneten sich, um Trends und allgemeine Zusammenhänge im Verschleißverhalten der Diamantdrähte festzustellen. Damit genau bestimmt werden kann, wann die Verschleißgrenze des Diamantdrahtes erreicht wird, müsste das in dieser Arbeit angestellte Analyseverfahren an der Multidrahtsäge angewendet werden. Dort sind die Sägeparameter exakt und die Auswirkungen der Pendelbewegung, die an der Eindrahtsäge nicht vorherrschten, miteinbezogen. Es könnten nach verschiedenen Sägezeiten über den Zeitbereich von 98 Minuten hinaus, mehrere Ausschnitte aus dem Diamantdrahtnetzwerk auf die Verschleißparameter hin untersucht werden. Da die Verschleißrate zum Anfang erhöht ist und mit zunehmender Standzeit abnimmt, könnte der Diamantdraht weiterhin im Sägeprozess eingesetzt werden. Ein Vergleich zu den im Multidrahtsägeprozess bestimmten Verschleißparametern könnte die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse validieren und es könnten damit weitere Verschleißversuche hinsichtlich möglicher Grenzbereiche mit Hilfe des Eindrahtsägeversuchs durchgeführt werden.

I Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beschreibung der technischen Funktion eines Tribosystems [4]	4
Abbildung 2: Überblick der vier grundlegenden Reibungsmechanismen [6].....	6
Abbildung 3: Kurven der Verschleißbeträge nach einer Bezugsgröße aufgetragen [3]	8
Abbildung 4: Ätzen des Diamantdrahtes in der Nickelstripper Lösung auf einer Heizplatte ..	10
Abbildung 5: Vergleich des ungeätzten Diamantdrahtes (links) mit dem geätzten (rechts)....	11
Abbildung 6: technische Darstellung einer Multidrahtsäge: Siliziumbrick (1), Führungsrollen (2), Drahtfeld (3), Kerbenabstand (4)	14
Abbildung 7: Messung der Kraft auf den Diamantdraht mit einem Drahtspannungsmessgerät	18
Abbildung 8: Sägen eines Siliziumblockes im Verschleißexperiment	19
Abbildung 9: Schema zur Probenbeschreibung der Diamantdrahtschleife und Kennzeichnung der lichtmikroskopischen Untersuchungsbereiche	21
Abbildung 10: mikroskopische Auswertung des Diamantdrahtes vom Herstellers B (Neuzustand).....	22
Abbildung 11: Histogramm/Dichtefunktion zum äußeren Drahtdurchmesser im Neuzustand (Hersteller A).....	24
Abbildung 12: Histogramm/Dichtefunktion zum inneren Drahtdurchmesser im Neuzustand (Hersteller A).....	25
Abbildung 13: Histogramm/Dichtefunktion zur Korngröße im Neuzustand (Hersteller A)	26
Abbildung 14: Histogramm/Dichtefunktion zur Kornanzahl im Neuzustand (Hersteller A).....	27
Abbildung 15: Histogramm/Dichtefunktion zum äußeren Drahtdurchmesser im Neuzustand (Hersteller B).....	28
Abbildung 16: Histogramm/Dichtefunktion zum inneren Drahtdurchmesser im Neuzustand (Hersteller B).....	29
Abbildung 17: Histogramm/Dichtefunktion zur Korngröße im Neuzustand (Hersteller B)	29
Abbildung 18: Histogramm/Dichtefunktion zur Kornanzahl im Neuzustand (Hersteller B).....	30
Abbildung 19: Übersicht der Histogramme mit Dichtefunktion zum äußeren Drahtdurchmesser für verschiedene Standzeiten des Drahtes A.....	32
Abbildung 20: Übersicht der Histogramme mit Dichtefunktion zum inneren Drahtdurchmesser für verschiedene Standzeiten des Drahtes A.....	33
Abbildung 21: Übersicht der Histogramme mit Dichtefunktion zur Kornanzahl für verschiedene Standzeiten des Drahtes A.....	34
Abbildung 22: Übersicht der Histogramme mit Dichtefunktion zur Korngröße für verschiedene Standzeiten des Drahtes A	35
Abbildung 23: Diagramm des äußeren Drahtdurchmessers über der Zeit für den Draht A....	40
Abbildung 24: Diagramm des äußeren Drahtdurchmessers über der Zeit für den Draht B....	41
Abbildung 25: Diagramm der Kornanzahl über der Zeit für den Draht A.....	42
Abbildung 26: Punktdiagramm der Kornanzahl über der Zeit für den Draht B	43
Abbildung 27: Verschleiß bezogen auf die Abtragungsgeschwindigkeit des Diamantdrahtnetzwerkes an einem Siliziumblock	44

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der direkten Verschleißmessgrößen [8].....	8
Tabelle 2: Sägeparameter einer Multidrahtsäge im industriellen Einsatz	12
Tabelle 3: Sägezeiten aus den Vorversuchen für beide Drahthersteller	13
Tabelle 4: Daten der gewählten Multidrahtsäge.....	14
Tabelle 5: Übersicht der gewählten Parameter an der Eindrahtsäge für alle durchgeführten Verschleißversuche	18
Tabelle 6: Angaben der Einstellwerte zum zweiten Experiment Schnittgeschwindigkeitsversuche.....	20
Tabelle 7: Gegenüberstellung der Referenzverschleißmarker für beide Drahthersteller	31
Tabelle 8: Auflistung der Verschleißmarker für verschiedene Standzeiten der beiden Hersteller.....	36
Tabelle 9: Messung der Schnitttiefen für die verschiedenen Sägezeiten des Drahtes (Hersteller A).....	38

III Literaturverzeichnis

- [1]. Möller, H. J. *Basic Mechanisms and Models of Multi-Wire Sawing*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.
- [2]. Yang, Chris, et al. *Advanced Engineering Materials*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [3]. Deters, Ludger, et al. http://gft-ev.de/wp-content/uploads/2014/07/2002_AB_7_Tribologie.pdf. [Online] 2002.
- [4]. Czichos, Horst. *Tribologie Handbuch - Reibung und Verschleiß*. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2003.
- [5]. Hornbogen, Erhard, Eggeler, Gunther und Werner, Ewald. *Werkstoffe Aufbau und Eigenschaften*. Heidelberg : Springer Verlag, 2012.
- [6]. Nasser , Jamil und Möller, Uwe. *Schmierstoffe im Betrieb*. Berlin : Springer Verlag, 2002.
- [7]. Fleischer, Gerd, Gröger, Horst und Thum, Heinz. *Verschleiß und Zuverlässigkeit*. s.l. : VEB Verlag Technik, 1980.
- [8]. Bartz, Wilfried J. und Möller, Uwe J. *Expert Praxislexikon plus: 2010 Begriffe für Studium und Beruf*. Renningen : expert Verlag, 2000.
- [9]. Czichos, Horst und Habig, Karl-Heinz. *Tribologie-Handbuch - Reibung und Verschleiß*. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2003.

[10]. Strunz, Matthias. *Instandhaltung Grundlagen Strategien Werkstätten*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2012.

IV Symbolverzeichnis

s	Sägestrecke
s_v	Verschleißweg
K_{ab}	Anzahl der Kerben beim Abwickeln
K_{auf}	Anzahl der Kerben beim Aufwickeln
s_{vab}	Verschleißweg beim Abwickeln
s_{vauf}	Verschleißweg beim Aufwickeln
t	Sägezeit
l_w	Länge eines Wafers

V Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Fraunhofer CSP bedanken, die mich während meiner Praktikumszeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonderer Dank gilt meinem betreuenden Professor Herr Bagdahn, der es mir vor allem ermöglicht hat, mein duales Studium an der Hochschule Anhalt in Köthen fortsetzen zu können.

Für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und Betreuung möchte ich mich ebenso bei meinem Mentor Dipl. Ing. Ringo Köpge bedanken.

Zuletzt gebührt meiner ganzen Familie herzlicher Dank dafür, dass sie mich während meines Studiums in allen Dingen unterstützt haben.

VI Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift des Verfassers

VII Anhang

