

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-01-02-89
Datum der Einreichung: 15.10.2025
Datum der Annahme: 12.12.2025
Datum der Veröffentlichung: 27.02.2026

Ressourcenschonende Herstellung von Schleifmitteln

Schleifscheiben aus Schleifvlies-Abfall

K. Rösch

ZUSAMMENFASSUNG Schleifvliesabfälle enthalten Polymere und Schleifkörner in schwer trennbarer Bindung und gelten als kaum recycelbar. Basierend auf früheren Ergebnissen wird ein neues Heißpressverfahren gezeigt, welches beide Fraktionen ohne Trennung zu funktionsfähigen Schleifscheiben verarbeitet. Mit 15 % frischem Phenolharz-Binder erreichen sie Eigenschaften nahe konventioneller Produkte, bei kürzerer und energiesparender Herstellung. Zusätzlich werden energetische Betrachtungen bei der Bearbeitung durchgeführt.

STICHWÖRTER

Schleifen, Recycling, Kunststoffe

Grinding discs from nonwoven abrasive waste

ABSTRACT Nonwoven abrasive waste contains polymers and abrasive grains in a hard-to-separate bond, considered difficult to recycle. Based on a prior publication, a novel hot-pressing process is demonstrated converting both fractions into functional grinding wheels without separation. With 15 % fresh phenolic resin binder, it achieves properties close to conventional products, in spite of shorter and more energy-efficient manufacturing. This article also provides an energy analysis of the grinding process.

1 Problemstellung

Schleifvlies ist ein Schleifmittel, in dem ein Trägermaterial, ein Vlies meist aus Nylon oder Polyurethan, mit Schleifkörnern bestückt wird [1]. Aufgrund der lockeren, offenen Struktur ist es sehr gut für feine Schleifarbeiten geeignet, wie dem Entgraten oder dem Finishing von Lack-Oberflächen [2, 3]. Zur Herstellung von Schleifvlies-Pads wird das Vlies als Meterware bezogen, die Körner (Korund oder Siliziumcarbid in verschiedenen Korngrößen) werden mittels Phenolharz-Binder aufgebracht, runde Scheiben ausgestanzt und zu Pads montiert, die anschließend auf den Enddurchmesser abgedreht werden [4]. In dieser Prozesskette entstehen zwei wesentliche Abfallströme: sortenreiner Verschnitt aus dem Stanzen sowie Mischstaub aus der Absaugung der Drehbank, der unterschiedliche Vlies- und Kornsorten enthält.

Das dabei entstehende Materialgemisch gilt als schwer recycelbar [5]. Viele Ansätze fokussieren sich auf die Wiedergewinnung der Schleifkörner durch Entfernen der Polymermatrix, etwa durch Pyrolyse oder chemisches Lösen [6–10]. Beide Pfade sind mit Umweltbelastungen verbunden: Pyrolyse verursacht CO₂-Emissionen, während chemische Verfahren gefährliche Substanzen benötigen. Die Kunststoffanteile gehen in beiden Fällen verloren. Downcycling-Varianten, etwa die Nutzung der Abfälle als Füllstoffe in Beton, führen die enthaltenen Körner keiner funktionalen Weiterverwendung zu [11]. Es besteht Bedarf nach einem Verfahren, das ohne umweltschädliche Substanzen und mit geringem Energieeinsatz die Wiederverwendung von Polymer und Schleifkorn ermöglicht.

Dieser Beitrag adressiert diesen Bedarf mit der Herstellung kunststoffgebundener Schleifscheiben aus zerkleinertem Schleif-

vlies mittels Heißpressen. Konventionell werden Schleifscheiben durch Mischen der Körner mit Binder, Pressen in einer Form und mehrstündiges Aushärten (bis zu 24 Stunden) im Ofen hergestellt [12, 13]. Der Energiebedarf ist entsprechend hoch [14]. Bei Recycling-Schleifscheiben kann der notwendige Binderanteil potenziell reduziert werden, was Materialspart und die Aushärtezeit verkürzt.

Ziel ist die methodische Bewertung des Heißpressverfahrens, die Ableitung eines robusten Prozessfensters sowie die Validierung der mechanischen Sicherheit und der Schleifleistung. Aufgrund der Materialeigenschaften werden Schleifanwendungen mit geringeren Anforderungen an die Kornreinheit priorisiert, zum Beispiel Entlacken von Metallen.

2 Recyclingkonzept und Materialcharakterisierung

Ausgehend von der in Kapitel 1 beschriebenen Zielsetzung, beide Abfallfraktionen des Schleifvlieses, also Kunststoffbinder und Schleifkörner, ohne gefährliche Chemikalien und mit geringem Energieeinsatz wiederzuverwenden, werden im Folgenden das Recyclingkonzept und die Eigenschaften der Eingangsmaterialien dargestellt. **Bild 1** zeigt das Recyclingmaterial sowie ein Referenz-Schleifvlies-Pad und eine aus Recyclingmaterial hergestellte Schleifscheibe.

2.1 Eingangsstoffe und Aufbereitung

Das Abfallmaterial stammt überwiegend aus dem Abrichten der Schleifvlies-Pads auf der Drehbank und liegt als kleine

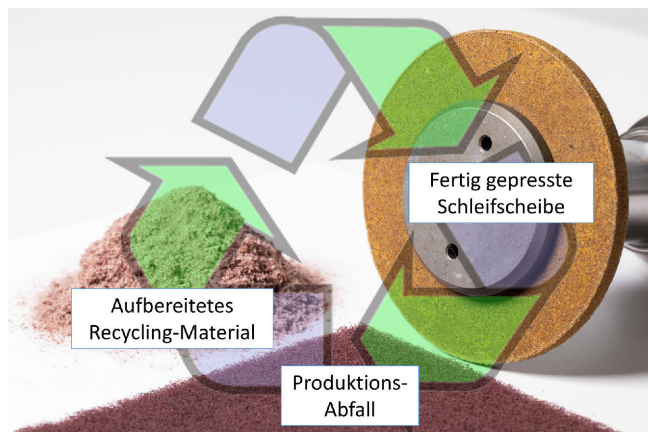
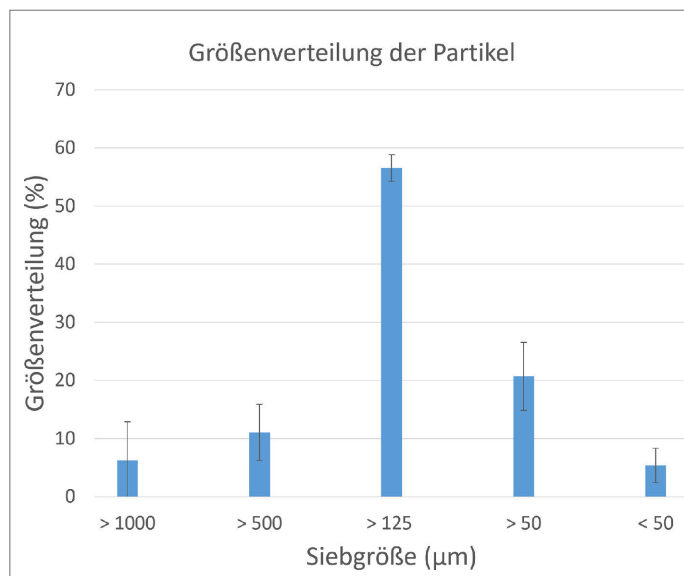


Bild 1 Vom Produktionsabfall (unten) über das aufbereitete Pulver (links) zur Recycling-Schleifscheibe. Foto: Fraunhofer IPA, Rainer Bez

Flocken aus Fasern mit angehafteten Schleifkörnern vor. Diese Flocken bilden den Hauptanteil des verfügbaren Recyclingstroms. Sie enthalten neben dem Trägermaterial sowohl Anteile des Phenolharz-Binders als auch keramische Körner wie Korund (Aluminiumoxid, Al_2O_3), und Siliziumcarbid (SiC). Für eine reproduzierbare Dosierung und Packung wurde das Material zunächst gesiebt. Die beim Sieben ermittelte Größenverteilung der Flocken im Pulver ist in **Bild 2 a)** dargestellt.

Stücke über 1 mm sowie der Verschnitt wurden mechanisch zerkleinert und anschließend mit der Pulverfraktion homogen vermischt, um die Fließeigenschaften zu verbessern. Ohne diesen Schritt traten Klumpen und Verstopfungen im Dosier-Equipment auf. Ein 3D-Mischprozess verhindert die Sedimentation der schwereren Körner und stellt eine gleichmäßige Verteilung im Mischgranulat sicher. Um die Fließfähigkeit zu erhöhen und die Dosierbarkeit zu stabilisieren, wurde das Pulver bei moderaten Temperaturen von 80 °C mehrere Stunden getrocknet. Die Feuchte sank dabei von 0,85 Gew-% auf 0,18 Gew-%. Versuche wurden auch mit nicht getrocknetem Material durchgeführt, aber hierbei waren die mechanischen Kennwerte um bis zu 60 % schlechter [15].



2.2 Materialcharakterisierung

Die organischen Komponenten des Recyclingmaterials wurden mittels IR-Spektroskopie als Polyamid (PA 6,6) und Polyurethan identifiziert. Die Partikelgrößenverteilung nach Siebung zeigte eine breite Streuung von $< 50 \mu\text{m}$ bis $> 1 \text{ mm}$ mit einem Maximum bei $500 \mu\text{m}$. Zur Analyse der keramischen Fraktion wurden die organischen Bestandteile durch Pyrolyse entfernt (Bild 2 b)). Die isolierten Körner lagen überwiegend im Bereich $30\text{--}300 \mu\text{m}$, mit einem Mittelwert von $96 \mu\text{m}$ und einer Standardabweichung von $60 \mu\text{m}$. Massebilanzen vor und nach der Pyrolyse ergaben einen Kornanteil von etwa 25 % am Recyclingmaterial. Optische Vergleiche bestätigten eine Mischung aus Al_2O_3 und SiC [16].

Diese breite und gemischte Kornverteilung macht den Abfallstrom für konventionelles Recycling ungeeignet, da dafür sortenreine Körner gefordert sind. An dieser Stelle fiel bereits die Entscheidung, die hier zu entwickelnden Schleifscheiben auf Anwendungsgebiete mit niedrigeren Anforderungen zu beschränken. Die ermittelten Kenngrößen sind maßgeblich für Pressbarkeit und spätere Schleifleistung: Die breite Kornbandbreite begünstigt einerseits die Packung, erfordert aber ein Mischungsdesign mit feinen und mittleren Fraktionen, um Offenporigkeit und Schneidraum sicherzustellen. Die vorhandenen thermoplastischen Kunststoffanteile im Abfallmaterial reduzieren den Bedarf an frischem Binder.

2.3 Entwicklung Prozesskonzept und Pressform

Basierend auf der Materialcharakterisierung wurde entschieden, eine konventionelle Pressform in einer beheizten Presse zu entwerfen, und die Aushärtung, welche normalerweise in einem Hochofen stattfindet, in der Form durchzuführen. Dies spart nicht nur einen Handhabungsschritt, sondern auch Energie zum Beheizen des Ofens. Ermöglicht wird dies dadurch, dass das Zusammenbinden der Schleifkörner zum größten Teil durch den im Vlies vorhandenen thermoplastischen Kunststoff geschieht, während bei konventionell hergestellten Schleifscheiben der frische Binder über längere Zeit aushärten muss [17]. Es wurden auch Versuche mit geringen Anteilen an frischem Binder durch-

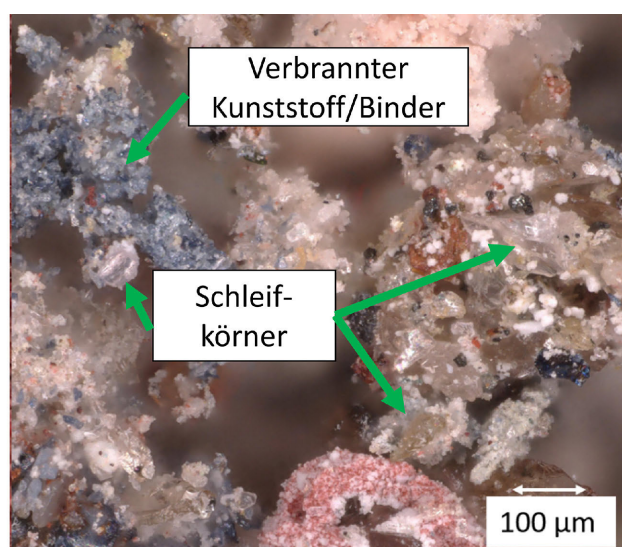


Bild 2 a) Größenverteilung der Flocken vor dem Sieben; b) Analyse der Schleifkörner durch Pyrolyse. Grafik: nach [16]

geführt, um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern (Kapitel 3.2).

Die Pressform ist für Scheiben mit 120 mm Durchmesser und einer 30-mm-Aufnahmebohrung ausgelegt. Die Bohrung wird über einen eingesetzten Stahlbolzen geformt (**Bild 3**).

Die Form besteht aus Stahl. Die plan gefrästen Stahlplatten sichern die Parallelität der Flächen und gleichmäßige Verdichtung. Die höhere thermische Masse verlängert das Aufheizen, erlaubt aber die Aushärtung in der Form außerhalb der beheizten Presse; die Presse steht rasch für den nächsten Zyklus bereit. Die hohe Härte erhöht die Standzeit der Form gegenüber abrasiven Körnern.

3 Prüfmethodik und Prozessbewertung

Ausgehend von den in Kapitel 2 beschriebenen Materialeigenschaften und der Pressform werden die untersuchten Herstellpfade und die darauf ausgerichteten Zielgrößen dargestellt.

3.1 Zielgrößen und Bewertungskriterien

Ziel ist die nutzbare Verwertung der Schleifvlies-Abfälle in Anwendungen mit moderaten Anforderungen, zum Beispiel Entlacken.

Die mechanische Sicherheit wird über Zugfestigkeit und 3-Punkt-Biegefestigkeit nach Norm sowie über einen Spintest im Berstprüfstand bewertet [18, 19]. Akzeptanzkriterium ist die sichere Handhabung und der Betrieb im vorgesehenen Drehzahlbereich. Der Spintest dient als Nachweis einer ausreichenden Sicherheitsreserve gegenüber dem realen Betrieb, wo zu der Fliehkraft noch die Belastung durch die Bearbeitungskräfte hinzukommt.

Die Schleifleistung wird über zwei Kriterien charakterisiert: Das Schleifverhältnis G , und die erzielte Oberflächenrauheit R_a . Während R_a über ein Lichtmikroskop einfach gemessen werden kann, muss das Schleifverhältnis ermittelt werden, indem der Masseverlust der Schleifscheibe mit dem Masseverlust des Werkstücks verglichen wird [20].

Weiterhin wird die Energie EA verglichen, die für das Abschleifen einer bestimmten Fläche benötigt wird. Die Leistung der Spindel während des Schleifens wird durch die Maschine ausgegeben. Diese Größe ist zum Bestimmen der Wirtschaftlichkeit relevant.

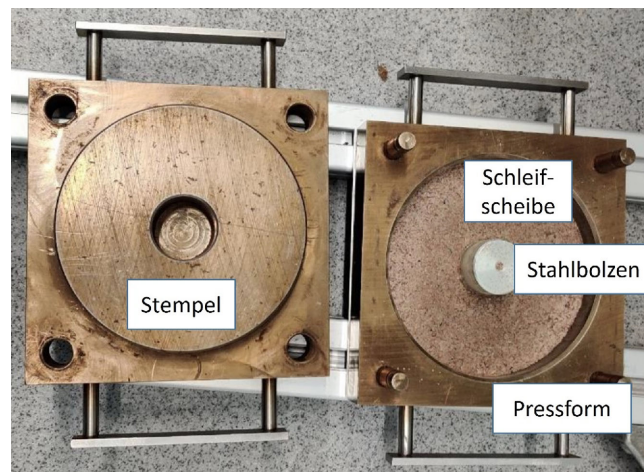


Bild 3 Pressform mit Recycling-Schleifscheibe. Foto: in Anlehnung an [16]

Ein letztes Kriterium, das für den wirtschaftlichen Einsatz entscheidend ist, ist das Zusetzen beziehungsweise Verschmieren der Schleifscheibe. Wenn die Oberfläche der Scheibe sich nicht mehr selbst reinigen kann, wird der Lack nicht mehr ganzflächig abgetragen, und die Scheibe muss „abgerichtet“ werden. Dabei wird mit einem Diamantwerkzeug die oberste Schicht der Schleifscheibe abgetragen, sodass wieder frische Körner in den Eingriff kommen. Je mehr solche Operationen nötig sind, umso langsamer verläuft der Prozess, und umso schneller verschleißt die Scheibe. Die Distanz, bevor das Zusetzen auftritt, wurde optisch durch Begutachtung der geschliffenen Oberfläche bestimmt.

3.2 Versuchsdesign

Für das Recycling von Schleifvlies existiert keine genormte Vorgehensweise. Daher wurde ein mehrstufiges Versuchsprogramm durchgeführt, bei welchem die Ergebnisse jeder Stufe die Auslegung der nächsten Stufe informierten. **Tabelle 1** fasst die Stufen, Variablen und Messungen zusammen.

Zusammenfassend werden im Folgenden drei Typen von Schleifscheiben unterschieden [15]:

- Typ A, der aus purem Recyclingmaterial besteht und entweder getrocknet oder nicht getrocknet verpresst wurde, **Bild 4 a)**

Tabelle 1 Übersicht über Experimente, nach [16].

Stufe	Art der Experimente	Untersuchte Variablen	Untersuchter Bereich	Art der Messungen
0	Anfängliche Untersuchungen	Druck, Temperatur	Druck: 10-100 kN, 8 Schritte	Optisch: Kann die Scheibe unbeschädigt aus der Form entnommen werden?
			Temperatur: 20-120 °C	
1	Vollfaktorieller Test; „Typ A“ Scheiben	Druck, Temperatur, Trocknung	Druck: 100 / 150 kN	Zugversuche, Dreipunkt-Biegeversuche, Berstversuche
			Temperatur: 160 / 200 °C	
			Trocknung: Ja / Nein	
2	Einzel-Faktor-Test; „Typ B“ Scheiben	Zusätzlicher Binderanteil	5 / 10 / 15 / 25 / 50 % Binder	Zugversuche, Dreipunkt-Biegeversuche, Berstversuche, Schleifversuche
3	A/B Tests; „Typ C“ Scheiben	Zusatz von Porenformer	Zusatz von Porenformer, Druck 6 kN / 20 kN	Berstversuche, Schleifversuche



a)



b)

Bild 4 a) Schleifscheibe Typ A, aus reinem Recyclingmaterial; b) Typ B, mit 15 % frischem Phenolharz-Binder; Typ C unterscheidet sich optisch nicht wesentlich von Typ B. Foto: [15]

Tabelle 2 Faktoren im DoE-Plan von Stufe 1, nach [16].

Temperatur [°C]	Presskraft [kN]	Ofengetrocknet
160 / 200	100 / 150	Ja / Nein

- Typ B, bei dem vor dem Vermischen ein bestimmter Anteil an frischem Phenolharz-Binder zugesetzt wurde, um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern, Bild 4b)
 - Typ C, dem zusätzlich zu einem Anteil von 15 % Binder auch noch 1 % Porenformer-Material zugesetzt wurde
- Gemäß Übersicht in Tabelle 1 und der Einordnung der Scheibentypen folgte ein stufenweises Versuchsdesign. Die Ergebnisse jeder Stufe bereiteten dabei die Planung der nächsten Stufe vor [15].

Stufe 0 (Orientierung) diente der Festlegung praktikabler Prozessgrenzen. Ohne formales DoE wurden Temperatur und Druck schrittweise erhöht, um praktikable Prozessgrenzen zu bestimmen. Voraussetzung für die Fortsetzung war die unbeschädigte Entformung. Erst bei Temperaturen ab 150 °C und Drücken ≥ 100 kN entstanden intakte Grünlinge.

Stufe 1 (vollfaktoriell, Scheiben von Typ A) untersuchte systematisch Temperatur, Presskraft und Trocknung. Es wurde ein $2 \times 2 \times 2$ -Plan mit drei Replikationen pro Kombination gefahren, randomisiert über den Herstellungstag zur Reduktion von Drifteffekten. Die Faktorstufen sind in **Tabelle 2** zusammengefasst. Es zeigte sich, dass die mechanische Festigkeit des reinen Recyclingmaterials nicht ausreichend war, um die Schleifscheiben in der freien Wirtschaft zu verkaufen. Deshalb wurde beschlossen, eine Versuchsreihe mit zusätzlichem Binder-Material durchzuführen, welche in „Stufe 2“ beschrieben wird.

Stufe 2 (einfaktoriell, Typ B) variierte den Zusatz frischen Phenolharz-Binders zwischen 5/10/15/25 %, ein 50 %-Ansatz härtete nicht vollständig aus und wurde verworfen. Die Pressparameter orientierten sich an den in Stufe 1 ermittelten günst-

tigsten Bedingungen. Biege- und Berstversuche zeigten die gewünschte Erhöhung der Haltbarkeit der Schleifscheiben, sodass nun Schleifversuche durchgeführt wurden. Während dieser Versuche wurde das Problem des Zusetzens offensichtlich, weshalb Versuche der Stufe 3 notwendig wurden.

Stufe 3 (A/B-Test, Typ C) adressierte das Zusetzen durch Erhöhung der Offenporigkeit. Ein Porenbildner („Tracel NCS 175“ mit 1 % Massenanteil) wurde zugegeben, der Binderanteil blieb bei 15 %. Um ein Zerdrücken der Poren zu vermeiden, wurden die Presskräfte stückweise auf 20 kN und 6 kN reduziert. Fokusvariationsmessungen zeigten Porositäten von etwa 25 % bei 20 kN und etwa 30 % bei 6 kN. Nach bestandem Berstversuch fokussierte sich die Bewertung auf die Distanz bis zum Zusetzen sowie R_a unter identischen Prozessparametern wie die Vergleichsvariante ohne Porenbildner, um die Wirkung der Poren isoliert zu erfassen.

Auf Basis dieses Designs werden die mechanischen Prüfungen und die Schleiftests in Kapitel 3.3 berichtet und entlang der oben definierten Kriterien interpretiert.

3.3 Versuchsdurchführung

3.3.1 Mechanische Prüfmethodik

Die Probekörper für die Zug- und Biegeversuche wurden gemäß Vorschrift [21] mittels Drahtsägen mit Diamantdraht aus den Schleifscheiben von Typ A und Typ B geschnitten. Es wurden Prüfkörper vom Typ 2 mit einer Breite von 10 mm und einer Länge von 80 mm sowie einer Dicke von 5 mm verwendet. Die Proben wurden aus einem Ringbereich in circa 30 mm Abstand

von der Scheibenmitte entnommen, um Randeffekte gering zu halten. Die Prüfung wurde durchgeführt auf einer „ZwickRoell Retro-Line 20kN“ Universalprüfmaschine, deren Traverse mit 5 mm/min verfahren wurde.

Die maximale Zug- beziehungsweise Biegespannung wurde im Zugversuch gemäß Formel (1) ermittelt:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1),$$

wobei σ die Spannung in Megapascal (MPa) bezeichnet, F die gemessene Kraft in N, und A den Querschnitt in mm².

Für den Berstversuch wurden die Schleifscheiben von Typ A, B oder C in eine geschlossene, beschussgetestete Anlage eingebracht, wo sie auf eine Motorspindel aufgespannt und beschleunigt wurden. Die Drehzahl, bei der Bruch auftritt, ist die maximale Drehzahl. Da die Scheiben im Schleifbetrieb einer höheren Belastung als nur der Zentrifugalkraft ausgesetzt sind, wurden die maximalen Drehzahlen für den Betrieb auf maximal die Hälfte der hier ermittelten Geschwindigkeit begrenzt [15].

3.3.2 Schleifversuche und Messstrategie

Die Anwendungstests wurden auf einer „Reichenbacher Eco-LT“ 5-Achs-CNC-Anlage durchgeführt, **Bild 5**.

Die Aufgabe orientierte sich an der Praxis: Entfernen von Lackschichten auf beschichteten Metallteilen. Die Versuchsdurchführung gliederte sich in drei Phasen (**Tabelle 3**): (1) Schleifen ohne Zwischenabrichten, (2) Schleifen mit Abrichten zwischen den Passagen, (3) Bewertung der Auswirkung der Porenbildner (Vergleich Typ B mit Typ C bei gleichen Einstellungen). Drehzahl und Vorschub wurden je Versuchsreihe variiert und sind in **Tabelle 3** zusammengefasst.

Eine entscheidende Größe, die während der Versuche gemessen wurde, war das Schleifverhältnis G , welches angibt, wie viel Material die Schleifscheibe verliert, um ein bestimmtes Volumen vom Werkstück zu zerspanen. Es berechnet sich gemäß folgender Gleichung:



Bild 5 Schleifen lackierter Teile mit der Recycling-Schleifscheibe. Foto: [15]

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (2),$$

wobei V_w das abgetragene Werkstück-Volumen und V_s das dabei verlorene Schleifscheiben-Volumen darstellt. Diese Größe ist ein wichtiges Maß für die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Schleifprozesses [20].

Aus den Daten, die während der Schleifversuche aufgezeichnet wurden, ließ sich im Nachgang eine Größe ermitteln, die für die energetische Betrachtung des Bearbeitungsvorgangs interessant ist: die Energie pro geschliffener Fläche EA in J/mm². Diese Größe errechnet sich wie folgt:

$$EA = \frac{P \cdot t}{L \cdot W} \quad (3),$$

Tabelle 3 Versuchsreihe der Schleifversuche, nach [16].

Versuchsreihe Nr.	Versuchsphase	Scheibentyp	Drehzahl [min ⁻¹]	Vorschub [mm/min]
1	(1) Ohne Zwischenabrichten	A (ohne Binder)	2 000	30
2	(1) Ohne Zwischenabrichten	A (ohne Binder)	4 000	45
3	(1) Ohne Zwischenabrichten	B (mit Binder)	6 000	30
4	(1) Ohne Zwischenabrichten	B (mit Binder)	8 000	45
5	(2) Abrichten zwischen Passagen	A (ohne Binder)	2 000	125
6	(2) Abrichten zwischen Passagen	A (ohne Binder)	4 000	250
7	(2) Abrichten zwischen Passagen	B (mit Binder)	6 000	125
8	(2) Abrichten zwischen Passagen	B (mit Binder)	8 000	250
9	(3) Bewertung der Porosität	B (mit Binder)	4 000	250
10	(3) Bewertung der Porosität	C (Porenbildner)	4 000	250

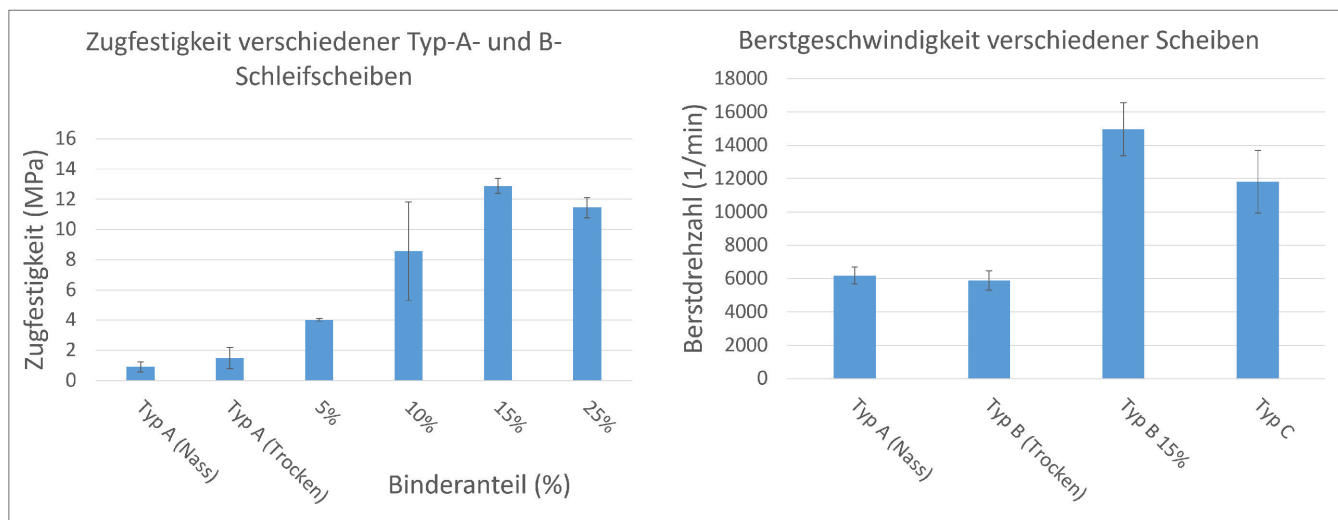


Bild 6 Links: Ergebnisse des 3-Punkt-Biege-Versuchs für Typ A- und Typ-B-Scheiben; rechts: Ergebnisse der Berstversuche. Grafik: nach [15]

mit P als Leistung während der Bearbeitung in Watt, t der Dauer des Eingriffs in Sekunden, L der bearbeiteten Länge in mm, und W der Dicke der Schleifscheibe in mm.

Die andere Größe, welche in den Schleifversuchen gemessen wurde, war die Oberflächengüte, die mit einem Fokusvariationsmikroskop vom Typ „Alicona Infinite Focus“ ermittelt wurde. Dabei wurde ein 3D-Profil der geschliffenen Oberfläche erzeugt und entlang bestimmter Messlinien die durchschnittliche Abweichung des Profils von der Mittel-Linie gemessen.

Während Phase 3 wurde zudem noch ermittelt, wie weit geschliffen werden kann, bevor sich die Oberfläche der Schleifscheibe zusetzt. Die Schleifversuche erfolgten auf lackierten Aluminiumprofilen als praxisnahem, schmierungsanfälligem Werkstoff (vergleiche Tabelle 3). Sobald das Zusetzen auftritt, entstehen dort charakteristische Schlieren auf der Oberfläche des bearbeiteten Gegenstands, wo der Lack nicht komplett entfernt wird. Die Distanz bis zum Eintreten der Schlieren wird im Anschluss an den Schleifvorgang optisch gemessen [16].

4 Ergebnisse

4.1 Resultate der mechanischen Prüfung

In der Stufe 1 wurde anhand von Typ-A-Scheiben untersucht, inwiefern die Temperatur und der Anpressdruck die Festigkeit der Schleifscheiben beeinflussen. Es zeigte sich, dass der Druck keinen statistisch signifikanten Einfluss hatte, und die Temperatur über 160 °C die Festigkeit verringerte. Dieses Ergebnis war konsistent zwischen dem Dreipunkt-Biege-Versuch und dem Zugversuch. Der für Nylon uncharakteristische negative Einfluss der Temperatur wird darauf zurückgeführt, dass Polyurethan-Flocken bei 200 °C bereits thermisch degradieren und dabei die Festigkeit des Werkstoffverbunds reduzieren. Einen großen Vorteil für die Festigkeit brachte das Trocknen der Werkstoffe im Ofen [15].

Bild 6 a) zeigt die Zugfestigkeit verschiedener Schleifscheiben-Typen.

Während die Trocknung der Scheiben einen leichten Vorteil in der Zugfestigkeit bringt, ist sie noch nicht zufriedenstellend. Mit Zusatz frischen Phenolharz-Binders (Stufe 2, Typ B) stieg die Tragfähigkeit bereits ab 5%-Binder auf das Doppelte. Das beste Niveau wurde mit 12 MPa bei 15 % erreicht. Bei 25 % sank die Zugfestigkeit wieder, was auf unvollständige Aushärtung hin-

deutet. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden 15%-Binder für nachfolgende Untersuchungen festgelegt.

Die Sicherheitsprüfung im Spintest bestätigte die mechanischen Trends: Typ-B-Scheiben erreichten maximale Bruchdrehzahlen von etwa 14 000 min⁻¹ (Bild 6 b)). Typ-A-Scheiben (trocken und nass) lagen deutlich niedriger und brachen meist bei ≤ 6000 min⁻¹. Typ-C-Scheiben mit erhöhter Offenporigkeit lagen knapp unter 12 000 min⁻¹. Die reduzierte Bruchdrehzahl ist konsistent mit dem höheren Porenanteil und der damit kleineren effektiven Querschnittsfläche, reicht jedoch immer noch für Anwendungen in geschlossenen Bearbeitungszentren. Anhand dieser Prüfungen wurden geeignete Varianten für die anschließenden Schleifversuche ausgewählt.

4.2 Oberflächen und Schleifverhältnisse von Scheiben Typ A und B

Die Phasen 1 und 2 wurden gemäß Tabelle 3 durchgeführt: zunächst ohne Zwischenabrichten (Versuchsreihen #1–4), anschließend mit Abrichten zwischen den Passagen und erhöhtem Vorschub (Versuchsreihen #5–8).

Ohne Abrichten erzielten Typ-B-Scheiben deutlich bessere Oberflächen als Typ-A-Scheiben: R_a lag bei Typ B unter 1,8 µm, bei Typ A bei etwa 2,5 µm (Bild 7 b)). Das Schleifverhältnis betrug für Typ B $G \approx 800$ und für Typ A $G \approx 200$ (Bild 7 a)). Gleichzeitig wurde frühes Zusetzen beobachtet, insbesondere bei Schleifscheiben mit geringer Offenporigkeit infolge hoher Presskräfte. Das abgetragene Material wurde unzureichend abgeführt, die Selbstschärfung blieb aus.

Mit Abrichten zwischen den Passagen verbesserte sich die Oberflächenrauheit für beide Typen (Bild 7 d)). Die Varianz der R_a -Werte wurde bei Typ B enger, quasi alle Ergebnisse lagen dabei bei etwa 1,5 µm. Das Abrichten reduzierte aber die Standzeit messbar: Das G -Verhältnis sank bei Typ B um mehr als 75 %, bei Typ A um etwa 50 % (Bild 7 c)). Ursache ist der zusätzliche Verschleiß durch das Abtragen der obersten Schicht, wodurch der Schleifscheibenverschleiß gegenüber dem Werkstückabtrag überproportional steigt.

Diese Befunde begründen die nachfolgende Untersuchung erhöhter Porosität zur Verzögerung des Zusetzens bei vergleichbarer R_a .

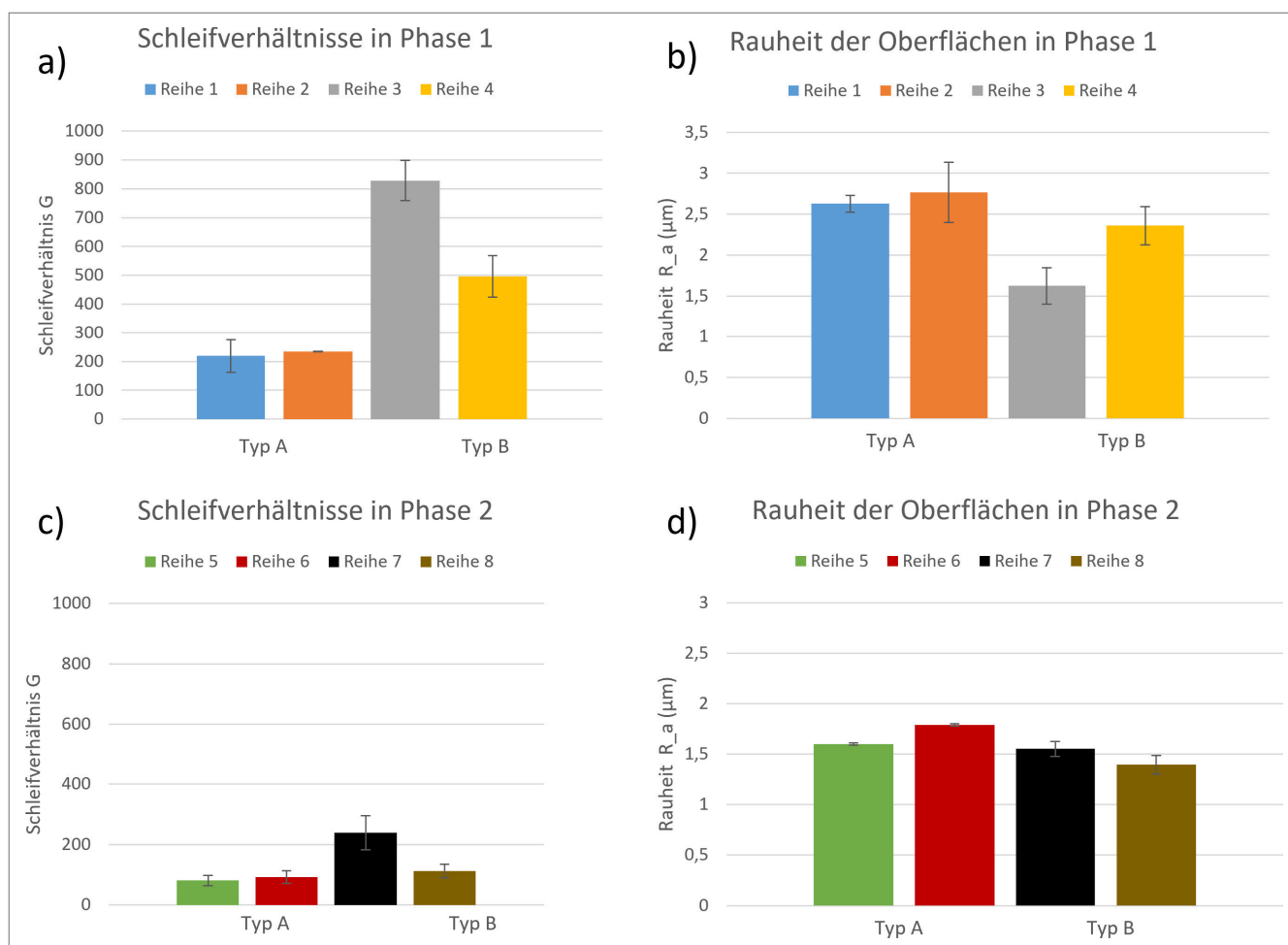


Bild 7 Ergebnisse der Schleifversuche Phasen 1 und 2: a) Schleifverhältnisse in Phase 1; b) Rauheit der dabei erzeugten Profile; c) Schleifverhältnisse in Phase 2; d) Rauheit der in Phase 2 erzeugten Oberflächen. Grafik: nach [15]

4.3 Energetische Betrachtung des Schleifvorgangs

Zur energetischen Bewertung wurden die Energie je Schleifvorgang E und die Energie pro bearbeiteter Fläche EA aus der gemessenen mittleren Leistungsaufnahme und den Prozessparametern je Versuchsreihe gemäß Formel (3) bestimmt. Die Ergebnisse sind in **Bild 8** zu sehen.

Offensichtlich ist der größte Einfluss auf den Energiebedarf der Spindel das Abrichten zwischen den Schleifvorgängen: Der Unterschied zwischen Versuchsreihe 1 und 5, bei denen alle Parameter außer dem Zwischen-Abrichten identisch sind, beträgt über 90 %. Die Reduktion deutet auf eine wiederhergestellte Schneidfähigkeit der Scheiben hin. Der Reibanteil am Energieeintrag nimmt ab, wenn die oberste Schicht durch Abrichten erneuert und frische Körner in den Eingriff gebracht werden.

Da die vorliegenden Daten nur einen durchschnittlichen Leistungswert während des Eingriffs enthielten, konnte eine feiner auflösende Analyse, die untersucht, ob mit Beginn des Zusetzens auch der Energiebedarf steigt, leider nicht durchgeführt werden.

4.4 Phase 3: Porenbildner und Porosität

In der Phase 3 wurde gemäß Tabelle 3 bewertet, inwiefern der Zusatz von Porenbildnern das Zusetzen der Schleifscheibenoberfläche verzögern kann. Die Parameter entsprachen den Einstel-

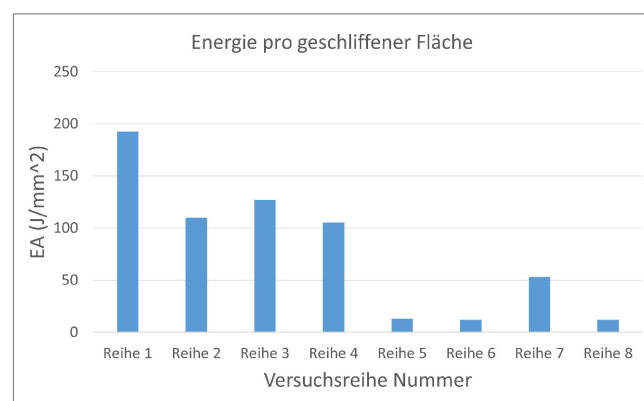


Bild 8 Energie, die pro geschliffener Fläche für die Spindel benötigt wird. Grafik: Universität Stuttgart

lungen aus Reihe 9/10: 4 000 min⁻¹ und 250 mm/min. **Bild 9** zeigt für verschiedene Varianten von Schleifscheiben die geschliffene Distanz in mm, bevor Zusetzen auftrat.

Die Scheiben mit Porenbildner erzielten eine längere Schleifstrecke bis zum Auftreten sichtbarer Schlieren auf dem Werkstück als die Variante ohne Porenbildner. Bemerkenswert ist, dass die bei 20 kN gepresste Variante ($\approx 25\%$ Porosität) beinahe 200 mm erreichten und damit mehr als die bei 6 kN gepresste Variante ($\approx 30\%$ Porosität). Diese zeigte nach knapp 95 mm

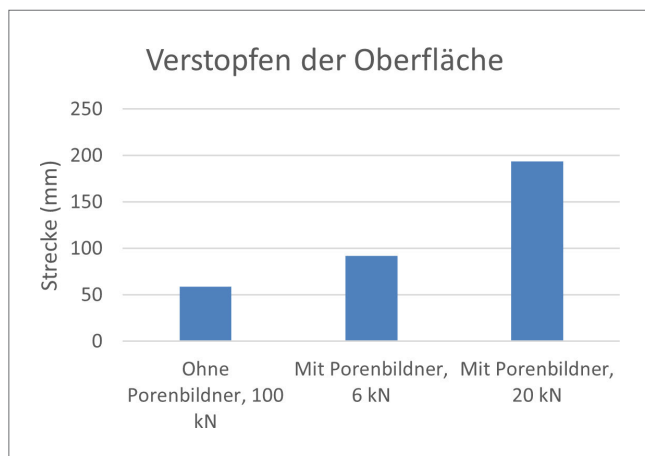


Bild 9 Einfluss von Porenbildner auf das Zusetzen der Oberfläche.
Grafik: nach [16]

Zusetzen, also etwas weniger als doppelt so viel Strecke wie die Variante ohne Porenbildner mit knapp 60 mm [16].

Die Ergebnisse sprechen dafür, dass neben dem absoluten Porenanteil die Porenstabilität und die Mikrostruktur der Bindermatrix das Verhalten beim Zusetzen bestimmen. Eine moderatere Porosität bei höherer Presskraft kann unter den hier gewählten Bedingungen einen günstigeren Kompromiss aus Spanraum, Kornhalt und Oberflächenqualität bieten als maximale Porosität mit ausgeprägt schwacher Matrix. Direktvergleiche mit den Phasen 1 und 2 sind aufgrund des abweichenden Werkstoffs nicht zielführend. Für die Parametrierung innerhalb Phase 3 ist der positive Effekt des Porenbildners auf die nutzbare Schleifstrecke klar erkennbar.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag zeigt, dass Schleifvlies-Abfälle ohne gefährliche Chemikalien und mit geringem Energieeinsatz zu funktionsfähigen, kunststoffgebundenen Schleifwerkzeugen verarbeitet werden können. Kern ist ein Heißpressverfahren, das den im Schleifvlies vorhandenen thermoplastischen Anteil als Bindemedium nutzt; gezielte Binderzugaben stabilisieren die Mechanik. Die stufenweise Versuchsplanung und Versuchsdurchführung von reinen Recyclingmischungen (Typ A) über Binderzugaben (Typ B) bis zu porenbildenden Varianten (Typ C) ermöglichte eine abgesicherte Parametrierung.

Mechanisch zeigte sich, dass 16 °C und vorgängige Trocknung die Festigkeit gegenüber 200 °C beziehungsweise ungetrocknetem Material erhöhen. Der Pressdruck im Bereich 100–150 kN war nachrangig. Mit 15 % Phenolharz-Binder erreichten die Räder das beste Festigkeitsniveau. Spintests bestätigten Sicherheitsreserven bei typischen Anwendungsfällen: Typ B versagte bei circa 14 000 min⁻¹, Typ C knapp darunter. In den Anwendungstests erzielte Typ B Oberflächenqualitäten, die mit jenen von kommerziellen Schleifscheiben vergleichbar sind. Frühes Zusetzen durch die geringe Offenporigkeit verlangte aber häufiges Abrichten, das die Standzeit (*G*) verkürzte. In Phase 3 verlängerte 1 % Porenbildner die Schleifstrecke bis zum Zusetzen. Die moderat poröse Variante erwies sich dabei als robuster als die stärker poröse.

Die energetische Auswertung ergänzt diese Befunde: Mit Abrichten sanken Energie je Schleifvorgang und Energie pro Fläche

deutlich gegenüber den Reihen ohne Abrichten, was auf reduzierte Reibanteile und erneuerte Schnittfähigkeit hinweist.

In Summe sind Schleifscheiben mit 15 % Binder- und 1 % Porenbildner-Anteil mechanisch sicher und für Anwendungen mit geringeren Anforderungen an die Oberflächengüte geeignet.

Nächste Schritte betreffen die Optimierung von Binde- und Porenbildner (Zersetzungsfenster, Porenstabilität), die robuste Dosierung/Fließfähigkeit des Mischgranulats, die Skalierung des Heißpressprozesses sowie erweiterte Messungen zur spezifischen Schleifenergie und zeitaufgelösten Leistung, um Zusammenhänge mit *G*, Rauheit und Zusetzen quantitativ zu schließen.

Zudem plant das Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) ein Folgeprojekt, das die Erkenntnisse aus diesem Projekt auf einen anderen Anwendungsbereich transferiert: Abfälle aus dem Gleitschleifprozess sollen gereinigt und zu neuen Gleitschleifkörpern verarbeitet werden. Ziel ist die Validierung von mechanischer Sicherheit, Bearbeitungsleistung und energetischer Effizienz in industriell relevanten Anwendungen.

FÖRDERHINWEIS

Das Forschungsprojekt ReAbrasive wurde aus Mitteln des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BWE) unter der Projekt-Nummer KK5040505AT0 gefördert, unter Betreuung durch die AiF GmbH als Projektträger.

DANKSAGUNG

Wir danken unserem Projektpartner, der H. Günther Falkenrich GmbH, für die gute Zusammenarbeit im Projekt.

LITERATUR

- [1] Lukić, S.; Jovanić, P.: Structural analysis of abrasive composite materials with nonwoven textile matrix. *Materials Letters* 58 (2004) 3–4, pp. 439–443
- [2] Magazine, M.: Finishing via Non-Woven Abrasives. *MetalForming Magazine*. Stand: 01.04.2017. Internet: www.metalformingmagazine.com/article/7/finishing/grinding/finishing-via-non-woven-abrasives. Zugriff am 14.01.2026
- [3] Research and Markets Ltd.: Nonwoven Abrasives Market – Global Forecast 2026–2032. Stand: 08.07.2025. Internet: www.researchandmarkets.com/reports/4968583/nonwoven-abrasives-market-by-form-end-use. Zugriff am 16.01.2026
- [4] H. Günther Falkenrich GmbH: Technology. Internet: www.falkenrich.de/en/technology#J. Zugriff am 14.01.2026
- [5] Sabarinathan, P.; Annamalai, V. E.; Xavier Kennedy, A.: On the use of grains recovered from spent vitrified wheels in resinoid applications. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 22 (2020) 1, pp. 197–206
- [6] Sabarinathan, P.; Annamalai, V. E.; Rajkumar, K.: Sustainable application of grinding wheel waste as abrasive for abrasive water jet machining process. *Journal of Cleaner Production* 261 (2020), # 121225
- [7] Sabarinathan, P.; Annamalai, V. E.; Vishal, K. et al.: Experimental study on removal of phenol formaldehyde resin coating from the abrasive disc and preparation of abrasive disc for polishing application.

- Advances in Materials Science and Engineering (2022), pp. 1–8, <https://doi.org/10.1155/2022/6123160>
- [8] Eriksson, O.; Finnveden, G.: Plastic waste as a fuel – CO₂-neutral or not? *Energy & Environmental Science* 2 (2009) 9, #907, <https://doi.org/10.1039/B908135F>
- [9] Pappa, G.; Boukouvalas, C.; Giannaris, C. et al.: The selective dissolution/precipitation technique for polymer recycling: a pilot unit application. *Resources, Conservation and Recycling* 34 (2001) 1, pp. 33–44
- [10] Palaniyappan, S.; Veiravan, A.; Kumar, V. et al.: Process optimization and removal of phenol formaldehyde resin coating using mechanical erosion process. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology* 38 (2022) 2, pp. 141–154
- [11] Miller, V.: The Environmental Impact of Abrasive Wheel Usage. Stand: 16.01.2025. Internet: cpdonline.co.uk/knowledge-base/health-and-safety/environmental-impact-abrasive-wheel. Zugriff am 14.01.2026
- [12] Linke, B.: Life Cycle and Sustainability of Abrasive Tools. Cham: Springer International Publishing 2016
- [13] Linke, B.: Manufacturing and sustainability of bonding systems for grinding tools. *Production Engineering* 10 (2016) 3, pp. 265–276
- [14] Beaucamp, A.; Kirsch, B.; Zhu, W.: Advances in grinding tools and abrasives. *CIRP Annals* 71 (2022) 2, pp. 623–646
- [15] Tumkur Karnick, S.: Parameter study in the production of grinding wheels made from recycled polymer powder. Master thesis, Otto von Guericke Universität, 2023
- [16] Rösch, K.; Mayer, T.; Karnick, S. T.: Environmentally friendly manufacturing of grinding wheels from nonwoven abrasive waste: method and performance evaluation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 140 (2025) 5–6, pp. 3015–3029
- [17] Pilato, L. (ed.): Phenolic Resins: A Century of Progress. Heidelberg: Springer-Verlag 2010
- [18] DIN EN ISO 527–1:2019–12: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO_527–1:2019). Deutsche Fassung EN ISO 527–1:2019
- [19] DIN EN ISO 178:2019: Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften. Deutsche Fassung EN ISO 178:2019
- [20] Rowe, W. B.: Principles of modern grinding technology. Waltham, MA: William Andrew 2014
- [21] DIN EN ISO 20753:2022–07: Kunststoffe – Probekörper (ISO/DIS 20753:2022)

Korbinian Rösch, M.Sc. 

korbinian.roesch@iff.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart, Institut für
Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF)
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.iff.uni-stuttgart.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)