

Triboelektrisch induzierte Aufladung von Holzstaub beim Schleifen – ein innovativer Ansatz zur Reduktion der Feinstaubbelastung

Masterarbeit

Eingereicht von

Lisa Doni

01340134

Betreuer: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Rupert Wimmer

Co-Betreuer: Dipl.-Ing. Dr. Stephan Frömel-Frybort

Co-Betreuer: Dipl.-Ing. Roman Myna

Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe

Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik

Universität für Bodenkultur Wien

28.04.2020

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Lisa Doni, an Eides statt, dass die vorliegende Masterarbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als den angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt wurde. Weiters habe ich die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommen Stellen als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keinem anderen Prüfer/ keiner anderen Prüferin als Prüfleistung eingereicht.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben. In erster Linie bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Roman Myna, für seine umfangreiche Unterstützung während der Versuchsdurchführungen und für seine zahlreichen Anregungen für das Schreiben selbst. Weiterer Dank gilt meinem Betreuer, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Rupert Wimmer, für die Möglichkeit diese Thematik behandeln zu können, ebenso für seine Hilfestellung während der gesamten Arbeit. Ebenfalls möchte ich Maria Georgiades für die von ihr zur Verfügung gestellten Forschung, danken. Ich bedanke mich bei meiner Familie, für die Ermöglichung und Unterstützung meines Studiums. Überdies möchte ich den Dank an meinen Lebenspartner für seine Geduld und sein Verständnis aussprechen. Zum Abschluss danke ich nochmals direkt meiner Mama, Susanne Doni, für ein intensives Korrekturlesen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	6
Kurzfassung	6
1. Einleitung	7
1.1. Holzindustrie	7
1.2. Holzarten und Werkstoffe	8
1.3. Feinstaubproblematik und gesundheitliche Auswirkungen	9
1.4. Triboelektrische Reihe	13
1.5. Notwendigkeit einer Staubreduktion	14
1.6. Zielsetzung und Hypothesen	18
2. Material und Methoden	19
2.1. Eingesetzte Materialien	19
2.2. Eingesetzte Geräte	20
2.3. Versuchsplan	22
2.4. Versuchsdurchführung	22
2.5. Datenauswertungssoftware	24
3. Ergebnisse	25
3.1. Mikroskopische Untersuchungen an Holzstaub	25
3.2. Elektrostatische Aufladung von Holzmaterialien	27
3.2.1. Gegenüberstellung von Fichte, Buche, mitteldichte Faserplatte (MDF) und Spanplatte (PB)	28
3.2.2. Vollholz vs. Holzwerkstoffe	41
3.2.3. Gegenüberstellung der Nadelhölzer Fichte, Tanne und Kiefer	49
4. Diskussion	56
4.1. Etablierung einer Entstaubungstechnologie während des Schleifprozesses	64
5. Schlussfolgerung	67

6. Literaturverzeichnis	69
Abbildungsverzeichnis	73
Tabellenverzeichnis	76
Abkürzungsverzeichnis	77
Anhang	78

Abstract

The present research provides new insights into the wood-dust problem – a increasingly critical topic in the wood industry. The problem is evident economically and ecologically, and most notable on a sanitary-health level. The major research task was the triboelectric charging of wood dust during sanding of wood and wood-based composites. It turned out that wood dust always accumulates an electrostatically net charge. During constant processing steps dust derived from wood and wood-based composites is charging differently. A systematic difference in the electrostatic charging of dust between softwoods and hardwoods was found. Opposite to the other species, spruce dust particles are charging negatively as well as positively. A solution-oriented approach to reduce fine dust pollution lies in the agglomeration through reverse polarity-induced charging of wood dust during sanding. The investigation of triboelectric charges of wood dust during sanding is truly a pioneer task, with further intensive research still needed.

Keywords

Wood dust, sanding, triboelectric charging, polarity, dust collection, spruce

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit gibt neue Einblicke in die Holzstaub-Problematik - ein zunehmend kritisches Thema in der Holzindustrie. Das Problem zeigt sich auf ökonomischer, auf ökologischer und vor allem auf gesundheitlicher Ebene. Untersuchungsgegenstand war die triboelektrische Aufladung von Holzstaub während des Schleifprozesses von Holz und Holzwerkstoffen. Im Zuge der eigenen Forschung zeigte sich, dass der beim Schleifen produzierte Holzstaub stets eine elektrostatische Nettoaufladung zeigt. Vollholz und Holzwerkstoffe laden sich bei gleichen Bearbeitungsparametern unterschiedlich auf. Ebenso gibt es zwischen Laub- und Nadelhölzern einen systematischen Unterschied bei der erzielten Polarität sowie Aufladungsstärke von Staubpartikel. Es stellte sich heraus, dass sich Fichtenstaub ausnahmsweise sowohl negativ als auch positiv aufladen lässt. Eine mögliche Erklärung wurde nicht gefunden, könnte aber in den akzessorischen Bestandteilen von Fichte liegen. Ein Ansatz zur Reduktion der Holz-Feinstaubbelastung liegt in der Agglomeration des Feinstaubs, indem eine gegenpolig-triboelektrisch induzierte Aufladung während des Schleifens induziert wird. Die Untersuchungen zur Aufladung von Holzstaub stellen eine Pionierleistung dar und bedürfen noch einer Vielzahl an weiteren Untersuchungen.

Schlüsselwörter

Holzstaub, Schleifen, triboelektrische Aufladung, Polarität, Entstäubungstechnologie, Fichte

1. Einleitung

In der Holzindustrie gilt der Holzstaub als einer der schädlichsten Umweltparameter. Zum einen führen die durch Holzstaub verursachten Gesundheitsprobleme zu vermehrten krankheitsbedingten Ausfällen mit einer daraus resultierenden verringerten Produktivität. Zum anderen haftet der Holzstaub auf Oberflächen, weilt weiter und streut er in der Luft. Dies verursacht Brandgefahr und führt zu einem erhöhten Explosionsrisiko. Auch hat der auf den Oberflächen abgesetzte Holzstaub einen vermehrten Reinigungsbedarf zur Folge, mit einhergehenden Betriebsunterbrechungen von Steuerungs- und Messsensoren (Welling et al. 2008).

Aufgrund der fortschreitenden technologischen Entwicklungen erfolgte mit der Novelle der Grenzwertverordnung (GKV) 2011 auch eine Angleichung der gesetzlichen Vorgaben für Holzstaub. Basis der Anpassungen war vor allem die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 553 Holzstaub (Kapelari et al. 2011). Der neue Grenzwert bei Maschinen der Holzbearbeitung wurde von $5\text{mg}/\text{m}^3$ auf $2\text{mg}/\text{m}^3$ festgelegt. Die Grundlage des neuen Grenzwertes bildet dabei der Schichtmittelwert. Dies entspricht dem Holzstaubaufkommen in Bezug auf einen Acht-Stunden Tag. Die TRGS 553 legt besonderes Augenmerk auf Harthölzer wie Buche und Eiche (Markovski 2008). Heisel und Weiss (1991b) zeigten in ihren Artikel auf, dass die Hartholzstäube von Eiche und Buche als gesicherte krebserregende Arbeitsstoffe eingestuft wurden. Die übrigen Holzstäube fallen aufgrund ungenügender Identifikationen bezugnehmend auf die krebserregende Substanz, in die Gruppe der Verdachtsstoffe.

1.1. Holzindustrie

Holzindustrie in der Europäischen Union

In der EU deckt die Holzindustrie eine Vielzahl an Tätigkeiten ab, darunter große Teile der Möbelindustrie, weiters die Papierindustrie, die Zellstoffherstellung, die verarbeitende Industrie und die Druckindustrie. In der EU waren im Jahr 2017 rund 430.000 Unternehmen mit 3,3 Millionen Erwerbstätigen beschäftigt. Dies entspricht 11% des gesamten verarbeitenden Gewerbes (European Commission 2019).

Holzindustrie in Österreich

Im Jahr 2018 zählte die Holzindustrie in Österreich 1.224 aktive Betriebe, 1.000 davon waren Sägewerke. Die Branche ist ein vielschichtiger Wirtschaftsbereich und beinhaltet den Baubereich, die Möbelindustrie die Sägeindustrie, die Skiindustrie, sowie die Holzwerkstoffindustrie (Schatzl 2019). Sowohl heimisches wie auch importiertes Säge- und Industrierundholz wird zu hochwertigen Erzeugnissen weiterverarbeitet, wie unter anderem zu Schnittwaren, Span- und Faserplatten, Zellstoff, Möbelstücke, Papier, Pappe und Viskose. Durch diese Veredelung wird eine bedeutete Wertschöpfung in Österreich generiert (Waldverband Österreich 2017). Im Jahr 2018 wurden durch Exporte 6,03 Mrd.€ erwirtschaftet. Weiters wurden in Summe Erzeugnisse mit einem Gesamtwert

von 4,73 Mrd.€ importiert. Mit 86,2% stellt die EU den wichtigsten Handelspartner der österreichischen Holzbranche dar (Schatzl 2019).

1.2. Holzarten und Holzwerkstoffe

Im Gegenzug zu anderen Rohstoffen zeichnet sich der Naturwerkstoff Holz, durch einen starken inhomogenen Aufbau aus. Aufgrund seines zellförmigen Aufbaus ist bei der Zerspanung ein Erzeugnis von Spänen mit gleicher Form und Größe nicht möglich. Dadurch entsteht ein Kollektiv an Späne mit differenzierten Größen. Sowohl die Größenverteilung der Späne als auch die Form der Staubfraktionen sind durch eine Vielzahl von Variablen bedingt. Dies sind Parameter wie das Bearbeitungsverfahren, die maschinenseitigen Einstellbedingungen, die Werkzeuggeometrie, sowie die Holzart selbst (Heisel, Weiss 1991b).

Holz ist ein von der Natur geschaffener Werkstoff, der auf Grund seiner einfachen Be- und Verarbeitbarkeit, seiner leichten Masse und seiner hohen Festigkeit zu einem der ältesten Werkstoffe zählt. Durch seine inhomogene Struktur weist Holz in verschiedenen Richtungen sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. Physikalisch wird dieses Merkmal Anisotropie genannt. Hauptbestandteile des Holzes sind Zellulose als größter Bestandteil mit 40-58%, gefolgt von der Hemizellulose mit 15-30% und das Lignin mit einem prozentuellen Anteil zwischen 20-25%. Des Weiteren machen Harze, Fette, Eiweiße, Gerb- und Farbstoffe einen Anteil von 2-7% aus. Vom Aufbau besteht jedes Holz aus Zellen, wobei zwischen Laub- und Nadelhölzer eine unverkennbare Verschiedenheit in ihrer Anordnung zu verzeichnen ist (Stehno 1981). Das Holzgrundgewebe richtet sich stets axial aus. Eingebettet in das Gewebe befinden sich radial ausgerichtete, sogenannte Holzstrahlen. Diese sind bei einigen Laubhölzern wie beispielsweise bei der Buche mit dem freien Auge leicht zu erkennen. Die meisten Nadelhölzer wiederum entwickeln Harzkanäle, unter welchen ein röhrenförmiger, mit Harz gefüllter Kanal verstanden wird (Thienel 2016). Stehno (1981) stellte fest, dass sich Holz gegenüber künstlich hergestellten Baustoffen, wie Beton und Stahl darin unterscheidet, indem sich die Eigenschaften von Holz innerhalb definierter Grenzen bewegen, wobei zwischen individuellen Holzstämmen starke Differenzen auftreten können.

Holzarten mit einer Darrdichte von unter 550 kg/m³ zählen zu der Kategorie der Weichhölzer, sie zeichnen sich durch ihre feineren und weicheren Strukturen aus. Von den untersuchten Holzmaterialien gelten Fichte, Tanne und Kiefer als Weichhölzer. Harthölzer wiederum definieren sich über eine Darrdichte von über 550 kg/m³. Wegen der Dichte der Fasern sind sie deutlich belastbarer und härter in ihrem Aufbau, dazu zählt die Buche (Eder o.J.).

Die **Fichte** (*Picea abies* Karst (L.)) als Nadelholz, zeichnet sich durch ein geradfaseriges, helles Holz ohne Kernfärbung aus. In frischem Zustand hat das Holz einen harzigen Geruch. Das Holz der Fichte besitzt neben axial ausgerichteten Tracheiden, im Gegensatz zum Tannenholz, auch radial ausgebildete, mit Harz angefüllte Kanäle (Richter, Ehmke 2017).

Charakteristisch für die Holzstruktur der **Buche** (*Fagus sylvatica* L.) ist sein dichter, harter und schwerer Aufbau (Schneider o.J.). Das Laubholz zeichnet sich durch seine feinen Poren aus, ebenso besitzt es eine homogene Struktur, ohne auffallende Zeichnungen (Lutze 2016).

Das Holz der **Tanne** (*Abies alba* Mill.) ist ein geradfaseriges, weißliches Nadelholz ohne Kernfärbung. Die Eigenschaften des Tannenholzes ähneln sehr dem der Fichte, das heißt es zeigen sich weder in der Optik, noch in den werkstofftechnischen Verwendungen deutliche Unterschiede. Jedoch zeichnet sich ein wesentliches Merkmal für die Unterscheidung durch die Harzkanäle aus. Diese häufig im Fichtenholz vorhandene Harzkanäle fehlen bei der Tanne. Das Holz der Tanne wird durch seine splitterige und filzige Struktur ausgezeichnet, wodurch das Holz schlechter zu be- und verarbeiten ist (Grosser 2004).

Die **Kiefer** (*Pinus* sp.) ist ein geradfaseriges Vollholz mit rötlicher bis rotbrauner Kernfärbung. Ein charakteristisches Merkmal bei Kiefernholz sind die in deutlich überwiegender Vielzahl ausgeprägten Harzkanäle. Im Vergleich zur Fichte sind diese größer und deutlich öfters vorhanden sowie mit bloßem Auge erkennbar (Grosser 2007).

Unter **MDF (engl. medium density fiberboard, mitteldichte Holzfaserverplatte)** wird eine Platte verstanden, welche nach dem Trocknungsverfahren unter Beimengung eines synthetischen Bindemittels hergestellt wird. Durch eine Veränderung der Zusammensetzung, wie beispielsweise des synthetischen Bindemittels, wie auch durch die Beimengung anderer Komponenten, können weitere Vorteile, wie Feuerschutz, oder eine Resistenz gegen biologischen Befall, generiert werden (Holzforschung Austria – Österreichische Gesellschaft für Holzforschung 2017).

Unter **Pressspanplatte (engl. particle board = PB)** wird allgemein eine Platte aus kurzen Splintern von einer Länge, von wenigen cm bezeichnet, dabei werden Kunstharze, seltene Zemente, Gipse und Magnesite, als Bindemittel verwendet. Die Späne und Splitter bestehen aus Frischholz, Abfallholz bzw. Altholz sowie anderen holzartigen Faserstoffen. In der Mittellage können bis zu 20% des Materials durch Altpapier ersetzt werden, ohne dabei an Festigkeit zu verlieren (Thienel 2016). Als Leim wird hauptsächlich Harnstoffformaldehyd verwendet, welcher einen Anteil von maximal 10% beträgt. Die Merkmale der Spanplatten sind charakteristisch mit den Eigenschaften von Vollholz vergleichbar, allerdings ein deutlicher Vorteil gegenüber dem Naturholz ist, dass Spanplatten keine Faserrichtungen haben. Die Platte besitzt eine homogene Struktur, ihre Oberfläche ist gleichmäßig strukturiert (Holzinfo (Puuinfo) o.J.).

1.3. Feinstaubproblematik und gesundheitliche Auswirkungen

Beier (2005) definiert **Schwebestaub** (engl. particular matter = PM) als alle sich in der Atmosphäre befindenden, flüssigen und festen Fraktionen, welche für einen längeren Zeitraum in der Luft verweilen, bevor sie sich auf dem Boden beziehungsweise auf einer Oberfläche ablagern. Der Schwebestaub stammt zum größeren Teil aus anthropogenen Quellen, deren gesundheitliche Auswirkungen gravierender als natürliche Quellen, wie beispielsweise ein Vulkanausbruch, sind. Der Durchmesser der Schwebestaubpartikel entscheidet ob eine Aufnahme in den menschlichen Organismus erfolgt, sowie über die Stelle der Deponierung

in den Atemtrakt. Weiters stellt er einen bedeutenden Beitrag für das Ausmaß der Reinigung der Atemorgane dar.

- Als Gesamtschwebestaub werden Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von unter $15\mu\text{m}$ bezeichnet.
- Thorakaler Schwebestaub (PM₁₀) umfasst Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von unter $10\mu\text{m}$. Stäube zwischen den Größenbereich von PM₁₀ und PM_{2,5} fallen in die Kategorie grobe Partikel. Thorakaler Schwebestaub wird auch als inhalierbarer Schwebestaub benannt.
- Zum alveolengängigen Schwebestaub (PM_{2,5}) zählen Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von unter $2,5\mu\text{m}$, welche auch feine Partikel genannt werden.
- Unter ultrafeine Partikel (UFP) werden Fraktionen mit einem aerodynamischen Durchmesser von unter $0,1\mu\text{m}$ verstanden (Beier 2005).

Als **Feinstaub** wird die Immission von Teilchen bis zu einem aerodynamischen Durchmesser von $10\mu\text{m}$ definiert. Diese Partikel können nicht mehr von dem Flimmerepithel im Lungengewebe zurückgehalten werden und erreichen unbehindert die Alveolen. Auf Stäube mit einer Größenordnung von $0,1-10\mu\text{m}$, welche etwa 90% des Staubanteils ausmachen, kann das Lungengewebe mit chronischen Entzündungen reagieren. Eine heute zu Tage deutlich weniger erforschte Gefahrenquelle stellt die Unterfraktion der ultrafeinen Staubpartikel mit einer Größe von $<0,1\mu\text{m}$ dar. Sie machen rund 10% der Feinstaubbelastung aus (Gross 2006). Die UFP haben im Vergleich zu Partikel mit einem größeren aerodynamischen Durchmesser, eine deutlich geringere Masse, dagegen eine um das Vielfache größere Teilchenanzahl. Folglich führt die Partikeloberfläche zu einem vermehrten Aufkommen in der Außenluft. Dies stellt in Folge eine weitere Gefahr für die Gesundheit dar (Beier 2005).

Hahn und Möhlmann (2011) beschreiben nachfolgend den allgemeinen Staubgrenzwert, welcher sich aus einem Grenzwert für die alveolengängige und die einatembare Fraktion zusammensetzt. Diese werden auch als A-Staub und E-Staub bezeichnet. Durch die Einführung und die Einhaltung des allgemeinen Staubgrenzwertes sollen die Atmungsorgane von allen schwer- und unlöslichen Stäuben geschützt werden. Ende 2001 wurde für den A-Staub ein Grenzwert von $3\text{mg}/\text{m}^3$ und für den E-Staub ein Grenzwert von $10\text{mg}/\text{m}^3$ gesetzt. Durch die MAK (maximale Arbeitsplatzkonzentration) - und BAT (biologischer Arbeitsstoff-Toleranzwert) - Werteliste 2011 hat sich der Grenzwert für die A-Fraktion verschärft und wurde von $3\text{mg}/\text{m}^3$ auf $0,3\text{mg}/\text{m}^3$ festgelegt.

In einer Forschung von Georgiades (2019) am Institut von Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe, wurden Untersuchungen zu dem beim Schleifen und Schneiden angefallenen Holzstaub durchgeführt. Inhalt der Arbeiten waren die Absinkgeschwindigkeit des Holzstaubes. Des Weiteren folgte eine Zuteilung durch die Relation des Rüttelsiebs der einzelnen Holzstaubpartikel an die jeweilige definierte geschätzte PM Größe. Diese Forschung kommt zu dem Ergebnis, dass zwischen rund 84 und 94% von dem fein entnommenen Holzstaub $X < 100\mu\text{m}$ waren. Beim groben Holzstaub liegt der Anteil zwischen

rund 48 und 85%. Folglich sind selbst die neuen Grenzwerte für den A-Staub unzureichend.

Der Großteil der Staubpartikel $>2,5\mu\text{m}$ wird schon in der Nasenschleimhaut ausfiltriert und ausgeatmet. Fraktionen von über $10\mu\text{m}$ gelangen nicht in den Organismus. Dennoch kommt der Nasen- oder Mundatmung eine große Bedeutung zu, welche beträchtliche Auswirkungen auf die Disposition der Partikel hat. Diese kann eine erhebliche Einflussnahme darauf haben, wie weit Teilchen in die Atmungsorgane ein- und vordringen können. Ebenso begünstigen langsame und tiefe Atemzüge, dass eine beträchtliche Menge des Aerosols in die Lunge und zu den Alveolen gelangen kann (Abteilung Kommunikation der SCNAT 2006). Etwa ein Drittel der Partikel im Bereich von $\text{PM}_{2,5}$ - PM_{10} gelangen in die Luftröhre und weiter in die Bronchien. Diese werden jedoch zumeist in einem Zeitraum von einen bis drei Tagen zum Kehlkopf zurück transportiert und ausgestoßen. Die UFP hingegen können bis in den Bereich der Alveolen vordringen. Die restlichen zwei Drittel davon verbleiben entweder vorübergehend auf den Äußeren der Alveolen, oder sie lagern sich beständig im Gewebe zwischen den Lungenbläschen ab. Diese werden durch das Blut in den gesamten Organismus und von dort weiter in allen Organen verteilt (Beier 2005). Lediglich Partikel um 500nm stellen eine verringerte Gefahr dar, da sie so gut wie gar nicht in den Atemtrakt deponiert werden. Ein Anteil von etwa 80% wird wieder ausgeatmet (Abteilung Kommunikation der SCNAT 2006). Abb.1. liefert einen Überblick über die Ablagerungen von Feinstaub im menschlichen Atemtrakt.

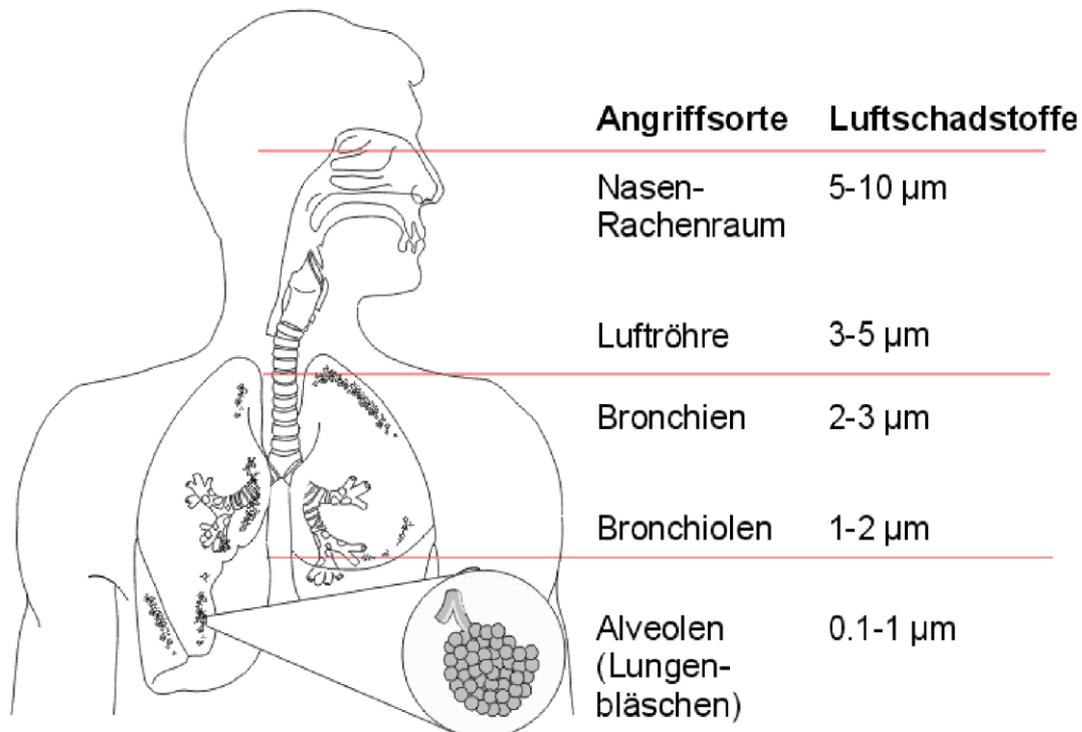


Abb.1.: Ablagerungen von Feinstaub im menschlichen Atemtrakt (Abteilung Kommunikation der SCNAT 2006).

Bezugnehmend auf **Holzstaub** selbst, konnte nach Heise und Weiss (1991a) seit Anfang der achtziger Jahre durch die Auswertung von Krebsregistern eine statistische Verbindung zwischen Holzstaubexposition und einem gesteigerten Nasenkrebsrisiko festgestellt werden. Im Falle nachgewiesener krebserregender Stoffe ist eine stoffspezifische Analyse erforderlich. Besonders da es sowieso anzusehen ist, dass sich die Risikowerte von Holzstaub unterhalb des aktuell festgelegten Grenzwertes für den A-Staub befinden (Hahn, Möhlmann 2011). Dies kann durch eine Forschung am Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe, in welcher Untersuchungen bezugnehmend auf die Absinkgeschwindigkeit und die Partikelgröße von Holzstaub angestellt werden (sh. Kapitel 1.5.), verdeutlicht werden (Georgiades 2019).

Neben den zahlreichen Holzstaubpartikel, die während der Be- und Verarbeitungsprozesse entstehen, kommt erschwerend hinzu, dass der Holzstaub auch Bakterien, Pilzsporen sowie auch Viren enthalten kann. Einflussnehmende Faktoren können u.a. sein:

- Grünes, frisches beziehungsweise nicht-getrocknetes Holz
- Holzart: Laub- oder Nadelholz
- Art der Holzbe- und verarbeitung
- Lagerungsbedingungen (Health and Safety Executive 2012).

Schuller (2012) weist auf die durch Holzstaub ausgelösten und nachgewiesenen Krankheiten hin (Tab.1.). Ausgewählt wurden die für diese Arbeit relevanten Staubarten der Holzarten Fichte, Buche, Kiefer und Tanne. Bei diesen Angaben wird von einem Holzstaubkonsum über einen langen Zeitraum ausgegangen.

Tab.1.: Mögliche, durch Holzstaub ausgelöste und nachgewiesene Krankheiten (Schuller 2012, eigene Darstellung).

Holzart	Asthma	akute oder chron. Entzündung der Nasenschleimhaut	Reizung der Augen	Reizung der Nase	Reizung des Halses	verringerte Lungenfunktion	Nasenschleimhautkrebs	Dermatitis
Fichte				x	x			
Buche			x			x	x	x
Kiefer	x	x				x		
Tanne	x	x						

TRGS werden definiert als die technischen Regeln für Gefahrenstoffe. TRGS 905 bezieht sich auf das Verzeichnis für krebserzeugende, keimzellmutagene oder reproduktionstoxische Stoffe. TRGS 906 beinhaltet das Verzeichnis für krebserzeugende Tätigkeiten oder Verfahren nach § 3 Abs. 2 Nr. 3 GefStoffV und TRGS 553 auf den Holzstaub (Erbach et al. o.J.). Der Holzstaub allgemein (TRGS 905) und vor allem der Holzstaub von Harthölzern ist als krebserzeugender Gefahrstoff (TRGS 906) eingestuft. Allerdings konnte die krebserzeugende Substanz noch nicht identifiziert werden (Krämer 2019). Dabei könnte es sich hierbei um die im Holz vorhandenen Inhaltsstoffe oder um deren Verbindungen handeln.

Solche Verbindungen beinhalten Komponenten wie Lignine, Cellulosen, Hemicellulosen und akzessorische Bestandteile (Kubel et al. 1988). Weißmann et al. (1992) machten darauf aufmerksam, dass weitere Ursachen Pyrolyseprodukte, Hilfsstoffe bei der Ver- und Bearbeitung selbst, Holzschutzmittel und/ oder myco-cancerogene Stoffe sein können.

1.4. Triboelektrische Reihe

Elektrische Eigenschaften hängen von den in den Materialien enthaltenen chemischen Zusammensetzungen, deren Bindungen, sowie deren Leitungsmechanismen ab. Atome haben stets das Bestreben, in ihrer äußersten Schale ein stabiles Befinden zu erreichen. Dabei wird das neutrale Atom aufgrund der Aufnahme oder der Abgabe von Elektronen zu einem Ion. Dadurch hat es die Möglichkeit, ein elektrostatisches Feld zu weiteren Ladungsträgern aufzubauen. Ein elektrisches Feld führt dazu, dass in einem Material, nicht nur abhängig von der Größe des spezifischen elektrischen Widerstandes, ein elektrischer Stromfluss, sondern auch eine Polarisierung stattfindet (Halbedel 2014). Durch Reibung und Trennung ungleicher Stoffe wird Triboelektrizität erzeugt. Das ist ein Prozess, in welchem ein Transfer von Elektronen von einem Stoff zu einem anderen Stoff stattfindet. Da Elektronen eine negative Ladung haben, wird der Stoff der Elektronen abgibt, positiv geladen und umgekehrt (Kleinwächter GmbH 2017). Die Menge der entwickelten Ladung hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab, wie der kinetischen Energie, der Kontaktfläche und der chemisch strukturellen Anordnung der beteiligten Stoffe. Die Polarität und Stärke der elektrostatisch induzierten Aufladungen unterscheiden sich je nach Material, Oberflächenrauheit, Temperatur, Dehnung und anderen physikalischen und chemischen Eigenschaften (Myna et al. 2020).

Der triboelektrische Effekt war der früheste Schwerpunkt der Tribologiestudie. Aufgrund seiner heute noch großen Komplexität ist die grundlegende Frage, welche Oberflächen nun positiv und welche negativ aufgeladen werden, wenn zwei Oberflächen miteinander in Kontakt gebracht werden. Der wichtigste Begriff für den triboelektrischen Effekt ist die triboelektrische Reihe (Pan, Zhang 2018), dargestellt in Abb.2..

Typische triboelektrische Reihe

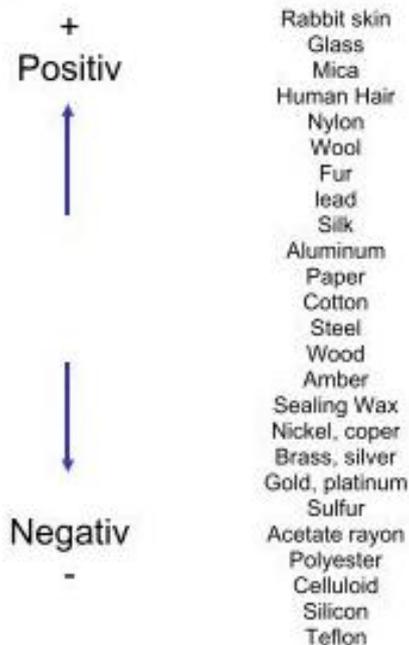


Abb.2.: Triboelektrische Reihe (Führer 2013).

Die Materialien können in der Reihenfolge der Polarität der Ladungstrennung aufgelistet werden. Ein Material im unteren Bereich dieser Serie erhält eine negative Ladung, wenn es auf ein Material in der Nähe des oberen Bereichs der Serie trifft. In einer triboelektrischen Reihe befindet sich Holz in der Mitte. Dies bedeutet, dass Holz je nach Kollisionspartnern oberhalb und unterhalb der Reihe sowohl negativ als auch positiv aufgeladen werden kann (Myna et al. 2020).

Nach McCarty und Whitesides (2008) zeichnet sich ein Elektret dadurch aus, dass durch seine Anionen- und Kationenanzahl eine Nettoladung aufgebaut wird. Es ist nicht möglich, dass ein Elektret keine Ladung besitzt. Ein ionisches Elektret definiert sich dadurch, dass sich auf der Oberfläche des Materials, Ionen befinden. Wenn ein Material mit diesen Eigenschaften mit einem anderen Material in Kontakt kommt, können Ionen zwischen diesen Materialien aufeinander übergehen. Wenn diese Materialien unterschiedliche Kationen und Anionen besitzen, kann dies zu einer Übergabe der Nettoladungen führen. Der Naturwerkstoff Holz selbst ist ein Bioelektret.

1.5. Notwendigkeit einer Staubreduktion

Aus einer Untersuchung von Welling et al. (2008) geht hervor, dass Schleifen, als Bearbeitungsprozess im Gegensatz zu Prozessen wie Sägen, Fräsen und Hobeln die stärksten Belastungen aufzeigt. Sowohl maschinell, als auch mit handgeführten Werkzeugen, stellte sich der dadurch entstandene Holzstaub trotz Absauganlagen als größte Belastung heraus.

Die effizienteste Möglichkeit zur Einhaltung der festgesetzten Grenzwerte wäre die Reduktion des Feinstaubanteils bereits bei der Holzbe- und Holzverarbeitung. Die Menge des Staubaufkommens ist abhängig von verschiedenen Bearbeitungsprozessen, der Art der Maschine, ebenso wie die maschinenseitig verwendeten Hilfsgrößen. Dadurch könne auf diese Weise, die anfallende Holzstaubfraktionen minimiert werden (Heisel, Weiss 1991b). Zum einen können Maßnahmen zur Staubreduzierung beim Maschinenhersteller angesetzt werden. Um eine bessere Effizienz des Staubeinfangens zu erzielen, ist eine gewissermaßen gänzliche Kapselung der Werkzeuge und Maschinen mit kleinstmöglichen Öffnungsquerschnitten, einzustellen. Zum anderen können Maßnahmen zur Staubreduzierung beim Bertreiber impliziert werden. Neben einer anständig dimensionierten Absauganlage angepasst an den jeweiligen Prozess, ist auch auf eine gewissenhafte Handhabung mit dem Holz selbst, ebenso wie ein einwandfreier Umgang mit der Maschine unbedingt notwendig (Heisel, Weiss 1991a). Um eine Staubreduzierung herbeizuführen, sind folgende technische und organisatorische Vorkehrungen zu treffen.

- Zu Beginn erfolgt die Erfassung der entstanden Holzstäube an Be- und Verarbeitungsmaschinen, sowie an Handarbeitsplätzen durch eine passende Einstellung der Erfassungselemente.
- Des Weiteren ist es erforderlich, eine Beschränkung der Staubemission bei der Rückführung der Luft, wie vor allem durch den Einsatz von passenden Filtern, zu erzielen.
- Auch soll dem Aufwirbeln bereits abgelagerter Holzstäube durch eine den Prozessen angepasste, regelmäßige Reinigung entgegengewirkt werden (Kapelari et al. 2011).

Eine Absaugung hat eine erhöhte Qualität in der Fertigung und eine gesteigerte Qualität der Arbeitsbedingungen zum Ziel (Krämer 2019). Absauganlagen werden bezugnehmend auf Erfassungselemente, Rohrleitungen, Filteranlagen, Ventilatoren, Silos und Bunker, welche an die festgelegten Bedingungen angepasst worden sind, am Standort selbst zusammengesetzt. Mit der GKV 2011 erfolgte eine Anpassung der Regelungen für Holzstaub auf den neuesten Stand und wurde geltend gemacht. Für alle Holzstäube gelten dieselben Bestimmungen zur Regelung der Luftrückführung, davon unabhängig, ob Hölzer nun als krebserregend oder nur als krebverdächtig eingeordnet worden sind (Kapelari et al. 2011).

Auch in der Filtertechnik steigen die Anforderungen, welche zur Entwicklung der Elektretfilter führte. Elektretfilter besitzen die Eigenschaft, dass ihre Polymerfasern elektrisch aufgeladen sind und somit zur Abscheidung von Partikeln aus Gasgemischen wie der Luft eingesetzt werden. Im Gegensatz zu gebräuchlichen Filtern, weisen Elektretfilter eine bessere Partikelabscheidung, insbesondere im Bereich von $<1\mu\text{m}$, bei demselben Druckverlust auf (Lathrache, Fißan 1989). Sowohl für die Effizienz als auch für die Wirtschaftlichkeit einer Absauganlage ist es unerlässlich, die Filter beiderseitig abzustimmen. Denn nicht alle Filter sind darauf ausgelegt, Partikel mit unterschiedlicher Korngröße zu filtern. Aufgrund unterschiedlicher physikalischer Effekte können die Partikel abgeschieden werden. Dies sind der Diffusions-, der Trägheits-, der Sperr- und der Siebeffekt, welche die wichtigsten Abscheideeffekte bei einer

Absaugungsanlage darstellen (AUVA 2019). Eine Möglichkeit zur Entstaubung bietet ein Filter mit großer Fläche, wie der High Efficiency Particulate Airfilter (HEPA). Ein HEPA-Filter ist ein hocheffizienter Gasfilter und wird zur Filtration von mikrofeiner Partikel von Feststoffen, oder von Flüssigkeiten aus Gasen verwendet. Allerdings benötigt diese Art von Filter eine überdurchschnittliche konstante Saugleistung (Cartier 1970). Ein Nachteil bezüglich dimensionierten Absauganlagen mit zusätzlichen unnötigen Rohrwiderständen ist, dass sie einen hohen Anteil an elektrischer Energie benötigen (Krämer 2019).

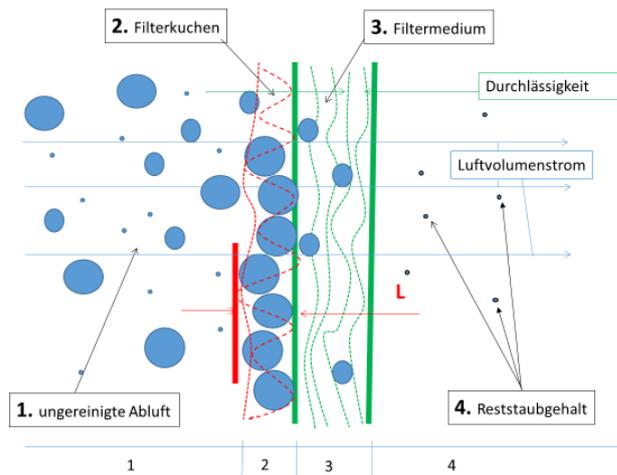


Abb.3.: Räumliche Trennsperre eines Filtermediums (Myna 2019).

Vorstehende Abb.3. stellt die räumliche Trennsperre eines Filtermediums dar. Wirklich effektiv funktioniert ein Filter nur für eine bestimmte, dafür vorgesehene Partikelgröße. Allerdings befinden sich Staubfraktionen unterschiedlichster Größenordnung in Luft und Bearbeitungsmaschine. Dies hat zur Folge, dass der Filter früher oder später verstopft und seine Aufgabe nur noch ungenügend erfüllen kann. Somit entweichen Holzstaubpartikel bereits vor dem Eintritt in den Filter und verteilen sich in der Außenluft (Myna 2019).

Beier (2005) beschrieb den Scavenger-Effekt, als jenen, bei welchen feine Partikel in Anwesenheit grober Partikel von diesen eingefangen werden. Durch Absorption kann sich somit die Anzahl an UFP verringern. Doch aufgrund von immer weiter voranschreitenden technologischen Entwicklungen in den letzten Jahren bis Jahrzehnte, wurden durch die Verwendung, die Entwicklung und die Verbesserung von Filteranlagen in den Industrien, eine Verringerung von einer Vielzahl an größerer Partikel erreicht. Dies führt zu einer Reduktion des Scavenger-Effekts und in Folge zu einem deutlichen Anstieg der UFP am Gesamtschwebstaub.

Zusätzliche Verwendung fand der beim Schleifen und Schneiden entstandene Holzstaub von Fichte, Buche, MDF und PB der Körnung P100 für weitere Untersuchungen des Instituts für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe. Es folgte die Entnahme von grobem Staub aus dem Zyklon und von feinem Staub aus dem Patronenfilter. In einem Rüttelsieb mit zwei Stufen wurde der Staub jeweils in $X > 250\mu\text{m}$, $250 > X > 100\mu\text{m}$ und $X < 100\mu\text{m}$ fraktioniert. Dieser Vorgang wurde vier Mal wiederholt, daraus der Mittelwert bestimmt und als

Grundlage für weitere Forschungen und Berechnungen verwendet. In Verbindung mit den Versuchsdurchführungen des Rüttelsiebes, stand der Holzturm (ein 1-Meter hoher Turm bestehend ausschließlich aus Holzplatten), mit dessen Hilfe die Absinkgeschwindigkeit der Holzstaubpartikel ermittelt werden konnte. Jedoch ist es nicht möglich die Absinkgeschwindigkeit von Holzpartikeln rechnerisch zu ermitteln, da es sich bei Holz um ein inhomogenes Material handelt. Deshalb wurde Wasser als homogenes Material als Referenz für die Berechnungen, um die Falldauer einer Wasserkugel mit der des Holzstaubes zu vergleichen, gewählt (Georgiades 2019).

Tab.2: Übersicht der Untersuchungsproben von P100 (Georgiades 2019).

Holzmaterial	Fraktion vom Rüttelsieb	Absinkzeit [sek]	PM geschätzt
Fichte	X1 <100 µm	5,6316	PM 1
	X2 100 µm bis 250 µm	3,2588	PM 4
	X3 > 250 µm	2,624	PM 6
Buche	X1 <100 µm	3,1486	PM 4
	X2 100 µm bis 250 µm	2,7092	PM 6
	X3 > 250 µm	1,9104	PM 12
MDF	X1 <100 µm	4,8113	PM 2
	X2 100 µm bis 250 µm	2,7503	PM 6
	X3 > 250 µm	2,092	PM 10
PB	X1 <100 µm	3,35	PM 8
	X2 100 µm bis 250 µm	2,1605	PM 9
	X3 > 250 µm	1,3302	>PM 20

Somit konnte die Geschwindigkeiten von unterschiedlichen Radien rechnerisch ermittelt werden. In einem Versuchsaufbau wurde die Verweildauer von realem Schleifstaub empirisch ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Größe der Partikel und die Holzart Einfluss auf die Verweildauer in der Luft haben. Die Zeiten werden mit den Referenzwerten wie in vorstehender Tab.2. dargestellt, verglichen, um somit die geschätzten PM zu erhalten. Durch die Ermittlung der Absinkgeschwindigkeit und der Fraktionierung der Holzstaubpartikel können nun Rückschlüsse auf die Gefährlichkeit von Holzstaub selbst geschlossen werden (Georgiades 2019).

Bei weiterer Betrachtung von Tab.2. entfiel ein enorm hoher Anteil auf die kleinste Kategorie von $X < 100 \mu\text{m}$. Diese sind deutlich gesundheitsgefährdender, vor allem der Holzstaub von Fichte und MDF, welche in die Kategorie PM1 und PM2 fallen. Buche fällt in dieser Fraktionseinheit in PM4, PB stellt mit minimal PM8 das geringste Risiko dar. Besonders gefährlich sind die feinen Fraktionen, welche dem Patronenfilter entnommen wurden. Wie Tab.3. und Abb.4. zu entnehmen, betragen bei allen vier Holzstäuben mindestens rund 84% eine Fraktionseinheit $X < 100 \mu\text{m}$. Die größeren Holzstäuben, welche von dem Zyklon aufgefangen wurden, waren größeren Schwankungen unterworfen. Mit Ausnahme von MDF, welches ähnliche Größenverteilungen wie die Stäube aus dem Patronenfilter aufwies. Bei Fichte, Buche und PB wiederum lag der maximale Anteil $X < 100 \mu\text{m}$ zwischen rund 48-63%.

Tab.3.: Prozentuelle Aufteilung der Korngrößenverteilung von P100 (Georgiades 2019).

	Bu_Grob	Bu_Fein	MDF_Grob	MDF_Fein	PB_Grob	PB_Fein	Fi_Grob	Fi_Fein
>250	5,94%	0,94%	1,62%	5,03%	10,69%	1,12%	14,69%	1,61%
>250>100	31,41%	5,36%	13,68%	11,04%	32,75%	2,44%	37,81%	12,48%
<100	62,65%	93,70%	84,70%	83,93%	56,56%	96,44%	47,50%	85,91%
	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

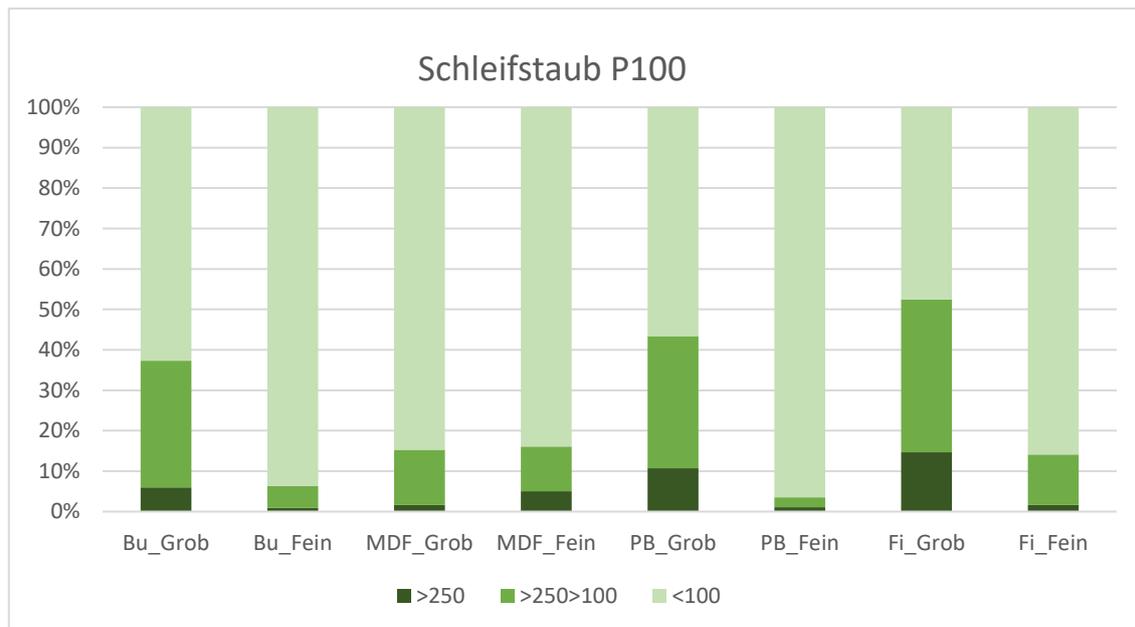


Abb.4.: Zusammenfassung der Korngrößenverteilung des Holzstaubs P100 (Georgiades 2019).

1.6. Zielsetzung und Hypothesen

Die Erforschung von triboelektrisch induzierten Aufladung von Holzstaub ist eine Pionierleistung, welche in den letzten Jahren am Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe gestartet wurde.

Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit war es herauszufinden, in welcher Weise sich Holzstaubpartikel beim Schleifen von Holz mittels Breitbandschleifmaschine triboelektrisch aufladen. Die Motivation für diese Forschung ergab sich aus der Suche nach Möglichkeiten zur Reduzierung der Holzstaubentwicklung während des Schleifprozesses selbst.

Daher wurden folgende Hypothesen aufgestellt.

- H1: Schleifen als spanabhebender Holzbearbeitungsprozess verursacht triboelektrische Aufladungen an den dabei entstehenden Staubpartikel.
- H2: Vollholzmaterialien laden sich bei gleichen Prozessbedingungen anders auf als Holzwerkstoffe.
- H3: Laub- und Nadelhölzer laden sich bei gleichen Prozessbedingungen unterschiedlich auf.

H4: Unterschiedliche Nadelhölzer laden sich bei denselben Prozessbedingungen gleich auf.

H5: Die triboelektrisch induzierte Aufladung ist für eine ausgewählte Holzprobe in Interaktion mit bestimmten Prozessbedingungen immer gleichsinnig.

Weiters soll eine Methode entwickelt werden, bei der Holzstaub bereits während des Schleifprozesses günstig und effizient entfernt wird. Ökonomischer und ökologischer Nutzen sind eine Reduzierung des Abfallaufkommen durch eine längere Verwendbarkeit des Schleifpapiers. Gesundheitsrisiken durch ein reduziertes Holzstaubaufkommen werden dadurch verringert. Durch eine vorgeschlagene Entstaubungstechnologie soll Holzstaub noch während des Bearbeitungsprozesses reduziert entfernt werden.

2. Material und Methoden

2.1. Eingesetzte Materialien

Holzmaterialien

Ausgewählte Holzmaterialien waren wie in Abb.5.a. und b. abgebildet, Buche als Laubholz, Fichte als Nadelholz und als Komposite MDF (mitteldichte Holzfaserverleimplatte) und PB (Pressspanplatte). Von den vier sich in ihrer Konsistenz unterscheidenden Holzmaterialien sind jeweils acht Probestücke verwendet worden. Alle Proben haben eine Länge von 63cm und eine Breite von 9,3cm. Die Höhe der Bretter von Fichte und Buche misst 4,5cm, von PB und MDF 3,8cm. Bei der Bestellung, sowohl bei Fichte wie auch bei Buche wurde versucht, auf eine ähnliche Anordnung der Jahresringe zu achten. Aufgrund der vorangegangenen Forschung erfolgte nachträglich eine Bestellung von zwei weiteren Holzproben – Tanne und Kiefer mit denselben Parametern wie jene der Naturhölzer. Tanne und Kiefer hatten ausschließlich tangentialen Anordnungen der Jahresringe.



Abb.5.: a. Buche, Fichte, MDF und PB; b. Tanne und Kiefer (Fotos: Lisa Doni).

Schleifpapier

Als Schleifpapier diente das Breitbänder Diamantflex Professional sowohl in P60 als grobkörnigeres, wie auch in P100 als feinkörnigeres Schleifpapier. 20-mal fand P60 und 20-mal fand P100 Verwendung.

Holzstaub

Untersuchungsgegenstand war je das in Abb.6. dargestellte entstandene Holzstaubgemisch von dem Schleifprozess der Fichte, Buche, MDF und PB bei Verwendung des Schleifpapiers mit einer Körnung von P60 und P100.



Abb.6.: (von oben li. nach unten re.) Holzstaubgemisch vom Schleifprozess von Fichte P60, Buche P60, PB P60, MDF P60, Fichte P100, Buche P100, PB P100 und MDF P100 (Foto: Lisa Doni).

Holzproben für Darrschrank

Von jedem Probematerial wurden vier Probestücke für eine kontinuierliche Überprüfung der Holzfeuchte vorbereitet. Die Messung der Masse des Holzes erfolgte mit einer von dem Labor zur Verfügung gestellten Waage. Die Maße der Probematerialien sind dem Anhang zu entnehmen.

2.2. Eingesetzte Geräte

Mikroskop

Für die mikroskopischen Untersuchungen des beim Schleifen entstandenen Holzstaubs kam das Zeiss Mikroskop Axioplan 2 zur Anwendung. Das Mikroskop war mit einer AxioCam HRc Videokamera verbunden, welche die analogen Bilder digital auf den PC übertrug.

Darrschrank

Die Holzproben wurden während des Untersuchungszeitraumes von fünf Wochen wiederholt in einem Darrschrank bei 103°C getrocknet. Die Berechnungen und Ergebnisse sind im Anhang einzusehen.

Breitbandschleifmaschine

Für die Erzeugung des Staubes diente die Breitbandschleifmaschine 630 C Pony. Dabei war sowohl ein langsamer Vorschub von 4,5m/min und ein doppelt so schneller Vorschub von 9m/min, sowie die Möglichkeit eine Abtragsvariation einzustellen.

Thermo-Hygrometer

Mittels des Thermo-Hygrometers PCE-TH 5 erfolgte die Aufzeichnung der aktuellen Raumtemperatur und die relative Feuchte der Luft, welche am Anfang der Testdurchläufe gemessen und aufgezeichnet wurden.

Air Flow Meter

Das Air Flow Meter PCE-HVA2 (Luftstrommessgerät), welches sich an der Messkonsole befand, gab Auskunft über die Temperaturbedingungen in der Breitbandschleifmaschine. Durch die Software Air Flow Meter fand in einem Zeitraum von etwa 90sek eine kontinuierliche Messung der Temperaturbedingungen im Inneren der Schleifmaschine statt. Es folgte die Messung der Geschwindigkeit in m/s und der Temperatur in °C im Innenbereich der Maschine und die Übertragung der Daten unmittelbar auf den PC.

Messbox

Die in Abb.7.a. und b. dargestellte Messbox war geerdet, dabei lädt sich das Testmaterial entweder positiv oder negativ auf. Es kann weder beides zugleich sein, noch kann es neutral sein und somit keine Aufladung besitzen.

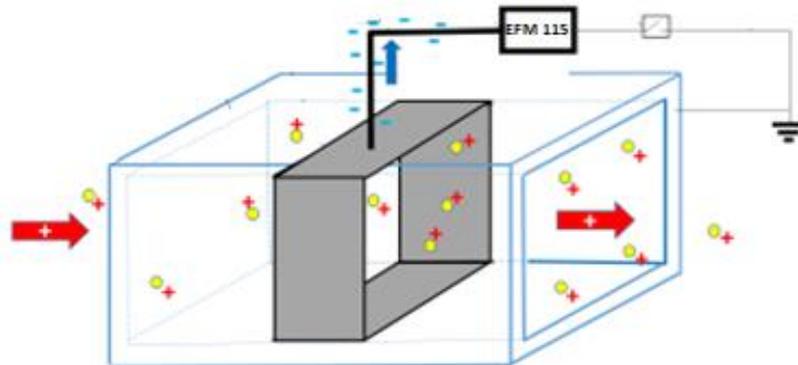


Abb.7.: a. Messbox (Foto: Lisa Doni); b. Messbox (Myna 2019).

Staurohr

Aufgabe des Staurohrs, welches mit dem Anemometer in Verbindung stand, war die lokale Messung der Geschwindigkeit der Luftströmung.

Messsonde

An der Messsonde EFM 115 mit den Messkopf MK11 fand die Messung und Weiterleitung der Aufladungen an den PC statt. Die Sonde gab Auskunft über die Stärke und die Polarität des gemessenen elektrischen Feldes (Kleinwächter GmbH 2017).

Messkonsole

Die Messkonsole besitzt eine Zeituhreinstellung. Leuchtet sie grün, bedeutet dies den Erdungsmodus für einen Zeitraum von 15sek. Leuchtet sie rot, ist der Messmodus aktiviert. Dieser beträgt einen Zeitraum von 25sek.

2.3. Versuchsplan

Versuchsplan 1 mit Fichte, Buche, MDF und PB lieferte eine detaillierte Übersicht über die Vorgehensweise und Kombinationen der Bearbeitungsparameter für alle 32 Testdurchläufe. Versuchsplan 2 von Tanne und Kiefer stellt die Vorgehensweise und Kombinationen der Bearbeitungsparameter für alle acht Testdurchläufe, wie beide in dem Anhang einzusehen, dar.

2.4. Versuchsdurchführung

Schleifen

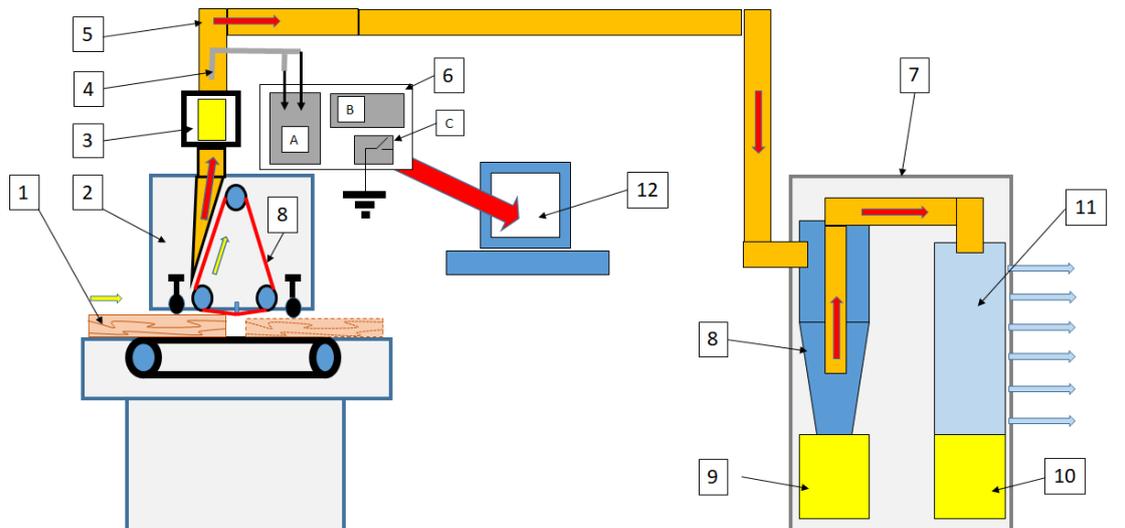
Zu Beginn erfolgte die Durchnummerierung und Beschriftung aller Probematerialien, eine Verwiegung jeder einzelnen Holzplatte und die anschließende Dokumentation in einem Excel File. Weiters wurden bei Buche und Fichte zwischen radialen und tangentialen Strukturen unterschieden und der Winkel bestimmt. Diese sind dem Anhang zu entnehmen. Die Lagerung sämtlicher Holzmaterialien erfolgte im Normklimaraum am Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe. Somit konnten gleich anhaltende Bedingungen für die gesamte Versuchsreihe gewährleistet werden. Im Klimaraum herrschte eine Raumtemperatur von 20°C sowie eine relative Luftfeuchtigkeit von 65%.

Anschließend wurden die zugeschnitten Holzproben im Darrofen bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, bei 103°C. Vor Beginn der Untersuchung erfolgte die erste Verwiegung. In weitere Folge fand wöchentlich, über einen Zeitraum von fünf Wochen hinweg, eine Gewichtsbestimmung statt, zur laufenden Ermittlung der Holzfeuchte.

Vor Beginn der Testdurchläufe erfolgte die Bestimmung der relativen Feuchte und der Lufttemperatur im Raum. Mit dem Air Flow Meter wurde die Temperatur in der Maschine gemessen.



Abb.8.: a. Breitbandschleifmaschine; b. Zyklon und Patronenfilter
(Fotos: Lisa Doni).



Legende: 1. Holzmaterial, 2. Breitbandschleifmaschine, 3. Messbox, 4. Messfüller Anemometer (Tauchrohr), 5. Rohrnetz, 6. Messkonsole, 7. Mobiler Kombi-Entstauber, 8. Zyklon, 9. und 10. Staubsammler, 11. Patronenfilter, 12. PC-Datenauswertung, A. Anemometer, B. Feldstärkemessgerät, C. Regenerationsmodul mit permanenter Erdung

Abb.9.: Versuchsablauf während des Bearbeitungsprozesses Schleifen (Myna 2019).

Ein Ausbau und eine Erweiterung der Breitbandschleifmaschine für die Messzwecke wurde selbst durchgeführt. Gearbeitet wurde nach den erstellten Versuchsplänen. Nach Einschalten der Maschine und Einstellen der Parameter folgte die Zuführung der Holzprobe auf der Vorderseite, auf der Rückseite der Maschine wurde die Probe nach Beendigung des Schleifdurchgangs wieder entnommen. Abb.8.a. und b. und Abb.9. zeigen einen Überblick über den gesamten Versuchsaufbau, inklusive Messgeräte und Absauganlage.

Der Schleifprozess wurde pro Durchlauf 20-mal wiederholt. Nach jedem einzelnen Schleifdurchgang erfolgte zur Kontrolle des Abtrags mittels Messschiebelehre eine Überprüfung der aktuellen Stärke des Probematerials. Anschließend wurden die Werte in einer separaten Tabelle aufgezeichnet. Somit sollten mögliche Schwankungen im Abtrag sofort registriert werden und wenn nötig, die Messung wiederholt werden können. Die Messkontrollen sind im Anhang einsehbar. Mit Hilfe der Software EFM 115 fand die Übertragung der gemessenen Daten auf den PC statt. Die Einstellung der Software erfolgte bei 5 Mal messen pro Sekunde – 5kV/m. Nach deren Eingabe war ein Beginn nur nach einem Nullpunktgleich möglich. Dabei musste das Feld am PC grün aufleuchten. Danach konnte der Schleifprozess beginnen, welcher 20 Mal wiederholt wurde (Kleinwächter GmbH 2017). Anschließend folgte eine direkte Weiterleitung der gemessenen Daten auf den PC. Parallel dazu entstanden Grafiken, worauf wiederum eine Umwandlung und Abspeicherung der entstandenen Rohdaten in einem Excel File erfolgte.

Die Orientierung erfolgte an den roten und grünen Signalen der Messkonsole. In diesem Fall bedeutete rot, dass der Schleifprozess beginnen konnte, anschließend die Holzprobe in die Maschine gelegt und somit eine Messung der Daten während des Schleifens, stattfinden konnte. Leuchtete die Messkonsole grün auf, bedeutete dies eine Erdung und somit keine Messung. Nach

Beendigung des Schleifprozesses und Abschalten der Maschine folgte eine gründliche Reinigung der Maschine. Im Inneren der Breitbandschleifmaschine wurde nach Entnahme des Schleifpapiers, der beim Schleifen angefallene Holzstaub ausgesaugt. Danach fand eine Entfernung des übrig angehafteten Holzstaubes statt, indem der Innenbereich nochmals mit einem leicht angefeuchteten Tuch ausgewischt wurde. Weiters wurde ein neues Schleifpapier in die Maschine eingelegt und die Maschine wieder verschlossen. Auch das Verbindungsstück zwischen Schleifmaschine und Absauganlage musste zerlegt und gründlich gereinigt werden. Zum Schluss folgte eine Zusammensetzung aller zuvor zerteilten Komponenten und der Schleifvorgang konnte fortgesetzt werden.

Mikroskopieren

Mit Hilfe einer Kamera erfolgte eine Digitalisierung der analogen Bilder vom Mikroskop zum PC. Mikroskopiert wurde im Auflicht-Modus. Auf ein Deckglas wurde während der gesamten Untersuchungen verzichtet, da es die mikroskopischen Abbildungen deutlich vernebelte. Aufgrund der 3D Strukturen jedes einzelnen Holzstaubes mussten Unschärfen in Kauf genommen werden. Mikroskopiert wurde eine Probe des jeweiligen Holzstaubgemische, P60 und P100 von Fichte, Buche, MDF und PB, das während des Schleifprozesses in dem Zyklon angefallen ist.

2.5. Datenauswertungssoftware

Excel

Mit Excel wurden Grafiken erstellt, welche das abgetragene Staubvolumen in cm^3 von 20 Schleifversuchen bei einer elektrostatischen Feldstärke in kV/m aufwiesen und die Vorauswertung dieser Arbeit darstellten (siehe Anhang). Mit den berechneten Mittelwert-Daten wurden letztendlich sechs Grafiken erstellt, welche unterschiedliche Holzmaterialien zu gleichen Bedingungen abbildeten. Excel fand auch zur Abtragerfassung, zur weiteren Dokumentation sämtlicher gemessener Daten und als SPSS Grundlage Anwendung.

IBM SPSS Statistics

SPSS (Version 26) ist ein Statistik Programm, welches zur Gegenüberstellung von unterschiedlichen Parametern und deren Wechselwirkungen aufeinander, genutzt wurde. Dazu wurden die bereits in Excel aufbereiteten Daten bei einen abgetragenen Staubvolumen von 5cm^3 in einem weiteren Excel File übertragen. Anschließend wurde die in Excel erstellte Übersicht in das Statistikprogramm importiert und ausgewertet. Diese Daten dienten als Grundlage sämtlicher SPSS-Auswertungen. Als Analyse fanden verschiedene Fälle Anwendung. Zu Beginn gab eine deskriptive Statistik Auskunft über die elektrostatische Aufladung von Holzstaub. Es wurden zahlreiche Boxplots die gleichzeitig auf mehrere Variablen Bezug nehmen können, mit unterschiedlich aufeinander wirkenden Parametern einander gegenübergestellt. Weiters wurden univariate Varianzanalysen grafisch und tabellarisch erstellt. In den Tabellen, welche die Tests der Zwischensubjekteffekte abbilden, kann abgelesen werden, welche Untersuchungsparameter ein signifikantes Verhalten aufweisen, es konnte somit

deren Wechselwirkungen miteinander als Varianzursache dargestellt werden. Desweiteren wurde eine Zusammenfassung der Anzahlen der Messwerte je Faktor der ANOVA für eine bessere Übersicht aufgelistet.

3. Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit angeführt. Diese werden zum einen durch die mikroskopischen Untersuchungen des Holzstaubs von Fichte, Buche, MDF und PB und zum anderen durch die elektrostatischen Aufladungen des Holzstaubs von Fichte, Buche, MDF, PB, Tanne und Kiefer, welche später mit Hilfe der statistisch gewählten Methode, die zuvor aufgestellten Hypothesen (sh. Kapitel 1.6.) bestätigen, beziehungsweise widerlegen sollen, dargestellt.

3.1. Mikroskopische Untersuchungen an Holzstaub

Jedes einzelne Holzstaubpartikel hat ein individuelles Aussehen. Jedoch unabhängig ob grob oder fein, hat die jeweilige Holzstaubart einen gleichen dreidimensionalen Aufbau. Holzstaubpartikel sind poröse Flugobjekte, deren Masse ungleichmäßig im gesamten Volumen verteilt ist. Die gesamte äußere Oberfläche ist vergleichbar mit einem Igel oder einer Schneeflocke, die festsitzende Verankerungen zwischen den einzelnen Partikeln bei dem Aufeinanderliegen, schafft. Die Holzstaubpartikel bestehen aus Hohlräumen beziehungsweise Zellwandteilen, welche sich durch ihre hakenförmigen und scharfkantig nadelförmigen Strukturen im Lungengewebe festsetzen können.

Im Gegensatz zu den anderen drei Holzproben, wird bei dem Fichtenstaub erkannt, dass er unverkennbar intensiver und mehrfach ineinander verhakt und somit mit anderen Staubpartikel starke, schwer voneinander lösliche Verkettungen bildet. Bei mikroskopischer Betrachtung bildet ein Staubpartikel sehr lange, spitze, zahlreiche hakenförmige, lange Verzweigungen. Abb.10.a. und b. stellen das unter dem Mikroskop untersuchte Fichten-Holzstaubgemisch von P60 und P100 dar.

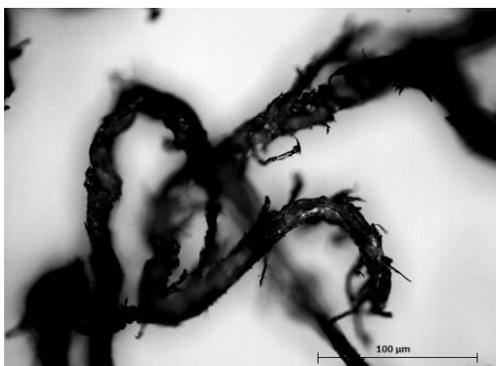


Abb.10.: a. Holzstaubgemisch der Fichte P60; b. Holzstaubgemische der Fichte P100 (eigene Darstellungen).

Buchenstaub (Abb.11.a. und b.) zeigte im Vergleich zu Fichtenstaub in sich abgeschlossenerer, kompaktere Fraktionen, ohne starke, spitze Verzahnungen. Buchenstaub besitzt eine glattere Struktur als Fichtenstaub. Der Staub bildet kleine Klumpen, die relativ kurz und voneinander unzusammenhängend sind. Die einzelnen, pulverartigen Holzstäube haften kaum aneinander und sind im Falle einer anzutreffenden Kompaktierung durch einfaches Schütteln wieder leicht voneinander zu trennen.

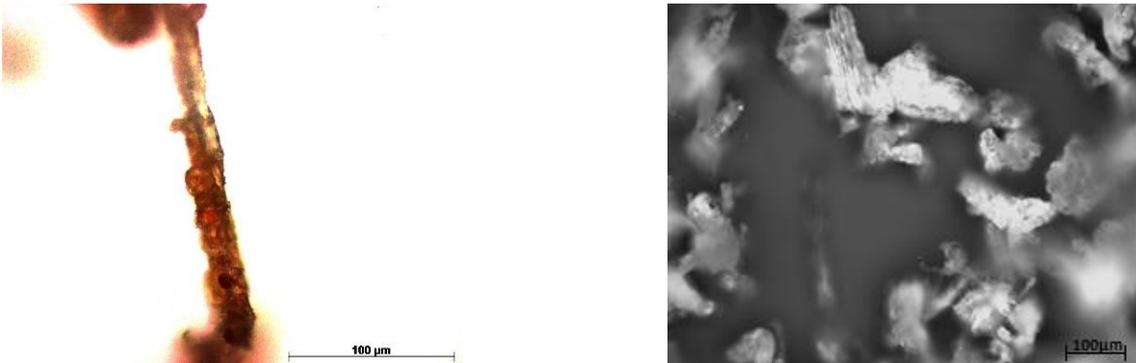


Abb.11.: a. Holzstaubgemisch der Buche P60; b. Holzstaubgemisch der Buche P100 (eigene Darstellungen).

Beim Staub von mitteldichten Faserplatten (MDF) konnten sehr glatte Oberflächen beobachtet werden (Abb.12.a. und b.). Lange Verzweigungen sind deutlich sichtbar, dennoch erscheinen die einzelnen fasrigen Bestandteile als eher stumpf. Im Vergleich zum groben Staub bildet der feinere Holzstaub zarte Verzahnungen mit anderen Partikeln.



Abb.12.: a. Holzstaubgemisch von MDF P60; b. Holzstaubgemisch von MDF P100 (eigene Darstellungen).

Der Holzstaub von Spanplatten ist im Vergleich zu den anderen drei Proben gröber geformt. Er besitzt eine körnige, splitterartige Konsistenz, daher gibt es keinen Zusammenhalt zwischen den einzelnen Holzstaubpartikel. In Abb.13.a. und b. sind die Holzstaubfasern gut strukturiert erkennbar. Doch wie bei dem Holzstaub der Buche gibt es keine bis wenige Verzahnungen. Staubpartikel mit

spitzen, langen nadelförmige Verzweigungen sind schwach bis gar nicht ausgeprägt. Mikroskopisch ist zu erkennen, dass die einzelnen Partikel nicht aneinanderhaften, sondern voneinander unabhängig, mit leichten Ausfransungen sind.



Abb.13.: a. Holzstaubgemisch von PB P60; b. Holzstaubgemisch von PB P100 (eigene Darstellungen).

3.2. Elektrostatische Aufladung von Holzmaterialien

Untersuchungsgegenstand waren Polarisierung und Stärke der Aufladung von Holzstaub in Wechselwirkung von den Holzmaterialien zu den ausgewählten Bearbeitungsparametern wie Korngröße, Abtrag und Vorschub, beim Schleifprozess.

3.2.1. Gegenüberstellung von Fichte, Buche, mitteldichte Faserplatte (MDF) und Spanplatte (PB)

Das Augenmerk wurde auf Wechselwirkungen zwischen den ausgewählten Holzproben, bei unterschiedlichem Vorschub, Schleifabtrag, sowie grober und feiner Körnung des Schleifmittels gelegt.

Wechselwirkungen verschiedener Holzstaubpartikel bei einem Abtrag von 0,1mm und einem Vorschub von 4,5m/min

Abb.14. sind die elektrostatischen Aufladungen [kV/m] bei einem Abtrag von 0,1mm und einem Vorschub von 4,5m/min zu entnehmen.

- Die stärksten Aufladungen wurden bei PB, sowohl bei einer Körnung von P60 bei 25kV/m, als auch bei einer Körnung von P100 bei 22kV/m gemessen. Die Aufladungen der Probematerialien waren trotz unterschiedlicher Körnung ähnlich stark ausgeprägt.
- Bei der Untersuchungsgruppe MDF gab es bei einer groben Körnung ebenso eine annähernd starke Aufladung, wie es bei PB P60 der Fall war.

Bei einer feinen Körnung wiederum, war die elektrostatische Aufladung allerdings deutlich schwächer im Vergleich zu PB P100.

- Zwischen Buche und Fichte gab es bezugnehmend auf eine unterschiedliche Körnung, kaum sichtbare Differenzen in der Aufladungsstärke. Bei dem Laubholz Buche wurden jedoch in Summe deutlich stärkere Ladungen als bei dem Nadelholz Fichte gemessen.
- Auffällig war, dass bei Fichte mit einer gröberen Korngröße eine negative Aufladung stattgefunden hat.
- Die schwächste Aufladung wurde bei Fichte P100 mit 3kV/m gemessen.

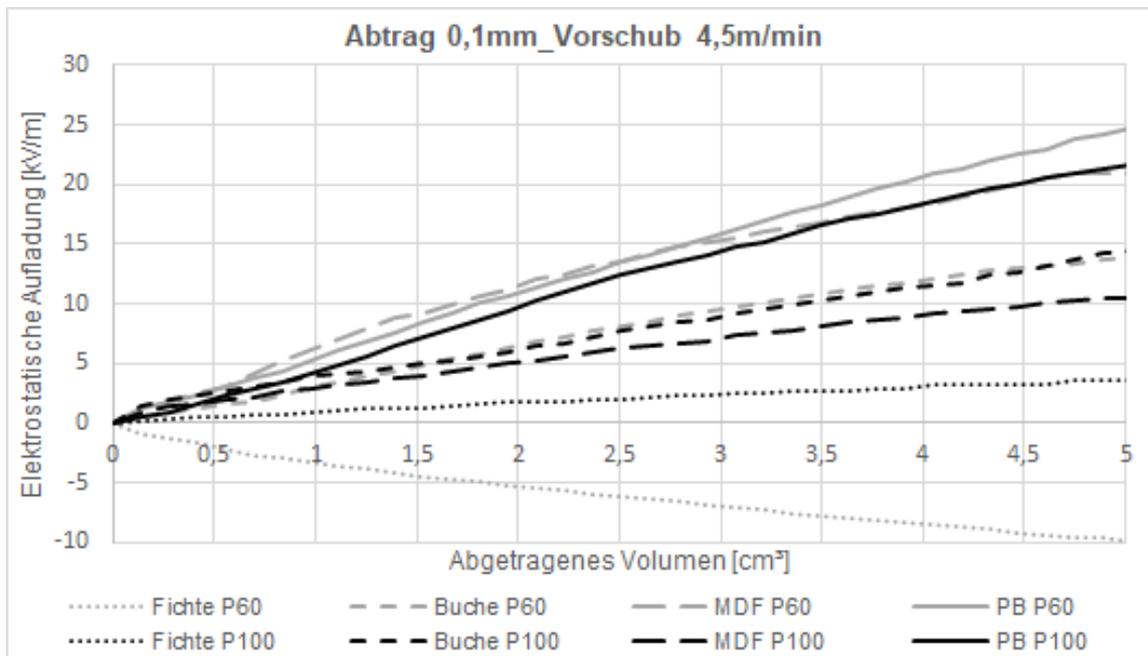


Abb. 14.: Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Buche, MDF (mitedichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei einem Schleifabtrag von 0,1mm bzw. einem Vorschub von 4,5m/min.

Wechselwirkungen verschiedener Holzstaubpartikel bei einem Abtrag von 0,1mm und einem Vorschub von 9,0m/min

In nachfolgender Abb.15. werden die elektrostatischen Aufladungen [kV/m] bei einem Abtrag von 0,1mm und einem Vorschub von 9m/min grafisch dargestellt.

- Die stärksten Aufladungen fanden erneut bei PB statt. Aber im Vergleich zu Abb.14. mit einem Vorschub von 4,5m/min und einen kleinen Schleifabtrag, war bei PB P100 die Stärke der Aufladung fast um die Hälfte schwächer, als bei einer groben Körnung.
- Bei MDF wurde auch hier eine eindeutige Differenz zwischen einer groben und einer feinen Korngröße festgestellt. Diesmal allerdings gingen mit einer feineren Körnung stärkere Ladungen einher.

- Die drittstärksten Aufladungen fanden erneut bei Buche statt. Auch hier spielte die Korngröße eine Rolle. Bei Buche mit einer Körnung von P100 gab es eine unverkennbar schwächere Aufladung, als bei einer groben Körnung.
- Am schwächsten, kaum mit Differenzen in der Aufladungsstärke waren die Aufladungen der Fichte.

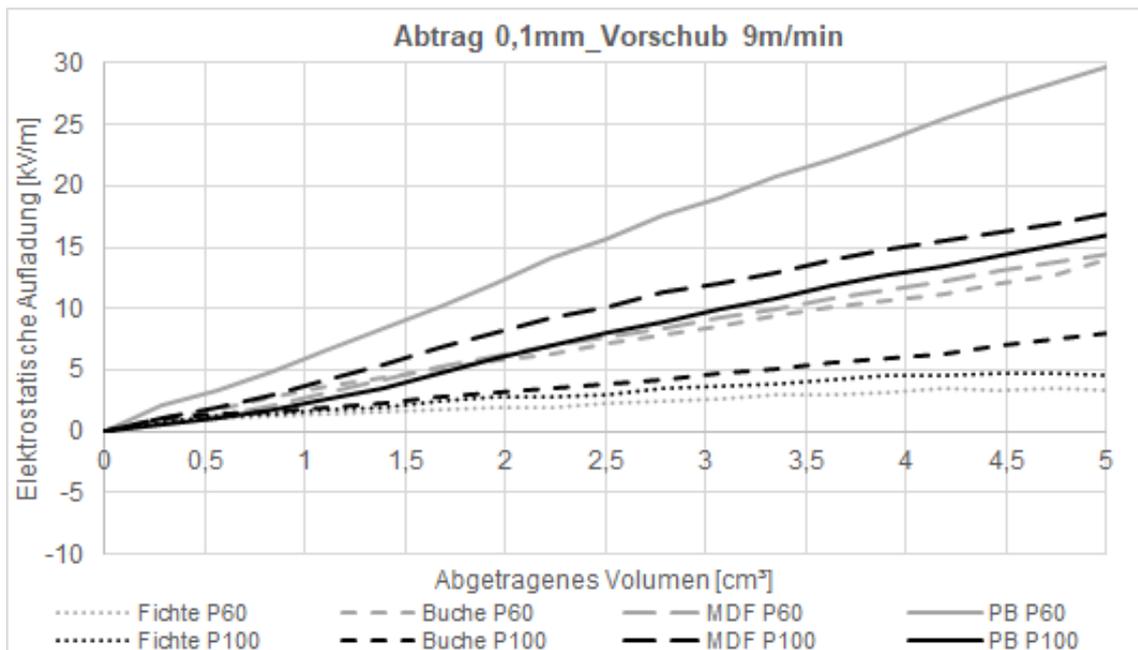


Abb. 15.: Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei einem Schleifabtrag von 0,1mm bzw. einem Vorschub von 9m/min.

Wechselwirkungen verschiedener Holzstaubpartikel bei einem Abtrag von 0,5mm und einem Vorschub von 4,5m/min

In Abb.16. folgt die Darstellung der elektrostatischen Aufladungen [kV/m] bei einem Abtrag von 0,5mm und einem Vorschub von 4,5m/min.

- Mit einem Abtrag von 0,5mm und einem Vorschub von 4,5m/min gingen deutlich geringere Aufladungen einher, als bei einem kleinen Schleifabtrag von 0,1mm. In Summe waren in dieser Abbildung, verglichen mit Abb.14. und 15. die gesamten Aufladungen unverkennbar schwächer.
- Erneut fand bei PB mit einer feineren Körnung die stärkste elektrostatische Aufladung bei 12kV/m statt, bei PB P60 hingegen war diese etwas schwächer.
- MDF hatte bei einer feineren Körnung definitiv stärkere elektrostatische Aufladungen, als bei einer groben Korngröße.

- Buche befand sich in den mittleren Bereich der elektrostatischen Aufladungen, von den vier untersuchten Probematerialien. Bei einer feinen Körnung waren die Aufladungen minimal stärker aufgeladen.
- Auch in diesem Fall wies Fichte die schwächsten elektrostatischen Aufladungen auf. Bei P100 wurde eine negative Aufladung gemessen. Bei P60 wiederum fand eine positive Aufladung statt.
- In Summe fanden mit einer feinen Körnung stärkere Aufladungen statt.

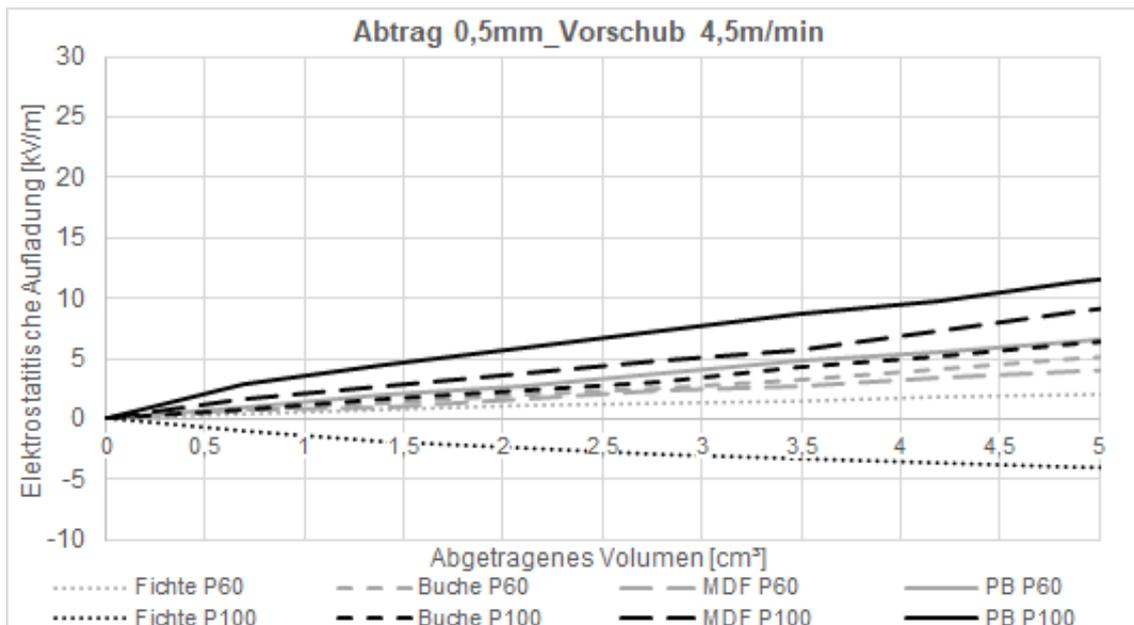


Abb. 16.: Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei einem Schleifabtrag von 0,5mm bzw. einem Vorschub von 4,5m/min.

Wechselwirkungen verschiedener Holzstaubpartikel bei einem Abtrag von 0,5mm und einem Vorschub von 9,0m/min

Abb.17. zeigt die elektrostatischen Aufladungen [kV/m] bei einem Abtrag von 0,5mm und einem Vorschub von 9m/min.

- Zusammenfassend waren die gemessenen Aufladungen bei einem großen Abtrag von 0,5mm und einem schnellen Vorschub von 9m/min, verglichen mit Abb.14.-16. am schwächsten.
- Erneut wurden mit PB die stärksten Aufladungen erzielt. Die Staubpartikel mit einer feinen Körnung waren deutlich stärker aufgeladen.
- Sowohl PB P100 wie auch MDF P100 hatten die gleiche und auch stärkste Aufladung. Bei PB P60, und MDF P60 waren die Aufladungen schwächer.
- Die drittstärkste Aufladung wurde bei Buche P100 gemessen. Auch in diesem Fall führte eine gröbere Körnung zu einer schwächeren Aufladung.

- Nur bei Fichte, welche die schwächsten und langsamsten Aufladungen hatte, gab es keinen deutlichen Unterschied zwischen einer feinen und groben Korngröße beziehend auf die Aufladungsstärke. Einzig auffällig war, dass P60 eine negative und P100 eine positive Aufladung hatte.
- Mit einer feinen Körnung gingen stärkere Aufladungen einher.

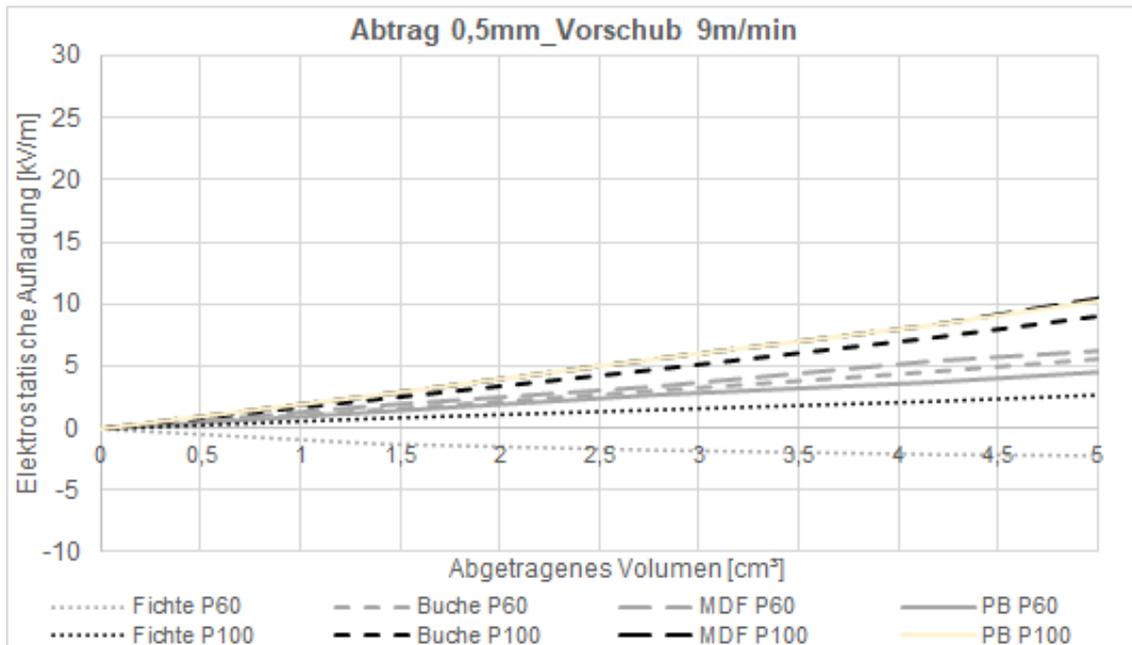


Abb. 17.: Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Buche, MDF (mitedichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei einem Schleifabtrag von 0,5mm bzw. einem Vorschub von 9m/min. Anmerkung: Die MDF P100 Linie überlagert jene von PB P100. Deshalb gelbe Linienfarbe für PB P100.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei Abb.16. und 17., beide mit einem Abtrag von 0,5mm, die schwächsten Aufladungen einhergingen. In Summe waren es sehr schwache und sehr langsame Aufladungen mit einer maximalen Stärke von 12kV/m. Im Gegensatz zu den ersten beiden Abbildungen, Abb.14. und 15., mit einem Schleifabtrag von 0,1mm, in welchen die Aufladungen eindeutig stärker ausgeprägt waren. Die stärkste elektrostatische Aufladung wurde bei 30kV/m gemessen. Bei einem Abtrag von 0,1mm variierte der Einfluss der Korngröße. Hingegen bei einem größeren Abtrag, waren ausnahmslos mit einer feineren Körnung stärkere Aufladungen zu verzeichnen. Abgesehen von einer deutlichen geringeren Aufladung, ähnelte Abb.16., sehr stark Abb.17., welche den gleichen Vorschub hat. Die schwächsten Aufladungen wurden bei einem schnellen Vorschub und einen großen Abtrag in Abb.17. gemessen.

Vergleich der mittleren Aufladungen [kV/m] von Holzstaub bei einem abgetragenen Staubvolumen von 5cm³

Nachfolgende Abb.18.-19. bieten einen detaillierten Überblick über den ermittelten Mittelwert der elektrostatischen Aufladungen bei einem abgetragenen Staubvolumen bei 5cm³ in Interaktion mit den Bearbeitungsparameter bei gleicher Korngröße.

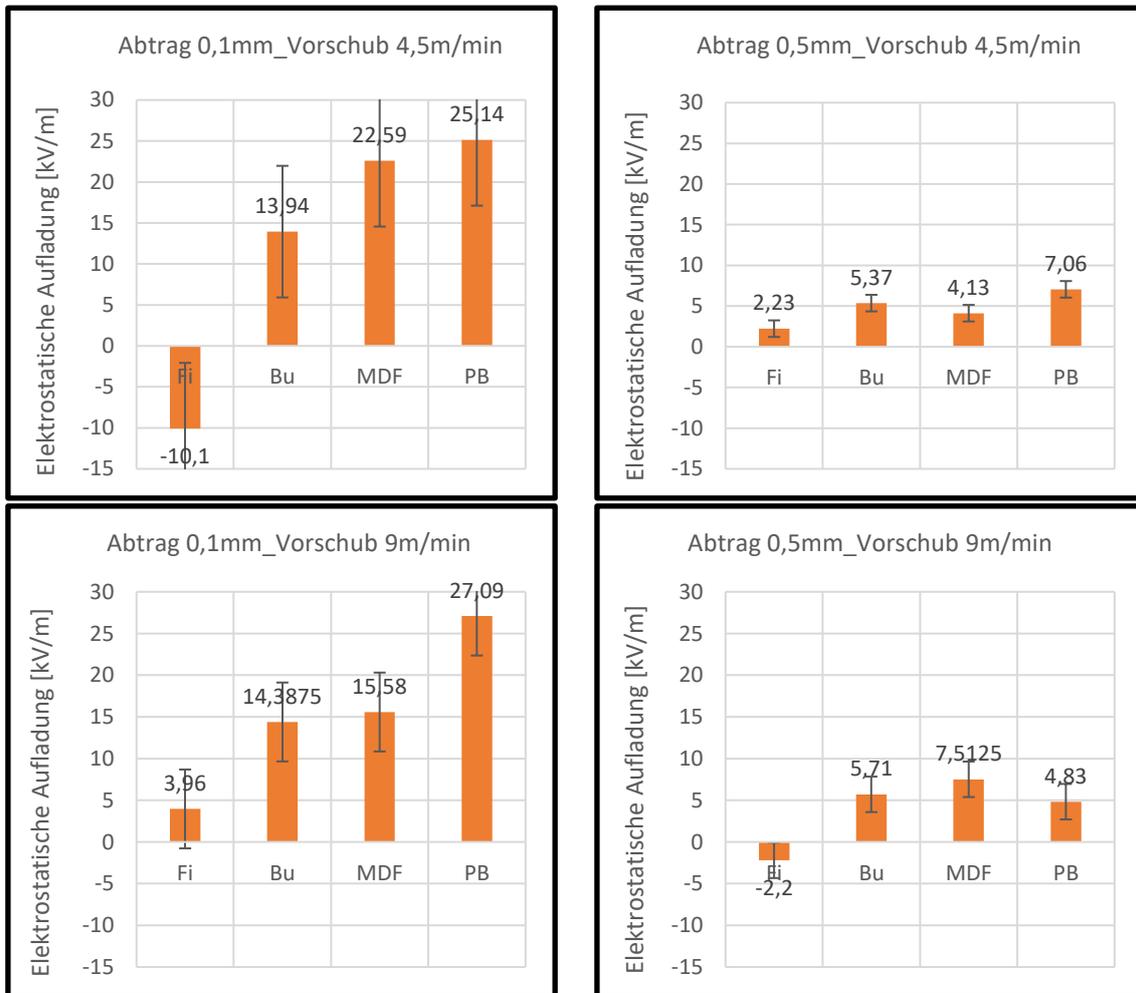


Abb.18.: Elektrostatische Aufladungen von Holzpartikel von Fichte (Fi), Buche (Bu), MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte) bei einer Körnung von P60 und einem abgetragenen Staubvolumen von 5cm³.

- Bei einem Abtrag von 0,1mm waren unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit deutlich stärkere Aufladungen bei allen vier Probematerialien zu verzeichnen, als bei den Versuchsdurchführungen mit einem Schleifabtrag von 0,5mm.
- Fichte wies in Summe die schwächsten Aufladungen auf. Weiters wurden bei einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 4,5m/min und den genau umgekehrten Parametern, einen Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 9m/min, ausnahmslos bei Fichte negative Aufladungen verzeichnet.

- Bei einem Abtrag von 0,5mm waren die Werte der elektrostatischen Aufladungen sehr einheitlich und hatten eine minimale Streuung, im Gegensatz zu einem kleinen Abtrag.
- Im Durchschnitt erzielten die Holzwerkstoffe MDF und PB deutlich höhere elektrostatische Aufladungen als die Vollholzmaterialien Fichte und Buche.

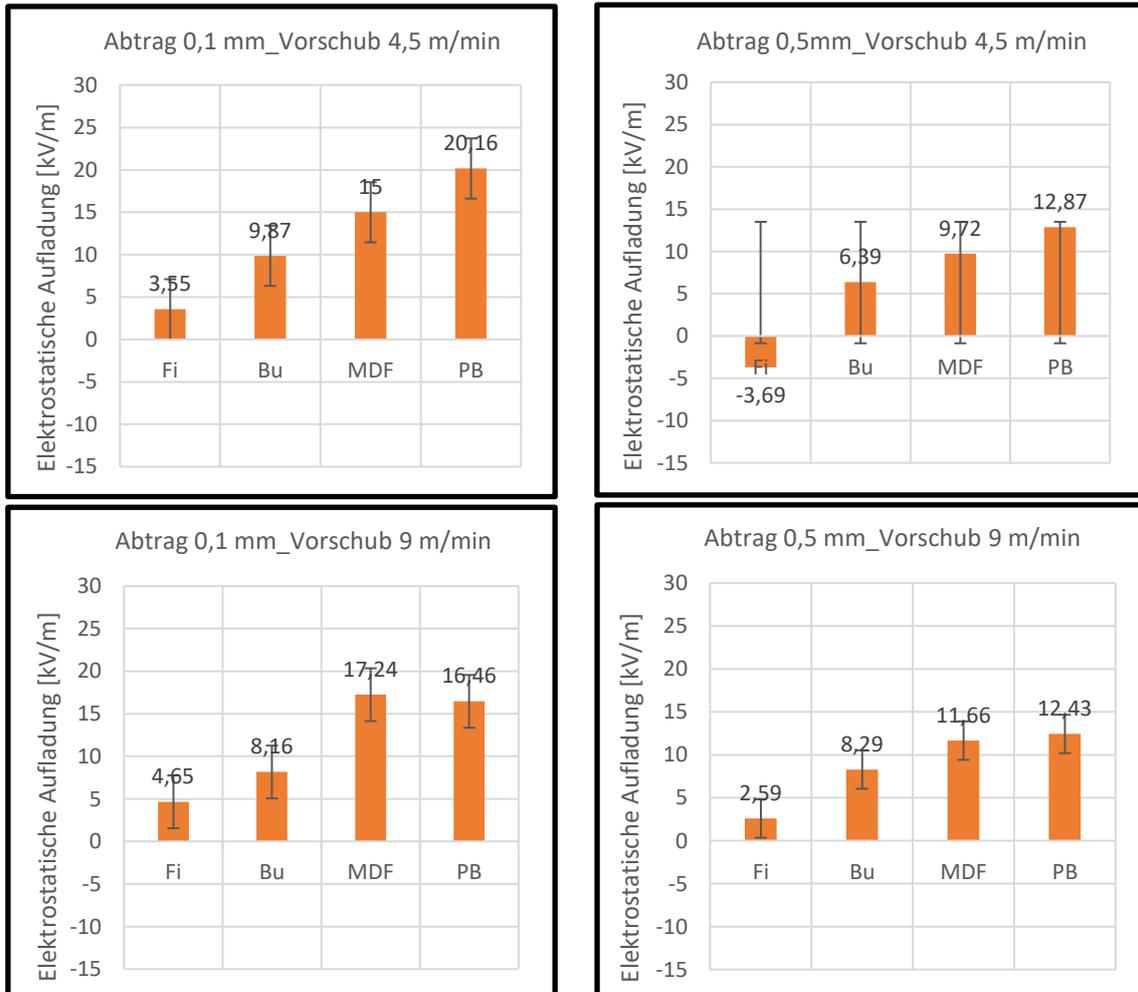


Abb.19.: Elektrostatische Aufladungen von Holzpartikel von Fichte (Fi), Buche (Bu), MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte) bei einer Körnung von P100 und einem abgetragenen Staubvolumen von 5cm³.

- Auch bei einer feineren Körnung fanden stärkere Aufladungen mit einem kleineren Abtrag, unabhängig von dem Vorschub, statt.
- Fichte erzielte erneut die schwächsten Ladungen. Eine negative Aufladung wurde bei einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 9m/min gemessen.
- Vollhölzer hatten ausnahmslos schwächere Aufladungen als Holzwerkstoffe.

- Buche befand sich erneut mit immer ähnlich stark ausgeprägten Aufladungen mit einem unterschiedlichen Abtrag, unabhängig von dem Vorschub im mittleren Bereich der elektrostatischen Aufladungen aller vier Probematerialien.
- Ebenso schwankte bei einem kleineren Schleifabtrag der Streubereich der elektrostatischen Aufladungsstärke deutlich stärker, als mit einem Abtrag von 0,5mm.

Verglichen mit Abb.18., war die Spannbreite der Aufladungsstärke von Holzstaub in Abb.19. mit einer feineren Körnung, einheitlicher. Die Aufladungen mit einem Abtrag von 0,1mm waren bei einer feineren Körnung schwächer, jene mit einem Abtrag von 0,5mm hingegen waren stärker geladen. Folglich war eine geringere Schwankung in der Aufladungsstärke bei einer feineren Körnung zu verzeichnen. In Summe hatten Vollholzmaterialien deutlich schwächere elektrostatische Aufladungen, als Holzwerkstoffe. Fichte war das einzige Probematerial, mit welchem negative Aufladungen stattgefunden haben. Bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten konnte kein erkennbarer Trend festgestellt werden.

Insgesamt lag eine wie in Tab.4. ersichtlich, Grundgesamtheit von 640 Versuchen (N) vor. Weiters gab ein Minimum von -17 und ein Maximum von 37 Auskunft über die schwächste und stärkste Aufladung. Diesen wurde der Mittelwert mit einer Aufladung von 10kV/m gegenübergestellt. Des Weiteren bildete die Standardabweichung von 9kV/m der einzelnen Untersuchungsgruppe den Streubereich des Mittelwertes ab.

Tab.4.: Deskriptive Statistik der elektrostatischen Aufladung.

Quelle	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Aufladung [kV/m]	640	-17	37	10,03	9,049

Tabelle 5. zeigt die Varianzanalyse für die Aufladung von Holzstaub der verschiedenen Holzmaterialien (Fichte, Buche, MDF und PB), zwei Abtragsmengen (0,1 und 0.5mm), geschliffen mit einem Schleifpapier mit Körnung P60 beziehungsweise P100, sowie bei zwei Vorschubgeschwindigkeiten (4.5m/min und 9m/min).

Tab.5.: Anzahl der Messwerte je Faktor der ANOVA.

		Wertelabel	N
Material	1	Fichte	160
	2	Buche	160
	3	MDF	160
	4	PB	160
Abtrag [mm]	1	0,1 mm	320
	5	0,5 mm	320
Körnung	1	P60	320
	2	P100	320
Vorschub [m/min]	1	4,5 m/min	320
	2	9 m/min	320

Tab.6.: Tests der Zwischensubjekteffekte in der SPSS Auswertung.

Abhängige Variable: Aufladung [kV/m]

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quad- rate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	45917,415 ^a	31	1481,207	140,663	,000
Konstanter Term	64390,694	1	64390,694	6114,859	,000
Abtrag	7940,384	1	7940,384	754,058	,000
Material	24670,002	3	8223,334	780,928	,000
Körnung	85,041	1	85,041	8,076	,005
Vorschub	105,792	1	105,792	10,046	,002
Abtrag * Material	3663,930	3	1221,310	115,982	,000
Abtrag * Körnung	1287,927	1	1287,927	122,308	,000
Abtrag * Vorschub	1,463	1	1,463	,139	,710
Material * Körnung	414,994	3	138,331	13,137	,000
Material * Vorschub	747,105	3	249,035	23,650	,000
Körnung * Vorschub	,588	1	,588	,056	,813
Abtrag * Material * Körnung	2934,142	3	978,047	92,880	,000
Abtrag * Material * Vorschub	866,599	3	288,866	27,432	,000
Abtrag * Körnung * Vorschub	457,306	1	457,306	43,428	,000
Material * Körnung * Vor- schub	691,604	3	230,535	21,893	,000
Abtrag * Material * Körnung * Vorschub	2050,539	3	683,513	64,910	,000
Fehler	6402,363	608	10,530		
Gesamt	116710,472	640			
Korrigierte Gesamtvariation	52319,778	639			

a. R-Quadrat = ,878 (korrigiertes R-Quadrat = ,871)

Tab.6. bietet einen Überblick der Tests der Zwischensubjekteffekte in der SPSS Auswertung, in welcher tabellarisch die rechnerisch ermittelte Signifikanz dargestellt wird. Sowie von den ausgewählten Parametern, deren Wechselwirkungen. Als Wert gilt $\alpha < 5\%$. Sowohl das untersuchte Material wie auch der Abtrag sind hoch signifikant ($p < 0,001$). Vorschub und Körnung fallen in den Bereich $p < 0,05$. Weiters liefert die Tabelle Informationen über die einander gegenübergestellten Wechselwirkungen als Varianzursache. Anhand des post-hoc Tests konnte ein multipler Mittelwertvergleich durchgeführt werden. Dafür wurde ein Scheffé-Test, als konservativer Test ausgewählt. Folglich wurden die untersuchten Parameter einander gegenübergestellt, welche ebenfalls Auskunft über das Signifikanzniveau geben. Dabei ist zu beobachten, dass der Vorschub* Körnung und Vorschub*Abtrag ($p > 0,05$) und somit nicht Signifikant sind. Dies spiegelt sich auch in den nachfolgenden Abbildungen ab. Weiters gibt Tab.6. eine Auskunft über die Anzahl der Freiheitsgrade.

Es werden jeweils vier Grafiken der einfachen Varianzanalyse mit verschiedenen Möglichkeiten von Wechselwirkungen einander gegenübergestellt. Die Beschriftung erfolgt dabei immer von 1-4.

In Abb.20. werden die elektrostatischen Aufladungen bei einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 4,5m/min, einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 9m/min, einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 4,5m/min und einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 9m/min dargestellt.

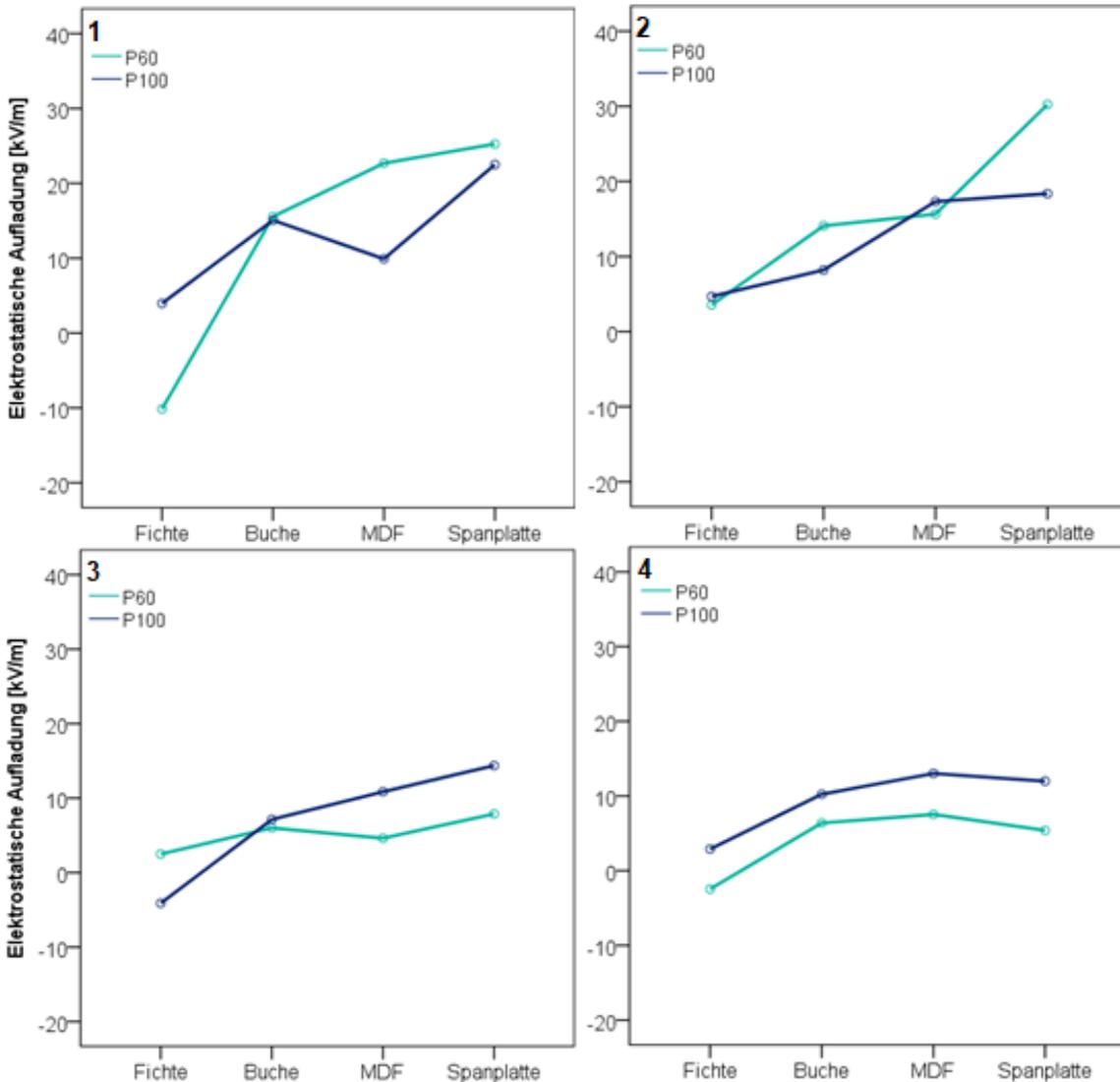


Abb.20.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 4,5m/min, (2) einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 9m/min, (3) einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (4) einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 9m/min.

- Bei dieser grafischen Abbildung der univariaten Varianzanalyse geht hervor, dass bei einem Schleifabtrag von 0,5mm in Summe deutlich schwächere Aufladungen gemessen wurden.

- Weiters fanden bei einem größeren Schleifabtrag mit einer feinen Körnung immer stärkere elektrostatische Aufladungen als mit einer groben Körnung statt.
- Bei einem Abtrag von 0,1mm hingegen waren die Aufladungen bei einer groben Körnung stärker.
- Es waren keine eindeutigen Unterschiede zwischen den einzelnen Vorschüben zu erkennen.
- Der Abbildung ist zu entnehmen, dass bei den Vollhölzern Fichte und Buche schwächere Aufladungen stattfanden, als bei den Holzwerkstoffen MDF und PB.
- Von den vier Probematerialien wurden bei Fichte, die schwächsten Aufladungen gemessen, gefolgt von Buche. Die stärksten Aufladungen fanden mit PB statt, etwas schwächer waren die Aufladungen von MDF.
- Fichte verzeichnete als einziges Probematerial sowohl positive als auch negative Aufladungen.

Die nachfolgende Abb.21. liefert einen Überblick über die elektrostatischen Aufladungen von Holzstaub der Holzmaterialien bei einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 4,5m/min, einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 9m/min, einer Körnung P100 mit einem Vorschub von 4,5m/min und einer Körnung mit einem Vorschub von 9m/min. Es werden Staubpartikel der Fichte, Buche, MDF und PB untereinander in Wechselwirkung zu einer Körnung, einem Vorschub und einem Abtrag näher betrachtet. Sowohl statistisch als auch grafisch hat sich gezeigt, dass der Abtrag eine große Rolle bezugnehmend auf die Aufladung spielt und wird mit einer Signifikanz von ,000 aus einer anderen Perspektive näher betrachtet.

- Bei einer gröberen Körnung wurden ausnahmslos stärkere Aufladungen mit einem Abtrag von 0,1mm, als mit einem größer gewählten Schleifabtrag von 0,5mm, gemessen.
- Eine schnelle beziehungsweise langsame Vorschubgeschwindigkeit schien bei einer groben Korngröße keinen Einfluss auf die elektrischen Aufladungen zu haben.
- Bei einer feinen Körnung wurden bis auf zwei Ausnahmen immer mit einem kleinen Abtrag stärkere Ladungen erzielt. Dies waren einmal die Aufladung bei einem Vorschub von 4,5m/min bei MDF und ein zweites Mal bei einem Vorschub von 9m/min bei Buche.
- Der Streubereich der elektrostatischen Aufladungsstärke aller vier Probematerialien, war bei einem kleinen Schleifabtrag unverkennbar größer als jener bei einem großen Schleifabtrag.

- Die stärkste Aufladung fand bei PB statt, die schwächste bei Fichte, welche auch negative elektrostatische Aufladungen verzeichnete.
- Das Laubholz Buche als Vollholz hatte deutlich stärkere Aufladungen als das Nadelholz Fichte, MDF wiederum hatte stärkere Aufladungen als Buche.

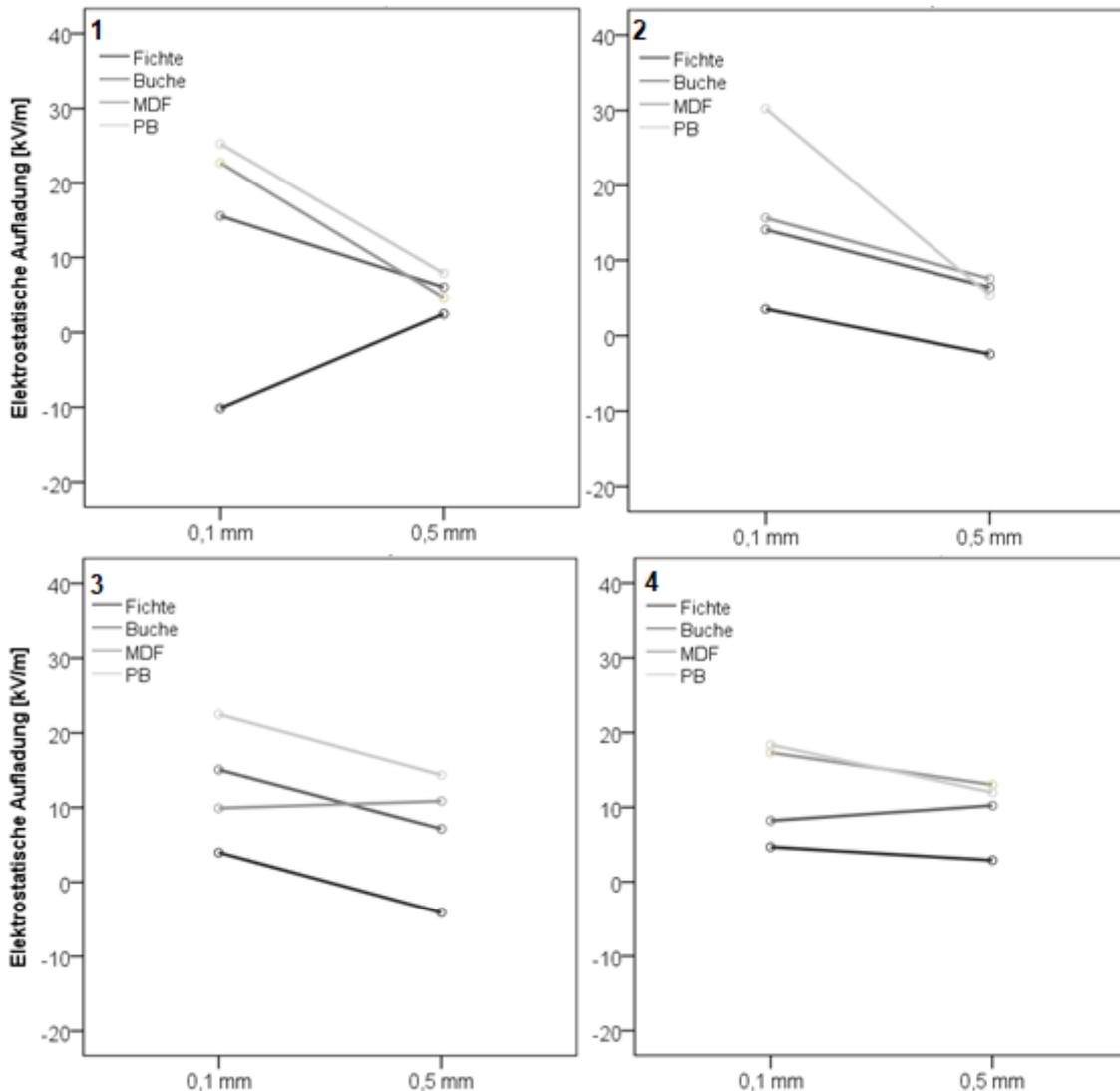


Abb.21.: Elektrostatische Aufladungen der Holzmaterialien der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteleichtete Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 4,5m/min, (2) einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 9m/min, (3) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (4) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 9m/min.

In nachfolgender Abb.22. werden die elektrostatischen Aufladungen bei einem Abtrag von 0,1mm mit einer Körnung P60, einem Abtrag von 0,1mm mit einer Körnung P100, einem Abtrag von 0,5mm mit einer Körnung P60 und einem Abtrag von 0,5mm mit einer Körnung P100 einander gegenübergestellt.

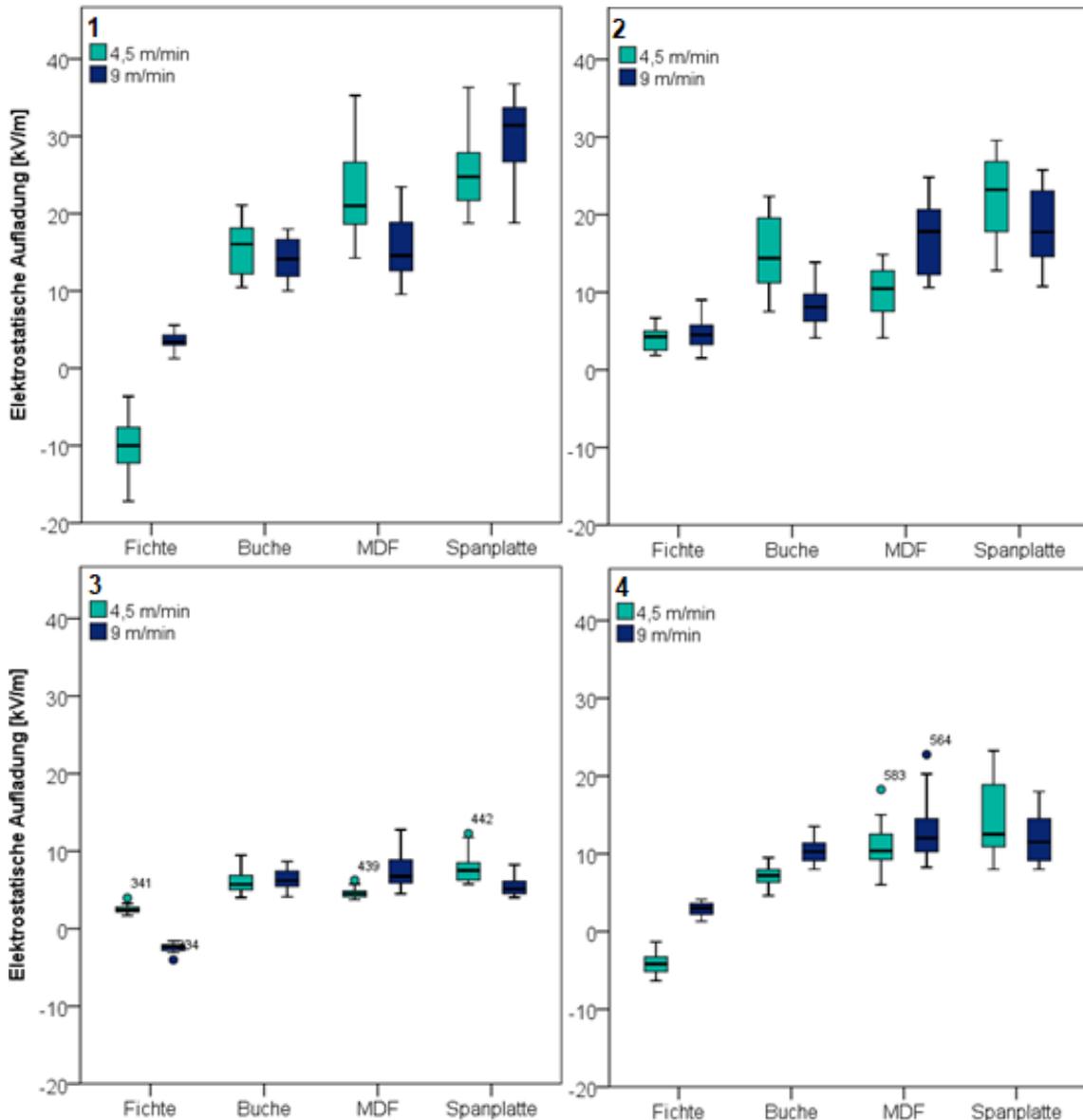


Abb.22.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel von Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei einem (1) Abtrag von 0,1mm und der Körnung P60, (2) einem Abtrag von 0,1mm und einer Körnung von P100, (3) einem Abtrag von 0,5mm und einer Körnung von P60, sowie (4) einem Abtrag von 0,5mm mit einer Körnung P100.

- Die ersten beiden Teilabbildungen (1) und (2), mit jeweils einem Schleifabtrag von 0,1mm haben die Gemeinsamkeit aufgewiesen, dass sie unverkennbar stärker aufgeladen waren als jene mit einem größeren Schleifabtrag von 0,5mm.
- Die unteren beiden Teilabbildungen (3) und (4), mit jeweils einem Abtrag von 0,5mm wiesen deutlich schwächer Aufladungen auf, vor allem mit einem Abtrag von 0,5mm und einer größeren Körnung von P60.
- Bei einem Abtrag von 0,5mm waren die Aufladungen aller vier Probematerialien sehr einheitlich, unabhängig von der Korngröße. Folglich streuten bei einem kleinen gewählten Abtrag die Aufladungen eindeutig stärker, ebenfalls unabhängig von der Korngröße.

- Bei einer unterschiedlich gewählten Vorschubgeschwindigkeit waren keine eindeutigen Unterschiede in der Stärke der Aufladungen bei den vier Probematerialien festzustellen.
- Bei einer Körnung von P60 und einem Abtrag von 0,5mm (3) war zu erkennen, dass die Aufladungen, unabhängig von dem Material, den Vorschub und der Körnung alle annähernd gleich stark ausgeprägt waren.
- Fichte bildete mit negativen Aufladungen die Ausnahme.
- Buche und Fichte verzeichneten in Summe deutlich schwächere elektrostatische Aufladungen als MDF und PB.

In Abb.23. werden die elektrostatischen Aufladungen bei einem Vorschub von 4,5m/min mit einer Körnung P60, einem Vorschub von 9m/min mit einer Körnung P60, einem Vorschub von 4,5m/min mit einer Körnung P100 und einem Vorschub von 9m/min mit einer Körnung P100 einander gegenübergestellt.

- Teilabbildung (1) und (2), beide mit einer groben Körnung, verzeichneten ähnlich starke elektrostatische Aufladungen.
- Eine Ausnahme stellte Fichte, mit einem Abtrag von 0,1mm, welche bei einem Vorschub von 4,5m/min stark negativ aufgeladen und bei einem doppelt so schnellen Vorschub schwach positiv aufgeladen war, dar.
- Bei allen Probematerialien wurden deutlich stärkere Aufladungen bei einem Abtrag von 0,1mm gemessen.
- Bei einem großen Schleifabtrag von 0,5mm wiederum, fanden schwächere elektrische Aufladungen statt, welche einen geringeren Streuradius bezugnehmend auf die Aufladungsstärke hatten. Sie waren allgemein sehr einheitlich, insbesondere bei einer groben Körnung.
- Mit einer groben Körnung ließen sich eindeutig Unterschiede in der Stärke der Aufladungen bezüglich des Abtrags feststellen. Unabhängig vom Probematerial und dem Vorschub wurde mit einer Körnung von P60 und einem Abtrag von 0,1mm ausnahmslos die stärksten Aufladungen verzeichnet.
- Auch bei den Teilabbildungen (3) und (4), jeweils mit einer feinen Körnung, waren die elektrischen Aufladungen mit einem Abtrag von 0,1mm stärker, unabhängig von dem Material und dem Vorschub. Diesmal allerdings war die Aufladungsstärke bei einem kleineren Abtrag ähnlich stark wie bei einem Abtrag von 0,5mm.
- Fichte stach als einziges Probematerial, mit negativen Aufladungen heraus.

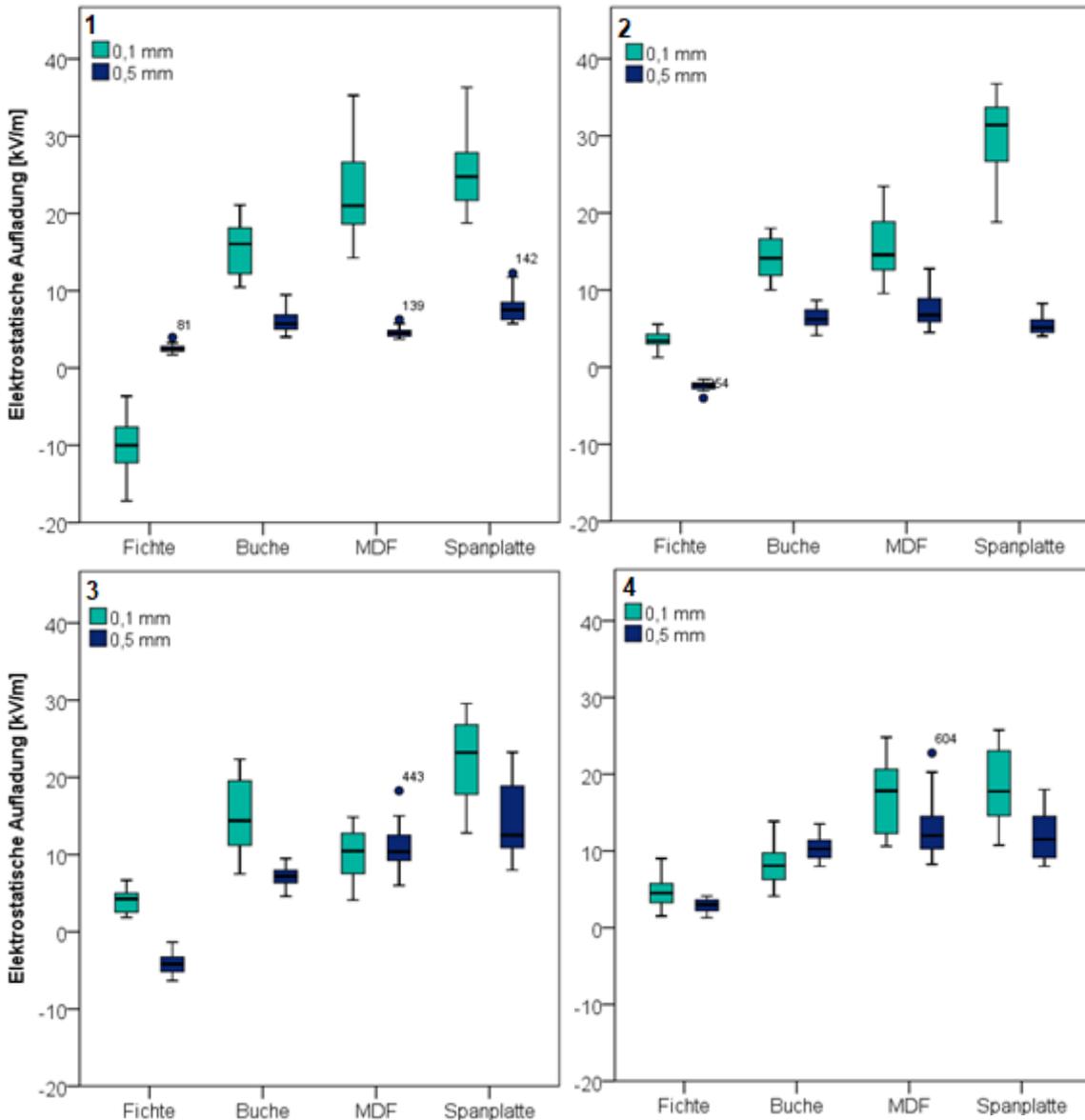


Abb.23.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einem Vorschub von 4,5m/min mit einer Körnung P60, (2) einem Vorschub von 9m/min mit einer Körnung P60, (3) einem Vorschub von 4,5m/min mit einer Körnung P100, sowie (4) einem Vorschub von 9m/min mit einer Körnung P100.

3.2.2. Vollholz vs. Holzwerkstoffe

Fichte und Buche als Vollhölzer werden der Gruppe der Holzwerkstoffen mit MDF (Mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte) gegenübergestellt.

In diesen Auswertungen ist die deskriptive Statistik der elektrostatischen Aufladung [kV/m] von Holzstaub dieselbe, wie in Tab.4. (sh. Kapitel 3.2.1.), da lediglich der Parameter Material mit vier Probenmaterialien durch den Parameter Material mit zwei Gruppen von Probenmaterialien ausgetauscht wurde.

Nachstehende Tab.7. zeigt die Varianzanalyse für die Aufladung von Holzstaub der verschiedenen Holzmaterialien (Fichte und Buche, als Vollholzmaterialien, sowie MDF und PB als Holzwerkstoffe), zwei Abtragsmengen (0,1 und 0.5mm), geschliffen mit Schleifpapier mit einer Körnung P60 beziehungsweise P100, sowie bei zwei Vorschubgeschwindigkeiten (4.5m/min und 9m/min). Der einzige Unterschied von Tab.7. zu Tab.5. liegt an den ausgetauschten Term, Material mit den vier Komponenten Fichte, Buche, MDF und PB, gegen die zwei Komponenten Vollholz und Holzwerkstoffe.

Tab.7.: Anzahl der Messwerte je Faktor der ANOVA.

		Wertelabel	N
Material	1	Vollholz	320
	2	Holzwerkstoffe	320
Abtrag [mm]	1	0,1 mm	320
	5	0,5 mm	320
Körnung	1	P60	320
	2	P100	320
Vorschub [m/min]	1	4,5 m/min	320
	2	9 m/min	320

Tab.8. bietet einen Überblick der Tests der Zwischensubjekteffekte in der SPSS Auswertung, in welcher tabellarisch die rechnerisch ermittelte Signifikanz dargestellt wird. Als Wert gilt $\alpha < 5\%$. Sowohl das untersuchte Material wie auch der Abtrag sind hoch signifikant ($p < 0,001$). Vorschub und Körnung sind nicht signifikant ($p > 0,05$). Weiters gibt die Tabelle Auskunft über die Anzahl der Freiheitsgrade. Sowie über die einander gegenübergestellten Wechselwirkungen als Varianzursache. Auch hier wurde mittels post-hoc Test der multipler Mittelwertvergleich durchgeführt. Dafür wurde ein Scheffé-Test, als konservativer Test ausgewählt. Folglich geben die einander gegenübergestellten Parameter auch Auskunft über das Signifikanzniveau. Dabei ist zu beobachten, dass in dem Vergleich der Vollhölzer mit den Holzwerkstoffen, ein deutlich geringeres Signifikanzniveau zu verzeichnen ist. Es konnte festgestellt werden, dass Abtrag*Vorschub, Körnung*Vorschub, Körnung*Material, Vorschub*Material, Abtrag*Vorschub*Material und Körnung*Vorschub*Material ($p > 0,05$) und somit nicht Signifikat sind. Dieses Ergebnis zeigt sich auch in den nachfolgenden Abbildungen.

Tab.8.: Tests der Zwischensubjekteffekte in der SPSS Auswertung

Abhängige Variable: Aufladung [kV/m]

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quad- rate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	30065,729 ^a	15	2004,382	56,203	,000
Konstanter Term	64390,694	1	64390,694	1805,505	,000
Abtrag	7940,384	1	7940,384	222,647	,000
Körnung	85,041	1	85,041	2,385	,123
Vorschub	105,792	1	105,792	2,966	,086
Material	14833,619	1	14833,619	415,932	,000
Abtrag * Körnung	1287,927	1	1287,927	36,113	,000
Abtrag * Vorschub	1,463	1	1,463	,041	,840
Abtrag * Material	2242,675	1	2242,675	62,884	,000
Körnung * Vorschub	,588	1	,588	,016	,898
Körnung * Material	114,375	1	114,375	3,207	,074
Vorschub * Material	64,990	1	64,990	1,822	,178
Abtrag * Körnung * Vorschub	457,306	1	457,306	12,823	,000
Abtrag * Körnung * Material	1935,733	1	1935,733	54,278	,000
Abtrag * Vorschub * Material	,136	1	,136	,004	,951
Körnung * Vorschub * Material	43,966	1	43,966	1,233	,267
Abtrag * Körnung * Vorschub * Material	951,734	1	951,734	26,686	,000
Fehler	22254,048	624	35,664		
Gesamt	116710,472	640			
Korrigierte Gesamtvariation	52319,778	639			

a. R-Quadrat = ,575 (korrigiertes R-Quadrat = ,564)

Es werden jeweils vier Grafiken der einfachen univariaten Varianzanalyse mit verschiedenen Optionen von Wechselwirkungen einander gegenübergestellt. Die Beschriftung der Teilabbildungen erfolgt dabei immer von 1-4.

In Abb.24. werden die elektrostatischen Aufladungen bei einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 4,5m/min, einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 9m/min, einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 4,5m/min und einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 9m/min einander gegenübergestellt.

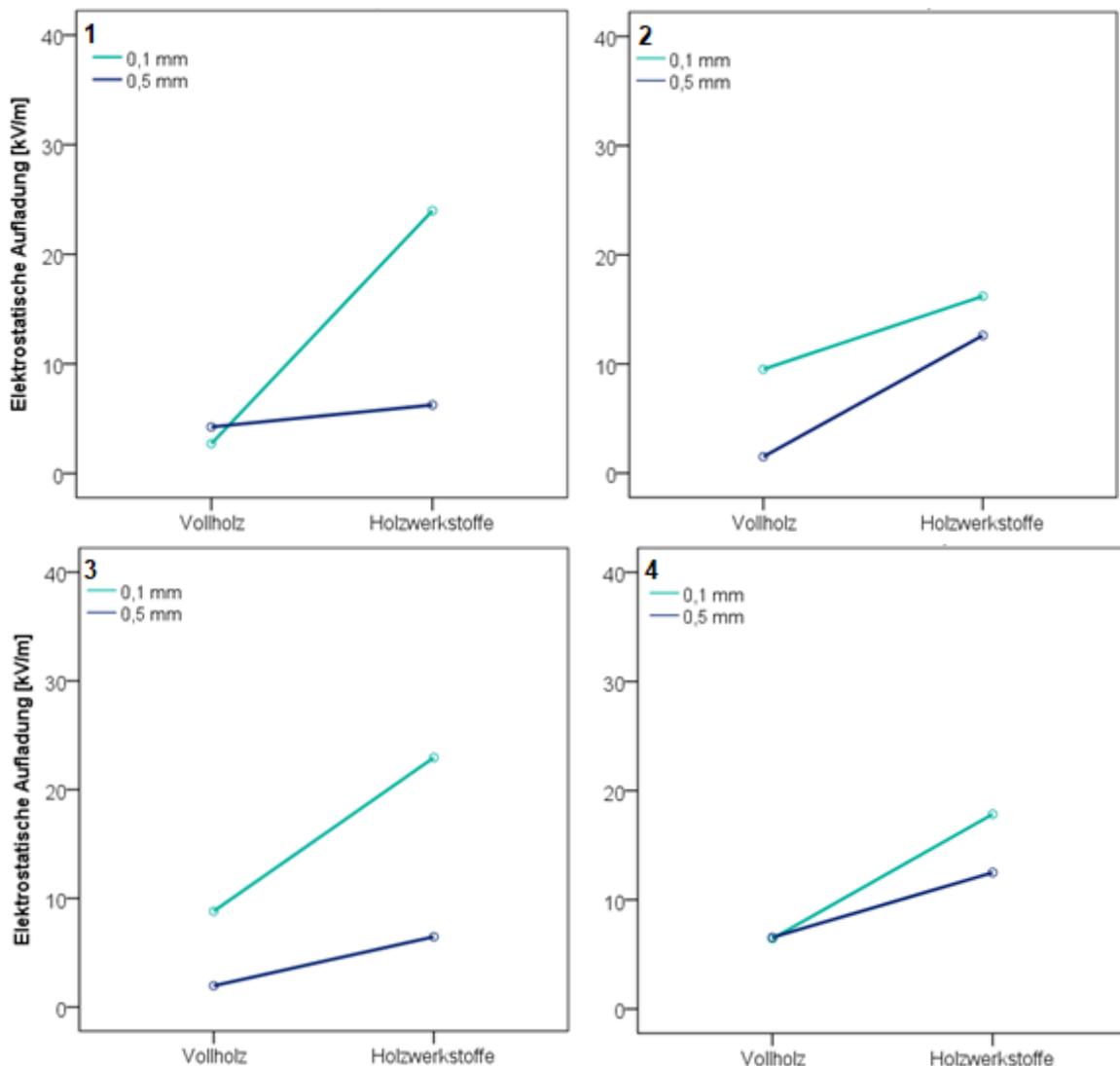


Abb.24.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 4,5m/min, (2) einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 9m/min, (3) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (4) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 9m/min.

- Bei einem Abtrag von 0,1mm wurden deutlich stärkere Aufladungen als mit einem Abtrag von 0,5mm, erzielt. Dies galt ausnahmslos für die Holzwerkstoffe.
- Bei einer Körnung von P60 mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 4,5m/min (1) und den genau umgekehrten Parametern, nämlich eine Körnung von P100 und einem Vorschub von 9m/min (4) waren die Aufladungen bei den Vollhölzern einmal bei einem Abtrag von 0,5mm etwas stärker, beziehungsweise waren keine Unterschiede in der Aufladungsstärke zu verzeichnen.
- Holzwerkstoffe hatten ohne Ausnahme stärkere Ladungen als Vollhölzer.
- Sowohl bei einer groben Körnung und einem langsamen Vorschub als auch bei einer feinen Körnung und einem langsamen Vorschub wurden

mit einem Abtrag von 0,1mm die stärksten Aufladungen gemessen. Der Streubereich bei einem kleinen Schleifabtrag war breiter gefächert.

- Hingegen konnten mit einem Abtrag von 0,5mm sehr ähnliche, einheitliche, schwache Aufladungen festgestellt werden.

Es folgt eine grafische Abbildung in Abb.25. welche Auskunft über die elektrostatischen Aufladungen bei einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 4,5m/min, einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 9m/min, einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 4,5m/min und einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 9m/min, gibt.

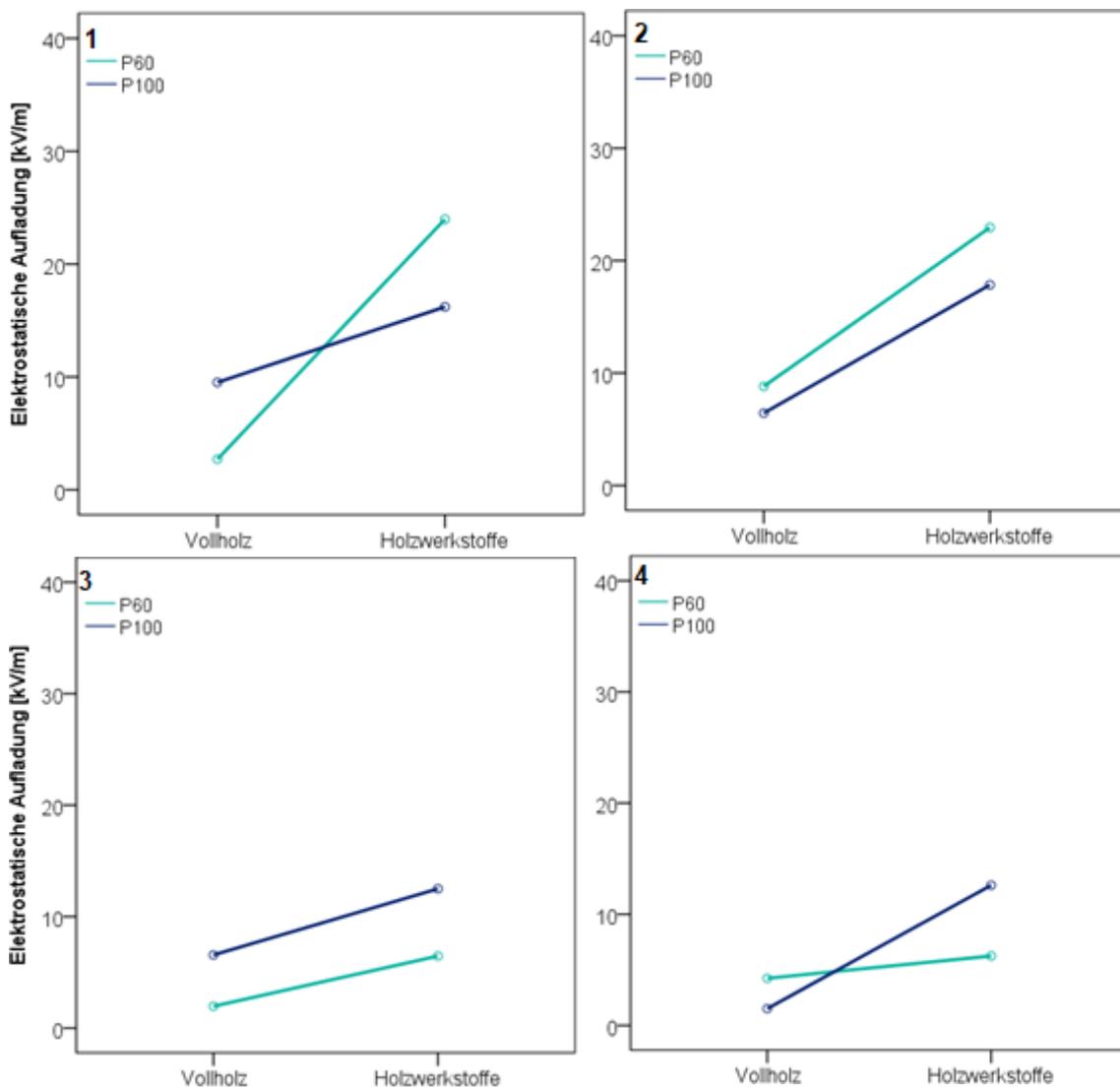


Abb.25.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 4,5m/min, (2) einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 9m/min, (3) einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (4) einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 9m/min.

- Aus dieser Abbildung ging hervor, dass mit einem kleinen Schleifabtrag von 0,1mm stärkere Aufladungen erzielt wurden. Diese waren allerdings mit einer größeren Streuradius in der Aufladungsstärke verbunden.
- Mit einem größer gewählten Abtrag von 0,5mm wiederum, waren die elektrischen Aufladungen deutlich schwächer. Sie waren geringeren Schwankungen unterlaufen und somit einheitlicher.
- Die Gruppe der Holzwerkstoffe hatten gegenüber der Gruppe der Vollhölzer ausnahmslos stärker Aufladungen.
- Holzwerkstoffe waren bei einem Abtrag von 0,1mm mit einer Körnung von P60 stärker aufgeladen.
- Wiederum bei einem größeren Abtrag von 0,5mm wurden mit feinerer Körnung stärkere Aufladungen, unabhängig von dem Vorschub, gemessen.
- Vollholzmaterialien hatten wie in Teilabbildung (1) und (3) mit einer feinen Körnung, bei einer langsamen Vorschubgeschwindigkeit von 4,5m/min stärkere Aufladungen zu verzeichnen.
- Bei den Teilabbildungen (2) und (4) jedoch wurden ein klein wenig stärkere Aufladungen mit einer groben Korngröße, bei einer schnellen Vorschubgeschwindigkeit von 9m/min erzielt.
- Dennoch zeigte sich bei den unterschiedlichen Korngrößen, sowie Vorschubgeschwindigkeiten kein klarer Trend.

In anschließender Abb.26. erfolgt eine Übersicht der elektrostatischen Aufladungen mittels Boxplots bei einem Abtrag 0,1mm mit einer Körnung P60, einem Abtrag von 0,1mm mit einer Körnung von P100, einem Abtrag von 0,5mm mit einer Körnung von P60 und einem Abtrag von 0,5mm mit einer Körnung von P100.

- Aus der vorstehenden Abbildung geht hervor, dass die Gruppe Vollholz und die Gruppe Holzwerkstoffe jeweils eine Einheit mit sehr ähnlichen Aufladungsstärken, bildeten.
- Hier wurden mit einem Abtrag von 0,1mm deutlich stärkere Aufladungen sowohl bei Vollholz wie auch bei Holzwerkstoffen gemessen.
- Bei einem größer gewählten Abtrag waren die elektrostatischen Ladungen deutlich schwächer, welche auch mit einem geringeren Streuungsmaß in der Aufladungsstärke einhergingen.
- Allgemein fanden die schwächsten Aufladungen bei einer Körnung von P60 mit einem großen Abtrag von 0,5mm, statt.
- In allen vier Teilabbildungen waren die Ladungen bei den Holzwerkstoffen stärker als bei dem Vollholz, unabhängig von dem Abtrag, der Körnung und der Vorschubgeschwindigkeit.

- Die größte Streuung der elektrostatischen Aufladungen, fand bei einem Abtrag von 0,1mm und einer Körnung von P60 statt, der Vorschub und das ausgewählte Material hatten darauf keine Einflussnahme.
- Mit einem langsamen Vorschub von 4,5m/min wurde eine minimal stärkere Aufladung erzielt.
- Es ließen sich keine definitiv erkennbaren Trends zwischen einem langsamen und einem schnell gewählten Vorschub feststellen.

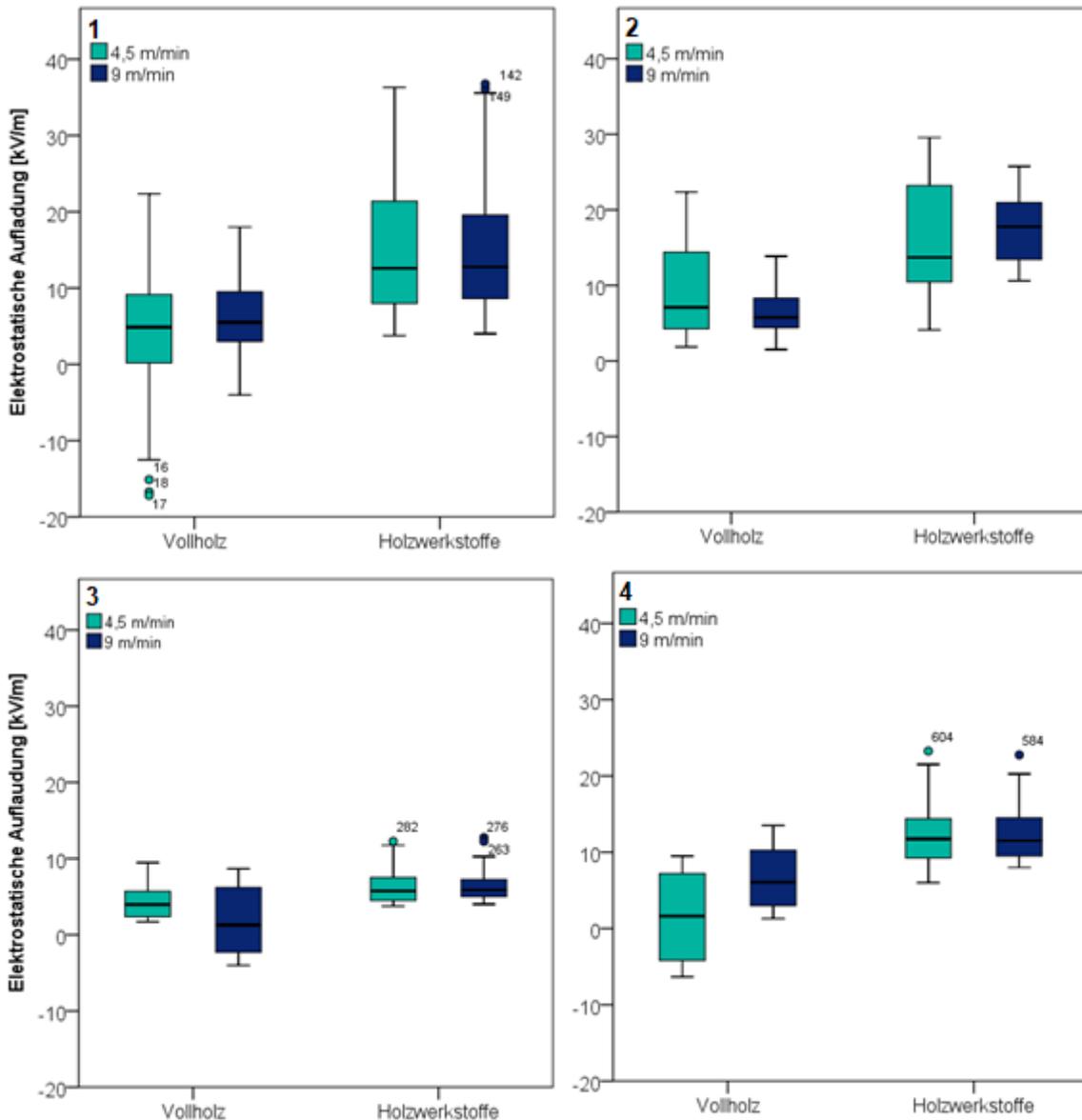


Abb.26.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einem Abtrag 0,1mm mit einer Körnung P60, (2) einem Abtrag von 0,1mm mit einer Körnung von P100, (3) einem Abtrag von 0,5mm mit einer Körnung von P60, sowie (4) einem Abtrag von 0,5mm mit einer Körnung von P100.

In nachfolgender Abb.27. folgt eine Abbildung der elektrostatischen Aufladungen bei einer Körnung P60 mit einem Vorschub von 4,5m/min, einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 9m/min, einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 4,5m/min und einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 9m/min.

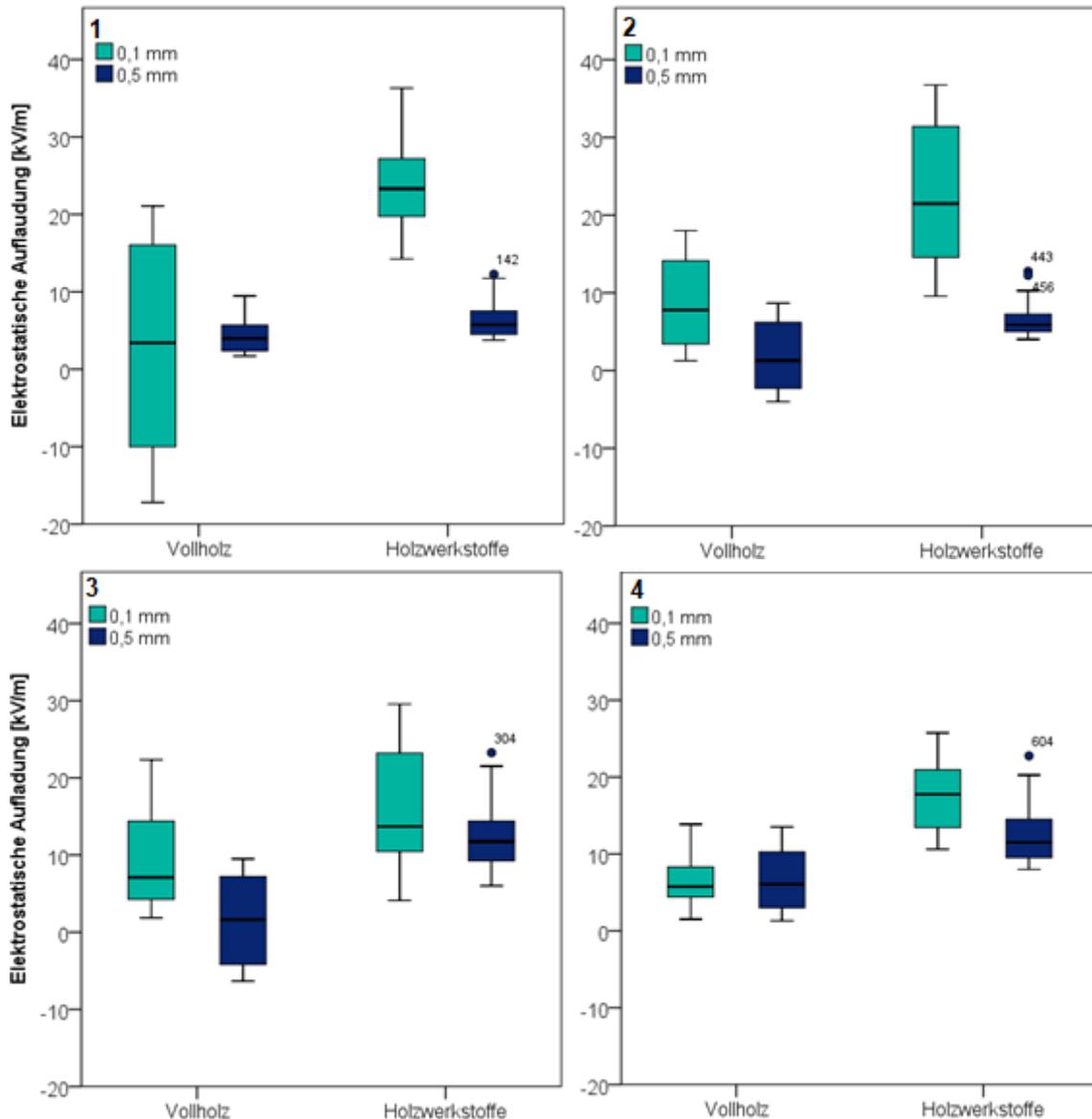


Abb.27.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einer Körnung P60 mit einem Vorschub von 4,5m/min, (2) einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 9m/min, (3) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (4) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 9m/min.

- Im Vergleich zur vorherigen Abb.26., in welcher die Boxplots unverkennbare Einheiten bilden, waren in diese eindeutigen Unterschiede zwischen den einzelnen Boxplots zu erkennen.
- Bei einem Abtrag von 0,1mm fanden mit Holzwerkstoffen die stärksten Aufladungen statt, gefolgt von Vollholz bei demselben Schleifabtrag.

- Bei einem großen Schleifabtrag von 0,5mm hatten erneut die Holzwerkstoffe stärkere Ladungen. Die schwächsten elektrostatischen Aufladungen fanden bei einem großen Abtrag mit Vollholz statt.
- Mit einem Abtrag von 0,1mm gab es größere Streuungen in der elektrostatischen Aufladungsstärke, im Gegensatz zu einem Abtrag von 0,5mm, bei welchen die gemessenen Aufladungen unverkennbar einheitlicher waren.
- Weiters war festzustellen, dass bei einem größeren Abtrag in Summe alle Ladungen einander gleichsinnig waren, unabhängig ob Vollholz oder Holzwerkstoff.
- Bei einer Körnung von P60 waren die Aufladungen stärker gestreut, bei einer feineren Körnung hingegen waren sie einheitlicher.
- Zwischen den beiden Vorschubgeschwindigkeiten von 4,5m/min und 9m/min waren keine Auffälligkeiten festzustellen.

3.2.3. Gegenüberstellung der Nadelhölzer Fichte, Tanne und Kiefer

Vergangene Untersuchungen und nachfolgende Abbildungen nehmen in diesem Kapitel keinen Bezug auf die Wechselwirkungen der Staubpartikel von Buche, MDF und PB und stellen dazu auch keine Vergleiche an. Das Augenmerk wurde lediglich auf die Wechselwirkungen zwischen den Holzproben Fichte, Tanne und Kiefer, bei unterschiedlichem Vorschub von 4,5m/min und 9m/min, sowie einer groben und feinen Körnung des Schleifmittels gelegt. Bei allen Durchläufen wurde ein Abtrag von 0,1mm eingestellt.

Wechselwirkungen von verschiedenen Holzstaubpartikel bei einem Abtrag von 0,1mm und einem Vorschub von 4,5m/min

Abb.28. zeigt die elektrostatische Aufladung [kV/m] von Holzstaub bei einem Vorschub von 4,5m/min.

- Bis auf die Ausnahme Fichte bei einer Körnung von P60, waren alle elektrostatischen Aufladungen ausnahmslos negativ.
- Alle Probematerialien erzielten mit einer feineren Körnung, stärkere Aufladungen als jene mit einer gröberen Körnung.
- Bei Fichte wurde die stärkste elektrostatische Aufladung festgestellt, gefolgt von Tanne.
- Am schwächsten und mit den geringsten Unterschieden in der Aufladungsstärke selbst, waren die Aufladungen von Kiefer.

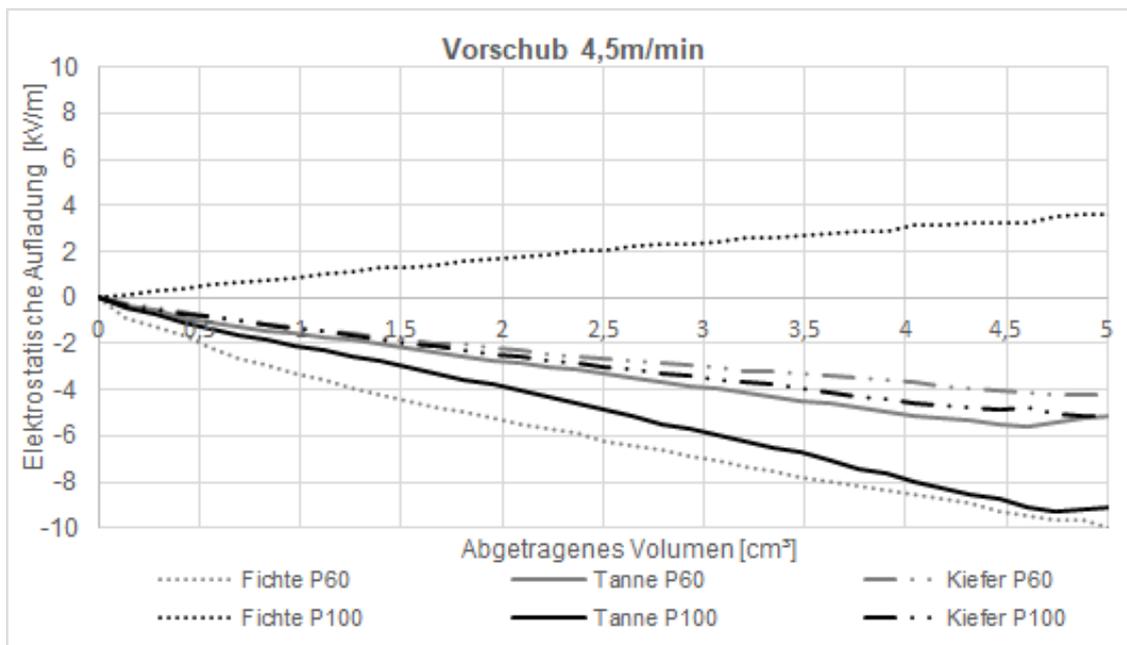


Abb.28.: Elektrostatistische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Tanne und Kiefer, bei einem Schleifabtrag von 0,1mm bzw. einem Vorschub von 4,5m/min.

Wechselwirkungen von verschiedenen Holzstaubpartikel bei einem Abtrag von 0,1mm und einem Vorschub von 9m/min

In Abb.29. wird die elektrostatistische Aufladung [kV/m] von Holzstaub bei einem Vorschub von 9m/min abgebildet.

- Mit einer doppelten Vorschubgeschwindigkeit gingen im Vergleich zu Abb.28. mit einem Vorschub von 4,5m/min, geringere Aufladungen einher.
- Die Aufladungen mit einer feinen Körnung von P100 waren erneut stärker, diesmal allerdings waren deutlich weniger Differenzen in der Aufladungsstärke zu verzeichnen.
- Die Aufladungen von Kiefer waren der vorherigen Abbildung sehr ähnlich, nur etwas schwächer ausgeprägt.
- Auch bei Tanne waren die Aufladungen bei einer feineren Körnung minimal stärker aufgeladen.
- Bei Fichte lag der einzige Unterschied im Vergleich zu einem langsamen Vorschub darin, dass diesmal auch die Ladungen mit einer Körnung von P100 positiv aufgeladen war. Aber auch hier waren die Aufladungen schwächer.

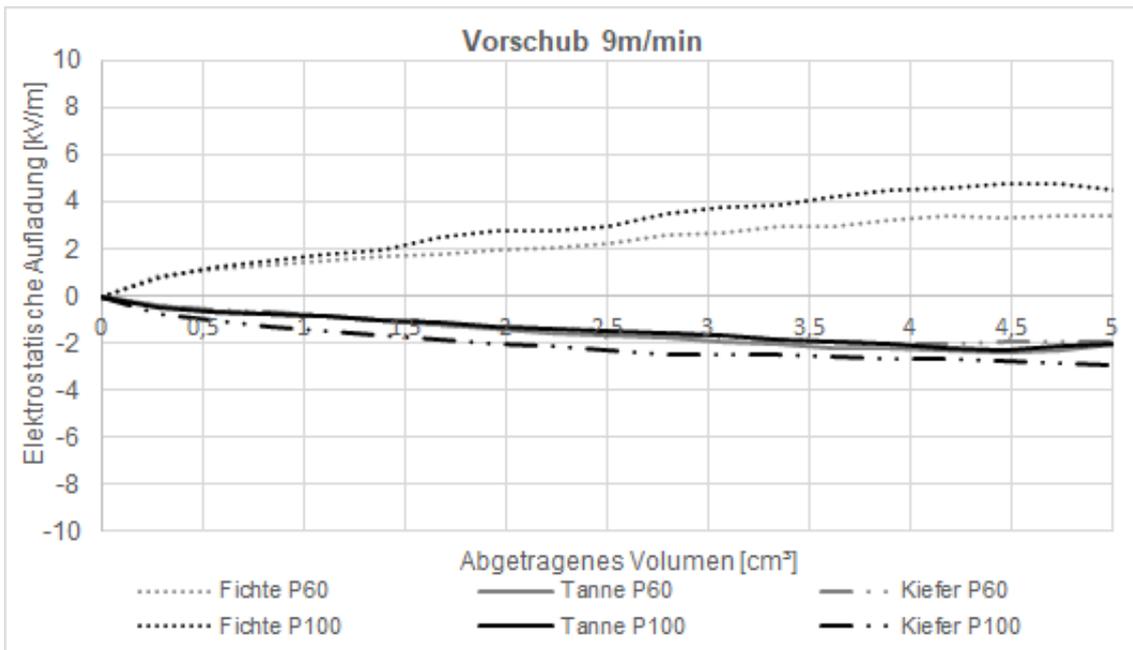


Abb.29.: Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Tanne und Kiefer, bei einem Schleifabtrag von 0,1mm bzw. einem Vorschub von 4,5m/min.

Alle Versuche wurden mit einem Schleifabtrag von 0,1mm durchgeführt. Ziel war ausschließlich der Vergleich von Fichte mit den Nadelhölzern Tanne und Kiefer.

Die deskriptive Statistik in Tab.9. gibt einen Überblick über die in der Versuchsdurchführung stattgefundenen elektrostatischen Aufladungen von Holzstaub. Mit einer Gesamtanzahl (N) von 240 Schleifdurchgängen, betrug das Minimum der Aufladungen -17 und das Maximum 9, der Mittelwert stellt -2,65kV/m dar. Die Standardabweichung lag bei 5kV/m.

Tab.9.: Deskriptive Statistik der elektrostatischen Aufladung.

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Aufladung [kV/m]	240	-17	9	-2,65	5,049

In nachfolgender Tab.10. zeigt die Varianzanalyse die Aufladung von Holzstaub der verschiedenen Holzmaterialien (Fichte, Tanne und Kiefer), geschliffen mit Schleifpapier mit Körnung P60 beziehungsweise P100, sowie bei zwei Vorschubgeschwindigkeiten (4.5m/min und 9m/min).

Tab. 10.: Anzahl der Messwerte je Faktor der ANOVA.

	Wertelabel	N
Material	1 Fichte	80
	2 Tanne	80
	3 Kiefer	80
Körnung	1 P60	120
	2 P100	120
Vorschub [m/min]	1 4,5 m/min	120
	2 9 m/min	120

Tab.11. liefert Informationen über die Signifikanz der miteinander in Wechselwirkung stehenden Untersuchungsparameter. Daraus kann geschlossen werden, dass die verwendeten Materialien Fichte, Tanne, Kiefer und der ausgewählte Vorschub von 4,5m/min und 9m/min, sowie die Körnung von P60 und P100 mit ,000 hoch signifikant sind ($p < 0,001$). Als Wert dient $\alpha < 5\%$. Ebenso anzumerken ist, dass alle untersuchten Wechselwirkungen in nachfolgender Tabelle mit ,000 ebenfalls wie die einzelnen Parameter hoch signifikant sind, ganz anders als bei den anderen beiden Untersuchungsgruppen, wie in Tab.6. und Tab.8. ersichtlich. Ebenso gibt die Tabelle Auskunft über deren Freiheitsgrade.

Tab. 11. Tests der Zwischensubjekteffekte in der SPSS Auswertung.

Abhängige Variable: Aufladung [kV/m]

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quad- rate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	5284,699 ^a	11	480,427	135,377	,000
Konstanter Term	1688,263	1	1688,263	475,728	,000
Körnung	112,491	1	112,491	31,698	,000
Vorschub	1469,012	1	1469,012	413,946	,000
Material	1255,286	2	627,643	176,861	,000
Körnung * Vorschub	92,206	1	92,206	25,982	,000
Körnung * Material	1198,021	2	599,010	168,792	,000
Vorschub * Material	275,194	2	137,597	38,773	,000
Körnung * Vorschub * Mate- rial	882,489	2	441,244	124,336	,000
Fehler	809,126	228	3,549		
Gesamt	7782,089	240			
Korrigierte Gesamtvariation	6093,825	239			

a. R-Quadrat = ,867 (korrigiertes R-Quadrat = ,861)

Es werden jeweils zwei Grafiken der univariaten Varianzanalyse einander gegenübergestellt. Die Beschriftung der Teilabbildungen erfolgt dabei von 1-2.

Abb.30. stellt die elektrostatischen Aufladungen bei einer Körnung von P60 und einer Körnung von P100 dar.

- Bei einer groben Körnung waren die Aufladungen mit einem langsamen Vorschub von 4,5m/min stärker. Mit einer doppelten Vorschubgeschwindigkeit hingegen, waren die elektrostatischen Aufladungen deutlich schwächer aufgeladen.
- Diesbezüglich bildete Fichte mit einem schnellen Vorschub mit feiner Körnung bei einer positiven Ladung, die Ausnahme. Allerdings war die Differenz in der Aufladungsstärke minimal, nämlich 1kV/m.

- Auch bei einer Körnung von P100, fanden mit einem Vorschub von 9m/min schwächere Aufladungen statt.
- Bei einer feinen Körnung hingegen, hatte Kiefer bei einem langsamen Vorschub eine deutlich stärkere Aufladung als Tanne. Allgemein waren die Aufladungen bei einem Vorschub von 4,5m/min deutlich stärker.

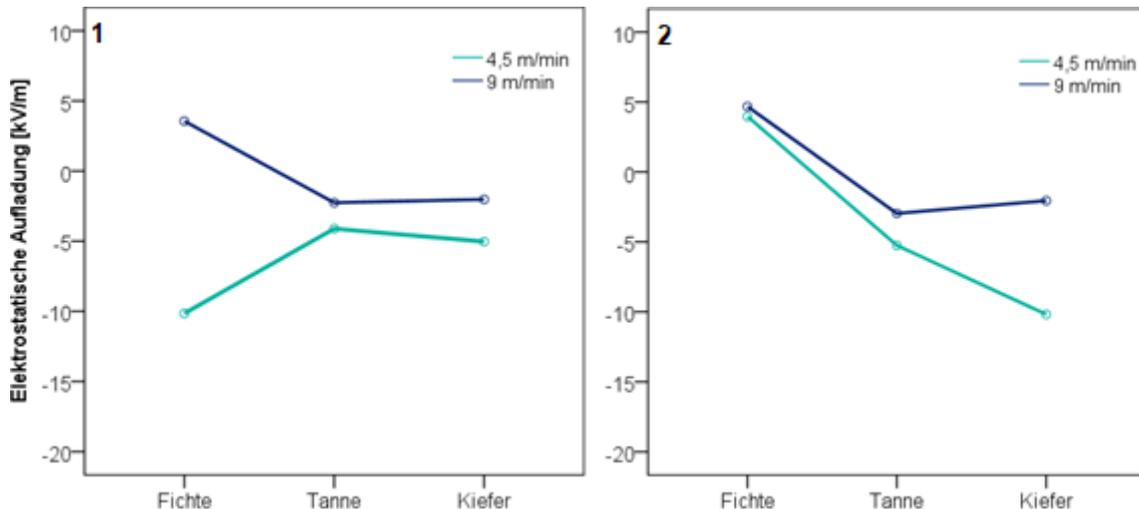


Abb.30.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel von Fichte, Tanne und Kiefer, bei (1) einer Körnung von P60, sowie (2) einer Körnung von P100.

Abb.31. bildet die elektrostatischen Aufladungen bei einem Vorschub von 4,5m/min und einem Vorschub von 9m/min ab.

- Bei einem langsamen Vorschub von 4,5m/min waren die Aufladungen bei allen drei Probematerialien stärker, als bei einem schnellen Vorschub von 9m/min.
- Tanne und Kiefer erzielten ausnahmslos stärkere Aufladungen, mit einer Körnung von P100, unabhängig von deren Vorschubgeschwindigkeit.
- Mit einer Körnung von P60 und bei einem Vorschub von 4,5m/min (1), hatte Fichte mit Ausnahme, eine stärkere Aufladung.
- Mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 9m/min (2) waren keine großen Differenzen bezüglich der Körnung und der Probematerialien in Abhängigkeit zu der Aufladungsstärke zu erkennen. Der Streuradius war minimal ausgeprägt.
- Kiefer und Tanne wiesen bei beiden Vorschüben ein gleichsinniges Aufladungsverhalten auf.
- Einerseits waren die Aufladungen von Fichte ähnlich mit jenen von Tanne und Kiefer, doch andererseits zeigten sich in der Polarität Unterschiede, bei welcher drei von vier positiven Aufladungen gemessen wurden.

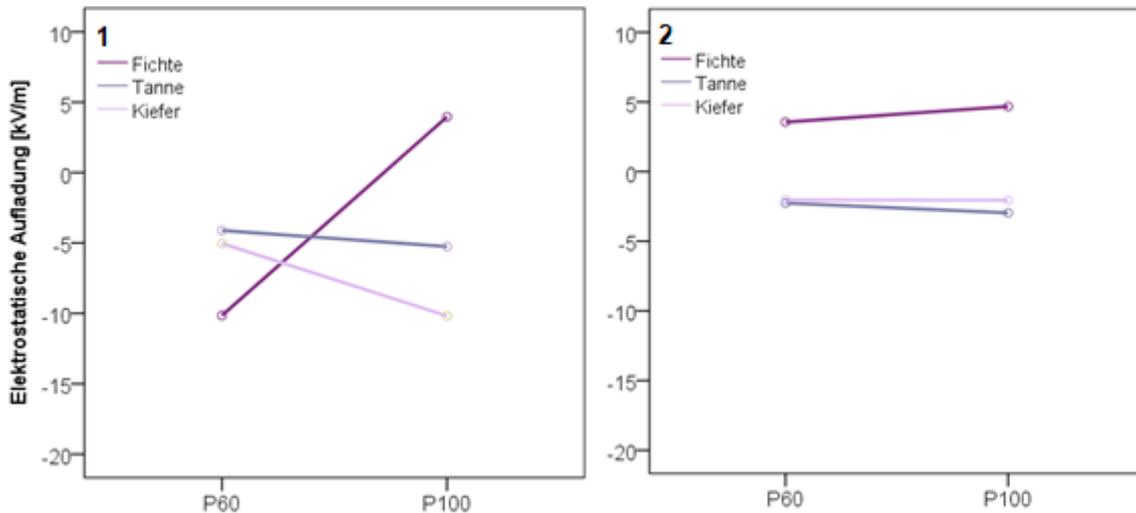


Abb.31.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Tanne und Kiefer, bei (1) einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (2) einem Vorschub von 9m/min.

Es folgt ein Vergleich der elektrostatischen Aufladungen in den Boxplots in Abb.32. bei einer Körnung von P60 und einer Körnung von P100.

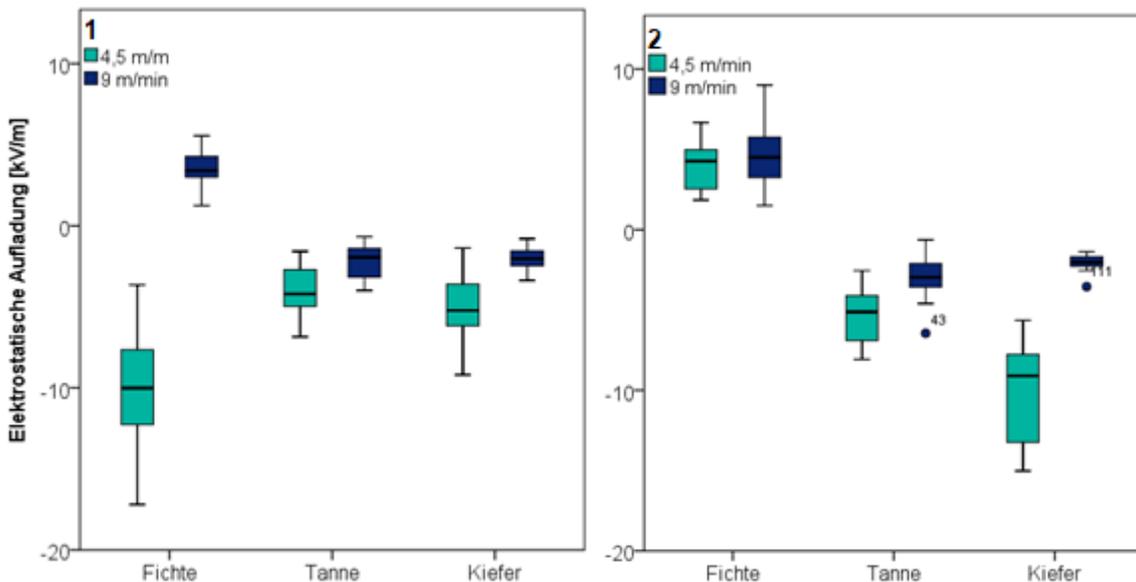


Abb.32.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel von Fichte, Tanne und Kiefer, bei (1) einer Körnung von P60, sowie (2) einer Körnung von P100.

- Bezugnehmend auf die Aufladungsstärke der Tanne, waren keine Auffälligkeiten zu verzeichnen. Die Aufladungen waren einander sehr ähnlich, unabhängig von deren Körnung. Bei einem langsamen Vorschub von 4,5m/min waren die Aufladungen etwas stärker, als bei einer doppelt so schnellen Vorschubgeschwindigkeit.
- Tanne und Kiefer erzielten ohne Ausnahme negative Aufladungen.
- Bei einer feineren Körnung waren die elektrostatischen Aufladungen der Fichte beide positiv. Bei einer Körnung von P60 hingegen wurde nur mit

einem langsamen Vorschub eine positive Aufladung gemessen, die letzte bei einem schnellen Vorschub hingegen war negativ.

- Auch bei Kiefer wurden bei einem Vorschub von 4,5m/min stärkere Aufladungen verzeichnet.
- Die Ausnahme bildete Fichte mit einer feineren Körnung, welche die Einzige war, welche bei einem Vorschub von 9m/min stärkere Aufladungen hatte

In Abb.33. folgt eine Darstellung der elektrostatischen Aufladungen von Fichte, Tanne und Kiefer in Wechselwirkung zu den Untersuchungsparametern einer groben und feinen Körnung, sowie einen langsamen und schnellen Vorschub.

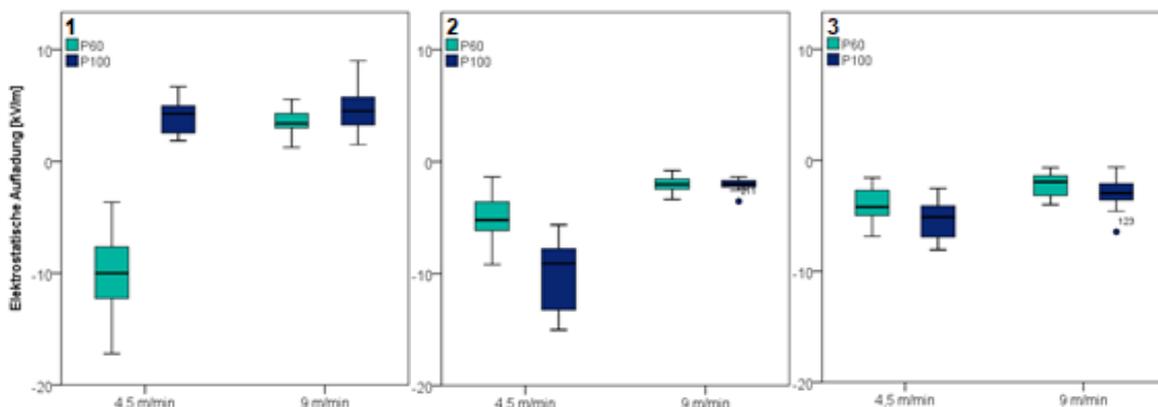


Abb.33.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel von (1) Fichte, (2) Tanne, sowie (3) Kiefer, bei einer Körnung von P60 und P100, sowie bei einem Vorschub von 4,5m/min und 9m/min.

- Fichte (1) hatte bei einer groben Körnung und einem langsamen Vorschub die einzige negative Aufladung. Die übrigen drei Ladungen waren sich beziehend auf die Aufladungsstärke relativ ähnlich, unabhängig von der Körnung, oder dem Vorschub.
- Bei Tanne (2) wurden mit einem langsamen Vorschub stärkere Aufladungen verzeichnet. Ebenso gingen mit einer feineren Körnung, stärkere Aufladungen einher. Bei doppelter Vorschubgeschwindigkeit waren keine Unterschiede in der Aufladungsstärke, unabhängig von der Körnung, ersichtlich.
- Von allen drei Probematerialien hatte Kiefer (3) die allgemein schwächsten Aufladungen. Miteinher gingen aber auch die geringsten Streuungen. Mit einem langsamen Vorschub waren die Aufladungen geringfügig stärker, als mit einem schnellen Vorschub. Ebenso wurden auch minimal stärkere Aufladungen mit einer feinen Körnung gemessen.

Gesamt stellte sich der Trend heraus, dass sich die Staubpartikel von Tanne und Kiefer mit ausschließlich negativen Ladungen sehr ähnlich waren. Bei der Gruppe der Nadelhölzer, erwiesen sich alle untersuchten Bearbeitungsparameter als signifikant. Allerdings stach Fichte durch eine zum Teil positive Polarisation, sowie durch eine stärkere Aufladung mit einer gröberen Korngröße bei einem langsamen Vorschub, erneut hervor. Im Vergleich zu den Untersuchungen und Gegenüberstellungen mit Buche, MDF und PB konnten allerdings deutlich mehr Gemeinsamkeiten mit den Nadelhölzern Tanne und Kiefer hergestellt werden.

4. Diskussion

Es konnte festgestellt werden, dass Fichte das einzige auffällige Material war, welches sowohl negative als auch positive Aufladungen erzielte. Die beiden Nadelhölzer Tanne und Kiefer hatten ausnahmslos negative Aufladungen. Diese Ergebnisse standen im Gegensatz zu jenen bei Buche, bei mitteldichten Faserplatten (MDF) und Spanplatten (PB), da alle positive Aufladungen zeigten. MDF und PB als Holzwerkstoffe hatten klar die stärkeren Aufladungen, im Vergleich zu Vollholz. In Summe der Mittelwerte fanden mit Fichte die schwächsten Aufladungen statt, gefolgt von Buche. PB hatte die stärksten Aufladungen, die nächststärksten Aufladungen wurden mit MDF gemessen. Bei den Nadelhölzern hingegen wurden die stärksten Aufladungen bei Fichte gemessen, nachgefolgt von Tanne. Die schwächsten elektrischen Aufladungen erreichte Kiefer.

In Wechselwirkung mit ausgewählten Bearbeitungsparametern stellte sich heraus, dass der Schleifabtrag bei dem ersten Versuchsdurchlauf einen hoch signifikanten Einfluss hatte. Mit einem kleineren Schleifabtrag von 0,1mm gingen stärkere Aufladungen einher, hingegen fanden mit einem größeren Schleifabtrag von 0,5mm deutlich schwächere Aufladungen statt. Die Körnungen P60 und P100 sowie die beiden gewählten Vorschube von 4,5m/min und 9m/min zeigten jeweils deutlich geringere, beziehungsweise bei der Gruppe der Vollholzmaterialien und der Gruppe der Holzwerkstoffe, keine statistisch signifikanten Unterschiede. Aus den Abbildungen konnte des Weiteren abgeleitet werden: Bei dem kleineren Abtrag gab es mit der gröberen Körnung von P60 stärkere Aufladungen. Im Gegensatz dazu wurden mit einem Abtrag von 0,5mm, in Verbindung mit der feineren Körnung von P100 stärkere Ladungen festgestellt. Hingegen konnte sowohl bei einem langsamen als auch bei einem schnellen Vorschub, kein erkennbares Muster hinsichtlich der triboelektrischen Aufladungen erkannt werden.

Bei den Schleifprozessen aus der zweiten Versuchsreihe stellte sich heraus, dass die Körnung und der Vorschub im Gegenzug zu den ersten Untersuchungen, statistisch hoch signifikant waren. Mit einem schnellen Vorschub von 9m/min wurden deutlich schwächere Aufladungen gemessen als mit einem Vorschub von 4,5m/min. Bei einem langsamen Vorschub waren die triboelektrisch induzierten Aufladungen bei Fichte, Tanne und Kiefer, bei einer feinen Körnung stärker als bei einer groben. Ebenso wie bei einem doppelt so schnell ausgewählten Vorschub. Die einzige Ausnahme bildete eine Fichte bei einem Vorschub von 4,5m/min und einer Körnung von P60, welche deutlich stärker, als jene mit

einer Körnung von P100 war. Tanne und Kiefer zeigten eine Vielzahl an Gemeinsamkeiten auf und erzielten ausnahmslos negative elektrostatische Aufladungen. Doch erneut konnte Fichte bezugnehmend auf ihre Polarität und Aufladungseigenschaften nicht als definitiv gleichsinnig angesehen werden.

Im Folgenden wird auf die gestellten Hypothesen im Einzelnen eingegangen:

H1: Schleifen als spanabhebender Holzbearbeitungsprozess verursacht triboelektrische Aufladungen an den dabei entstehenden Staubpartikel.

→ Hypothese 1 wurde angenommen. Sowohl von allen 32 Testdurchläufen mit jeweils 20 Wiederholungen der Schleifprozesse bei Fichte, Buche, MDF und PB, als auch bei den acht Testdurchläufen mit ebenfalls jeweils 20 Wiederholungen der Schleifprozesse von Tanne und Kiefer wurden ausnahmslos Aufladungen verzeichnet, ersichtlich im Anhang unter Vor- auswertung Versuchsplan 1 und Versuchsplan 2. Des Weiteren sind die triboelektrischen Aufladungen ebenfalls (sh. Kapitel 3.2.1.) in den Abb.14.-19., in welchen die elektrostatischen Aufladungen von Holzstaub von Fichte, Buche, MDF und PB bei unterschiedlichen Bedingungen abgebildet werden, anschaulich. Sowie (sh. Kapitel 3.2.3.) Abb.28. und 29., in welchen die elektrostatischen Aufladungen der Staubpartikel von Fichte, Tanne und Kiefer dargestellt werden. Wie McCarty und Whitesides (2008) feststellten, ist das Material Holz ein Bioelektret und muss immer eine Net- toladung besitzen. Davon unabhängig ob nun positive oder negative Auf- ladungen stattgefunden haben. Ein Grund dafür könnte seine Position in der triboelektrischen Reihe sein (Myna et al. 2020), ein anderer Grund können die Eigenschaften und die Charakteristik von Holz selbst sein. Da jedes einzelne Holz durch seine inhomogene Struktur und somit seinen individuellen Aufbau ausgezeichnet wird, kann es in verschiedenen Rich- tungen die unterschiedlichsten Eigenschaften aufweisen (Stehno 1981). Im Gegenzug zu anderen Materialien zeichnet sich Holz durch seine inho- mogene Struktur aus, denn der zellförmige Aufbau führt dazu, dass bei dem Bearbeitungsprozess Schleifen, Späne und Stäube von ver- schiedensten Größen erzeugt werden (Heisel, Weiss 1991b). Denn zum einen kann die Größenverteilung, zum anderen die individuelle Form jedes einzelnen Partikels von einer Vielzahl an Faktoren abhängen wie die Be- arbeitungsmaschine und der Umgang mit den Werkstoffen selbst (Heisel, Weiss 1991b). All diese Faktoren implizieren eine Aufladung des Holz- staubs. In Interaktion zu verschiedenen Bearbeitungsparametern können die Stäube unterschiedlicher, aber auch gleichartige Hölzer, verschieden starke und verschiedenpolige Aufladungen haben. Allerdings ist es nicht möglich, dass keine Aufladung stattfindet.

H2: Vollholzmaterialien laden sich bei gleichen Prozessbedingungen anders auf als Holzwerkstoffe.

- Hypothese 2 wurde ebenfalls belegt. Es konnten folgende grundlegenden Annahmen getroffen werden, die aus den Abb.24.–27. hervorgingen (sh. Kapitel 3.2.2.) Die Abbildungen stellen eine Gegenüberstellung der Vollhölzer und Holzwerkstoffe dar. Aus den Messungen konnte abgeleitet werden, dass Holzwerkstoffe ausnahmslos positive Aufladungen besitzen. Die elektrostatischen Aufladungen vom Holzstaub der Holzwerkstoffe, waren deutlich stärker geladen als jene der Vollholzmaterialien. Bei der univariaten Varianzanalyse stellte sich heraus, dass die Körnung und der Vorschub nicht signifikant waren. Dieses Signifikanzniveau verdeutlichte sich zum Teil auch in den elektrostatischen Aufladungen der beiden einander gegenübergestellten Gruppen in den Abbildungen. Denn auch grafisch konnte bei der Vorschubgeschwindigkeit kein signifikantes Verhalten festgestellt werden. Die Aufladungen bei einem kleinen Abtrag von 0,1mm waren in der gesamten Untersuchungsgruppe bei allen Probenmaterialien eindeutig stärker aufgeladen, als jene mit einem größer gewählten Abtrag. Auffällig war, dass die Spannweite der Aufladungsstärke mit einem kleineren Abtrag stärker streute. Mit einem Abtrag von 0,5mm hingegen, war der Streuradius der gemessenen Aufladungen unverkennbar einheitlicher und geringer. Auch konnte aufgezeigt werden, dass bei den Holzwerkstoffen mit einem kleinen Abtrag und einer Körnung von P60, eine stärkere elektrostatische Aufladung einherging. Hingegen mit einem großen Abtrag stellten sich stärkere Aufladungen mit einer feinen Körnung heraus. Dieser Trend zeigte sich auch bei den Vollholzmaterialien. Ebenfalls waren die Ladungen bei einem Abtrag von 0,1mm und einer groben Körnung stärker aufgeladen, als mit einer feineren Körnung. Auch mit einem großen Abtrag wurden bei einer Körnung von P100 zum Großteil stärkere Aufladungen gemessen. Die Ausnahme bildeten jedoch bei einem großen Abtrag sowohl ein langsamer Vorschub von 4,5m/min, als auch eine doppelt so schnelle Vorschubgeschwindigkeit von 9m/min. In beiden Fällen waren die Aufladungen mit einer Körnung von P60 stärker. Der Verdacht liegt an der statistisch nicht signifikanten Einflussnahme der Körnung beziehungsweise an der Beeinflussung der Fichte, welche schon öfters andere Trends aufgezeigt hat. Denn nach Stehno (1981) ist Holz ein naturgegebener Werkstoff, der sich durch seinen inhomogenen Aufbau und seine individuelle Struktur auszeichnet. Dies hat zur Folge das mit unterschiedlichen Richtungen verschiedene Eigenschaften einher gehen können. Des Weiteren verhindert die zellförmige Struktur der Holzpartikel bei der Bearbeitung die Erzeugung von Holzstaubpartikel bei einer gleichförmigen Größe. Dies führt dazu, dass auf der einen Seite die Größe der Splitter und auf der anderen Seite die Struktur der einzelnen Holzfraktionen durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden können (Heisel, Weiss 1991b). Im Gegensatz zu den Vollholzmaterialien sind MDF und PB kein von der Natur geschaffener Baustoff. Denn sowohl MDF ist eine Platte, welche in Zusammenhang mit synthetischen Bindemittel, sowie anderen Zusätzen hergestellt wird (Holzforschung Austria – Österreichische Gesellschaft für

Holzforschung 2017), wie auch die Pressspanplatte, welcher verschiedenste Bindemittel wie Kunstharze, Zemente, Gipse und Magensite beigelegt werden. Obwohl die Grundeigenschaften der Spanplatte mit denen eines Naturholzes vergleichbar sind, haben Hilfswerkstoffe einen deutlichen Vorteil gegenüber Vollholz. Denn sie haben keine Faserrichtungen, folglich besitzen sie eine homogene Struktur mit einer gleichmäßigen Oberfläche (Holzinfo (Puuinfo) o.J.). Ansonsten ließen sich keine Unterschiede, sondern nur die bereits aufgezählten Gemeinsamkeiten in der Stärke und der Polarität der triboelektrisch induzierten Aufladungen feststellen.

Diesbezüglich ließ sich die Theorie aufstellen, dass sich Holzwerkstoffe aufgrund ihrer künstlichen Herstellung mit der Charakteristik einer gesamt-einheitlichen homogenen Struktur, positiv und stärker aufladen. Dies könnte natürlich mit anderen Bearbeitungsparametern wieder anders aussehen. Vollholz weist aufgrund seines inhomogenen Aufbaus auch unterschiedliche Eigenschaften und somit auch differenziertere Aufladungen auf, mit einhergehen schwächere elektrostatische Aufladungen. Weiters könnte als Hauptursache für die unterschiedlich starken elektrostatischen Aufladung, an den Anteilen der Bindemittel in den Holzwerkstoffen festgestellt werden, welche in den gewachsenen Hölzern zur Gänze fehlen.

Es wird die Annahme getroffen, dass sich bei einem größeren Abtrag von 0,5mm die einzelnen Fraktionen stärker verklumpen. Ein kleinerer Abtrag bewirkt, dass sich jedes Holzstaubpartikel als Individuum bewegt. Ein einzelner Partikel hat somit eine größere Fläche und damit einhergehend größere Aufladungen pro Holzstaubpartikel. Weiters kommt es bei einem kleinen Abtrag mit stärkeren Aufladungen zu einer vermehrten Streuung in der Aufladungsstärke zwischen den einzelnen Holzproben. Der Grund dafür wird in der inhomogenen Struktur jedes Partikels gesehen. Jeder Holzstaub hat einen direkten Einfluss auf die Aufladung selbst, somit führt dies zu stärkeren Schwankungen in der Aufladungsstärke. Im Gegensatz zu den verklumpen Holzstaubpartikel, welche aus einem größeren Abtrag resultieren. Diese wirken sich somit als Einheit weniger stark auf die Ladungsintensität aus und haben dahingehend einen nahezu einheitlichen Aufladungsbereich.

Auch in den mikroskopischen Abb.10.-13. von dem Holzstaub der Fichte, Buche, MDF und PB (sh. Kapitel 3.1.) stach der Holzstaub der Fichte mit seiner sehr spitzen, nadelförmigen, sich ineinander verhakenden Struktur hervor und unterscheidet sich deutlich von dem Aufbau der anderen Holzstäube. Folglich sind Fichte und Buche als Naturwerkstoffe aufgrund ihres inhomogenen Aufbaus stärkeren Schwankungen unterworfen, anders als MDF und PB in der Gruppe der Holzwerkstoffe, welche eine homogene Struktur besitzen.

H3: Laub- und Nadelhölzer laden sich bei gleichen Bedingungen unterschiedlich auf.

- Hypothese 3 konnte bestätigt werden. Es wird angemerkt, dass in nachfolgender Diskussion, bezogen auf Hypothese 3, die Holzwerkstoffe MDF und PB in den grafischen Abbildungen nicht berücksichtigt und miteingebunden werden.

Bei dem direkten Vergleich der triboelektrischen Aufladungen der Staubpartikel von dem vielseitig beliebten Laubholz Buche und dem gerne verwendeten Nadelholz der Fichte, lässt sich folgendes wie in Abb.20.-23. (sh. Kapitel 3.2.1.) ersichtlich, ableiten. Die Messungen der elektrischen Aufladungen der Staubpartikel von Buche waren ausschließlich positiv. Die der Fichte hingegen, waren mit Ausnahme sowohl positiv als auch negativ aufgeladen. Buche hatte eine deutlich größere Aufladungsstärke, die der Fichte hingegen waren in Summe die Schwächsten. Mit einem Schleifabtrag von 0,1mm gingen sowohl bei Fichte als auch bei Buche höhere Aufladungen einher. Allerdings waren diese mit einem größeren Streuradius in der elektrostatischen Aufladungsstärke verbunden. Bei Fichte konnten keine Unterschiede bezüglich der Aufladungen zwischen einem langsamen und einen schnellen Vorschub festgestellt werden. Bei Buche wurden mit einem großen Abtrag und einer schnelleren Vorschubgeschwindigkeit minimal stärkere Aufladungen erzielt. Bei einem Abtrag von 0,1mm waren die Aufladungen bei einem Vorschub von 4,5m/min stärker. Mit einer feineren Körnung wurden bei einem Abtrag von 0,5mm bei beiden Probematerialien stärkere Aufladungen gemessen. Die extremen Schwankungen bezüglich der Körnung und des Vorschubs waren auf die mit der Statistik der univariaten Varianzanalyse in Tab.6., welche aussagt, dass die Wechselwirkungen der Körnung und des Vorschubs nicht signifikant waren, zurückzuführen.

Die Struktur jedes Holzes, definiert sich über seinen Zellenaufbau, wobei unter Laub- und Nadelhölzer differenziert werden muss, da die Zellen verschieden angeordnet sind (Stehno 1981). Charakteristisch für die Struktur des Hartholzes Buche ist sein deutlich dichter und härterer Aufbau (Schneider o.J.). Das Holz ist feinporig und homogen strukturiert (Lutze 2016). Daher lässt sich die Theorie aufstellen, dass Staubpartikel von Buche aufgrund ihres Aufbaus und der physikalischen Eigenschaften wie beispielsweise einer größeren Rohdichte, deutlich stärkere Aufladungen haben. Fichte hingegen definiert sich über sein geradfaseriges, helles Holz. Zusätzlich zu den axial angeordneten Tracheiden weist das Weichholz auch radial angeordnete mit Harz angefüllte Kanäle auf (Richter, Ehmke 2017). Gewachsenes Holz besteht aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Des Weiteren können abhängig von den Holzarten, neben Harz weitere Bestandteile in unterschiedlicher Menge im Holz vorhanden sein, wie Fette, Eiweiße, Gerb- und Farbstoffe (Stehno 1981). Hölzer mit einer Darrdichte von unter 550 kg/m³ gehören zu den Weichhölzern, sie zeichnen sich durch feinere und weichere Strukturen aus. Von den untersuchten Holzmaterialien gilt, Fichte als

Weichholz. Harthölzer zeichnen sich über eine Darrdichte von über 550 kg/m³ aus. Wegen der höheren Dichte ihrer Fasern, sind sie deutlich belastbarer und stärker in ihrem Aufbau, dazu zählt die Buche (Eder o.J.).

Folglich wird die Theorie aufgestellt, dass Harz für die unterschiedliche Polarisierung und Aufladungsstärke verantwortlich sein könnte. Denn Harz kann auf der einen Seite ein Störstoff beim Schleifen darstellen. Dies hat zur Folge, dass schwächere Aufladungen erzielt werden und auf der anderen Seite können sie auch zu negativen Aufladungen führen.

Eine weitere Theorie besagt, dass Harthölzer die Tendenz haben, sich positiv und deutlich stärker aufzuladen. Weichhölzer wiederum neigen dazu, sich negativ und schwächer aufzuladen. Zusätzlichen Einfluss auf die Polarisierung könnte der Harzgehalt des Probematerials sein, was dazu führen würde, dass wenn von dem untersuchten Probematerial die geschliffene Stelle harzhaltig war, negative Aufladungen mit einher gehen. Beim Schleifen einer Probe, an einer Position, an welcher der Harzanteil ausbleibt, würden positive Aufladungen stattfinden können.

Bei dem Vergleich von Fichte und Buche, als Nadel- und Laubhölzer zeigen sich große Unterschiede. Laubholz ist deutlich schwerer und härter als Nadelholz, wie im Anhang ersichtlich. Hinzu kommt, dass es sich durch eine höhere Elastizität auszeichnet und somit stabiler gegen Beanspruchungen ist. Es wurde daher der Schluss gezogen, dass aufgrund der Härte, Buche resistenter gegen Bröckeln, Spröden und Splintern bei mechanischen Be- und Verarbeitungsprozessen ist. Dies wird auch in den mikroskopischen Bildern Abb.10 und 11. von Holzstaub verdeutlicht. Im Gegensatz zu Fichte, die eine deutlich geringere Härte hat, sind deren Holzstaubpartikel ausnahmslos zerrissen. Die Schleifpartikel sind an ihrer Oberfläche stark zerfasert. Daher lassen sich auch diesbezüglich große Unterschiede wie charakteristische Eigenschaften, welche sowohl aus den mikroskopischen Untersuchungen, als auch in den gemessenen Aufladungen hervorgingen, erkennen.

Bei der Buche konnte kein Zusammenhang zwischen einer radiale beziehungsweise tangentialer Ausrichtung der Jahresringe, mit einer Einflussnahme auf die elektrostatische Aufladung, festgestellt werden. Sechs von acht Probematerialien hatten eine tangentialer Anordnung, nur zwei waren radial, wie im Anhang dargestellt, angeordnet. Bei Fichte wiederum waren fünf von acht Holzproben radial angeordnet. Die Probematerialien 06, 07 und 14 waren mit einem Winkel von 65, 70 und 60° tangential. Davon waren die Probematerialien 06 und 07 negativ aufgeladen. Die dritte negative Aufladung wurde allerdings bei der Probe 04 mit einem Winkel von 90° gemessen. Auch diesbezüglich sollten weitere Forschungen angestellt werden. Es war zwar auffällig, dass zwei von drei negativen Aufladungen bei einer tangentialer Anordnung der Jahresringe stattgefunden haben, aber es scheint dennoch keinen eindeutigen Einfluss auf die Polarität zu haben.

Auch in diesem Fall wird dieselbe Annahme, wie in Hypothese 2 beziehend darauf genommen, dass ein kleiner Abtrag zu stärkeren Aufladungen führt, ebenso das damit eine breitere Streuung einher geht.

Buche hingegen besitzt Ähnlichkeiten mit MDF und PB, welche ebenso nicht durch Harzkanäle und Harzgallen gezeichnet sind. Die Struktur der Buche ist homogener und härter als die der Fichte. Um eine Ursache für die unterschiedliche Polarität der Fichte zu eruieren, wurden weitere Untersuchungen mit Nadelhölzern angestellt.

H4: Unterschiedliche Nadelhölzer laden sich bei denselben Prozessbedingungen gleich auf.

- Hypothese 4 wurde abgelehnt. Ersichtlich in Abb.30.-33. (sh. Kapitel 3.2.3.). Es stellte sich heraus, dass der Holzstaub von Tanne und Kiefer ausnahmslos negative Aufladungen hatte. Auch in diesem Vergleich fiel die Fichte auf. Denn sie hatte nur bei einer groben Körnung mit einem langsamen Vorschub, eine negative Aufladung. Die anderen drei Messungen waren positiv. Am auffälligsten war, wie sich in der univariaten Varianzanalyse herausstellte, dass alle Untersuchungsparameter signifikant waren, wie auch in Tab.11. ersichtlich. Es konnte nachgewiesen werden, dass die elektrostatischen Aufladungen mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 4,5m/min eindeutig stärker waren. Weiters wurde erkannt, dass sowohl mit einem langsamen als auch mit einem schnellen Vorschub, mit einer Körnung von P100 ausnahmslos stärkere Aufladungen gemessen wurden. Allerdings ging mit einer stärkeren Aufladung durch einen langsamen Vorschub auch ein stärkerer Streuradius beziehend auf die elektrostatische Aufladungsstärke einher.

Es wurde die Theorie aufgestellt, dass der Grund weshalb an Staubpartikel der Nadelhölzer als einzige Probematerialien negative Aufladungen gemessen wurden, daran liegen könnte, dass sich alle drei untersuchten Nadelhölzer über eine Darrdichte von unter 550 kg/m³ definieren, durch welche sie in die Kategorie Weichhölzer fallen. Sie zeichnen sich durch feinere und weichere Strukturen aus (Eder o.J.). Eine weitere Gemeinsamkeit aller drei Probematerialien besteht darin, dass sie alle drei ein geradfaseriges Holz besitzen (Richter 2017; Grosser 2004; Grosser 2007). Eine andere Ursache könnte der Harzanteil als akzessorische Bestandteil der Hölzer sein. Das Holz der Fichte weist axial und radial angeordnete Harzkanäle auf, welche bei Tanne oft fehlen (Richter, Ehmke 2017). Ein charakteristisches Merkmal der Kiefer, sind die zahlreich vorhandenen Harzkanäle, welche deutlich größer und häufiger vorhanden sind als bei der Fichte (Grosser 2007). Dennoch ähneln die Eigenschaften des Tannenholzes dem des Fichtenholzes sehr. Denn es lassen sich zum einen von der Optik, zum andern von den werkstofftechnischen Verwendungen keine großen Unterschiede erkennen. Allerdings zeichnet sich das Holz der Tanne als splittiger und filziger aus. Dies hat zur Folge, dass das Nadelholz schlechter zu be- und verarbeiten ist und dementsprechend bei

Be- und Verarbeitungsprozessen leichter absplittert (Grosser 2004). Denn bereits bei Betrachtung der mikroskopischen Abb.10.a. und b. von Fichte, kommt diese filzige, spröde Struktur unverkennbar zu Vorschein. Daher sollten bei mikroskopischer Betrachtung von Holzstaub von Tanne und Kiefer, die Holzstaubpartikel einen ähnlichen Aufbau wie jene der Fichte aufweisen. Diese charakteristische Struktur führt zu größeren Beanspruchungen während des Schleifprozesses, als wenn beispielsweise Buche geschliffen wird. Dahingehend resultiert eine Bearbeitungserschwerung in schwächeren Aufladungen.

Das führt zu dem Schluss und der Theorie, dass der Harzgehalt unabhängig von dem prozentualen Anteil zu einer negativen Aufladung führen kann. Ein stärkerer Harzgehalt, wie er in der Kiefer vorhanden ist, führt nicht zu einer stärkeren negativen Aufladung. Die positiven Aufladungen können damit erklärt werden, dass während des Schleifprozesses die Oberfläche des untersuchten Staubmaterials, zumindest an jener Position, welche bei dem Messen mit dem Messrohr in Kontakt gekommen sind, keinen Harzbestandteil aufgewiesen haben. Einher gingen somit positive Ladungen. Folglich gehören weitere Untersuchungen mit der Fichte, aber auch mit dem in den Nadelhölzern vorhandenen Harz angestellt. Wie beispielsweise genauere chemische Analysen bezugnehmend auf den Harzgehalt. Auch mikroskopisch müssen Untersuchungen mit dem Holzstaub von Tanne und Kiefer angestellt werden, um weitere eventuelle Parallelen herstellen zu können.

Weitere Möglichkeiten, welche zu einem anderen Aufladungsverhalten der Fichte führen können, ist, dass das Probematerial einen Anteil, oder deutlich höheren Anteil an Bakterien, Pilz- und/ oder Moossporen enthält. Hierzu bedarf es zukünftige chemische Untersuchungen und Analysen zu den Zusammensetzungen des Holzes. Die Ursache in den unregelmäßigen Aufladungen könnte auch in den Holzinhaltsstoffe oder deren Verbindungen liegen. Besonderes Augenmerk sollte dabei auch auf anderen akzessorischen Bestandteilen gelegt werden.

Es wird die Theorie verfolgt, dass ein geringerer Vorschub von 4,5m/min, eine erhöhte Verweilzeit bedingt. Dies führt dazu, dass sich der Staub deutlich länger in dem Messrohr aufhält, dies wiederum impliziert stärkere elektrische Aufladungen. Folglich finden mit einer geringen Vorschubgeschwindigkeit stärkere Aufladungen statt. Ähnlich sieht es mit der Körnung aus. Je feiner die Stäube sind, desto intensiver sind die elektrostatischen Aufladungen. In Folge dessen bewirkt eine feinere Korngröße stärkere Aufladungen. Es wird auch für diese Hypothese dieselbe Annahme bezugnehmend auf einen größeren Streuradius in Wechselwirkung zu einer stärkeren Aufladung getroffen.

Bei Betrachtung des Gesamtbildes haben Nadelhölzer, als Weichhölzer deutlich schwächere Aufladungen. Demzufolge wird die Annahme getroffen, dass die Ursache für die schwächeren elektrostatischen Aufladungen sowohl an der chemischen Zusammensetzung wie beispielsweise den Harzgehalt, als auch an den physikalischen

Eigenschaften, wie zum Beispiel der Rohdichte, welche im Anhang einzusehen ist, liegt.

H5: Die triboelektrisch induzierte Aufladung ist für eine bestimmte Holzprobe in Interaktion mit bestimmten Prozessbedingungen immer gleichsinnig.

- Hypothese 5 wurde angenommen. In allen 40 Vorauswertungen, sowohl alle 32 Versuchsdurchführungen mit Fichte, Buche, MDF und PB von Versuchsplan 1, wie auch jene acht Versuchsdurchführungen mit Tanne und Kiefer von Versuchsplan 2, welche im Anhang ersichtlich sind, haben bei 20 Schleifdurchgängen bei denselben Prozessbedingungen, dieselben Aufladungen stattgefunden. Zumal Streuungen in der Intensität der elektrischen Aufladungen zwischen den einzelnen Wiederholungen stattgefunden haben, sind diese dennoch als gleichsinnig einzustufen. Denn unterschiedliche Parameter führen zu einer unterschiedlichen Streuung, welche wiederum auch zu einer unterschiedlichen Aufladungsstärke führen. Nichtsdestotrotz bleibt die Polarität ausnahmslos gleichsinnig.

Auffällig war, dass bei der Gegenüberstellung der Nadelhölzer, alle Bearbeitungsparameter signifikant waren. Bei dem Vergleich von Fichte, Buche, MDF und PB stellte sich ein Signifikanzniveau bei der Körnung von ,005 und dem Vorschub von ,002 heraus. Bei der Gegenüberstellung von Vollholzmaterialien mit Holzwerkstoffen, ergab sich ein Wert bei der Körnung von ,123 und bei dem Vorschub von ,086, welche somit als nicht signifikant eingestuft waren. Empfohlen wird daher die Gegenüberstellung der Gruppe der Holzwerkstoffe und einer Gruppe von Laubhölzern, um zu überprüfen, ob sich ein signifikantes Verhalten bei den ausgewählten Bearbeitungsparameter einstellt. Denn vor allem, bei der Zusammengabe von Fichte und Buche in die Gruppe der Vollhölzer und MDF und PB in die Gruppe der Holzwerkstoffe, hat sich das Signifikanzniveau nochmals drastisch reduziert.

4.1. Etablierung einer Entstaubungstechnologie für den Schleifprozess

Aufgrund der Tatsache, dass Holzstaub allgemein (TRGS 905) und vor allem Holzstaub von Harthölzern als krebserzeugender Gefahrstoff (TRGS 906) eingestuft wurden, die krebserzeugende Substanz beziehungsweise der Auslöser jedoch noch nicht bekannt ist (Krämer 2019), gelten auch in diesem Fall die Festlegungen des allgemeinen Staubgrenzwertes für den A- und den E-Staub, welcher die Atmungsorgane schützen soll. Der Grenzwert für den E-Staub ist auf $10\text{mg}/\text{m}^3$ festgelegt worden. Jener für die A-Fraktion wurde 2011 von $3\text{mg}/\text{m}^3$ auf $0,3\text{mg}/\text{m}^3$ verschärft (Hahn, Möhlmann 2011).

Der aerodynamische Durchmesser einer jeden Staubfraktion ist davon abhängig, bis in welchen Bereich der Atmungsorgane und in Folge des gesamten Organismus die Holzstäube ein- und vordringen können. Seit dem Jahr 2005 sind verbindliche Grenzwerte für PM10 und PM2,5 festgelegt worden. Dennoch werden die Maßzahlen oft kritisiert, denn auf der einen Seite werden die

spezifischen Inhaltsstoffe der Stäube selbst nicht herangezogen. Auf der anderen Seite wird die Groendifferenzierung jedes Holzstaubpartikels nicht ausreichend in Kalkulationen miteinbezogen (Birmili et al. 2014).

Selbst wenn Filter, Entstauber und die gesamten Absauganlagen für die jeweilige Partikelgröße passend gebaut und verwendet werden könnten, würde es früher oder später unweigerlich zu Verstopfungen kommen, da in der Regel nicht nur ein Spannkollektiv einer Größe vorhanden ist. Der Staub würde vor Ein- und Durchtritt in die Entstaubungstechnologie entweichen und sich in der Raumluft verteilen. Folglich wird der Schluss gezogen, dass trotz des ständigen technischen Fortschrittes, eine verbesserte Technologie nicht zwingend zu einer Verbesserung der Entstaubung selbst führt. Insbesondere gilt dies für Holzstaubfraktionen von einer Größenverteilung von $<PM_{10}$. Einerseits müssten die Filter größer werden, um effizienter und länger Staub absaugen zu können. Dies würde andererseits auf ökonomische, aber auch auf technische Grenzen stoßen und wäre somit schwer realisierbar.

Folgernd wäre, dass der Holzstaub bereits während der Bearbeitungsprozesse entfernt werden muss, nämlich durch Agglomeration gegenpoliger triboelektrischer Aufladungen. Denn auf Grund des technologischen Fortschrittes werden immer mehr Ansauganlagen, Filter, Entstauber so effizient gestaltet, dass fast alle groben Staubpartikel entfernt werden können. Doch es sind die kleinen Partikel, von denen die größten Gefahren ausgehen. Sie haben keine Möglichkeit sich an die größeren Staubfraktionen anzuhafte, da alle bereits erfolgreich entfernt wurden und verweilen und streuen somit in der Luft.

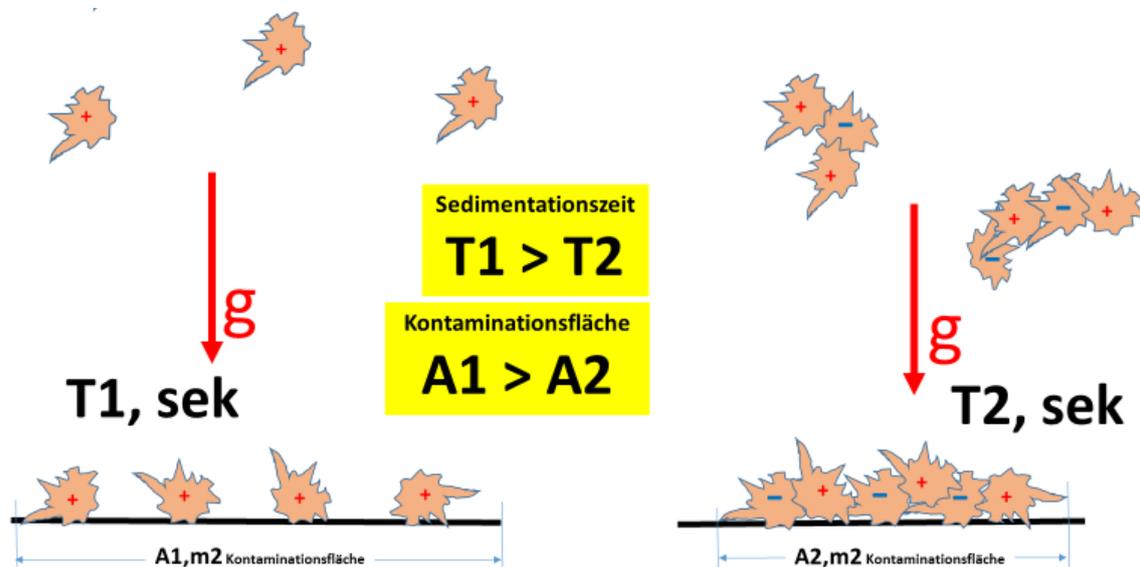


Abb.34.: Partikelaggregation (Myna 2019).

In getrennt geführten Strömungskammern lassen sich die Holzpartikel gegenpolig aufladen. Bei der Zusammenführung der Partikelströme kommt es somit zur Partikelaggregation. Aus Feinstaub wird somit Grobstaub wie in

Abb.34. dargestellt. Dies hat den Vorteil, dass die Sedimentationszeit von T1 auf T2 verringert wird, ebenso wie die Kontaminationsfläche von A1 auf A2.

Ohne den triboelektrischen Effekt stoßen sich gleichpolige Teilchen gegenseitig ab. Dies bewirkt eine vollflächige, homogene Belastung der Filteroberfläche. Bei der primären Entstaubung kommt es zur Ausbildung von einer sehr dünnen, undurchlässigen Staubschicht. Dies hat zu Folge, dass innerhalb kürzester Zeit eine immer geringere Durchlässigkeit erreicht wird, bis dies letztendlich zu einer vollkommenen Verstopfung des Filters führt.

Im Gegenzug dazu wird in Abb.35. das Prinzip der Agglomeration durch gegenpoliger triboelektrischer Aufladung erklärt. Mit den triboelektrischen Effekt ziehen sich gegenpoligen Partikel an. Durch die Anziehung werden die Teilchen ausgebremst. Der Staubkuchen ist somit nicht vollflächig, sondern neutral, porös und dick. Dies führt zu einer erhöhten Durchlässigkeit. In Wechselwirkung zu der primären Entstaubung steht die sekundären Vorentstaubung. Es kommt durch die triboelektrische Zusammenführung zu einer Geschwindigkeitsreduktion von $v_2 < v_1$. Weiters finden mechanische Verankerungen von den Staubteilchen unmittelbar vor und an der Filteroberfläche statt. Bei der primären Entstaubung im Filter selbst, kommt es zur Ausbildung von einer porösen, undurchlässigen Holzstaubschicht.

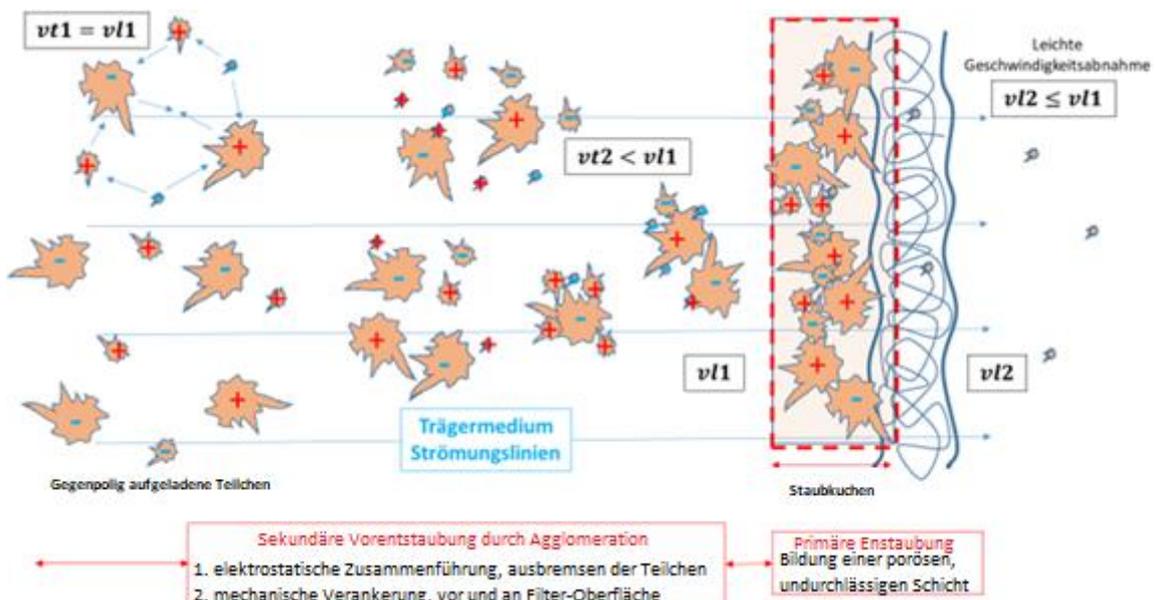


Abb.35.: Prinzip der Agglomeration durch gegenpoliger triboelektrischer Aufladung (Myna 2019).

5. Schlussfolgerung

In der Holzindustrie stellte sich der durch die Ver- und Bearbeitungsprozesse entstandene Holzstaub ökonomisch, ökologisch und vor allem gesundheitlich als große Herausforderung heraus. Ziel war es, durch die Forschung der triboelektrischen Aufladung von Holzstaub, den bei den Schleifprozessen anfallenden Schleifstaub noch während der Ver- und Bearbeitung selbst zu entfernen und somit auf allen drei Ebenen eine mögliche Lösung anzubieten.

Untersuchungsgegenstand waren die triboelektrischen Aufladungen von Holzstaub während des Bearbeitungsprozesses Schleifen. Die Probenmaterialien waren die Gruppe der Holzwerkstoffe mit der mitteldichten Faserplatte (MDF) und der Spanplatte (PB) und die Gruppe der Naturwerkstoffe mit Buche als Laub- und Fichte als Nadelholz. Nachträglich wurden weitere Untersuchungen bezüglich der elektrostatischen Aufladungen von Holzstaub von Nadelhölzern mit Tanne und Kiefer angestellt. Die Bearbeitungsparameter waren wie folgt:

Ein kleiner Schleifabtrag von 0,1mm, ein großer Schleifabtrag von 0,5mm. Weiters ein langsamer Vorschub von 4,5m/min und ein doppelt so schneller Vorschub von 9m/min. Letzter Parameter war eine grobe Körnung von P60 und eine feine Körnung von P100 des Schleifmittels.

Die gemessenen Daten aus den Schleifprozessen haben nachfolgende klare Trends gezeigt.

- Holzstaub hat immer eine einpolige Aufladung.
- Vollholz und Holzwerkstoffe unterschieden sich in ihrer Aufladung, bei denselben Bearbeitungsparametern.
- Weiters konnte festgestellt werden, dass Laubhölzer und Nadelhölzer unterschiedliche Aufladungen, bei den gleichen Bearbeitungsparametern haben.
- Nadelhölzer laden sich bei denselben Bearbeitungsparametern nicht gleich auf.
- Ausgewählte Holzproben in Interaktion mit bestimmten Prozessbedingungen sind immer gleichsinnig.

Es hat sich herausgestellt, dass mit einem geringeren Abtrag, stärkere Aufladungen einher gehen. Folglich fanden bei einem größeren Schleifabtrag von 0,5mm deutlich schwächere elektrische Aufladungen statt. Weiters wies Fichte sowohl in der ersten Gegenüberstellung wie auch in dem zweiten Vergleich eine Andersartigkeit bezugnehmend auf die Polarität auf. Die negativen elektrischen Ladungen, sind höchstwahrscheinlich auf das inhärente wärmehärtende Harz in den Naturwerkstoff zurückzuführen. Diesbezüglich bedarf es weitere Untersuchungen.

Wie bereits angemerkt wurde, enthalten Holzstaubpartikel während des mechanischen Schleifprozesses durchgehend eine triboelektrisch induzierte Aufladung. Daher sollen durch definierte gegenpolige Aufladungen des Holzstaubes, Partikel agglomeriert werden. Dies resultiert in reduzierten

Feinstaubanteilen und in einer reduzierten Staubwolkenbildung. Durch entworfene triboelektrische Aufladungsprozesse kann eine neuartige Staubentfernungstechnologie etabliert werden.

Die gemessenen triboelektrisch induzierten Aufladungen aus den Versuchsprozessen sind vorläufig und bedürfen einer ständigen Bestätigung und Erweiterung. Dabei müssen auch andere Bearbeitungsparameter wie beispielsweise abgenutzte Schleifmittel, Variationen des Schleifmittels sowie deren Korngrößen, unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalte im Holz selbst, lackierte und/ oder geölte Oberflächen der Hölzer, näher betrachtet werden. Weiteres Augenmerk muss auf die physikalische und chemische Zusammensetzung, welche die Aufladungen der Staubpartikel beeinflussen können, gelegt werden. Insbesondere ist eine genauere Untersuchung, bezogen auf den Einfluss des Harzgehaltes in den Hölzern, wie vor allem in dem der Fichte, unerlässlich. Nach einer Vielzahl an weiteren zukünftigen Untersuchungen in Interaktion mit anderen Bearbeitungsparametern, gilt es nicht nur die triboelektrische Aufladung beim Schleifen, sondern auch bei anderen Holzbearbeitungs- und Verarbeitungsprozessen zu untersuchen und somit eine Reduktion des Staubaufkommens in der gesamten Holzindustrie mittels triboelektrisch induzierter Aufladungen herbeizuführen.

6. Literaturverzeichnis

Abteilung Kommunikation der SCNAT (2006): Feinstaub PM10. Fragen und Antworten zu Eigenschaften, Emissionen, Immissionen, Auswirkungen und Massnahmen. Hg. v. Bundesamt für Umwelt BAFU. Online verfügbar unter <https://naturwissenschaften.ch/service/publications/76162-feinstaub-pm10>, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

AUVA (2019): Absauganlagen. M.plus 911 SICHERHEIT KOMPAKT. Hg. v. Bundesamt für Umwelt BAFU. Wien. Online verfügbar unter <https://www.auva.at/cdscontent/load?contentid=10008.660930&version=1537253905>, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Beier F.-J. (2005): Gesundheitliche Auswirkungen von Feinstaub. Zusammenfassung des aktuellen Kenntnisstandes. Hg. v. Gesundheitsamt Nürnberg. Online verfügbar unter <https://www.nuernberg.de/internet/gesundheitsamt/feinstaub.html>, zuletzt aktualisiert am 2015, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Birmili W., Rückerl R., Hoffmann B., Weinmayr G., Schins R., Kuhlbusch T. A. J., Vogel A., Weber K., Frank U., Cyrys J., Peters A. (2014): Ultrafeine Aerosolpartikel in der Außenluft: Perspektiven zur Aufklärung ihrer Gesundheitseffekte. In: Gefahrstoffe -Reinhaltung der Luft (11/12), S. 492–500. Online verfügbar unter http://wiki.tropos.de/images/2/25/Birmili_2014_GRdL.pdf, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Cartier G. T. (1970): High efficiency particulate air filter. In: United States Patent Office. Online verfügbar unter <https://patentimages.storage.googleapis.com/37/94/d8/ae6b478e94c740/US3490211.pdf>, zuletzt geprüft am 29.12.2019.

Eder D. (o.J.): Hartholz und Weichholz - Wo liegen die Unterschiede und womit heizt es sich am besten? Hg. v. Hoftechnik Portal für Landwirte. Online verfügbar unter <https://www.hoftechnik.at/lexikon/hartholz-und-weichholz-wo-liegen-die-unterschiede-und-womit-heizt-es-sich-am-besten/>, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Erbach A., Füchsel H., Grahl M., Grahl R., Kühnel J., Meilicke G., Tschernow D. (o.J.): Technische Regeln für Gefahrenstoffe (TRGS). Hg. v. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Online verfügbar unter <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/TRGS.html>, zuletzt geprüft am 19.12.2019.

European Commission (2019): Wood products - production and trade. Hg. v. eurostat Statistics Explained. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Wood_products_-_production_and_trade, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Georgiades M. (2019): Messdaten zum Projekt "Tribotools" (Bridge, Nr. 868027). Universität für Bodenkultur Wien.

Gross H. (2006): Wird die Gefahr unterschätzt? Feinstaub: Aus der Luft direkt ins Blut. In: MMW - Fortschritte der Medizin (6), S. 10. Online verfügbar unter <https://www.springermedizin.de/feinstaub-aus-der-luft-direkt-ins-blut/10339814?searchResult=1.feinstaub%20luft%20direkt%20blut&searchBackButton=true>, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Grosser D. (2004): Das Holz der Tanne - Verwendung und Eigenschaften. In: LWF-Wissen (45), S. 66–69. Online verfügbar unter https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/forsttechnik-holz/dateien/w45_das_holz_der_tanne_eigenschaften_verwendung.pdf, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Grosser D. (2007): Das Holz der Kiefer - Eigenschaften und Verwendung. In: LWF-Wissen (57), S. 67–72. Online verfügbar unter http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/waldschutz/dateien/lwf-wissen_57-12.pdf, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Hahn J.-U., Möhlmann C. (2011): Neuer A-Staub-Grenzwert - Aspekt für dessen Anwendung. In: Gefahrstoffe -Reinhaltung der Luft (10), S. 429–432. Online verfügbar unter https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2011_137.pdf, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Halbedel B. (2014): Versuch: Dielektrische Eigenschaften von Materialien (WSW). Hg. v. Technische Universität Ilmenau. Institut für Werkstofftechnik. Online verfügbar unter https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/wt/Lehre/Praktikum/Werkstoffwissenschaft_WSW/5._Fachsemester/2014-DieEig_WSW.pdf, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Health and Safety Executive (2012): Wood dust: Controlling the risks WIS23. Hg. v. HSE (woodworking sheet Nr 23). Online verfügbar unter <http://www.hse.gov.uk/pubns/wis23.htm>, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Heisel U., Weiss E. (1991a): Entstehung, Erfassung und Messung von Holzstaub. Ligna Report 2. Teil. In: Die Holzbearbeitung 38 (7), S. 47–50. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.18419/opus-4199>, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Heisel U., Weiss E. (1991b): Holzstaub-ein neuer Gefahrstoff, S. 37–43. Online verfügbar unter <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/4215/1/hei77.pdf>, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Holzforschung Austria – Österreichische Gesellschaft für Holzforschung (2017): MDF. Hg. v. dataholz.eu. Online verfügbar unter https://www.dataholz.eu/fileadmin/dataholz/media/baustoffe/Datenblaetter_de/mdf.de_01.pdf, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Holzinfo (Puuinfo) (o.J.): Spanplatten. Hg. v. Woodproducts fi. Helsinki. Online verfügbar unter <https://www.woodproducts.fi/de/content/spanplatten>, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Kapelari S., Kerschhagl J., Lurf I., Panzenböck K., Pürgy R. (2011): Holzstaub. Leitfaden. Unter Mitarbeit von Bruckner H., Exel R., Griebler T., Handl R., Körbler

R., Schögl J., Schönfuß D. Hg. v. Österreichische Arbeitsschutzstrategie 2007-2012. Bundesministerium für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz. Wien. Online verfügbar unter <https://www.arbeitsinspektion.gv.at/Suchergebnis.html?query=leitfaden+holzstaub>, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Kleinwächter GmbH (2017): Handbuch. Elektronenfeldmeter EFM 115. Hg. v. Kleinwächter GmbH. Online verfügbar unter https://www.kleinwaechtergmbh.de/cms/upload/downloads/handbuecher/elektrofeldmeter/EFM_115_HB_D.pdf, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Krämer G. (2019): Absaugung von Holzstaub und Spänen - eine energieaufwändige und organisatorische Herausforderung. Hg. v. BISTECH Fachinformationen. Beratungs- und Informationssystem für Technologietransfer im Handwerk. Online verfügbar unter <http://fachinfo.bistech.de/pdf/455/Absaugung+von+Holzstaub+und+Sp%C3%A4nen.>, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Kubel H., Weißmann G., Lange W. (1988): Untersuchungen zur Cancerogenität von Holzstaub. In: Holz als Roh- und Werkstoff (46), S. 215–220. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02608116>, zuletzt geprüft am 14.12.2019.

Lathrache R., Fißan H. (1989): Grundlegende Untersuchungen zum Abscheideverhalten der Elektret-Filter. In: Staub Reinhaltung der Luft, S. 309–314. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/285049197_Grundlegende_Untersuchungen_zum_Abscheideverhalten_der_Elektret-Filter_Teil_1_Bestimmung_der_Abscheidegrade, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Lutze M. (2016): Buchenholz - Rohstoff für heute und morgen. Klimawandel, Waldumbau, Bevölkerungswachstum, Rohstoffversorgung: die Buche ist und bleibt aktuell. In: LWF aktuell (2), S. 16–19. Online verfügbar unter http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/forsttechnik-holz/bilder/a109_buchenholz_rohstoff_fuer_heute_und_morgen_gesch.pdf, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Markovski F. (2008): TRGS 553 HOLZSTAUB. Neufassung akzeptabel. In: DDS online. Das Magazin für Möbel und Ausbau 2008 (11). Online verfügbar unter <https://www.dds-online.de/allgemein/neue-trgs-553-holzstaub-veroeffentlicht/>, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

McCarty L. S., Whitesides G. M. (2008): Elektrostatische Aufladung durch Separierung von Ionen an Grenzflächen: Kontaktelektrisierung von ionischen Elektreten. In: Angewandte Chemie (120), S. 2218–2239. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1002/ange.200701812>, zuletzt geprüft am 19.12.2019.

Myna R. (2019): mündliche Mitteilung vom 04.12.2019.

Myna R., Frybort S., Hellmayr R., Lieber F., Wimmer R. (2020): Triboelectrical charging of wood: a neglected wood property with potential applications.

Accepted Abstract for the 63rd International Convention, Portoroz, Slovenia, July 12-17, 2020.

Pan S., Zhang Z. (2018): Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review. In: Friction 7 (1), S. 1–16. DOI: 10.1007/s40544-018-0217-7.

Richter K., Ehmke G. (2017): Das Holz der Fichte. In: LWF-Wissen (80), S. 117–124. Online verfügbar unter http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/forsttechnik-holz/dateien/w80_richter_holz_der_fichte.pdf, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Schatzl M. (2019): Branchen Bericht 2018/19. EIN ROHSTOFF VOLLER LEBEN HOLZ. Hg. v. Fachverband der Holzindustrie Österreichs. Online verfügbar unter <https://www.wko.at/branchen/industrie/holzindustrie/branchenbericht-2018-2019.pdf>, zuletzt geprüft am 08.11.2019.

Schneider A. (o.J.): Holzarten und Hölzer für das Holzwerken. Hg. v. DIY Digital GmbH. Online verfügbar unter <https://www.heimwerker.de/holzarten-uebersicht-der-heimwerker-holzguide/>, zuletzt geprüft am 07.11.2019.

Schuller K. (2012): Holzstaub - die unsichtbare Gefahr. Hg. v. DER Fuchs GmbH. Online verfügbar unter <https://www.befestigungsfuchs.de/blog/holzstaub-die-unsichtbare-gefahr/>, zuletzt geprüft am 07.11.2019.

Stehno G. (1981): Baustoffe und Baustoffprüfung. Wien: Springer Verlag 1981. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-8632-9_9, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Thienel K.-Ch. (2016): Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens. Holz. Hg. v. Universität der Bundeswehr München. Online verfügbar unter <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium/skripte-werkstoffe/holz-2018.pdf/download.>, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Waldverband Österreich (2017): Zahlen - Daten - Fakten Hintergrundinformationen zu Wald und Forstwirtschaft in Österreich. "Baum fällt" - Waldbewirtschaftung hautnah erleben. Hg. v. wv waldverband österreich. Online verfügbar unter https://www.waldverband.at/wp-content/uploads/2017/06/Zahlen_Daten_Fakten_Pressefahrt_END.pdf, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Weißmann G., Lange W., Kubel H., Wenzel-Hartung R. (1992): Untersuchungen zur Cancerogenität von Holzstaub. In: Holz als Roh- und Werkstoff (50), S. 421–428. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02662779>, zuletzt geprüft am 14.12.2019.

Welling I., Lehtimäki M., Rautio S., Lähde T., Enbom S., Hynynen P., Hämeri K. (2008): Wood dust particle and mass concentrations and filtration efficiency in sanding of wood materials. In: Journal of occupational and environmental hygiene 6 (2), S. 90–98. DOI: 10.1080/15459620802623073.

Abbildungsverzeichnis

Abb.1.:	Ablagerungen von Feinstaub im menschlichen Atemtrakt (Abteilung Kommunikation der SCNAT 2006, https://www.auva.at/cdscontent/load?contentid=10008.660930&version=1537253905).....	11
Abb.2.:	Triboelektrische Reihe (Fuhrer M. 2013, https://www.yumpu.com/de/document/read/26989416/3-4-fuhrer-emtest-leitungsgebundene-immunitaetpdf/5).....	14
Abb.3.:	Räumliche Trennsperre eines Filtermediums (Myna R. 2019, unpublished).....	16
Abb.4.:	Zusammenfassung der Korngrößenverteilung des Holzstaubs P100 (Georgiades M. 2019, unpublished).....	18
Abb.5.:	a. Buche, Fichte, MDF und PB; b. Tanne und Kiefer (Fotos: Lisa Doni).....	19
Abb.6.:	(von oben li. nach unten re.) Holzstaubgemisch von Schleifprozess von Fichte P60, Buche P60, PB P60, MDF P60, Fichte P100, Buche P100, PB P100 und MDF P100 (Foto: Lisa Doni.....)	20
Abb.7.:	a. Messbox (Foto: Lisa Doni); b. Messbox (Myna R. 2019, unpublished).....	21
Abb.8.:	a. Breitbandschleifmaschine; b. Zyklon und Patronenfilter (Fotos: Lisa Doni).....	22
Abb.9.:	Versuchsablauf während des Bearbeitungsprozesses Schleifen (Myna R. 2019, unpublished).....	23
Abb.10.:	a. Holzstaubgemisch der Fichte P60; b. Holzstaubgemisch der Fichte P100 (eigene Darstellungen).....	26
Abb.11.:	a. Holzstaubgemisch der Buche P60; b. Holzstaubgemisch der Buche P100 (eigene Darstellungen).....	26
Abb.12.:	a. Holzstaubgemisch von MDF P60; b. Holzstaubgemisch von MDF P100 (eigene Darstellungen).....	27
Abb.13.:	a. Holzstaubgemisch von PB P60; b. Holzstaubgemisch von PB P100 (eigene Darstellungen).....	27
Abb.14.:	Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei einem Schleifabtrag von 0,1mm bzw. einem Vorschub von 4,5m/min.....	28
Abb.15.:	Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei einem Schleifabtrag von 0,1mm bzw. einem Vorschub von 9m/min.....	29

- Abb.16.: Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei einem Schleifabtrag von 0,5mm bzw. einem Vorschub von 4,5m/min.....30
- Abb.17.: Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei einem Schleifabtrag von 0,5mm bzw. einem Vorschub von 9m/min. Anmerkung: Die MDF P100 Linie überlagert jene von PB P100. Deshalb gelbe Linienfarbe für PB P100.....31
- Abb.18.: Elektrostatische Aufladungen von Holzpartikel von Fichte (Fi), Buche (Bu), MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte) bei einer Körnung von P60 und einem abgetragenen Staubvolumen von 5cm³.....32
- Abb.19.: Elektrostatische Aufladungen von Holzpartikel von Fichte (Fi), Buche (Bu), MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte) bei einer Körnung von P100 und einem abgetragenen Staubvolumen von 5cm³.....33
- Abb.20.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 4,5m/min, (2) einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 9m/min, (3) einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (4) einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 9m/min.....36
- Abb.21.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 4,5m/min, (2) einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 9m/min, (3) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (4) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 9m/min.....38
- Abb.22.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel von Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei einem (1) Abtrag von 0,1mm und der Körnung P60, (2) einem Abtrag von 0,1mm und einer Körnung von P100, (3) einem Abtrag von 0,5mm und einer Körnung von P60, sowie (4) einem Abtrag von 0,5mm mit einer Körnung P100.....39
- Abb.23.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einem Vorschub von 4,5m/min mit einer Körnung P60, (2) einem Vorschub von 9m/min mit einer Körnung P60, (3) einem Vorschub von 4,5m/min mit einer Körnung P100, sowie (4) einem Vorschub von 9m/min mit einer Körnung P100.....41
- Abb.24.: Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 4,5m/min, (2) einer Körnung von

	P60 mit einem Vorschub von 9m/min, (3) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (4) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 9m/min.....	45
Abb.25.:	Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 4,5m/min, (2) einem Abtrag von 0,1mm mit einem Vorschub von 9m/min, (3) einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (4) einem Abtrag von 0,5mm mit einem Vorschub von 9m/min.....	46
Abb.26.:	Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einem Abtrag 0,1mm mit einer Körnung P60, (2) einem Abtrag von 0,1mm mit einer Körnung von P100, (3) einem Abtrag von 0,5mm mit einer Körnung von P60, sowie (4) einem Abtrag von 0,5mm mit einer Körnung von P100.....	47
Abb.27.:	Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Buche, MDF (mitteldichte Faserplatte) und PB (Spanplatte), bei (1) einer Körnung P60 mit einem Vorschub von 4,5m/min, (2) einer Körnung von P60 mit einem Vorschub von 9m/min, (3) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (4) einer Körnung von P100 mit einem Vorschub von 9m/min.....	48
Abb.28.:	Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Tanne und Kiefer, bei einem Schleifabtrag von 0,1mm bzw. einem Vorschub von 4,5m/min.....	50
Abb.29.:	Elektrostatische Aufladung [kV/m] von unterschiedlichen großen Holzpartikel von Fichte, Tanne und Kiefer, bei einem Schleifabtrag von 0,1mm bzw. einem Vorschub von 4,5m/min.....	51
Abb.30.:	Elektrostatische Aufladungen der Partikel von Fichte, Tanne und Kiefer, bei (1) einer Körnung von P60, sowie (2) einer Körnung von P100.....	53
Abb.31.:	Elektrostatische Aufladungen der Partikel von (1) Fichte, (2) Tanne, sowie (3) Kiefer, bei einer Körnung von P60 und P100, sowie bei einem Vorschub von 4,5m/min und 9m/min.....	54
Abb.32.:	Elektrostatische Aufladungen der Partikel von Fichte, Tanne und Kiefer, bei (1) einer Körnung von P60, sowie (2) einer Körnung von P100.....	54
Abb.33.:	Elektrostatische Aufladungen der Partikel Fichte, Tanne und Kiefer, bei (1) einem Vorschub von 4,5m/min, sowie (2) einem Vorschub von 9m/min.....	55
Abb.34.:	Partikelaggregation (Myna R. 2019, unpublished).....	65
Abb.35.:	Prinzip der Agglomeration durch gegenpoliger triboelektrischer Aufladung (Myna R. 2019, unpublished).....	66

Tabellenverzeichnis

Tab.1.:	Mögliche, durch Holzstaub ausgelöste und nachgewiesene Krankheiten (eigene Darstellung) (Schuller K. 2012, https://www.befestigungsfuchs.de/blog/holzstaub-die-unsichtbare-gefahr/).....	12
Tab.2:	Übersicht der Untersuchungsproben von P100 (Georgiades M. 2019, unpublished).....	17
Tab.3.:	Prozentuelle Aufteilung der Korngrößenverteilung von P100 (Georgiades M. 2019, unpublished).....	18
Tab.4.:	Deskriptive Statistik der elektrostatischen Aufladung.....	34
Tab.5.:	Anzahl der Messwerte je Faktor der ANOVA.....	34
Tab.6.:	Tests der Zwischensubjekteffekte in der SPSS Auswertung	35
Tab.7.:	Anzahl der Messwerte je Faktor der ANOVA.....	42
Tab.8.:	Tests der Zwischensubjekteffekte in der SPSS Auswertung.....	43
Tab.9.:	Deskriptive Statistik der elektrostatischen Aufladung.....	51
Tab.10.:	Anzahl der Messwerte je Faktor der ANOVA.....	51
Tab.11.:	Tests der Zwischensubjekteffekte in der SPSS Auswertung.....	52

Abkürzungsverzeichnis

BAT	Biologischer Arbeitsstoff-Toleranzwert
GKV	Grenzwertverordnung
HEPA	High Efficiency Particular Airfilter
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MDF	Mitteldichte Faserplatten (engl. medium density fiberboard)
PM	Particular Matter
PB	Pressspanplatte (engl. particle board)
TRGS	Technische Regeln für Gefahrenstoffe
UFP	Ultrafeine Partikel

Anhang

Materialliste

Holzart	Probe	Masse [g]	Radial	Tangential
Fichte	01	1435,5	90	
Fichte	02	1324,5	90	
Fichte	03	1435	90	
Fichte	05	1330,5	90	
Fichte	06	1395,5		65
Fichte	07	1360,5		70
Fichte	08	1322	90	
Fichte	14	1443,5		60

Holzart	Probe	Masse [g]	Radial	Tangential
Buche	01	1787		60
Buche	02	1833,5		75
Buche	03	1814,5	90	
Buche	04	1817		70
Buche	05	1853	90	
Buche	06	1763,5		70
Buche	07	1786		65
Buche	08	1863,5		80

Holzart	Probe	Masse [g]
MDF	01	1523
MDF	02	1518
MDF	03	1519
MDF	04	1521,5
MDF	05	1517,5
MDF	06	1514
MDF	07	1533
MDF	08	1514

Holzart	Probe	Masse [g]
PB	01	1334
PB	02	1334
PB	03	1332,5
PB	04	1339,5
PB	05	1306
PB	06	1336,5
PB	07	1315,5
PB	08	1300,5

Holzart	Probe	Masse [g]
Tanne	04	1238
Tanne	05	1236,5
Tanne	07	1239,5
Tanne	10	1237

Holzart	Probe	Masse [g]
Kiefer	02	1474,5
Kiefer	03	1477
Kiefer	06	1479
Kiefer	07	1476,5

Versuchsplan 1 von Fichte, Buche, MDF und PB

Run	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
	Kornpapier	Vorschub [m/min]	Abtrag [mm]	Holzart
1	P60	4,5	0,1	Buche
2	P100	4,5	0,1	Fichte
3	P100	9	0,1	PB
4	P60	9	0,1	PB
5	P60	4,5	0,5	Fichte
6	P100	9	0,5	Fichte
7	P100	4,5	0,5	Fichte
8	P100	4,5	0,1	PB
9	P60	9	0,1	MDF
10	P60	9	0,5	PB
11	P60	4,5	0,5	Buche
12	P60	9	0,5	Buche
13	P60	4,5	0,1	Fichte
14	P60	4,5	0,1	PB
15	P100	4,5	0,1	Buche
16	P60	9	0,5	Fichte
17	P60	4,5	0,5	PB
18	P100	9	0,1	Buche
19	P100	4,5	0,1	MDF
20	P100	9	0,1	Fichte
21	P60	9	0,1	Fichte
22	P100	4,5	0,5	Buche
23	P100	4,5	0,5	MDF
24	P60	9	0,1	Buche
25	P60	4,5	0,5	MDF
26	P100	4,5	0,5	PB
27	P100	9	0,5	PB
28	P60	9	0,5	MDF
29	P60	4,5	0,1	MDF
30	P100	9	0,5	Buche
31	P100	9	0,5	MDF
32	P100	9	0,1	MDF

Versuchsplan 2 von Tanne und Kiefer

Run	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
	Kornpapier	Vorschub [m/min]	Holzart
1	P60	4,5	Tanne
2	P100	4,5	Tanne
3	P100	9	Kiefer
4	P60	9	Tanne
5	P60	4,5	Kiefer
6	P100	9	Tanne
7	P100	4,5	Kiefer
8	P60	9	Kiefer

Berechnungen - Staubvolumen [cm³] abhängig vom Vorschub und vom Abtrag

$l=63\text{cm}; b=9,3\text{cm}$ Fläche: $63 \times 9,3 = 585,9 \text{ cm}^2$

$V: 585,9 \text{ cm}^2 \times 0,01 \text{ cm} = 5,859 \text{ cm}^3$ $585,9 \text{ cm}^2 \times 0,05 \text{ cm} = 29,295 \text{ cm}^3$

Abtrag: 0,1mm Vorschub: 4,5 m/min („Vorschub doppelt so schnell, braucht

0,5 mm 9 m/min die Hälfte der Zeit in Sekunden“)

4,5 m/min: 1min = 4,5 m

? min = 0,63 m $0,63/4,5 = 0,14 \text{ min} (\times 60) = 8,4 \text{ sek}$

9 m/min: 1 min = 9 m

? min = 0,63 m $0,63/9 = 0,07 \text{ min} (\times 60) = 4,2 \text{ sek}$

-Volumen v. Abtrag 0,1 mm mit verschiedenen Geschwindigkeiten

$V=5,859 \text{ cm}^3$

$5,859 \text{ cm}^3/8,4 \text{ sek} = 0,6975 \text{ cm}^3$ (: 1/5) $0,1395 \text{ cm}^3$

$5,859 \text{ cm}^3/4,2 \text{ sek} = 1,395 \text{ cm}^3$ (: 1/5) $0,279 \text{ cm}^3$

-Volumen v. Abtrag 0,5 mm mit verschiedenen Geschwindigkeiten

$V=29,295 \text{ cm}^3$

$29,295 \text{ cm}^3/8,4 \text{ sek} = 3,4875 \text{ cm}^3$ (: 1/5) $0,6975 \text{ cm}^3$

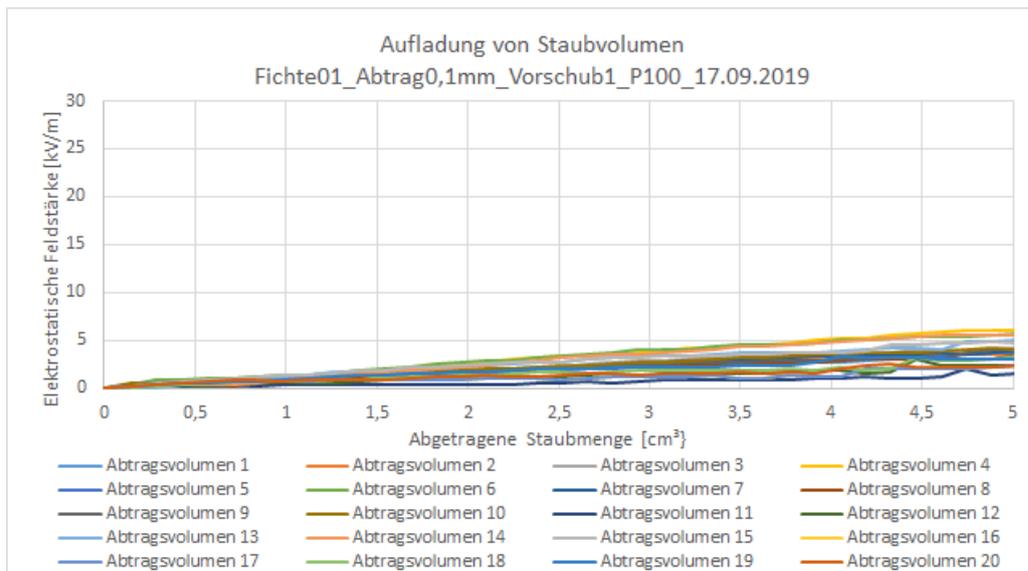
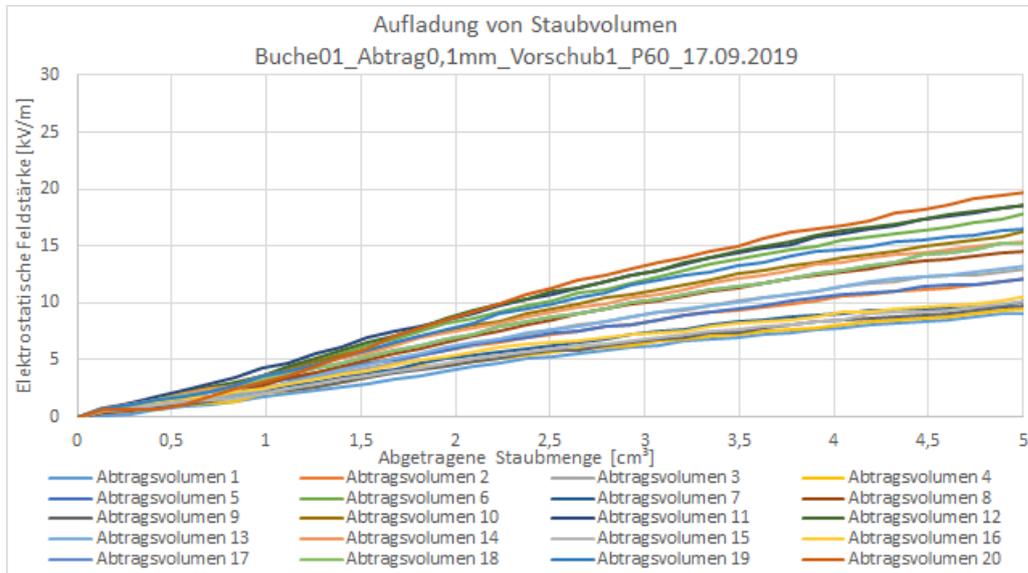
$29,295 \text{ cm}^3/4,2 \text{ sek} = 6,975 \text{ cm}^3$ (: 1/5) $1,395 \text{ cm}^3$

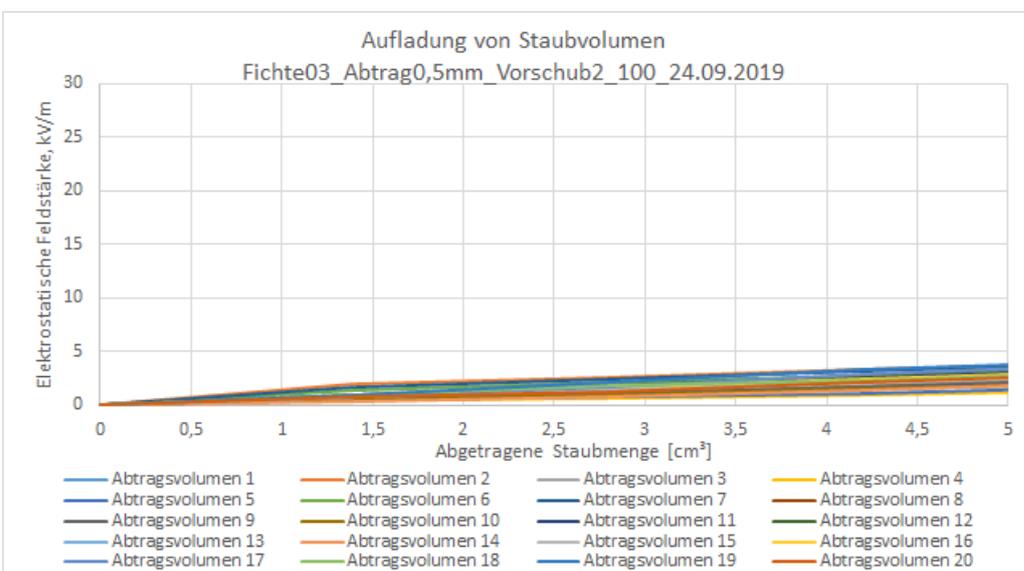
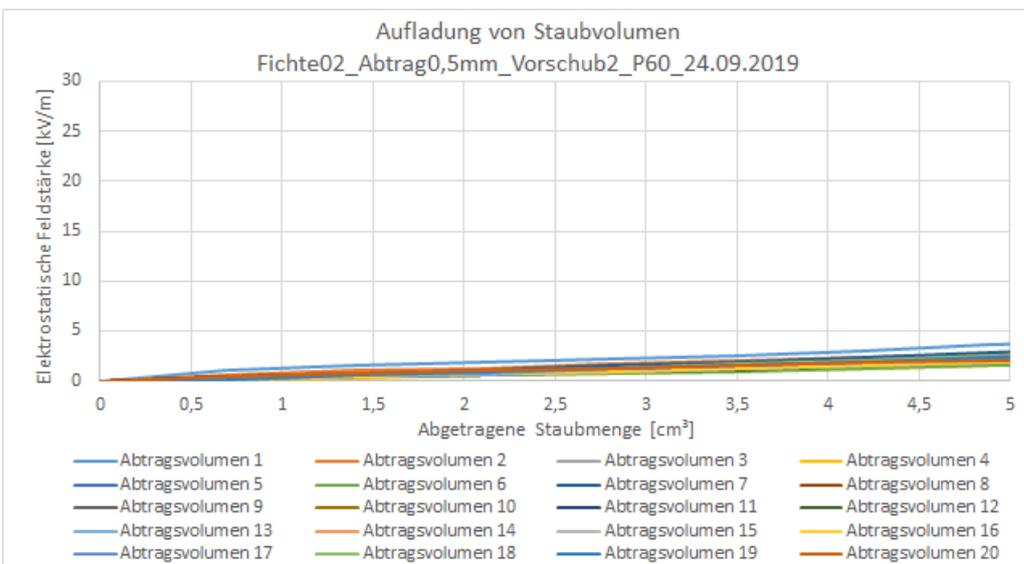
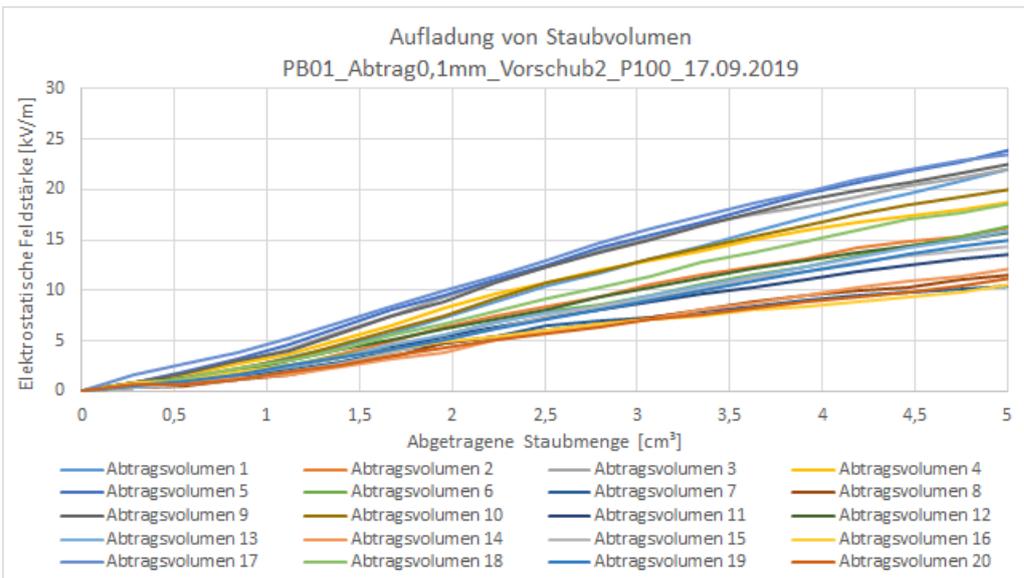
(„1/5 d. Sek., da 5x pro Sek gemessen wird“)

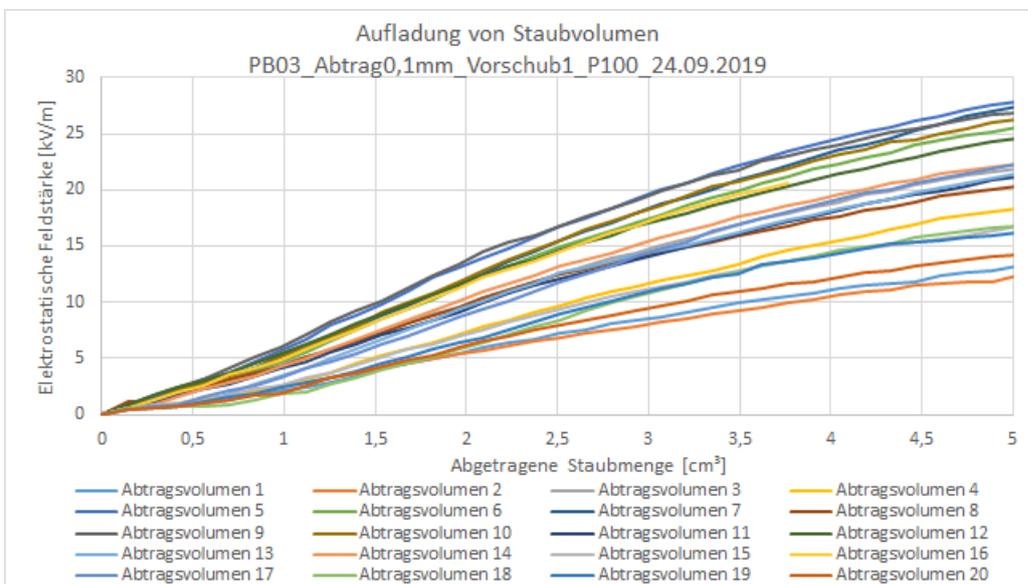
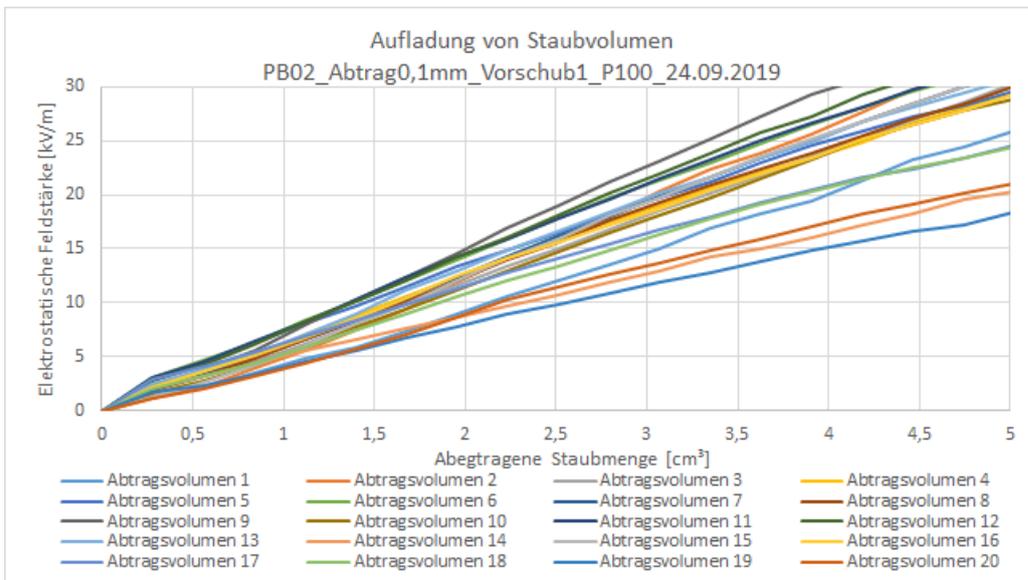
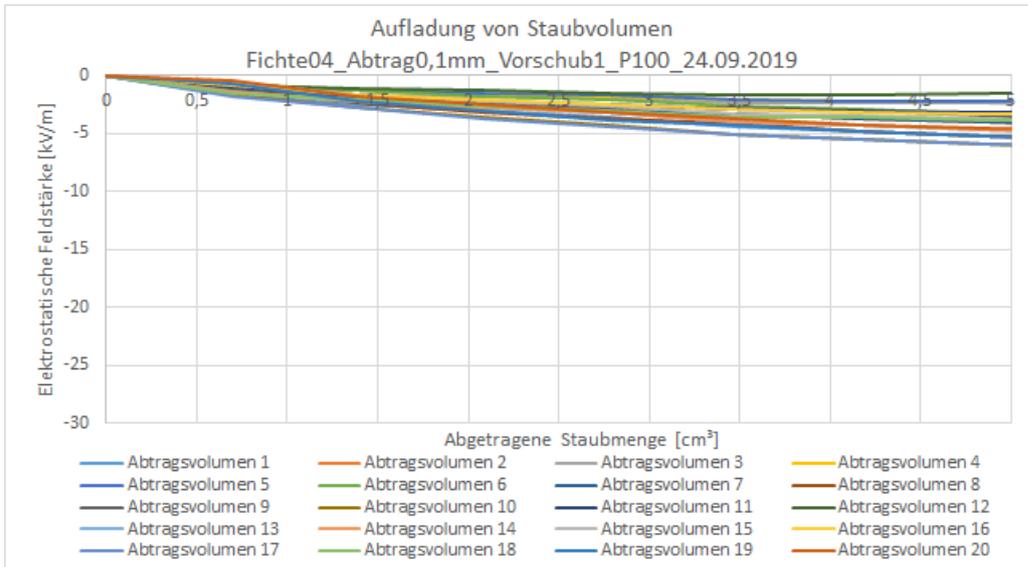
(„das 10fache von 0,1mm/4,5 m/min ($0,1395 \text{ cm}^3$) = 0,5mm/4,5 m/min ($1,395 \text{ cm}^3$)“)

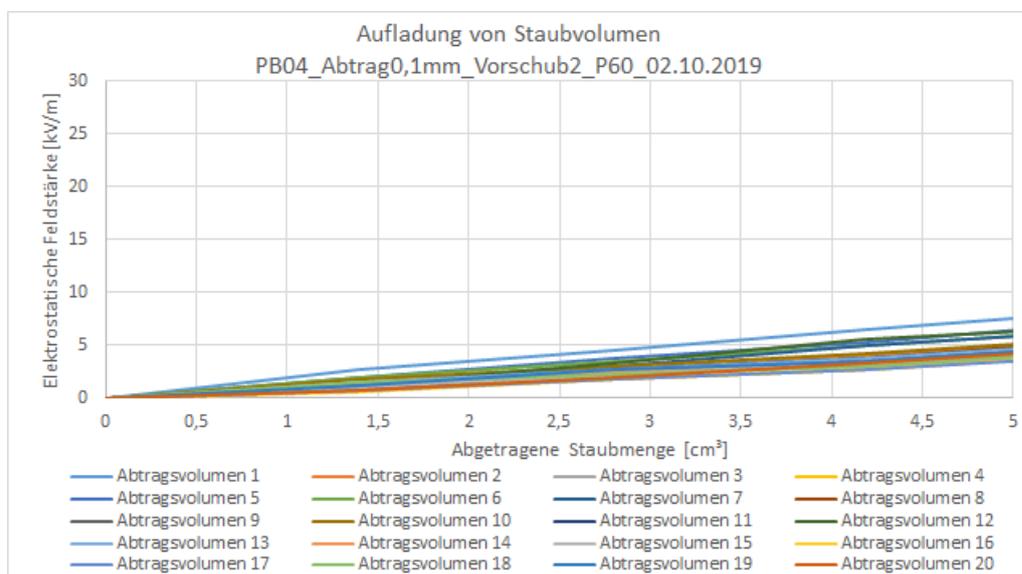
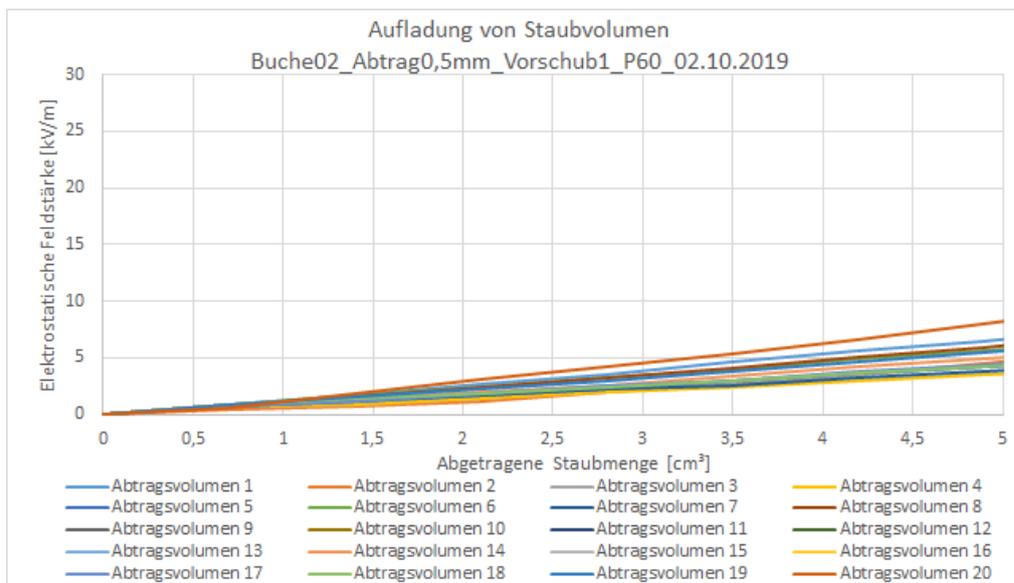
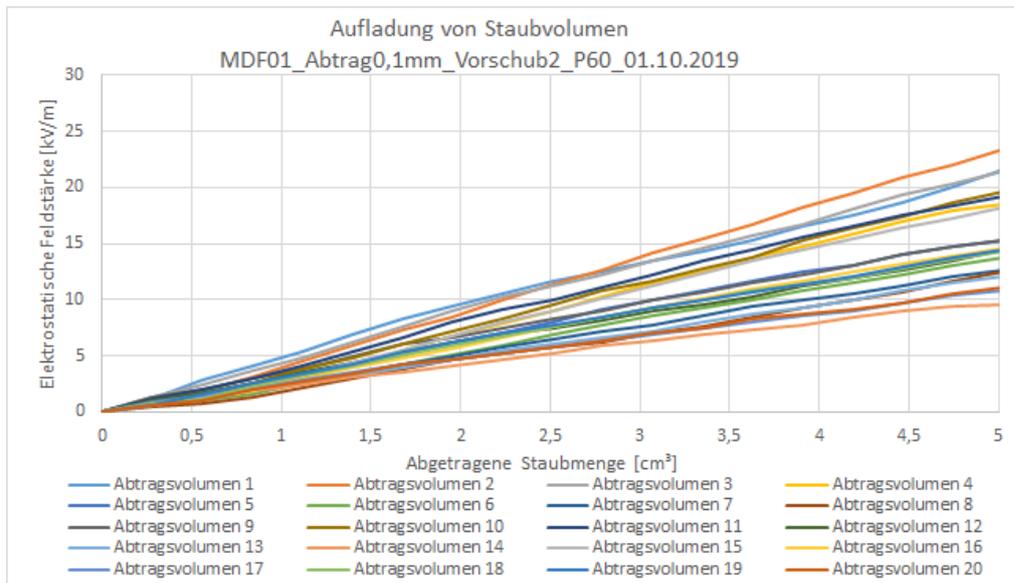
	Abtrag 0,1mm		Abtrag 0,5mm	
	Volumen Vorschub 4,5 m/min	Volumen Vorschub 9 m/min	Volumen Vorschub 4,5 m/min	Volumen Vorschub 9 m/min
0	0	0	0	0
200	0,1395	0,279	0,6975	1,395
400	0,279	0,558	1,395	2,79
600	0,4185	0,837	2,0925	4,185
800	0,558	1,116	2,79	5,58
1000	0,6975	1,395	3,4875	6,975
1200	0,837	1,674	4,185	8,37
1400	0,9765	1,953	4,8825	9,765
1600	1,116	2,232	5,58	11,16
1800	1,2555	2,511	6,2775	12,555
2000	1,395	2,79	6,975	13,95
2200	1,5345	3,069	7,6725	15,345
2400	1,674	3,348	8,37	16,74
2600	1,8135	3,627	9,0675	18,135
2800	1,953	3,906	9,765	19,53
3000	2,0925	4,185	10,4625	20,925
3200	2,232	4,464	11,16	22,32
3400	2,3715	4,743	11,8575	23,715
3600	2,511	5,022	12,555	25,11
3800	2,6505	5,301	13,2525	26,505
4000	2,79	5,58	13,95	27,9
4200	2,9295	5,859	14,6475	29,295
4400	3,069	6,138	15,345	30,69
4600	3,2085	6,417	16,0425	32,085
4800	3,348	6,696	16,74	33,48
5000	3,4875	6,975	17,4375	34,875
5200	3,627	7,254	18,135	36,27
5400	3,7665	7,533	18,8325	37,665
5600	3,906	7,812	19,53	39,06
5800	4,0455	8,091	20,2275	40,455
6000	4,185	8,37	20,925	41,85

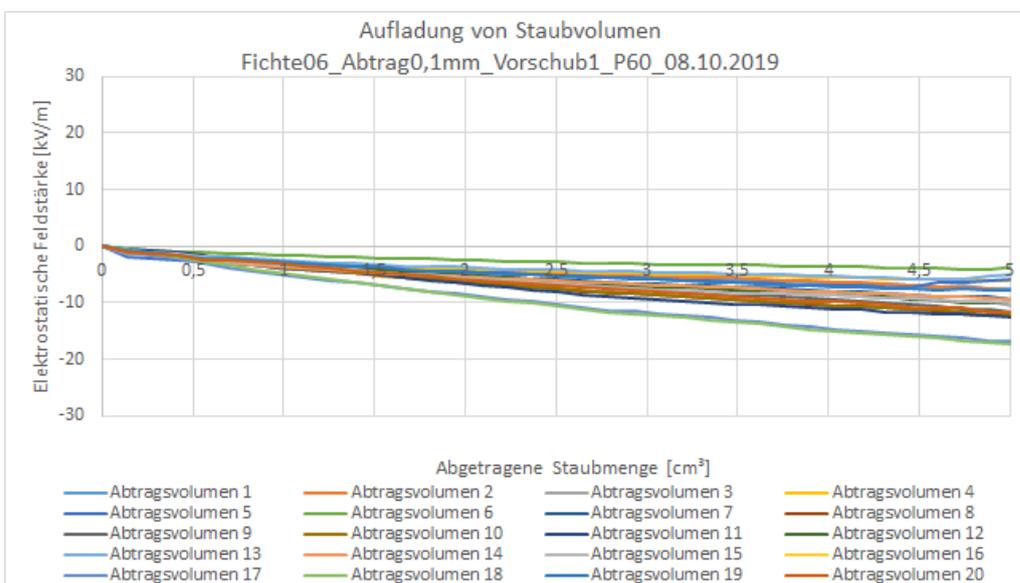
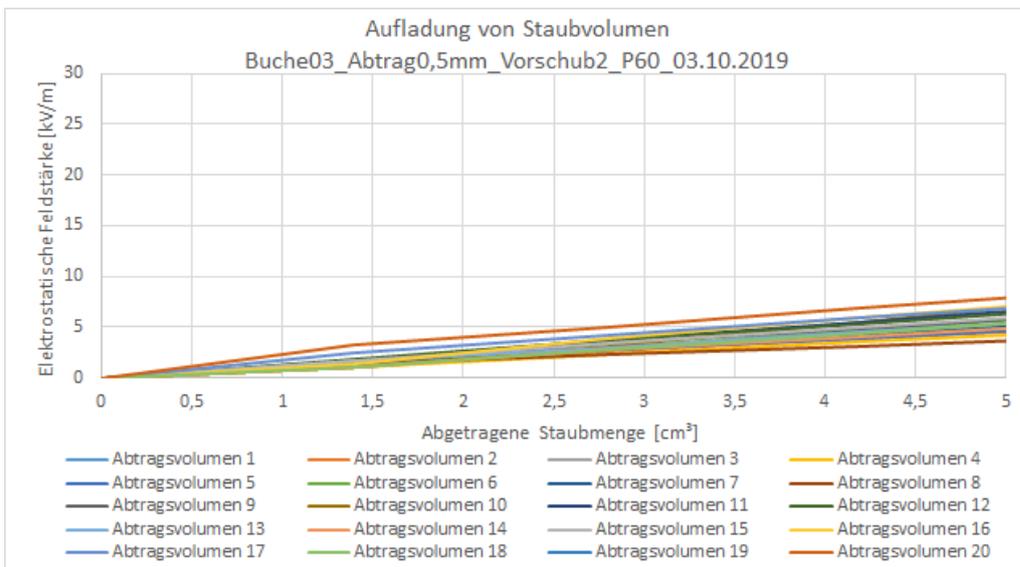
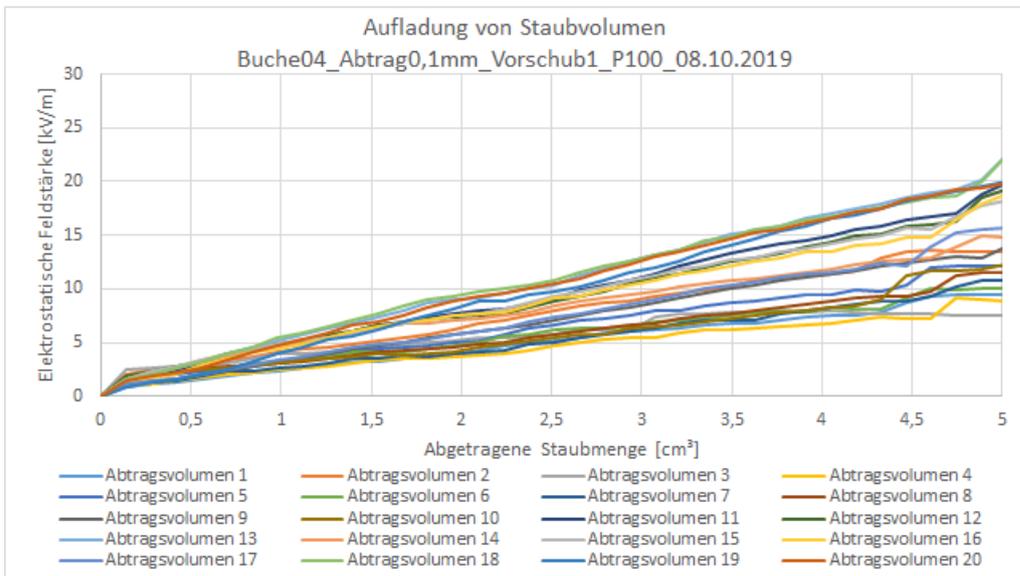
Vorauswertung Versuchsplan 1

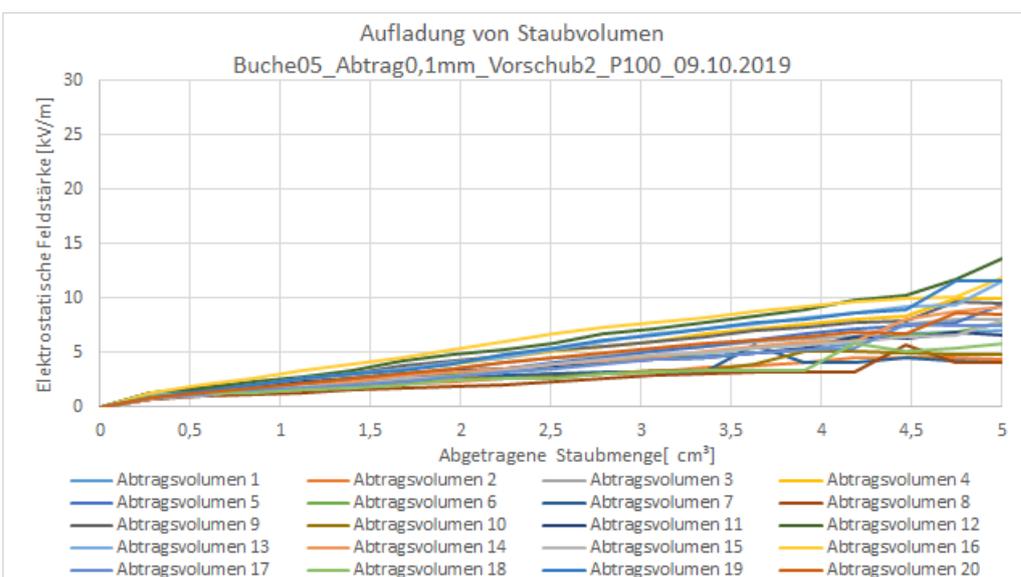
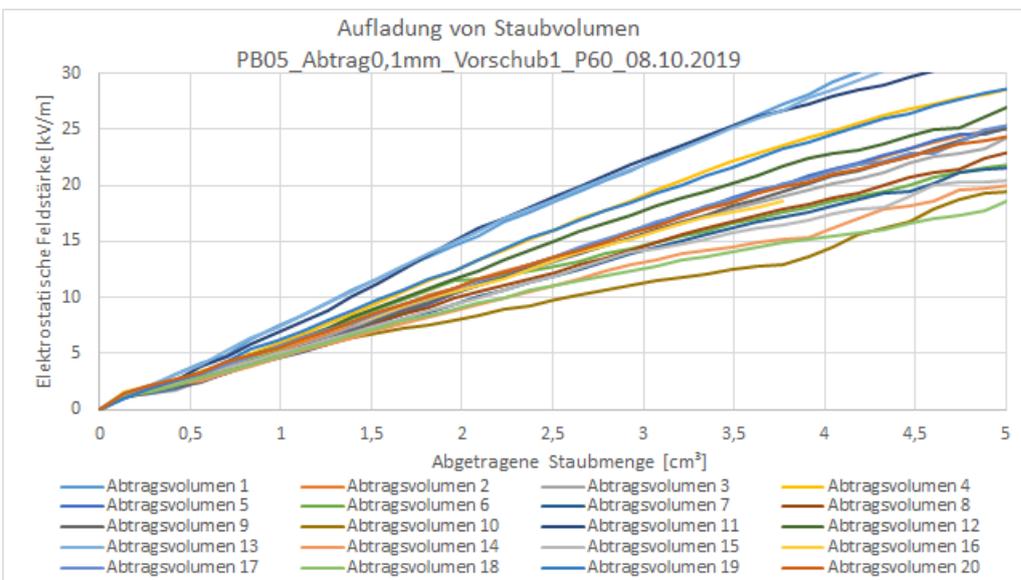
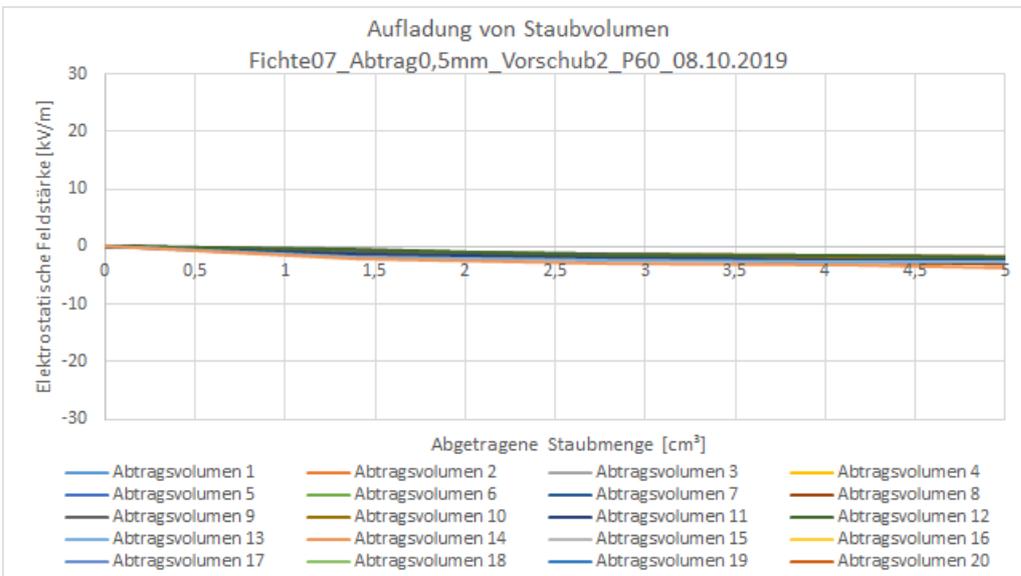


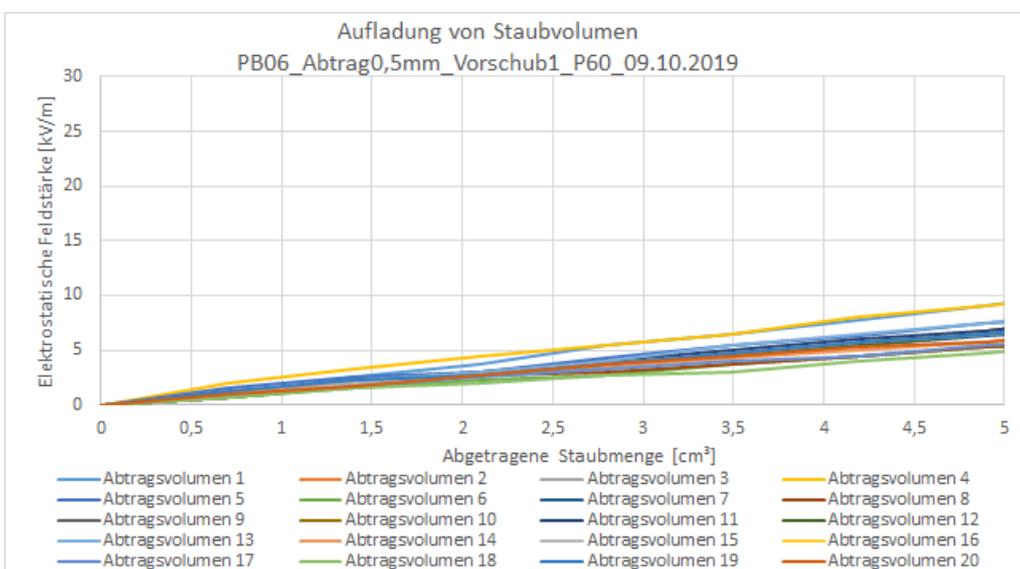
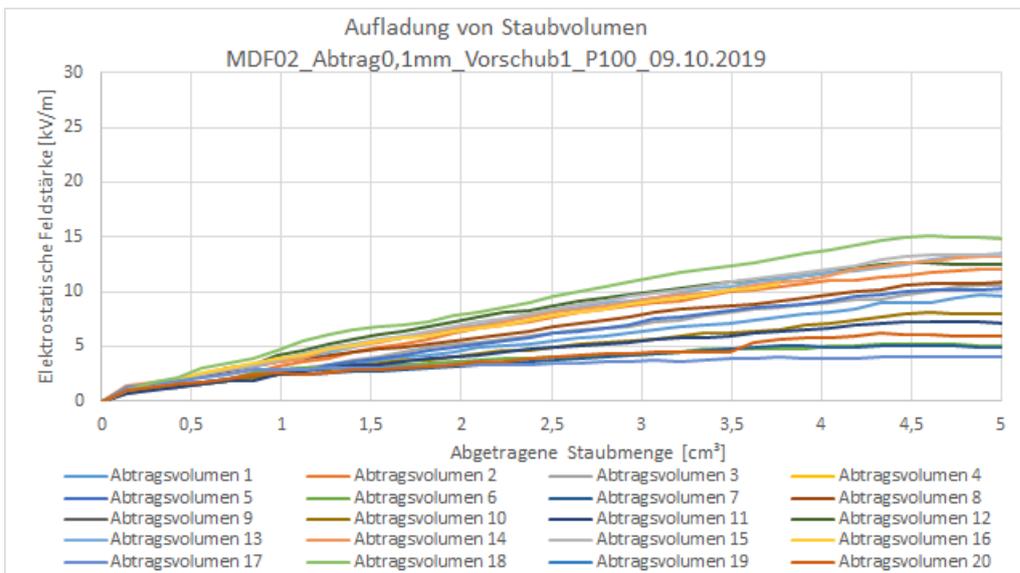
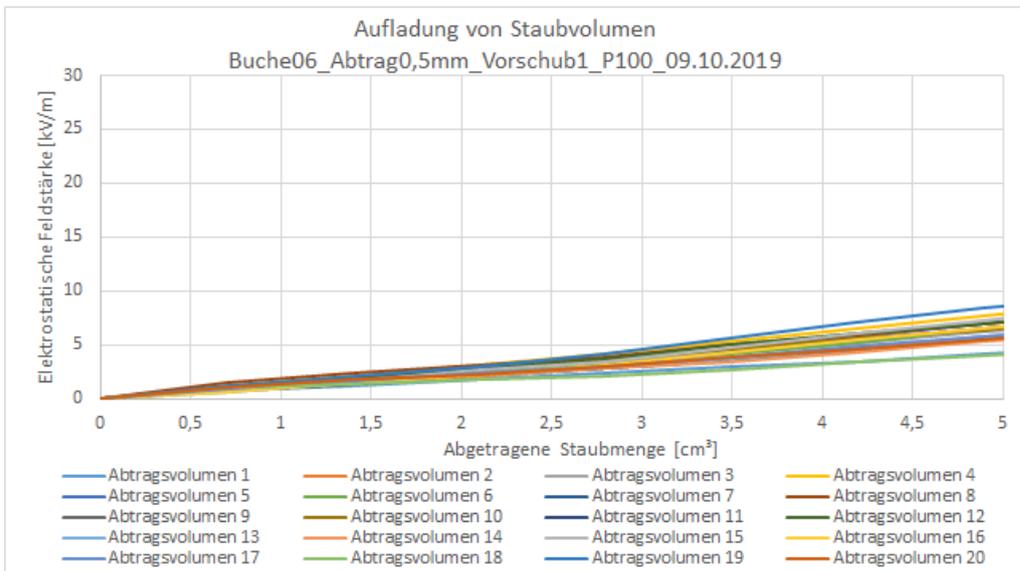


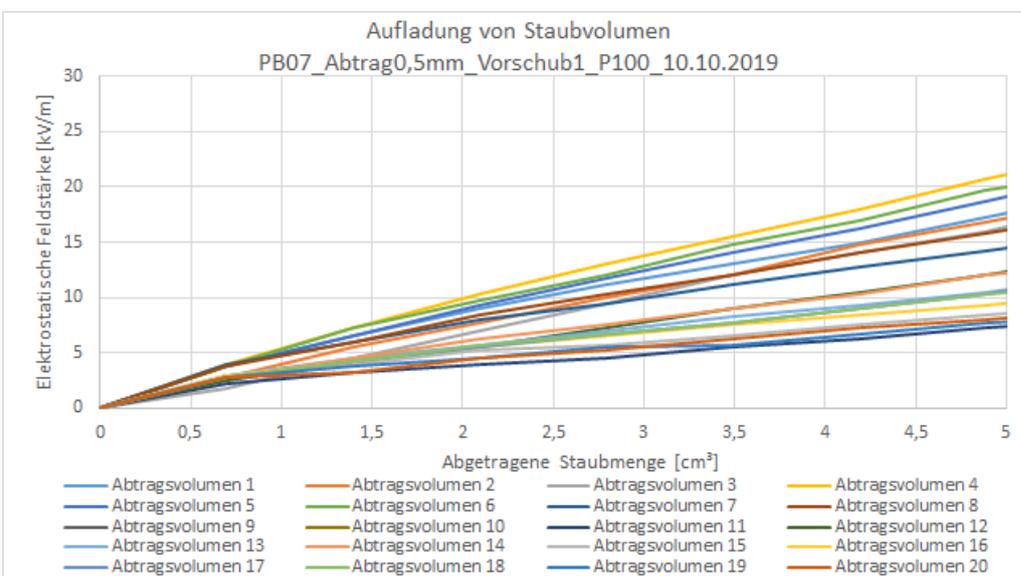
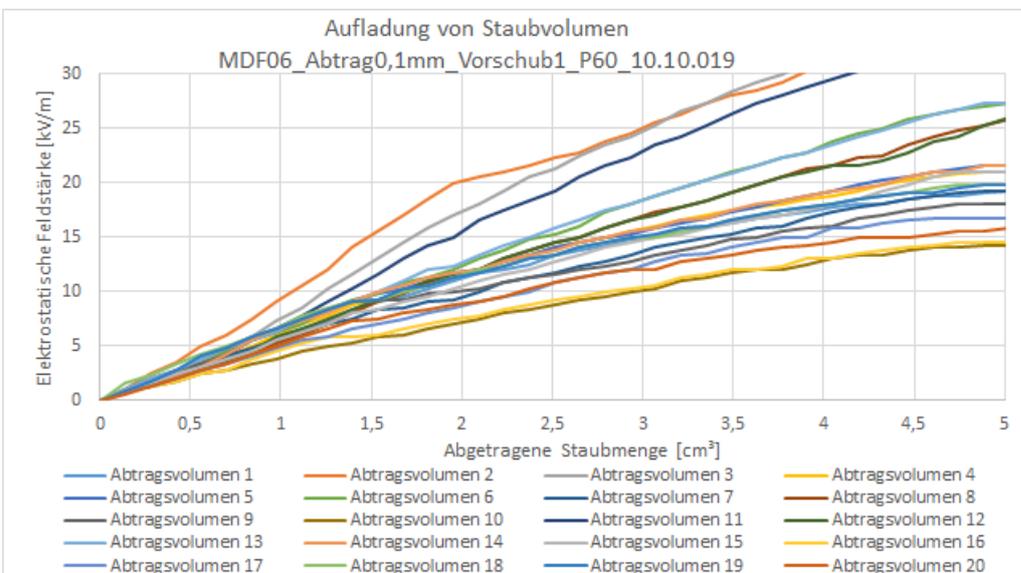
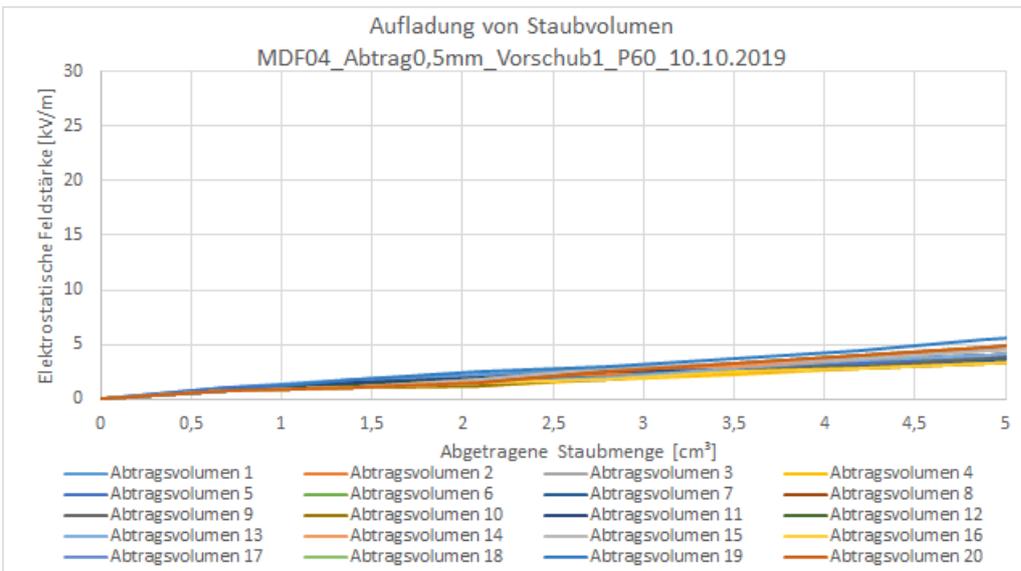


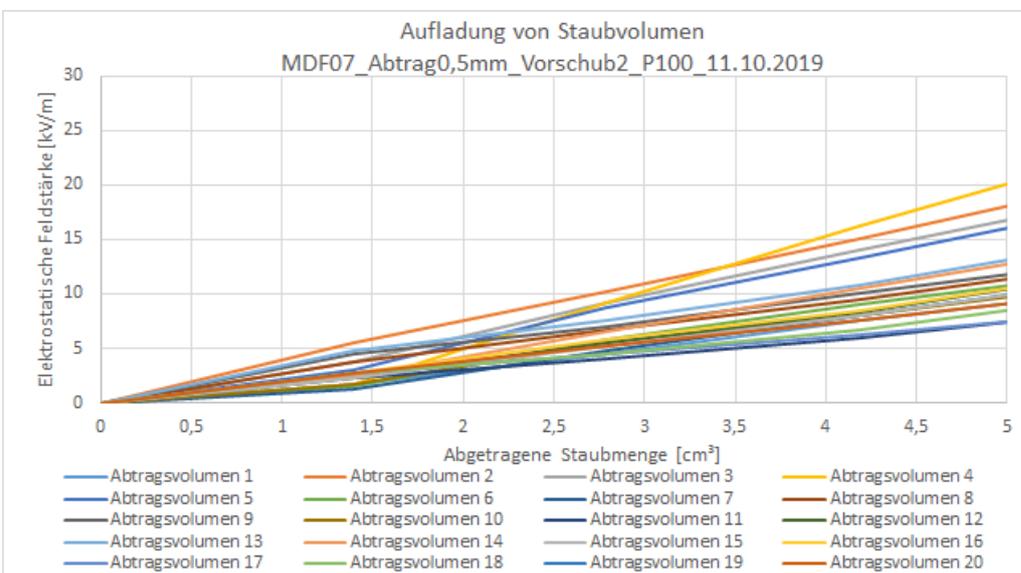
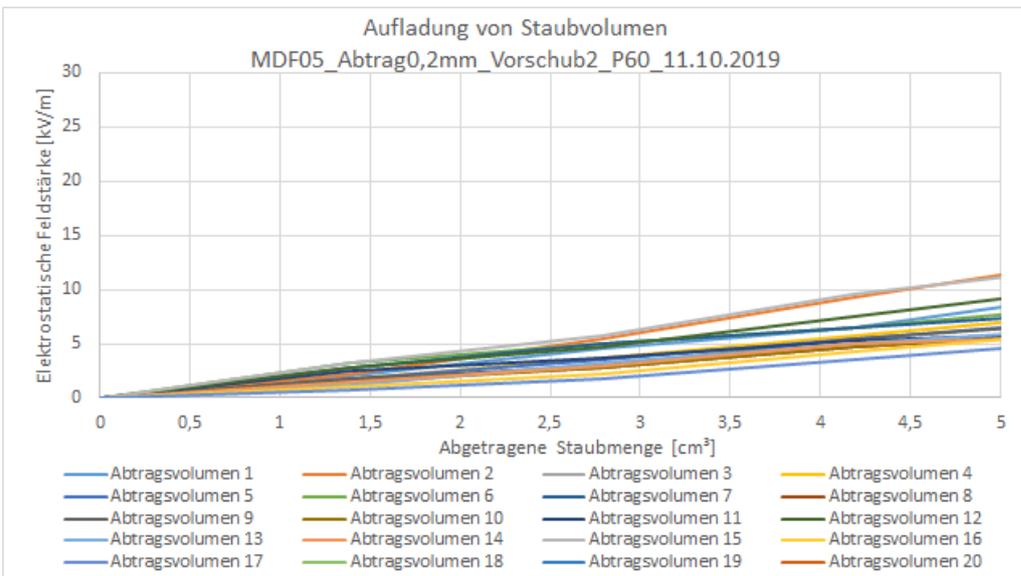
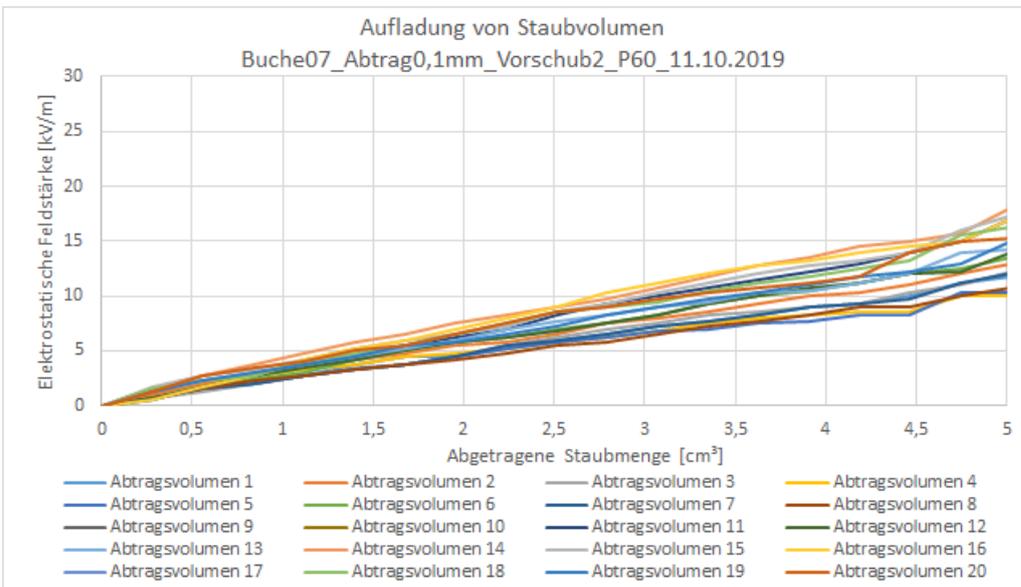


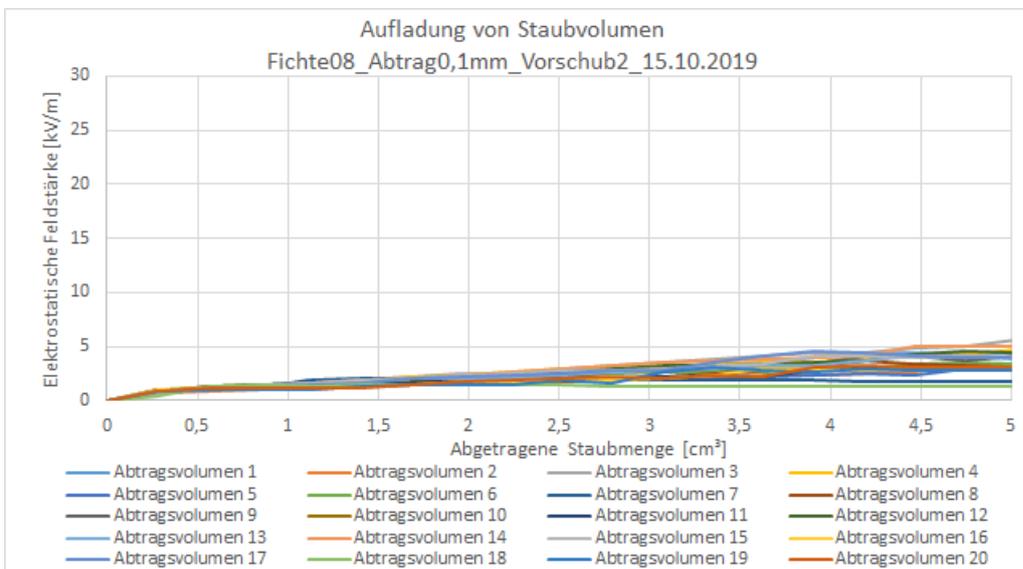
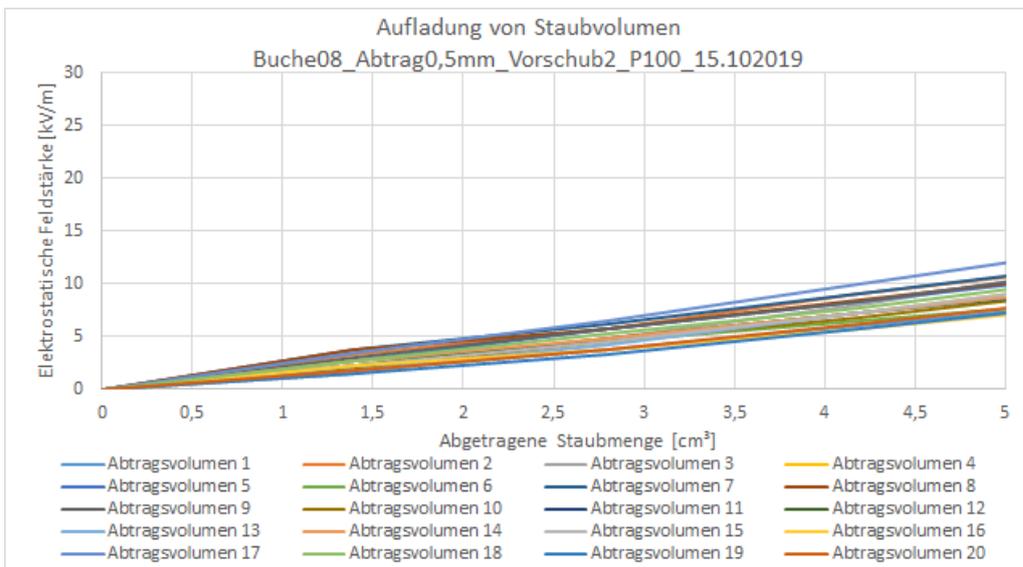
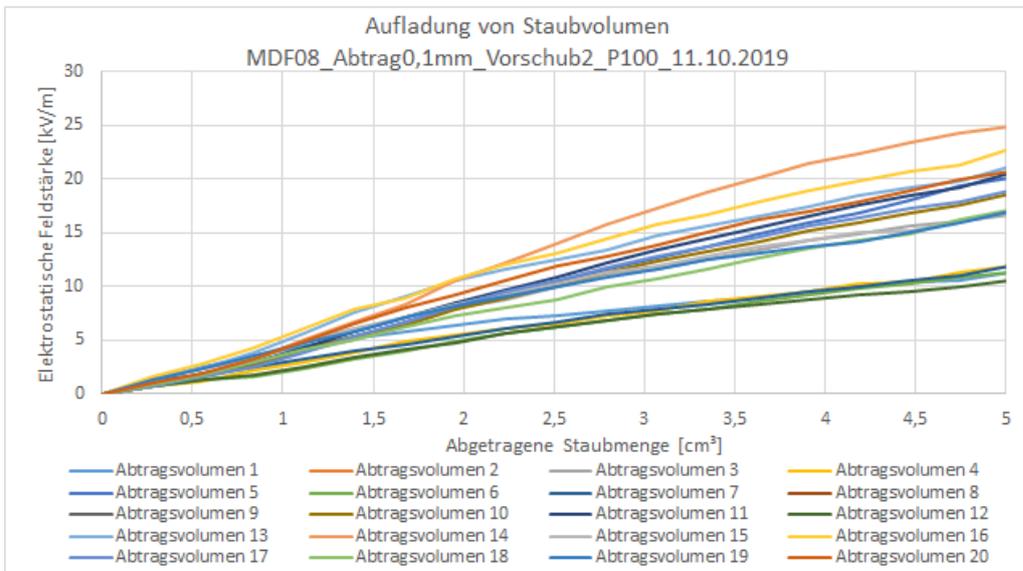


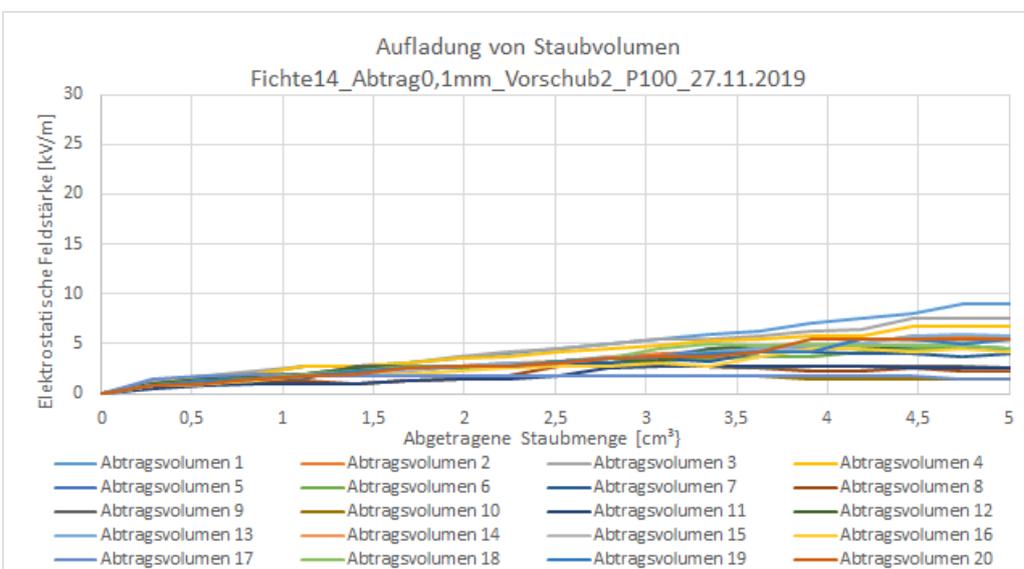
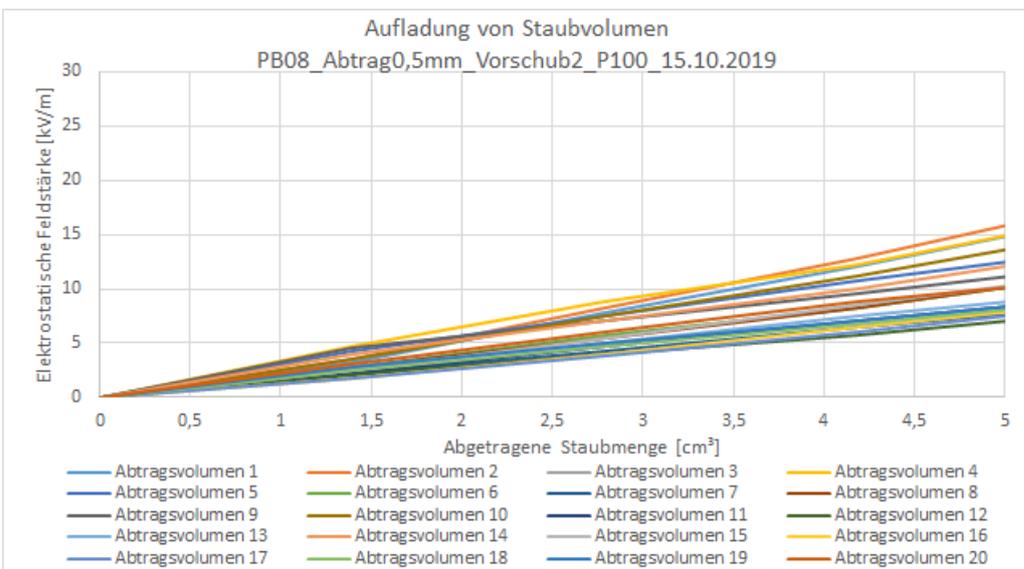
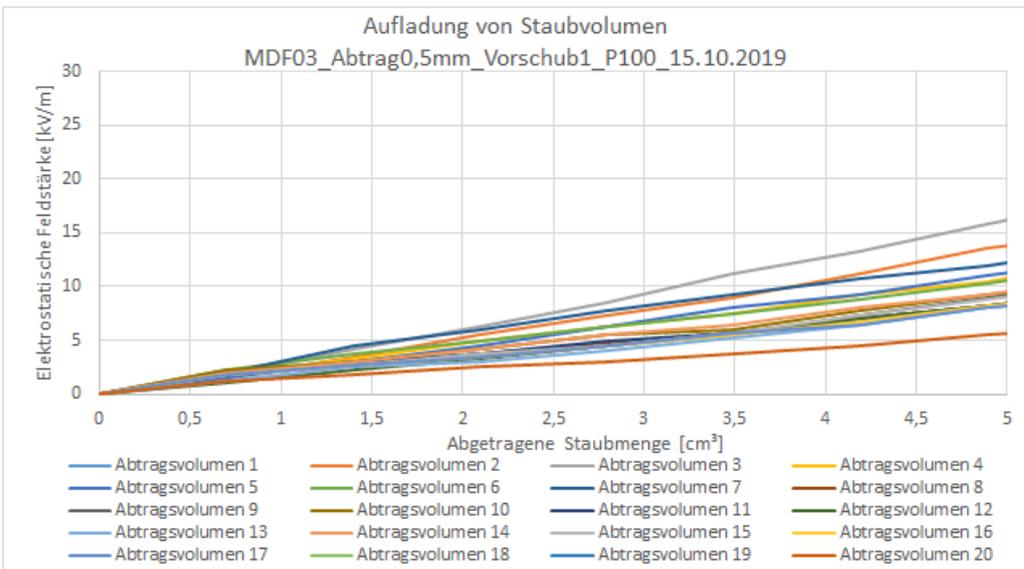




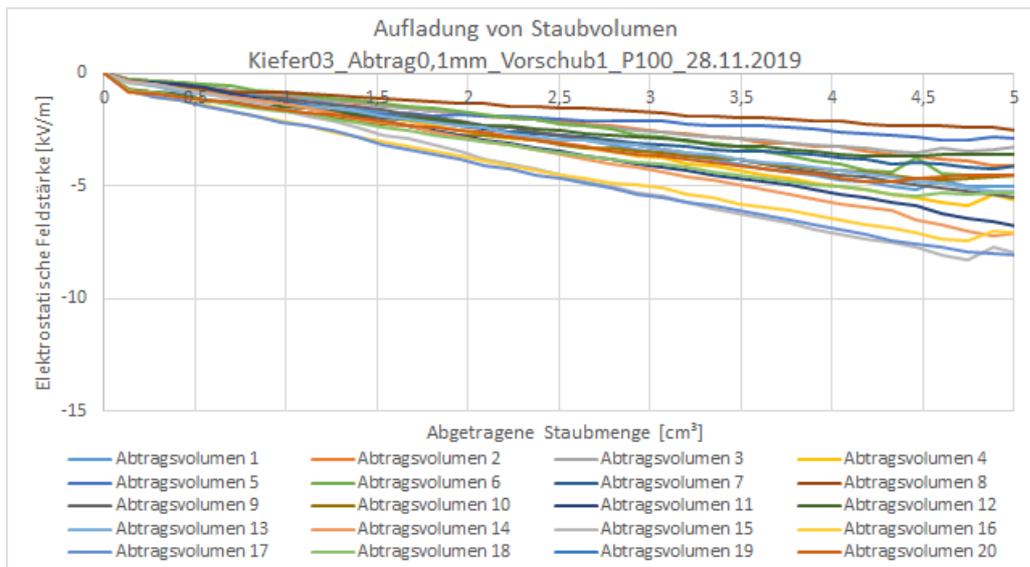
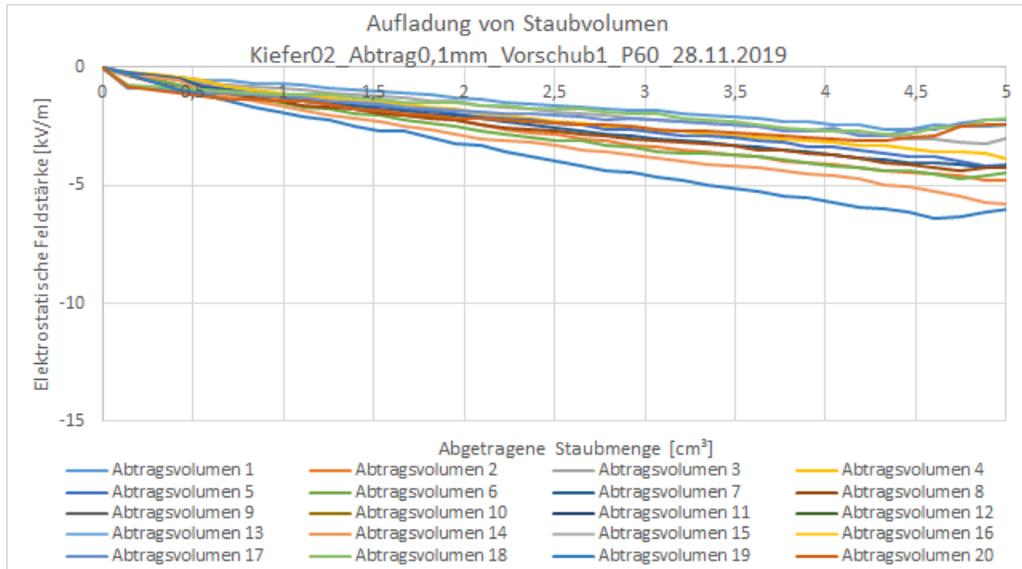


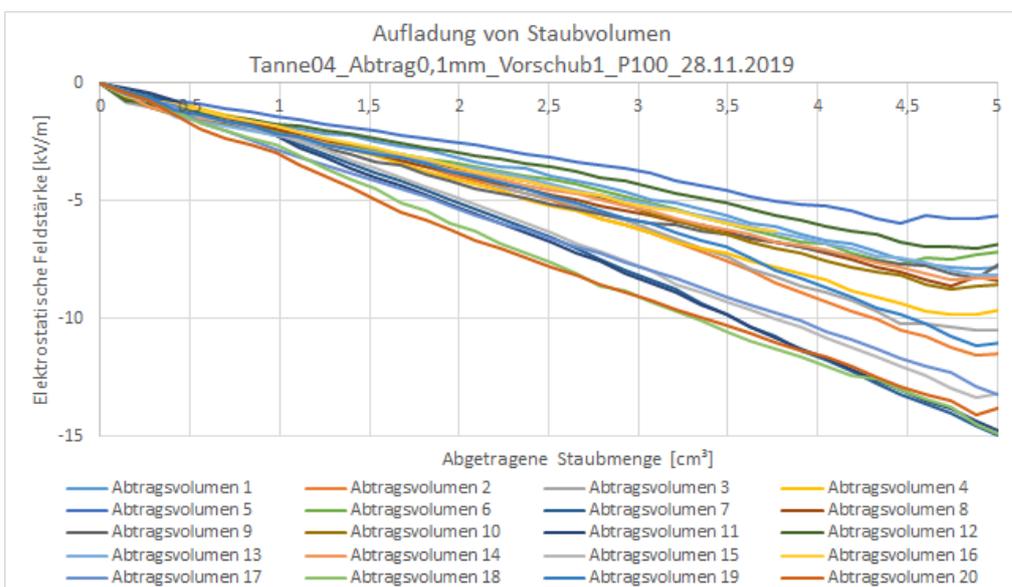
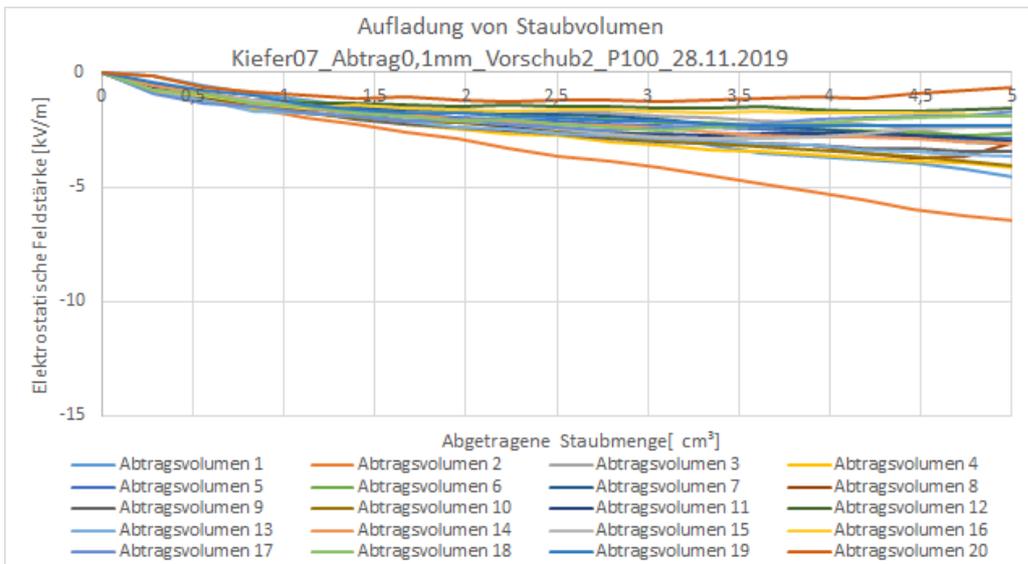
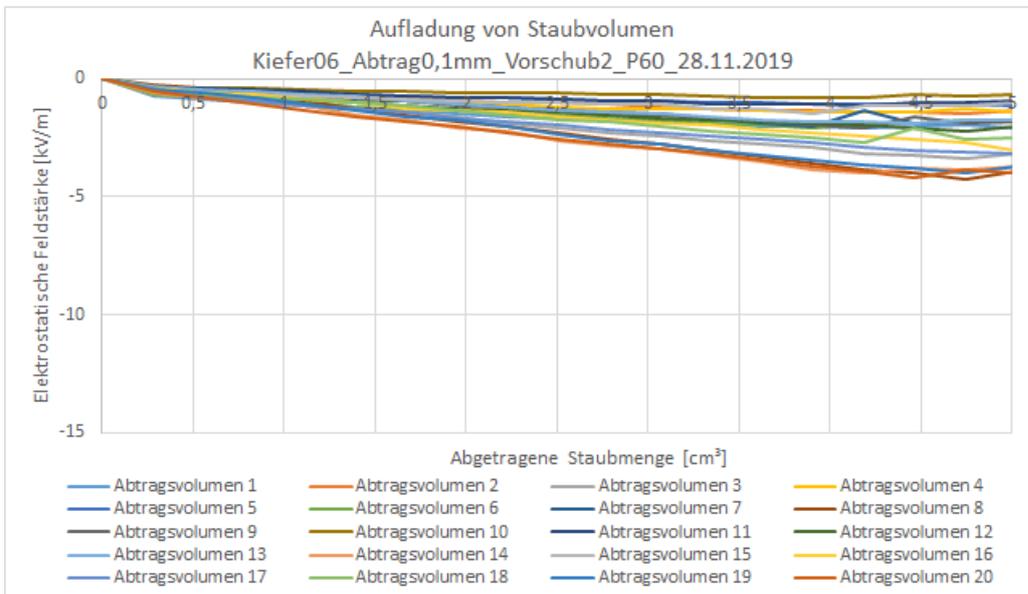


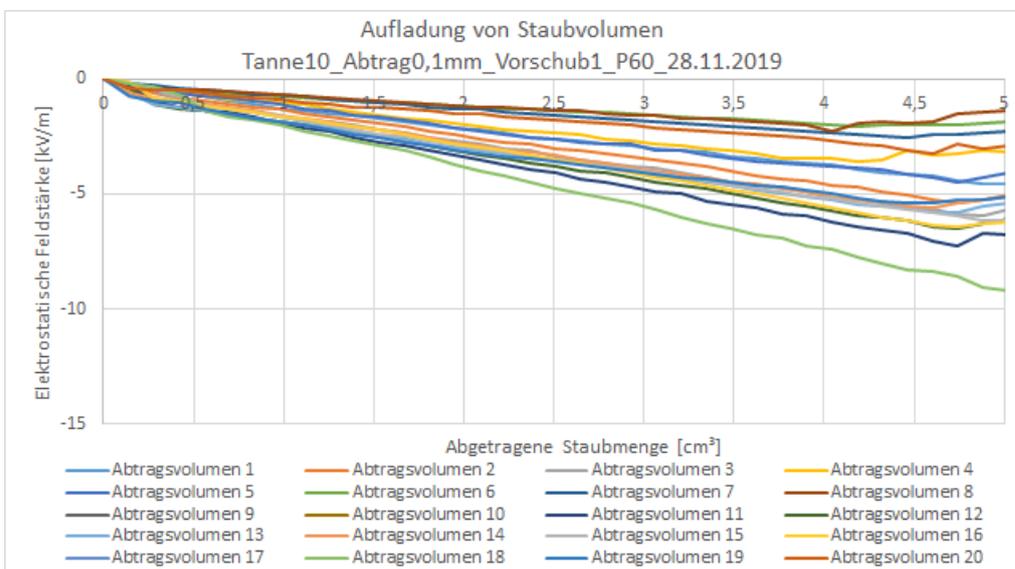
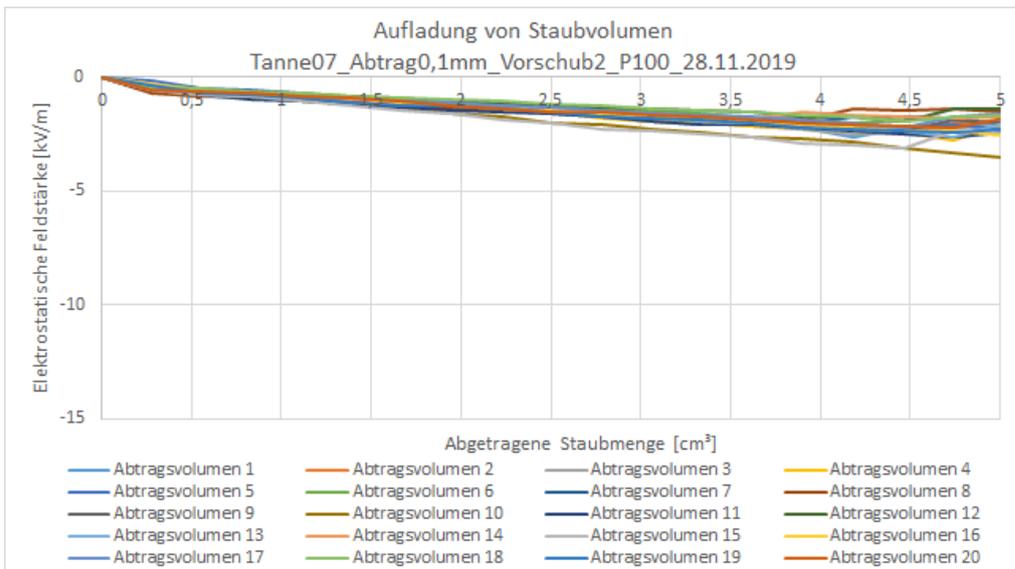
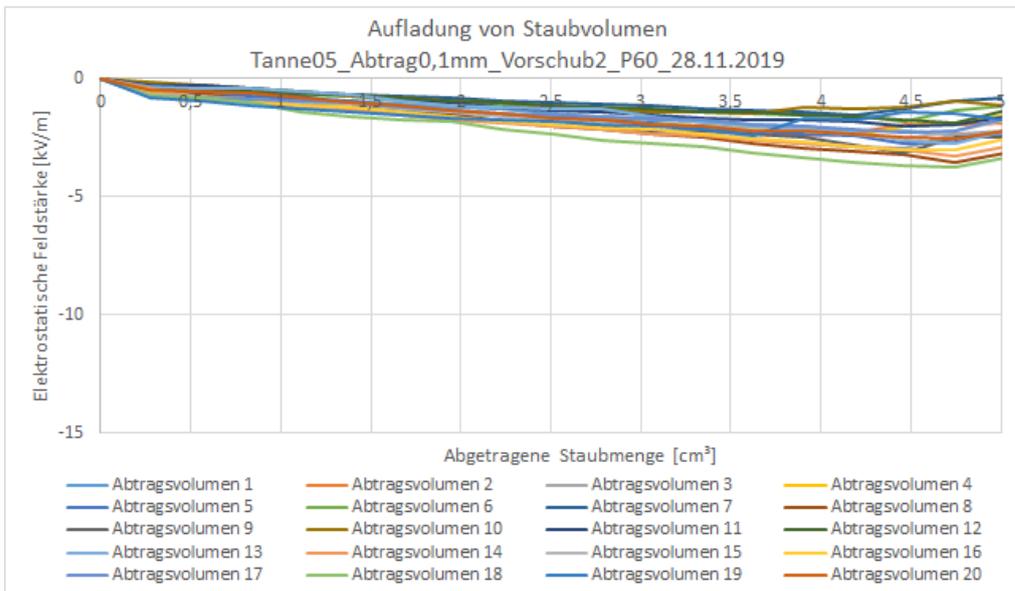




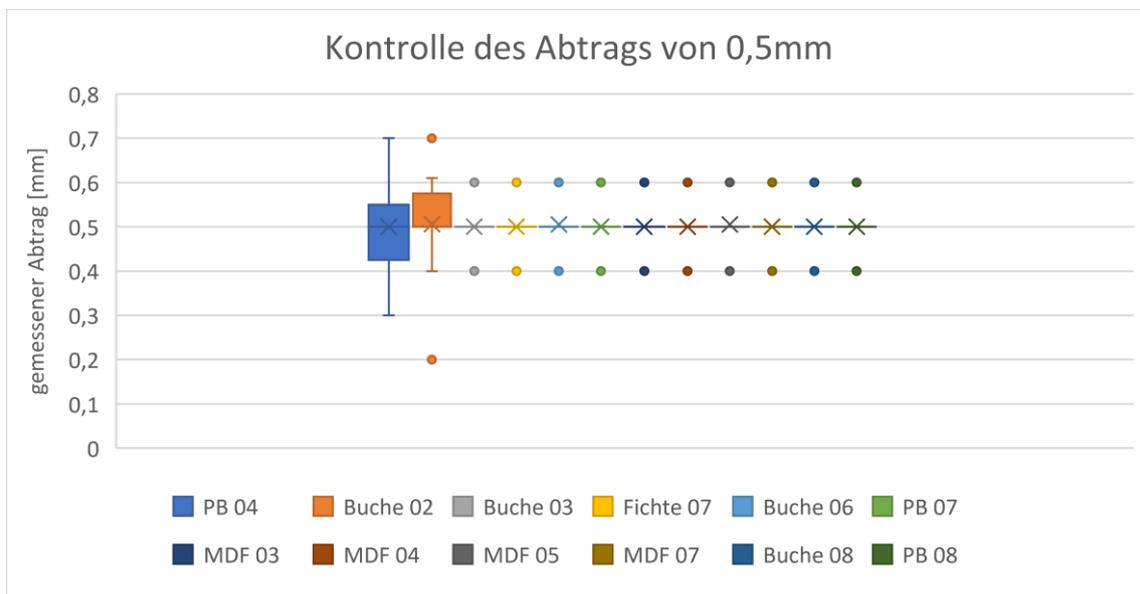
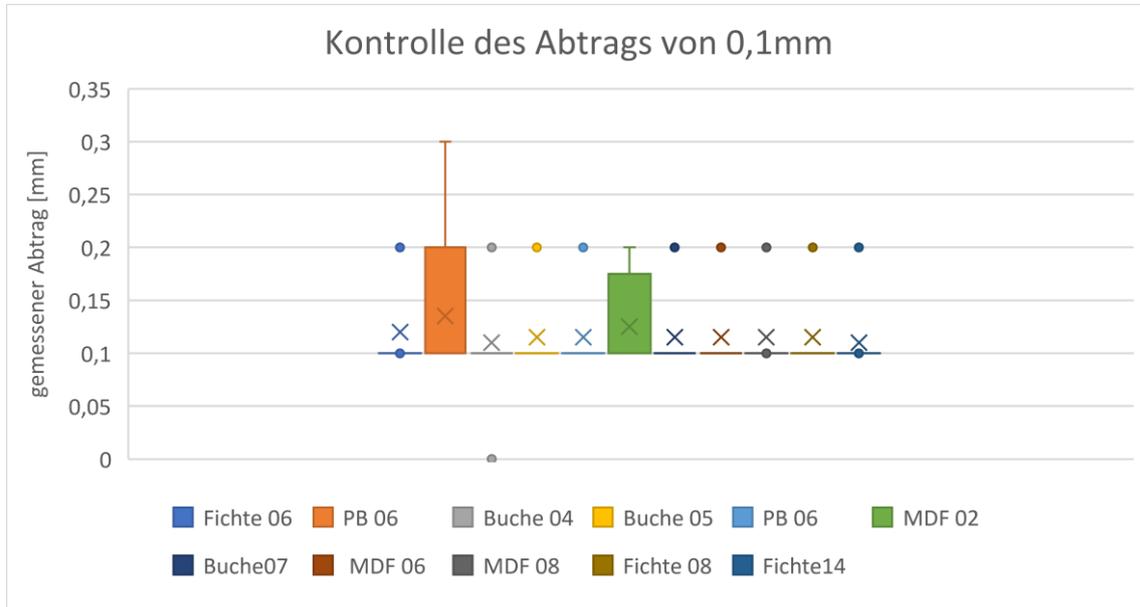
Vorauswertung Versuchsplan 2







Stichprobenhafte Kontrollen eines korrekten Schleifabtrags während der Testdurchläufe



Aufzeichnungen der relativen Feuchte und der Raumlufttemperatur

Datum	Relative Feuchte [%]	Raumlufttemperatur [°C]
24.09.2019	55	22,5
01.10.2019	45,3	22,3
08.10.2019	38,9	19,8
11.10.2019	45,5	21
15.10.2019	56,1	20,4

Maße Holzproben

Material	Abmessungen		
	l [mm]	b [mm]	h [mm]
Fichte	93	44	4,7
Buche	93	45	4,7
MDF	92,6	37,8	4
PB	92,7	38	5,1

Darrschrank Ergebnisse

Material	Zeitraum von 5 Wochen [g]				
	1W [g]	2W [g]	3W [g]	4W [g]	5W [g]
Fichte	9,57	8,70	8,69	8,69	8,64
Buche	14,14	12,88	12,86	12,84	12,77
MDF	9,51	8,79	8,71	8,65	8,36
PB	10,54	9,72	9,68	9,65	9,49

Berechnung der Holzfeuchte

Holzfeuchte = (Nassgewicht [g] – Darrgewicht [g]) * 100/ Darrgewicht [g]

$$= (m - m_0) * 100 / m$$

Probematerial	Nassgewicht [g]	Darrgewicht [g]	Massen%
Fichte	9,57	8,64	10,76
Buche	14,14	12,77	10,73
MDF	9,51	8,36	13,76
PB	10,54	9,49	11,06

Berechnung der Rohdichte

$$\delta = m/V \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$V_{\text{Buche und Fichte}} = V_{\text{Tanne und Kiefer}} = l \cdot b \cdot h = 63 \cdot 9,3 \cdot 4,5 = 2636,55 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{MDF und PB}} = l \cdot b \cdot h = 63 \cdot 9,3 \cdot 3,8 = 2226,42 \text{ cm}^3$$

Fichte	[g/cm³]	Buche	[g/cm³]	MDF	[g/cm³]	PB	[g/cm³]
01	0,544	01	0,678	01	0,684	01	0,599
02	0,505	02	0,695	02	0,682	02	0,599
03	0,544	03	0,688	03	0,682	03	0,598
05	0,505	04	0,689	04	0,683	04	0,602
06	0,529	05	0,703	05	0,682	05	0,587
07	0,516	06	0,669	06	0,680	06	0,600
08	0,501	07	0,677	07	0,689	07	0,591
14	0,547	08	0,707	08	0,680	08	0,584

Tanne	[g/cm³]	Kiefer	[g/cm³]
04	0,470	02	0,560
05	0,469	03	0,560
07	0,470	06	0,561
10	0,469	07	0,560