

1 Ausgangssituation

For most of today's rich countries, there was indeed a period when economic success was synonymous with manufacturing.

The Economist. 1998 [THE98, S. 4]

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Wie das einführende Zitat beschreibt, sind die Zeiten, in denen wirtschaftlicher Erfolg gleichbedeutend mit Fertigung verwendet werden konnte, Vergangenheit. Insbesondere am Hochlohnstandort Deutschland stehen produzierende Unternehmen vor der Herausforderung, den wirtschaftlichen Unternehmenserfolg sicherzustellen, weshalb zunehmend Produktivitätssteigerungs- und Ressourceneffizienzaspekte in den Fokus von Innovationen rücken [SPA13, S. 41]. Bearbeitungsverfahren auf spanenden Werkzeugmaschinen, die sich nach DIN 8580 der Fertigungshauptgruppe des Trennens, im Detail des Trennens mit geometrisch bestimmter Schneide, zuordnen lassen [DIN03c], kommen in nahezu jedem produzierenden Unternehmen in Deutschland zum Einsatz.

Neben der Automobilindustrie inklusive zugehöriger Zulieferunternehmen ist vor allem der Maschinenbau ein Industriezweig mit einem hohen Anteil spanender Bearbeitungsaufgaben. Alleine diesem Industriezweig lassen sich im Jahr 2018 6.653 Unternehmen in Deutschland zuordnen, ohne dabei Werkzeug- und Halbzeughersteller zu berücksichtigen. Umfassend betrachtet repräsentieren oben genannte Industriezweige ca. 7 % der Bruttowertschöpfung der Gesamtwirtschaft Deutschlands. [STA20b; STA20a; VDM20, S. 11] Im Jahr 2018 wurden in Deutschland spanende und abtragende Werkzeugmaschinen im Gesamtwert von 9,35 Mrd. € produziert. Bearbeitungszentren und Fräsmaschinen haben dabei mit einem Gesamtwert von 3,26 Mrd. € einen Anteil von ca. 35 % an der deutschen Jahresgesamtproduktion [VDW20, S. 20].

Um der allgemein angestrebten Produktivitäts- und Ressourceneffizienzsteigerung in der spanenden Bearbeitung Rechnung zu tragen, muss die Energieaufwandscharakteristik einer spanenden Bearbeitungsaufgabe betrachtet werden; vgl. Abbildung 1, Beispiel einer Fräsbearbeitungsaufgabe. Diese zeigt die prozentuale Zusammensetzung des Gesamtenergieverbrauchs aus dessen Einzelverbrauchsanteilen. Nach WESTERMANN entfallen somit im Mittel 39,1 % des Gesamtenergieverbrauchs¹ auf die Grundlast, 44,9 % auf den Leerlauf sowie 16,0 % auf die Prozesslast, also jener Energieverbrauchsanteil für die tatsächliche mechanische Zerspannung [WES16, S. 71]. Auch weitere Untersuchungen zeigen, dass durchschnittlich etwa 20 % der Energie für den Bearbeitungsprozess selbst sowie 80 % für den Betrieb der Nebenaggregate bei einer spanenden Bearbeitungsaufgabe verbraucht werden [KAU11, S. 60; DEN12, S. 6].

¹In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Energieverbrauch gemäß der VDI-Richtlinie 4661 als aufgewandte Menge bestimmter Energieformen für die Deckung eines Energiebedarfs unter realen Bedingungen verwendet, wohl wissend, dass bei rein physikalischer Betrachtung in geschlossenen Systemen kein Energieverbrauch existiert, sondern eine Energieumwandlung stattfindet [VDI14, S. 5 f.].

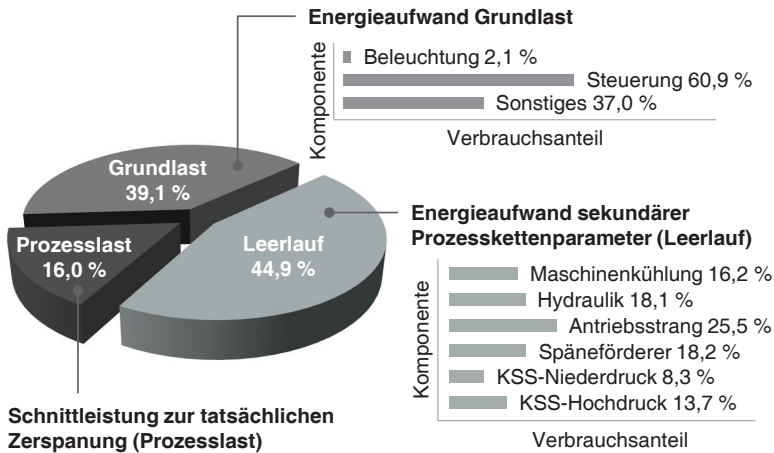


Abb. 1: Gemittelte Energieaufwandscharakteristik einer Fräsbearbeitungsaufgabe, nach [WES16, S. 72]

Eine Reduzierung der Prozesslast (z. B. durch optimierte Schnittbedingungen) hat somit weniger Produktivitäts- und Ressourceneffizienzsteigerungspotential als die Reduzierung der Prozessdauer (z. B. durch höhere Schnittwerte). Wird Letztgenannte verkürzt, führt dies sowohl zu einer Reduzierung der Grundlast als auch des Leerlaufs, die zusammen einen Anteil von 84,0 % an dem Gesamtenergieverbrauch einer Fräsbearbeitungsaufgabe repräsentieren. Die energetischen Bestandteile werden in Abbildung 1 verdeutlicht.

Eine Reduzierung der Prozessdauer erfordert dementsprechend eine Steigerung des Zeitspanvolumens² unter Beachtung der Fertigungsgenauigkeit und -qualität. Begrenzt wird diese Steigerung meist durch im Prozess auftretende Störungen. Dynamische Störgrößen bewirken dabei eine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, die sich als überlagerte Schwingungserscheinungen zur eigentlichen Vorschub- und Schnittbewegung zeigen. [KAL05, S. 17] Diese beschriebenen Störgrößen treten unabhängig davon auf, ob sich das Werkzeug (z. B. beim Fräsen) oder das Werkstück (z. B. beim Drehen) bewegt [ADA05]. Daraus resultieren eine verminderte Prozessleistung sowie eine geringere Bearbeitungsgenauigkeit, einhergehend mit schlechteren Oberflächengüten und verkürzten Werkzeugstandzeiten [ADA05; LAN08].

Die Störgrößen können durch diverse Einflussgrößen beeinflusst werden. Nachfolgende Tabelle 1 veranschaulicht die Einflussgrößen auf das Stabilitätsverhalten spanender Bearbeitungsaufgaben. Diese können dabei in die Bereiche Maschine, Werkstück/Werkzeug und Schnittprozess aufgeteilt werden.

²Das Zeitspanvolumen beschreibt das je Zeiteinheit abgespannte Volumen [DEN11, S. 6].

Tab. 1: Einflussgrößen auf das Stabilitätsverhalten spanender Bearbeitungsaufgaben, nach [WEC06b, S. 349]

	Maschine		Werkstück/ Werkzeug	Schnittprozess
	Betriebs- bedingungen	Richtungs- orientierung		
Einflussgrößen	– Fundament/Aufstellbedingungen	Geometrische Einflüsse durch den Bearbeitungsfall:	– Werkstücknachgiebigkeit	– Werkstoff
	– Lage der Bauteile	– Richtung der dynamischen Schnittkraft	– Werkstückmasse	– Schneiden-geometrie
	– Spindel-drehzahl	– infolge Einstell- und Neigungswinkel	– Werkstückeinspannung	– Werkzeugverschleißzustand
	– Schlitten-, Tischbewegungen	– Werkstück-Werkzeug-konfiguration	– Werkstück- bzw. Werkzeugdurchmesser	– Eckenradius
	– Lose, Umkehrspannen, Nicht-linearitäten, Vorspannung, Klemmzustände		– Werkzeugnachgiebigkeit	– Schnittgeschwindigkeit
	– Betriebstemperatur		– Werkzeugmasse	– Vorschub
			– Werkzeugeinspannung	– Hysterese der Grenzspannungsbreite
			– Werkzeug-Schneidstoffkombination	
			– Ungleichteilung bei Mehrschneidenwerkzeugen	
			– Kühl- und Schmiermittel	

1.2 Zielsetzung

Die Beschreibung der diversen Einflussgrößen auf das Stabilitätsverhalten spanender Bearbeitungsaufgaben, vgl. Tabelle 1, erlaubt eine Komposition von Maßnahmen, die das Potential zur Stabilisierung der Prozesse aufweisen. Der Fokus der hier vorliegenden Arbeit ist dabei auf das Werkzeug selbst gerichtet. Zur Optimierung der genannten Einflussgrößen im fokussierten Bereich tragen nach WECK & BRECHER vor allem ein dämpfungswirksames Werkzeug sowie eine geringe Werkzeugmasse bei. [WEC06b, S. 349 f.]

Vor diesem Hintergrund soll diese in der vorliegenden Arbeit mit einem Leichtbau-Innenkern aus Faserverbundkunststoff im spanenden Werkzeug erreicht werden. Dieser reduziert die rotierende Masse des Werkzeugs und kann durch die Auswahl der eingesetzten Werkstoffe für Faser und Matrix sowie deren Eigenschaften und Ausführungen Einfluss auf das Widerstandsmoment gegen Biegung und Torsion sowie auf die Schwingungsreduktion des Werkzeugs nehmen.

Eine eingehende Untersuchung von Schwingungsphänomenen an Schafteckfräsern, die bei der spanenden Bearbeitung von Stählen entstehen, soll einen Beitrag zur Steigerung der Prozesseffizienz, der Oberflächengüte bearbeiteter Bauteile sowie der Werkzeugstandzeit leisten. Die angestrebten technischen Funktionalitäten können, wie in Abbildung 2 dargestellt, in zwei Hauptgruppen – Werkzeug und Prozess – unterschieden werden. Neben der simulativen Ermittlung optimierter Schafteckfräser mit Leichtbau-Innenkernen steht hierbei die technische Umsetzung sowie deren Erprobung im Vordergrund.

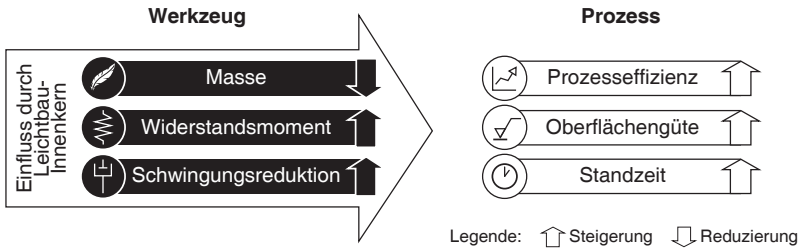


Abb. 2: Ziel der vorliegenden Arbeit

Die im Rahmen der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und verfolgte systematische Vorgehensweise sollen darüber hinaus als Basis für die Untersuchung weiterer spanender Werkzeuge im Hinblick auf die Reduzierung prozessinduzierter Schwingungen sowie die Ausgestaltung von Innenkernen aus andersartigen Leichtbauwerkstoffen bzw. einer umfassenden Substitution der aktuell zum Einsatz kommenden Werkstoffe für spanende Werkzeuge dienen.

1.3 Vorgehensweise

Die systematische Vorgehensweise zur Entwicklung eines Schafteckfräsers mit Leichtbau-Innenkern zur schwingungsreduzierten Fräsbearbeitung gliedert sich in mehrere, inhaltlich aufeinander aufbauende Arbeitsschritte, die in Abbildung 3 dargestellt sind. Darüber hinaus werden die erforderlichen Eingangsinformationen sowie die eingesetzten technischen und methodischen Mittel zusammenfassend für die einzelnen Arbeitsschritte aufgezeigt.

Zur zielorientierten Aufbereitung des Stands der Erkenntnisse in **Kapitel 2** wird zunächst ein grundlegendes Verständnis der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide vermittelt. Nach der detaillierten Betrachtung von Schwingungen an Werkzeugen und Werkzeugmaschinen folgt eine Erläuterung der Begriffe und Grundlagen zu Faserverbundkunststoffen sowie wesentlicher Verfahren zur Fertigung endlosfaserverstärkter Duromerbauteile. Ein umfassender Überblick zu bereits im vorliegenden Themengebiet sowie in thematisch verwandten Bereichen durchgeführter Arbeiten und Ansätzen gibt Aufschluss über aktuelle Forschungs- und Entwicklungsansätze aus Wissenschaft und Industrie. Die thematische Zusammenfassung zum Abschluss des Stands der Erkenntnisse zeigt die bestehenden Defizite nochmals auf.

Die Ausgangsbasis für die vorgesehenen Untersuchungen bildet die Analyse der Einsatzbedingungen von Schafteckfräsern in Form einer umfassenden Marktstudie in **Kapitel 3**. Auf Grundlage dieser wird sowohl der Werkzeugdurchmesser als auch der Werkstoff für das in **Kapitel 4** zu entwickelnde Referenzwerkstück definiert. Neben den Erkenntnissen aus der Marktstudie sowie bestehenden Referenzwerkstücken aus der Forschung und der Literatur flossen, basierend auf dem Referenzwerkstück nach WESTERMANN ET AL. [WES15], charakteristische Zerspanungsaufgaben aus der industriellen Praxis in dieses mit ein. Dem Featureansatz nach der Norm ISO 14649-10:2004(E) [ISO04] folgend, wird eine Vergleichsgrundlage für die Entwicklung von schwingungsreduzierten Schafteckfräsern mit Leichtbau-Innenkern geschaffen.

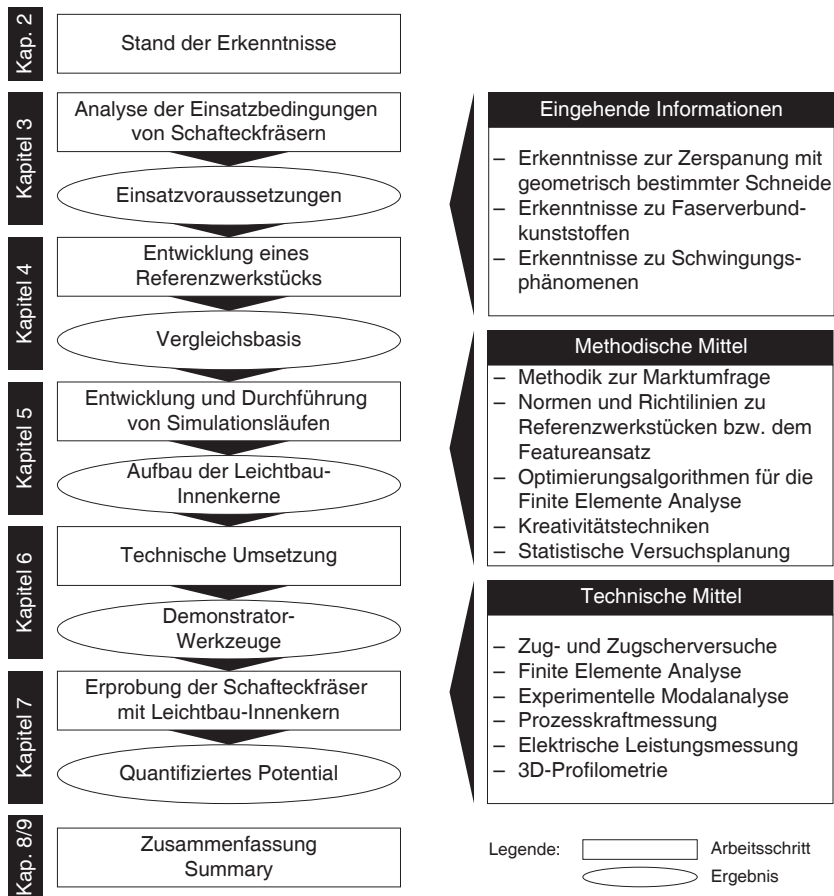


Abb. 3: Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit

Im Hinblick auf die Zielsetzung, die Masse zu senken und sowohl das Widerstandsmoment gegen Biegung und Torsion als auch die Schwingungsreduktion zu erhöhen, wird ein Modell für die Finite Elemente Analyse aufgebaut. Da Werkstoffkennwerte von Faserverbundkunststoffen aufgrund der Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten in der Regel nicht vorliegen, werden auch in dieser Arbeit die notwendigen Kennwerte für die zur Verfügung stehenden Werkstoffe ermittelt. Durch den Einsatz von Optimierungsalgorithmen werden Kombinationsmöglichkeiten gesucht, die eine Verbesserung gegenüber dem Referenzwerkzeug darstellen. **Kapitel 5** schließt mit der Ableitung der Aufbauten von Schafteckfräsern mit Leichtbau-Innenkern.

Auf Grundlage der Simulationsläufe erfolgt in **Kapitel 6** zunächst unter Einsatz von Kreativitätstechniken die Auswahl einer geeigneten Verbindung zwischen Leichtbau-Innenkern und Werkzeugmantel bevor im Rahmen der Praxisuntersuchungen auf Prinzipien und Instrumente der statistischen Versuchsplanung zurückgegriffen wird. Darauf folgend wird die Herstellung sowohl von Werkzeugmantel als auch der Leichtbau-Innenkerne beschrieben. Mit dem Fügen der Einzelkomponenten unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den praktischen

Untersuchungen zur Verbindung werden die Demonstratorwerkzeuge schließlich hergestellt. **Kapitel 7** beginnt mit der Beschreibung der eingesetzten Messtechnik für die experimentellen Untersuchungen der entwickelten Schafteckfräser mit Leichtbau-Innenkern. Ferner enthält dieses Kapitel die Ergebnisse der durchgeführten Erprobungen, die mit den Demonstratorwerkzeugen durchgeführt werden. Hierfür werden einleitend der Versuchsaufbau mit dem im Laborumfeld zum Einsatz kommenden 5-Achs-CNC Fräsbearbeitungszentrum, die Spannzeuge sowie die Versuchsdurchführung beschrieben. Auf Grundlage des entwickelten Referenzwerkstücks, weiterer praktischer Untersuchungen auf Basis von gestuften Versuchsplatten und Abzeiloperationen sowie dem industriellen Einsatz erfolgt die Validierung der vorteilhaften Eigenschaften der Schafteckfräser mit Leichtbau-Innenkern. Zum Abschluss dieses Kapitels werden die gesteigerte Leistungsfähigkeit gegenüber konventionellen Schafteckfräsern quantifiziert.

Die Zusammenfassung sowie das Aufzeigen von fortbestehenden Forschungsbedarfen in **Kapitel 8** schließen die Arbeit ab.