

1 Einleitung

„In der Spitze der Schneide liegt die Rendite des Betriebs.“

Georg Schießinger (1874–1949)¹

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der Werkstoff Holz wird seit Jahrtausenden vielseitig verwendet, was einerseits durch dessen kontinuierliche Verfügbarkeit und andererseits durch die herausragenden Bearbeitungs- und Gebrauchseigenschaften erklärbar ist. Gerade heute kommt ihm eine bedeutende Rolle zu. Vor dem Hintergrund aktueller Nachhaltigkeitsbemühungen überzeugt Holz, da es nicht nur langfristig Kohlenstoff bindet, sondern auch energieintensive Werkstoffe ersetzt und dadurch erhebliche Mengen an CO₂-Emissionen vermeidet. [CHU20, S. 269 f.] MISHRA et al. sehen bspw. das Potenzial, die globalen CO₂-Emissionen um 106 Gigatonnen zu senken, wenn für zusätzlich benötigten Wohnraum in Städten bis 2100 die bisher häufig genutzten Baustoffe Stahl und Beton zu 90 % durch Holz ersetzt werden [MIS22, S. 7]. Im Jahr 2023 belief sich die weltweite Produktion von Schnittholz² auf etwa 445 Millionen Kubikmeter, wovon 23,8 Millionen Kubikmeter, also rund 5,3 %, in der Bundesrepublik Deutschland hergestellt wurden [FAO24, S. 7; FAO25].

Das wichtigste Bindeglied zwischen Forstwirtschaft und weiterverarbeitenden Branchen stellen dabei Sägewerke dar [DEU15, S. 3]. Zentraler Bestandteil der Bearbeitung in diesen ist der Sägeprozess, bei dem Holz in unterschiedliche Formen und Größen zugeschnitten wird. Dabei kommt insbesondere die Kreissäge als eines der vielseitigsten und am häufigsten verwendeten Werkzeuge zum Einsatz [NAS18, S. 1]. Die Effizienz und Produktivität des Sägeprozesses bestimmen erheblich die Produktqualität, den Materialverbrauch sowie die Wirtschaftlichkeit des gesamten Sägewerks [ETT04, S. 122] – eine Aussage, die im Eingangszitat prägnant zum Ausdruck kommt.

Dabei ist zu beachten, dass in der Holzverarbeitenden Branche ein relevanter Wettbewerbsdruck besteht. Dieser entsteht durch Preis- und Kostendruck, Überkapazitäten und globale Konkurrenz. Damit Sägewerke aus der europäischen Union im internationalen Wettbewerb bestehen können, ergibt sich ein Zwang zur Steigerung von Effizienz und Innovation. [GRA23, S. 39; YIA24, S. 1] Fortschritte in Materialwissenschaft, Prozessüberwachung und -steuerung sowie Fertigungstechnologie werden genutzt, um die Prozesse der traditionellen Holzbearbeitung für eine wettbewerbsfähige Produktion weiter zu optimieren [HÜL25; VIL25].

Das Sägen von Holz ist ein komplexer Prozess, der von zahlreichen Einflussgrößen bestimmt wird³ – diese können werkstück-, prozess- und werkzeugseitig eingeordnet werden. Neben den

¹ Zitat nach [ETT04, S. XI].

² Der Sammelbegriff Schnittholz umfasst bspw. Holzbalken, -leisten und -bretter.

³ Eine Auflistung der Einflussgrößen ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Möglichkeiten, digitale Technologien⁴ zur Prozessoptimierung einzusetzen, wird an Kreissägeblättern geforscht. Untersuchte Faktoren betreffen u. a. das Material und die Steifigkeit von Kreissägeblättern. [KAN25, S. 1–28]

Bisher kaum wissenschaftlich untersucht ist das Potenzial von Beschichtungen zur Erhöhung der Standzeit von Kreissägeblättern in der Holzbearbeitung. Dieser Umstand ergibt sich aus der Tatsache, dass Sägezähne von Kreissägeblättern üblicherweise mehrmals nachgeschliffen werden [MAI00, S. 68]. Ein dabei nötiges Nachbeschichten der gesamten Kreissägeblätter ist unwirtschaftlich. Demgegenüber wird bspw. im Fräsprozess bereits bei ca. 60 % und im Drehprozess sogar bei ca. 95 % der Werkzeuge eine hochverschleißfeste Beschichtung eingesetzt [KLO18, S. 147]. Zusätzlich zu den nötigen Effizienzsteigerungen steht die holzverarbeitende Branche Forderungen nach einer ökologisch verantwortungsvollen und ressourcenschonenden Produktion gegenüber [VIL25]. Verbraucher, Politik und Bauwirtschaft erwarten eine nachhaltige Wertschöpfung entlang der gesamten Prozesskette [BMW25]. Damit wächst der Druck, (CO₂-) Emissionen zu senken, Abfall zu reduzieren und die Materialeffizienz zu steigern.

1.2 Zielsetzung und Fokussierung

Abgeleitet aus der beschriebenen Ausgangssituation und Problemstellung ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung eines Hochleistungskreissägeblattes zur Optimierung der effizienz- und produktivitätsbestimmenden Zielgrößen Werkzeugverschleiß, Schnittkraft und Oberflächenqualität des Schnittholzes. Das Hochleistungskreissägeblatt zeichnet sich insbesondere durch Sägezähne mit einer optimalen Sägezahngeometrie und einer maßgeschneiderten Beschichtung sowie durch eine Schnittstelle zum Wechsel der Sägezähne aus. Die Entwicklung basiert auf einer wissenschaftlichen Analyse der den Kreissägeprozess bestimmenden Einflussgrößen. Diese sind gemäß Abbildung 1 den Kategorien Werkstück, Prozess und Werkzeug zuordenbar.

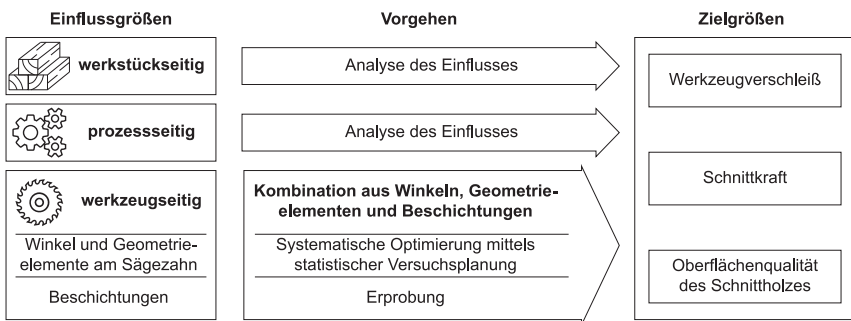


Abbildung 1: In der vorliegenden Arbeit betrachtete Einfluss- und Zielgrößen beim Prozess Kreissägen

⁴ Ansätze sind u. a. eine intelligente Prozesssteuerung [NAS18, S. 9–11], eine intelligente Bildauswertung zur Bewertung der Holzqualität [NAS24, S. 224–227] oder auch Predictive Maintenance mittels künstlicher Intelligenz [BRA25].

Die Auswirkungen der Einflussgrößen aus den Kategorien Werkstück und Prozess sollen experimentell untersucht werden, um – basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen – im Entwicklungsprozess des Hochleistungskreissägeblattes konstante Rahmenbedingungen zu schaffen. Zur Analyse der Oberflächenqualität des Schnittholzes soll zudem der in der Industrie gebräuchliche Begriff *sägerau* erstmals systematisch quantifiziert werden.

Zunächst soll im Entwicklungsprozess der Fokus auf den Sägezähnen liegen. Das zentrale Element bildet dabei die multikriterielle Zielgrößenoptimierung der Winkel und weiterer Geometrieelemente unter Anwendung der statistischen Versuchsplanung. Damit wird in dieser Arbeit ein umfassender Ansatz verfolgt, der die Betrachtung der wechselseitigen Beeinflussung von Winkeln und Geometrieelementen erlaubt. Als wissenschaftlich bisher kaum untersuchter Ansatz werden zudem maßgeschneiderte Beschichtungen erprobt und mit den optimierten Sägezahngeometrien kombiniert.

Im Anschluss soll ein Hochleistungskreissägeblatt für den Industrieprozess abgeleitet und dessen dynamisches Verhalten analysiert werden, um kritische Resonanzzustände im Bereich der Anregungsfrequenz auszuschließen. Eine vergleichende Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [DIN21b] und DIN EN ISO 14044 [DIN21a] soll die Umweltauswirkungen des Hochleistungskreissägeblattes im Vergleich zu marktüblichen Kreissägeblättern aufzeigen.

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die Entwicklung eines Hochleistungskreissägeblattes für Industrieprozesse. Aufgrund des höheren Verarbeitungsanteils von Weichholz gegenüber Hartholz in der industriellen Holzbearbeitung richtet die vorliegende Arbeit ihren Fokus auf die Bearbeitung von Weichholz⁵. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit aller Versuchsergebnisse wurden sämtliche Untersuchungen einheitlich mit Fichtenholz durchgeführt, einem typischen Vertreter von Weichholz. Das Hochleistungskreissägeblatt wird dabei für das Kreissägen parallel zur Baumstammachse im sogenannten Längsschnitt entwickelt.

1.3 Vorgehensweise

Die in der vorliegenden Arbeit gewählte Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung wird nachfolgend beschrieben. Die systematische Entwicklung des Hochleistungskreissägeblattes erfolgt in mehreren inhaltlich aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten wie in Abbildung 2 dargestellt. Zusätzlich werden die erforderlichen Eingangsinformationen sowie die eingesetzten methodischen und technischen Mittel zusammenfassend aufgezeigt.

⁵ Der Anteil von Weichholz am Holzeinschlag in Deutschland lag in den Jahren 1998–2023 bei mindestens 70 % [STA24].

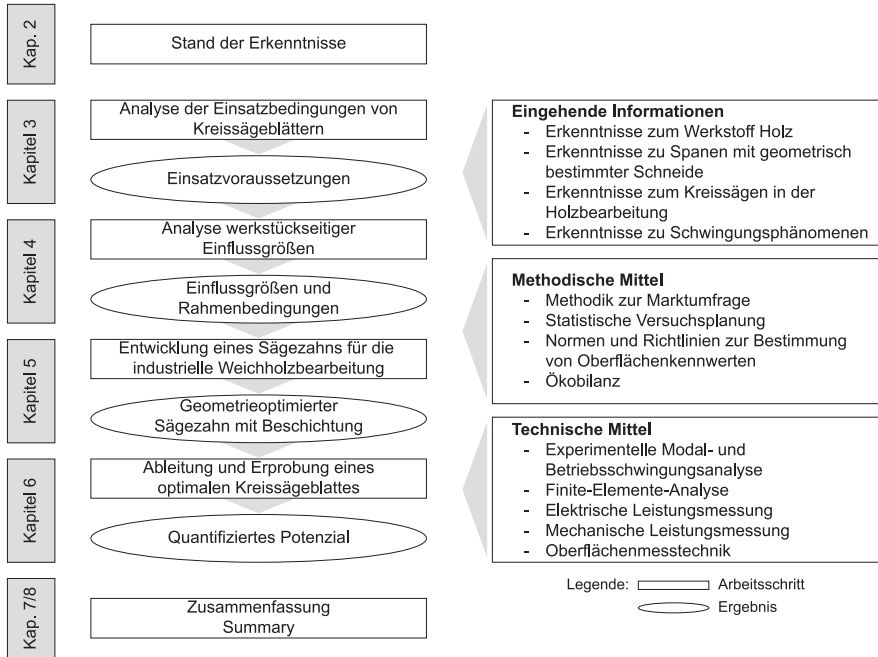


Abbildung 2: Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit

Der Stand der Erkenntnisse und relevante Grundlagen werden in **Kapitel 2** dargelegt. Dazu wird in den Themenbereich Holz als Werkstoff eingeführt. Nach einer allgemeinen Hinführung zur Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide erfolgt eine Konkretisierung auf das Fertigungsverfahren Kreissägen in der Holzbearbeitung. Abschließend werden die Grundlagen des Themenbereichs Schwingungen an Werkzeugen und Werkzeugmaschinen erläutert.

Kapitel 3 beschreibt die durchgeführte Marktstudie unter Herstellern (Werkzeugschleifern) und Anwendern (Sägewerken) von Kreissägeblättern. Basierend auf den Ergebnissen werden wichtige Werkzeugeigenschaften wie Durchmesser und Werkstoff sowie Prozessparameter wie Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit für die folgenden Kapitel festgelegt. Zudem werden die für die Anwender bedeutendsten Kriterien ermittelt und daraus die Zielgrößen Werkzeugverschleiß, Schnittkraft und Oberflächenqualität des Schnittholzes für die vorliegende Arbeit definiert.

Zum vertieften Verständnis des Kreissägeprozesses zur Weichholzbearbeitung erfolgen in **Kapitel 4** systematische Untersuchungen werkstückseitiger Einflussgrößen. Dazu werden bei Fichtenholz die Auswirkungen von Holzfeuchte, Holztemperatur, Schnittrichtung und Position am Baumstamm auf die Zielgrößen Schnittkraft und Oberflächenqualität des Schnittholzes

untersucht. Gleichzeitig werden daraus die Rahmenbedingung für die nachfolgenden Laboruntersuchungen abgeleitet.

Das zentrale Element der Arbeit bildet die Entwicklung eines Sägezahns für die industrielle Weichholzbearbeitung in **Kapitel 5**. Zur Ermittlung von Rahmenbedingung werden die prozesseitigen Einflussparameter Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit hinsichtlich ihrer Auswirkung auf Schnittkraft und Oberflächenqualität untersucht. Zur Analyse der Oberflächenqualität des Schnittholzes wird der Begriff *sägerau* systematisch quantifiziert. Für die Entwicklung des Sägezahns wird eine multikriterielle Zielgrößenoptimierung unter Anwendung der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Die betrachteten Eingangsgrößen umfassen ausgewählte Winkel und Geometrieelemente am Sägezahn, bei denen auf Grundlage der bereits gewonnenen Erkenntnisse ein signifikanter Einfluss auf die Zielgrößen erwartet wird. In diesem Kapitel werden auch der entwickelte Prüfstand und das zugehörige Messkonzept sowie die Planung und Durchführung der systematischen Versuchsreihen beschrieben. Zudem werden maßgeschneiderte Beschichtungen erprobt und mit den optimierten Sägezähnen kombiniert.

In **Kapitel 6** wird, basierend auf den in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnissen, ein Hochleistungskreissägeblatt für die industrielle Weichholzbearbeitung abgeleitet. Zunächst wird eine Schnittstelle zum Wechsel der Sägezähne eingeführt, welche die Voraussetzung für den ökonomisch sinnvollen Einsatz von Beschichtungen bei Kreissägeblättern darstellt. Die Validierung des Hochleistungskreissägeblattes erfolgt sowohl im Rahmen von Laboruntersuchungen, inklusive der Überprüfung des dynamischen Verhaltens mittels einer Modal- und Betriebsschwingungsanalyse, als auch im Industrieprozess. Eine vergleichende Ökobilanz rundet das Kapitel ab und zeigt die Umweltauswirkungen des Hochleistungskreissägeblattes im Vergleich zu marktüblichen Kreissägeblättern auf.

Eine Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte der vorliegenden Arbeit in deutscher und englischer Sprache in **Kapitel 7** und **Kapitel 8** schließt die Arbeit ab.