

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19172 N

Thema

Leistungssteigerung von Bearbeitungsmaschinen durch CFK-Komponenten in dynamisch angeregten Primärstrukturen

Berichtszeitraum

01.01.2017-31.12.2019

Forschungsvereinigung

VDW-Forschungsinstitut e.V.

Forschungseinrichtung(en)

- 1) Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)
- 2) Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen (KLuB)

Darmstadt, 21.08.2020

Guillaume Meyer (KLuB)

Frederik Birk (PTW)

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

1. Forschungsthema	1
2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	2
2.1. Stand der Technik	4
2.2. Ergebnisse des Vorläufervorhabens	8
2.3. Forschungsziel	12
3. Projektpartner	15
4. Komponentenauswahl und Potenzialanalyse	15
5. Demonstrator 1: x-z-Aufbau einer Portalfräsmaschine	15
5.1. Ausgangssituation und Anforderungen	15
5.2. Aufbau des Demonstrators	40
5.2.1. x-z-Schlitten	42
5.2.2. Abdeckung	46
5.2.3. Gewindeinserts	48
5.2.4. Kostenbetrachtung	50
5.3. Messtechnische Untersuchung des Demonstrators 52	
5.3.1. Statische Steifigkeit	52
5.3.2. Modalanalyse	58
5.3.3. Untersuchung des Portalnickens	61
5.3.4. Stabilitätskarten	63
5.4. Fazit	65
6. Demonstrator 2: Spindelstock eines Doppelspindlers (KLuB)	66
6.1. Ausgangssituation, Anforderungen	66
6.2. Leistungsanalyse des Originalbauteils	68
6.2.1. Numerische Analyse	68
6.2.2. Statische Steifigkeit	70
6.2.3. Modalanalyse	72
6.3. Konstruktion	74
6.4. Messtechnische Untersuchung des Demonstrators 80	
6.5. Fazit	80

7. Demonstrator 3: Hubbalken einer Gesenkschmiedeanlage (KLuB)	82
7.1. Leistungsanalyse des Originalbauteils	84
7.2. Konzipierung, Auslegung, Herstellung und Auswertung des CFK Demonstrators	85
7.3. Fazit	92
7.4. Zusatzinformationen	93
8. Untersuchung der Umgebungseinflüsse auf CFK-Komponenten	96
8.1. Motivation	96
8.2. Untersuchung von MMS-Einfluss	98
8.3. Fazit	100
9. Fazit	101
10. Ergebnistransfer	102
11. Verwendung der Zuwendung	105
12. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	105
13. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	106
Literaturverzeichnis	108

1. Forschungsthema

Die Hersteller von Werkzeugmaschinen sehen sich einem globalen Wettbewerb ausgesetzt, der insbesondere durch den Aufbau entsprechender Kapazitäten in den asiatischen Ländern getrieben wird. Um in diesem Wettbewerb bestehen zu können, sind stetige Verbesserungen und Innovationen notwendig. Zum Erreichen hoher Antriebsdynamiken und zur Steigerung der Vorschubgeschwindigkeiten muss entweder die bewegte Masse reduziert oder die Antriebsleistung erhöht werden. Letzteres ist im Hinblick auf die steigende Bedeutung des Energieverbrauchs und die höheren Anschaffungskosten keine zielführende Lösung. Im Gegensatz dazu kann der Leichtbau einen bedeutenden Beitrag liefern und eine tragende Rolle spielen, wenn es darum geht, die Geschwindigkeiten der Maschinen zu erhöhen. Dabei dürfen jedoch keinesfalls die hohen Anforderungen an die Maschinengenauigkeit oder der Kostendruck vernachlässigt werden.

Der klassische Strukturleichtbau mit Aluminium als Werkstoff, der Einsatz von Blechstrukturen und der topologieoptimierte Guss können mittlerweile als Stand der Technik angesehen werden und sind technisch nahezu ausgereizt [1]. Dennoch ist bei vielen Maschinenbauern nach wie vor die Grundeinstellung festzustellen: „Wir haben doch schon immer in Metall gebaut und das hat funktioniert“ [2]. Auf Dauer wird diese Einstellung aber zu einem Verlust der Technologieführerschaft führen. Als Gründe für den zögerlichen Einsatz und die bisher fehlende Erprobung alternativer Werkstoffe werden von Werkzeugmaschinenherstellern die Punkte Bauteilfestigkeit, Kühlschmiermittel-Verträglichkeit, die Widerstandsfähigkeit gegen Spänebeschuss und insbesondere höhere Material- und Fertigungskosten genannt.

Obwohl es Forschungsaktivitäten im Bereich alternativer Werkstoffe wie Beton, Metallschäumen und Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) für bewegte Komponenten und Achsen gibt, haben sich diese Materialien im Werkzeugmaschinenbau noch nicht dauerhaft etabliert. Oftmals fehlen vergleichende Untersuchungen, um das Potenzial bewerten und aufzeigen zu können. Weiterhin hemmen die höheren Werkstoffkosten den Einsatz von Leichtbaumaterialien.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Analyse und der Test von Werkzeugmaschinen-Komponenten aus FKV und der gesteigerten Leistungsfähigkeit durch gezielte Optimierung ihres dynamischen und thermischen Verhaltens. Dabei stehen insbesondere Komponenten im direkten Bearbeitungskraftfluss im Fokus. Diese sollen durch Komponenten aus FKV ersetzt werden. Die Kosten sollen im Vergleich zu herkömmlichen Bauteilen durch eine werkstoffgerechte Konstruktion mit Halbzeugen, den Verzicht auf teure Fertigungsverfahren sowie der Ausnutzung von Sekundäreffekten im Vergleich zu bisherigen FKV-Lösungen gering gehalten werden.

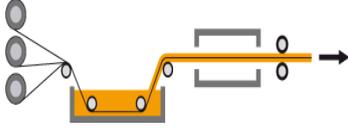
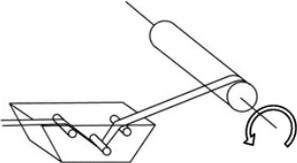
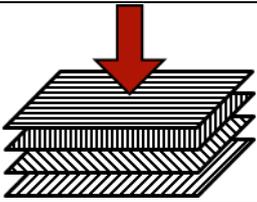
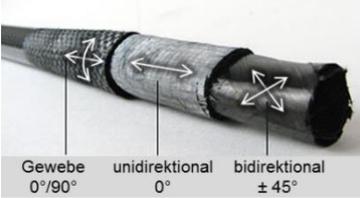
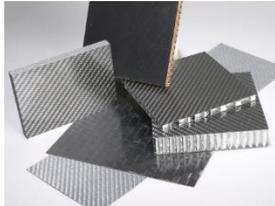
2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

FKV-Komponenten konnten in Werkzeugmaschinen (WZM) bisher selten nachhaltig etabliert werden. Ursache ist oft mangelndes Verständnis für die komplexen und anisotropen Werkstoffeigenschaften der FKV. Das große Potenzial wird häufig nicht voll ausgeschöpft, da der reine Substitutionsleichtbau die besonderen Eigenschaften des Werkstoffs nicht berücksichtigt und somit eine nicht optimale und werkstoffgerechte Konstruktion zur Folge hat. Gründe hierfür sind die gegenseitige Beeinflussung von Steifigkeit, Festigkeit, Dämpfung, thermischer Ausdehnung in Abhängigkeit der Faserorientierung. Selten werden diese in ihrer Gesamtheit in einer FKV-spezifischen Konstruktionsweise berücksichtigt. Ein weiterer Grund für die geringe Akzeptanz von FKV sind die hohen Materialkosten und die werkzeug- und kostenintensiven urformenden Fertigungsverfahren, die eine wirtschaftliche Umsetzung von FKV-Bauteilen erschweren.

Dennoch ist es durch geschickte Nutzung der anisotropen Eigenschaften von FKV möglich, deutliche Vorteile für WZM-Komponenten zu generieren. Dafür ist eine innovative Konstruktionsweise notwendig, die sich einfacher FKV-Halbzeuge bedient. Vorteil dieser Halbzeuge sind die vergleichsweise einfachen Fertigungsverfahren. Dadurch kann auf teure Werkzeuge der integralen Fertigungsverfahren wie beispielsweise RTM (Resin-Transfer-Moulding) oder Schlauchblasverfahren verzichtet werden. CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff)-Halbzeuge sind in der Beschaffung daher preisgünstiger. Eine Übersicht der wichtigsten Herstellungsverfahren verschiedener Halbzeugarten ist nachstehend in Tabelle 1 gegeben. Dabei betragen die Selbstkosten für das Heißpressen etwa 35 EUR/kg und CFK-Plattenware ist im Einzelhandel ab 50 EUR/kg erhältlich. In ähnlicher Höhe liegen die Kosten für Pultrusionsprodukte, wobei diese stark von der Komplexität des Profils abhängig sind. Dahingehen sind Aluminiumplatten im Einzelhandel ab 7 EUR/kg erhältlich. Die gegenüber Metallbauweisen hohen Materialkosten werden durch den Ansatz der neuen halbzeugbasierten Konstruktionsmethodik kompensiert. Diese wurde bereits im Vorgängervorhaben erfolgreich angewandt und wird in diesem Vorhaben weiterverfolgt.

Bei der wirtschaftlichen Betrachtung des gesamten Produktentstehungsprozesses muss berücksichtigt werden, dass auf diverse Schritte der Vor- und Nachbearbeitung verzichtet werden kann. Das Spannungsarmglühen entfällt, da keine Schweißverbindungen angebracht werden. Eine Lackierung des fertigen Bauteils zum Schutz vor Korrosion ist ebenfalls nicht nötig. Hierdurch kann zusätzlich der Energie- und Wasserbedarf in der Fertigung verringert werden. Dazu kommt, dass durch das verringerte Bauteilgewicht bei der Montage unter Umständen kostengünstigere Manipulatoren genutzt werden können.

Tabelle 1: Übersicht über die wichtigsten Verfahren zur Herstellung von FKV-Halbzeugen

Pultrusion	Wickelverfahren	Pressen
		
<ul style="list-style-type: none"> kontinuierlicher Prozess große Profil-Vielfalt eingeschränkte Faserorientierung 	<ul style="list-style-type: none"> bevorzugt Kreisquerschnitte kontinuierlich: Pullwinding beliebige Faserorientierung 	<ul style="list-style-type: none"> beliebige Faserorientierung einfache Geometrien begrenzte Plattengröße
		

Die technischen Eigenschaften von FKV sind, je nach verwendeter Faser, stark unterschiedlich. Der Fokus des Vorhabens liegt hierbei auf CFK, da dessen spezifische Steifigkeit derjenigen der anderen Fasern (Glas- oder Aramidfasern) deutlich überlegen ist. Insbesondere die spezifische Steifigkeit ist maßgeblich für die statischen und dynamischen Eigenschaften von WZM-Komponenten verantwortlich. Die typischen Werte für die Materialeigenschaften verschiedener unidirektionaler FKV und des klassischen Leichtbaumaterials Aluminium sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Vergleich der Materialeigenschaften von FKV und Aluminium

	Glas-FKV (Fasertyp S)	Aramid-FKV	Kohlenstoff-FKV (Standard)	Kohlenstoff-FKV (ultrahochmodulig)	Aluminium
E-Modul in N/mm ² parallel zur Faserrichtung	52.000	75.000	140.000	380.000	72.000
Zugfestigkeit in N/mm ² parallel zur Faserrichtung	2.700	1.500	2.900	1500	550
Dichte in g/cm ³	2,0	1,3	1,5	1,8	2,7

Zunächst soll sich auf die Verwendung von CFK mit duroplastischer Matrix konzentriert werden. Neben den gegenüber thermoplastischen Matrizen besseren mechanischen Eigenschaften – zu nennen ist vorrangig die geringere Kriechneigung – zeichnen sich diese vor allem durch eine deutlich bessere Eignung für Klebverbindungen aus. Da bei der erforderlichen Konstruktionsmethodik CFK-Rohre, -Platten und -Profile in einer modularen Bauweise miteinander gefügt werden müssen, ist dieses Kriterium ausschlaggebend. Die Verklebung FKV-relevanter Thermoplaste ist im Vergleich dazu nur mit erhöhtem Aufwand möglich. Besonders die Sicherstellung der Dauerfestigkeit bei schwingender Belastung und feuchter Umgebung gestaltet sich schwieriger. Das Verschweißen von Thermoplasten ist

zwar eine gute Alternative zur Klebung, steht mit dem einhergehenden hohen Werkzeugaufwand und den damit entstehenden Investitionskosten dem Kerngedanken dieses Forschungsvorhabens entgegen.

Mit der Wahl einzelner FKV-Halbzeuge und der Verbindungsart steht dem Konstrukteur eine große Variationsmöglichkeit zur Verfügung. Im Forschungsvorhaben soll daher geklärt werden, mit welchen Halbzeugen und Verbindungstechniken (z.B. Kleben, Nieten, Pressverbände) sich die dynamischen Eigenschaften von realen Strukturbauteilen gezielt beeinflussen lassen.

2.1. Stand der Technik

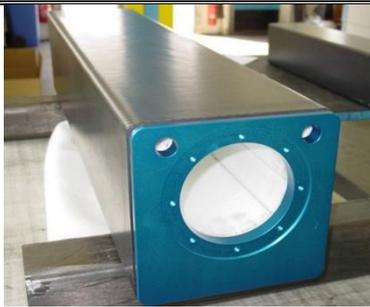
Die Forschung und Entwicklung im Werkzeugmaschinenbau zum Thema CFK beschäftigt sich hauptsächlich mit der Verbesserung von Produktionsverfahren für CFK-Komponenten. Insbesondere die Zerspanung von CFK stellt auf Grund des spröden Werkstoffes und der anisotropen Eigenschaften eine große Herausforderung dar. Diese ist speziell im Flugzeugbau von Belang, da dort große Komponenten in Integralbauweise gefertigt und bearbeitet werden. Der Forschungsschwerpunkt und die zugehörigen Veröffentlichungen mit Bezug zu CFK befassen sich fast ausnahmslos mit Beiträgen zur CFK-Zerspanung (z.B. [3], [4]).

In [5], [6] wurden die einzelnen Rahmensegmente der in Abbildung 1 gezeigten modularen Werkzeugmaschine für die Mikrobearbeitung aus CFK gefertigt. Grund hierfür ist die Ausnutzung der besonderen thermischen Eigenschaften des Werkstoffes. Durch den Aufbau und die Baugröße der Maschine sind die mechanischen Belastungen der Struktur sehr gering.



Abbildung 1: CFK-Rahmensegmente einer Werkzeugmaschine zur Mikrobearbeitung, Universität der Bundeswehr Hamburg / TU [7]

Ein Querträger aus CFK für eine LCD-Panel Fertigung wurde in [8] vorgestellt. Dabei handelt es sich um einen gewickelten Balken in Fachwerkstruktur mit teilweiser Aluminiumverrippung. Es werden Gewichtseinsparungen von 16 – 27 % im Vergleich zu reinen Aluminiumbauteilen erzielt. Allerdings werden keine Aussagen über das Verhältnis der Steifigkeit des CFK-Bauteils zur Aluminiumvariante sowie die Fertigungskosten der in Integralbauweise gefertigten CFK-Komponente getroffen.



Bildquelle: Roschiwal+Partner



Bildquelle: Messestand EiMa

CFK-Pinole ([9], [10])

- Massenreduktion der Struktur um 66 %
- Erhöhung der maximalen Beschleunigung um 100 %
- geringfügig erhöhte Eigenfrequenzen des Gesamtsystems
- vergleichbare Dämpfungseigenschaften
- aber: Reduktion der dynamischen Steifigkeit um 50 %

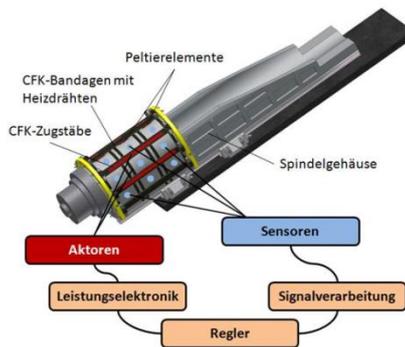
Schwenkkopfgabel

- Massenreduktion der Struktur um 60 %
- bisher kein Vergleich der Leistungsparameter
- Fertigung in Integralbauweise

Darüber hinaus werden auf Messen und in Zeitschriften neue Komponenten aus CFK für den Werkzeugmaschinenbereich vorgestellt und präsentiert. Meist sind jedoch keine detaillierten Informationen über Gewichtseinsparungen, Steifigkeiten und Prozessverhalten angegeben. Eine Übersicht der präsentierten Bauteile wird im Folgenden näher dargestellt.

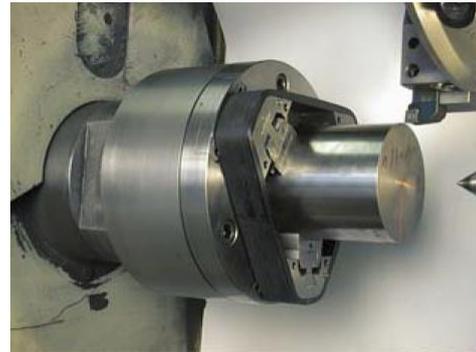
Beide in Tabelle 3 gezeigten Bauteile wurden in Integralbauweise mit hohem Werkzeugaufwand gefertigt. Die Pinole wurde zuerst als CFK-Variante gebaut und anschließend zum Vergleich der Leistungsparameter aus Stahl realisiert. Die Masse der CFK-Variante ist entsprechend geringer (66 %) als die des Stahlnachbaus. Die Verringerung der Steifigkeit und die nicht erzielte Verbesserung der Dämpfungseigenschaften sprechen allerdings gegen eine Optimierung des Bauteilverhaltens durch den Einsatz von CFK. Die Schwenkkopfgabel ist eine reine Substitution der herkömmlichen Stahlvariante. Es erfolgte bislang allerdings kein Vergleich der Systemeigenschaften wie Eigenfrequenzen und Dämpfung sowie deren Auswirkungen auf die Prozessstabilität. Als Fazit aus beiden Bauteilen lässt sich konstatieren, dass der Austausch von Strukturkomponenten aus Stahl durch direkte Nachbauten aus CFK nicht zielführend ist.

Tabelle 4: Übersicht von CFK-Komponenten in WZM, Teil 2



Bildquelle: IWF Berlin

CFK-Kompensationsstruktur [11]



Bildquelle: IWF Berlin

CFK-Bandage [12]

Bei der adaptiven Kompensationsstruktur aus Tabelle 4 wird der negative Wärmeausdehnungskoeffizient von CFK in Längsrichtung genutzt, um durch gezielte Erwärmung von CFK-Stäben die Verlagerung durch thermische Effekte zu kompensieren. Die CFK-Bandage soll in der Drehbearbeitung die maximal erreichbaren Drehzahlen steigern. Durch die geringe Masse werden die wirkenden Fliehkräfte reduziert und damit das Aufweiten des Spannfutters reduziert.

Der in Tabelle 5 in der linken Abbildung gezeigte Querbalken der Firma Trumpf wurde für eine Laserschneideanlage entwickelt. Durch die in Differentialbauweise gefertigte Komponente sind laut Hersteller große zeitliche Einsparungen bei Verfahrbewegungen möglich. Bearbeitungskräften ist das Bauteil durch die Verwendung als Träger eines Lasers jedoch nicht ausgesetzt.

Tabelle 5: Übersicht von CFK-Komponenten in WZM, Teil 3



Bildquelle: Trumpf

Querbalken [13]



Bildquelle: Schunk

Linearachse [14]

Bei der Tabelle 5 rechts gezeigten Linearachse konnte nach Herstellerangaben eine Gewichtsreduktion von 50 % und dadurch eine Steigerung der maximalen Geschwindigkeit um den Faktor 3 erreicht werden. Es liegen allerdings keine konkreten Aussagen über die Steifigkeiten und das dynamische Verhalten der Struktur vor.

Tabelle 6: Übersicht von CFK-Komponenten in WZM, Teil 4



Bildquelle: Jenaer Antriebstechnik



Bildquelle: Blum Novotest

Kamerahalterung [15]

- Auslegungskriterium: thermische Null-Dehnung
- kein belastetes Strukturbauteil

Verlängerung für Messtaster [16]

- einfaches CFK-Rohr
- geringe Bauteilbelastung

Sowohl die in Tabelle 6 links dargestellte Kamerahalterung als auch der rechts abgebildete Messtaster nutzen die Eigenschaft von CFK aus, um bei entsprechender Faserorientierung eine thermische Nulldehnung zu erzielen. Somit können, bei gleichzeitig geringem Bauteilgewicht, für Messaufgaben die Einflüsse von Temperaturänderungen unterdrückt werden. In beiden Fällen handelt es sich jedoch nicht um tragende Strukturbauteile.

Tabelle 7: Übersicht von CFK-Komponenten in WZM, Teil 5



Bildquellen: Hainbuch / R+W Antriebselemente



Bildquelle: IWU Chemnitz

Drehspannfutter [17] / Gelenkwelle [18]
einfache Bauweise

- Fertigung in Integralbauweise

CFK-Kugelgewindetrieb [19]

- gewickelter CFK-Kern mit flammgespritzter Metallummantelung
- bislang nur als Anschauungsobjekt hergestellt
- keine Untersuchung der Leistungsparameter bekannt

Die in Tabelle 7 links dargestellten Drehspannfutter und Gelenkwellen mit CFK-Komponenten werden von verschiedenen Herstellern angeboten und können als Stand der Technik angesehen werden. Es handelt sich vom Aufbau her jedoch um sehr einfache

Bauteile, die von der Komplexität nicht mit denen des angestrebten Forschungsvorhabens vergleichbar sind.

Beim rechts gezeigten Kugelgewindetrieb handelt es sich um einen interessanten Ansatz, die thermische Ausdehnung zu minimieren. Ziel ist es, die gegenüber bisherigen Lagerungen deutlich steifere Fest-Fest-Lagerung zu ermöglichen. Es erfolgten allerdings bislang noch keine Untersuchung der Leistungsparameter und kein Festigkeitsnachweis, da nach aktuellem Kenntnisstand nur ein Anschauungsobjekt für das neuartige Fertigungsverfahren zur Verfügung steht.

Wie aus der Übersicht hervorgeht, gibt es verschiedene Bauteile im Bereich des Werkzeugmaschinenbaus, die aus CFK gefertigt werden. Diese besitzen jedoch entweder einen sehr einfachen Aufbau, legen den Fokus auf thermische Effekte, sind reine Substitutionen von Stahlvarianten oder es fehlen vergleichende Untersuchungen der Leistungsparameter. Es gibt somit durchaus Ansätze zur Umsetzung, die bei einfachen Bauteilen wie Wellen und Spannfuttern auch zur Serienreife gelangt sind. Komplexere Komponenten, die hohen Kräften standhalten müssen und eine aufwändigere Geometrie aufweisen, sind jedoch nicht über den Status von Prototypen oder Anschauungsbeispielen hinausgelangt.

2.2. Ergebnisse des Vorläufervorhabens

Im Vorläufervorhaben AiF 409ZN wurde das Potenzial einer Vielzahl von WZM-Komponenten analysiert und bewertet. Infolgedessen wurden zwei Peripherie-Bauteile ausgewählt und diese als CFK-Variante aufgebaut. Dabei wurde ein neuer Konstruktionsansatz mit kostengünstigen CFK-Halbzeugen entwickelt. Diese Bauweise konnte in den ausgewählten Demonstrator-Bauteilen erfolgreich umgesetzt werden.

Demonstrator 1: Schwenkarm einer Beladeeinheit

Der Schwenkarm, der konventionell als Stahl-Schweißkonstruktion gebaut wird, ist an einer Laufkatze befestigt und dient dem Transport von Bauteilen zwischen und der Beschickung von Werkzeugmaschinen. Durch die rotatorische Bewegung am oberen Flansch erfolgt das Absenken und Anheben der Bauteile, die mittels eines Greifers vom Schwenkarm aufgenommen werden. Die Komponente ist in Abbildung 2 sowohl zum einen als Simulationsmodell, zum anderen als umgesetzter und verbauter Demonstrator abgebildet. Ziel bei der Umsetzung als CFK-Bauteil war es, durch die Verringerung der bewegten Massen die benötigte Antriebsleistung zu senken, wodurch kleinere und gegebenenfalls günstigere Antriebe verbaut werden können. Alternativ ist bei Beibehaltung der Antriebe eine Steigerung der Nutzlast möglich, wenn dies keine unzulässigen Auslenkungen des Schwenkarms hervorruft.

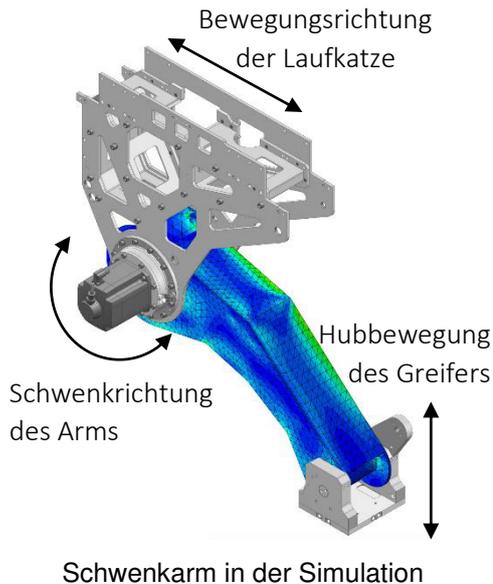


Abbildung 2: CFK-Schwenkarm

Vorgaben bei der Umsetzung als leistungsfähiger Demonstrator waren:

- Reduktion der Masse größer 50 %
- Erhalt der Steifigkeit in alle Richtungen
- Beibehaltung des Bauraumes

Bei der Konstruktion kam der neu entwickelte Längspressverband von CFK-Rohr und CFK-Platte zum Einsatz, um die bei einem Nothalt wirkenden hohen Momente von der Bremse in die dünnwandige Kastenstruktur sicher einleiten zu können. Weiterhin ist es gelungen, einzelne CFK-Platten mit duropastischer Matrix in einem neuartigen Verfahren plastisch zu verformen und anschließend, ähnlich dem Schichtverleimen im Holzbau, miteinander zu einer gekrümmten Struktur zu verkleben.

Bisherige Ergebnisse des erprobten Demonstrators sind:

- Reduktion der Strukturmasse um 65 %
- Reduktion des Massenträgheitsmoments um 68 %
- Steifigkeitserhöhung in Positionierichtung um 10 %
- Erhöhung der möglichen Nutzlast um 20 %
- Erhöhung der ersten Eigenfrequenz um 80 %
- Vergrößerung der Dämpfung in der ersten Eigenfrequenz um 20 %, in der Zweiten um 50 %

Die abgeschätzten Produktionskosten einer CFK-Serie sind höher als die der bisherigen Variante. Durch eine Optimierung der Abmessungen hinsichtlich der tatsächlich benötigten Leistungsparameter könnten allerdings die Materialkosten und durch Ausnutzung der Sekundäreffekte die Kosten für den Antrieb gesenkt werden. Durch die Reduzierung des Massenträgheitsmomentes des Schwenkarms ist bei Beibehaltung der Antriebe eine Steigerung der Antriebsdynamik erreichbar. Durch die mögliche Senkung der Nebenzeiten kann unter Umständen auf eine zweite Beladeeinheit verzichtet werden, was eine besonders starke Senkung der Investitionskosten zur Folge hätte.

Demonstrator 2: Vertikale Hubtür

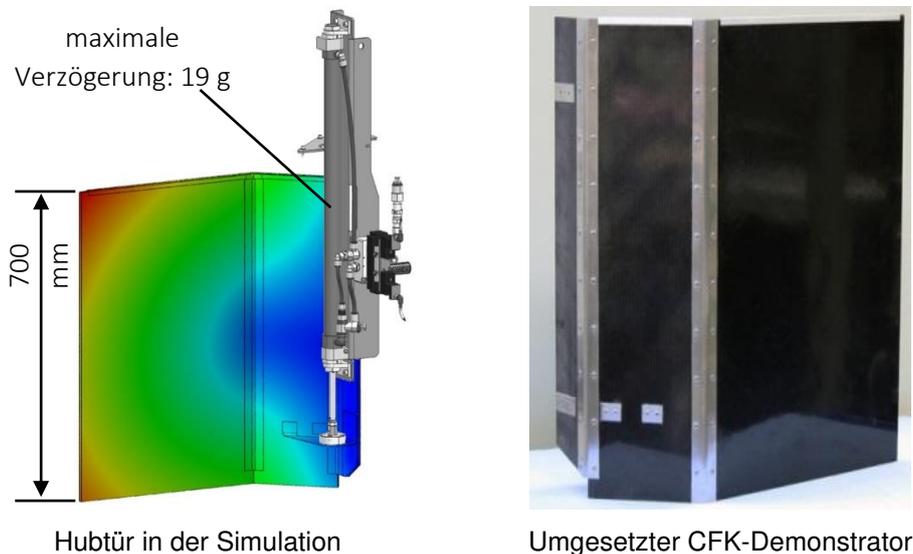


Abbildung 3: CFK-Hubtür

Die Hubtür dient zur Abtrennung des Arbeitsraumes vom Werkzeugmagazin und wird mit einem Pneumatikzylinder angetrieben. Durch die hohe Masse der konventionellen Variante aus Stahl wird dieser an seiner Leistungsgrenze betrieben. Bereits bei geringen Druckverlusten kann es dazu kommen, dass der Zylinder nicht mehr in der Lage ist die Tür wie gewünscht zu bewegen. Für einen zuverlässigen Prozess ist es daher notwendig, den benötigten Luftdruck zu senken. Dazu ist die Verringerung der bewegten Masse erforderlich.

Bisherige Ergebnisse des erprobten Demonstrators sind:

- Reduktion der bewegten Masse um 75 %
- Reduktion der maximalen Auslenkung am freien Ende im Betrieb um 90%
- Erhöhung der ersten Eigenfrequenz um 100 %
- Verringerung des nötigen Antriebs-Luftdrucks um 32 %
- Verringerung der Zeit zum Öffnen um 11 %, der Zeit zum Schließen um 38 %
- bei über 1.000.000 Zyklen bislang keine Auffälligkeiten

Für die in Abbildung 3 dargestellte CFK-Konstruktion wurde ein hochsteifes CFK-Sandwich mit Schaumkern gewählt. Dadurch konnte auf das ursprünglich sehr komplexe, teure und schwere Schweißteil zur Befestigung des Pneumatikkolbens verzichtet werden. Die abgeschätzten Produktionskosten einer CFK-Serie sind bereits bei Betrachtung der reinen Tür um mehr als 30 % niedriger als die der bisherigen Variante. Durch eine Ausnutzung von Sekundäreffekten wie dem Einsatz eines kleineren Pneumatikzylinders oder einfacheren Schienenführungen sind nochmals Einsparungen von 30 % möglich.

Ergebnis zum Umgebungseinfluss auf CFK-Bauteile

Seitens der WZM-Unternehmen des PA bestanden große Bedenken hinsichtlich der Beständigkeit von CFK-Komponenten unter dem Einfluss von Kühlschmierstoffen (KSS). Befürchtet wurde die Degradation der Faser-Matrix-Haftung und somit die Zerstörung des Verbunds. Um die tatsächliche Wirkung einer KSS-Exposition auf den Werkstoff CFK zu bewerten, wurden eigens temperierte Einlagerungsbecken errichtet und eine KSS-Nebelkammer gebaut. Somit konnten an CFK-Querzugproben umfangreiche Untersuchungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse lassen nach derzeitigem Stand darauf schließen, dass die Wirkung von KSS-Emulsionen auf den Werkstoff CFK derjenigen von reinem Wasser und natürlicher Alterung entspricht.

Weiterhin wurden einfache und günstige Beschichtungskonzepte gegen Späneflug entwickelt, welche als Probekörper bereits auch in WZM angebracht und unter realen Umgebungsbedingungen geprüft wurden. In Vorversuchen wurden verschiedene Konzepte durch Bestrahlung von Plättchen mit Abrasit untersucht. In Abbildung 4 sind die verschiedenen Plättchen jeweils unbehandelt (links) und nach Versuchsende (rechts) abgebildet. Unbeschichtete CFK-Probekörper zeigten ähnliche Ergebnisse wie mit Aluminiumblech beplankte oder mit metallpartikelverstärkten Polymerlacke versehene Probekörper. Der Belastung von sehr starkem Spänebeschuss hielt jedoch nur eine Beplankung aus Edelstahlblech stand.

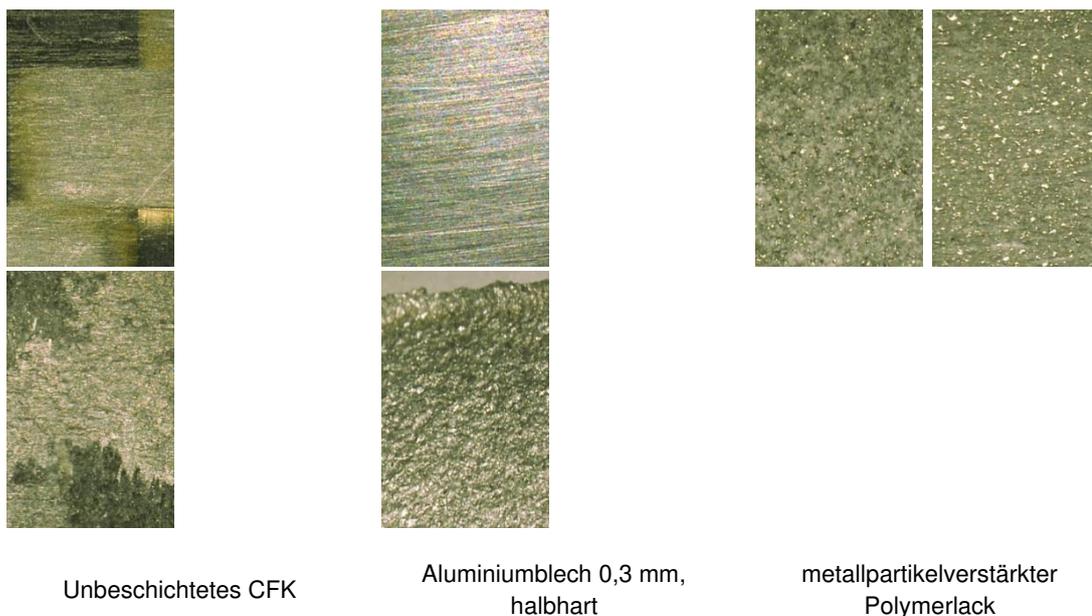


Abbildung 4: CFK-Probekörper für Versuche zum Späneflug

Fazit zum Vorläufervorhaben

Mit den erarbeiteten Ergebnissen konnte bei den beteiligten Firmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) nachhaltig Vertrauen in die neue Technologie geschaffen werden. Insbesondere die Kosten für die Fertigung der Demonstratoren fielen bedeutend niedriger aus, als vor Projektstart von den Mitgliedern des PA erwartet. Dies liegt in folgenden Punkten begründet:

- Gegenüber der Stahlbauweise fallen Bearbeitungsschritte wie Lackierung, Spannungsarmglühen oder Richten weg. Die Lagepräzision der Klebverbindung konnte unter Beweis gestellt werden.

- Durch CFK-Halbzeuge und konsequente Ausnutzung aller Sekundäreffekte kann Kostengleichheit oder sogar -senkung erreicht werden.
- Durch die Erhöhung der Dynamik kann bei der Beladeinheit u.U. die Investition in eine zweite Linie entfallen (kein Fixkostensprung), was die Mehrkosten eines CFK-Bauteils kompensieren würde.

Die Bedenken hinsichtlich der Beständigkeit von CFK-Bauteilen unter Einfluss von KSS konnten ausgeräumt werden. Die Mitglieder des PA sind deshalb stark an einem Folgevorhaben mit weitergehenden Untersuchungen interessiert.

2.3. Forschungsziel

Ausgangspunkt dieses Forschungsprojekts ist das vorangegangene Vorhaben „CFK in WZM“. Die dort erzielten Ergebnisse konnten die beteiligten Unternehmen nachhaltig positiv von der Technologie der Faserkunststoffverbunde überzeugen, besonders in Fragen der Wirtschaftlichkeit von CFK-Bauteilen und deren Beständigkeit in KSS-Umgebung. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, den Nutzen der Integration von CFK-Strukturkomponenten aus Halbzeugen in Werkzeugmaschinen tiefergehend zu analysieren. Dabei sollen entgegen den Tätigkeiten im Vorläufervorhaben keine Peripheriekomponenten betrachtet werden, sondern Strukturkomponenten, die im direkten Bearbeitungskraftfluss liegen. Dadurch wird die Komplexität der Anforderungen an die Bauteile und somit das Niveau der Konstruktionsmethodik weiter angehoben. Übergeordnete Ziele des Vorhabens sind:

- Fortführung des im Vorläufervorhaben generierten Wissensvorsprungs
- Umsetzung von CFK-Strukturbauteilen im Bearbeitungskraftfluss
- Einbinden klassischer Konstruktionselemente in die CFK-Struktur (z.B. Führungswagen und -schienen, Gewindespindeln)
- Erweiterung des Know-Hows der Konstruktionsmöglichkeiten mit CFK-Halbzeugen
- Steigerung der Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen
- Transfer der Ergebnisse in die Industrie und Sensibilisierung hinsichtlich der Potenziale des Einsatzes von CFK als Leichtbaumaterial

Um diese Ziele zu erreichen, müssen nachfolgende Punkte mit wissenschaftlicher Relevanz geklärt werden. Dabei soll deren anwendungsnahe Lösung direkt an den CFK-Demonstratoren erprobt werden.

- Berücksichtigung thermischer Einflüsse auf Schnittstellen zwischen CFK und Metallen
- Anpassung und Entwicklung geeigneter Krafteinleitungskonzepte
- Evaluierung der richtungsabhängigen Dämpfung von CFK und von Klebverbindungen bei der Verbesserung des dynamischen Verhaltens

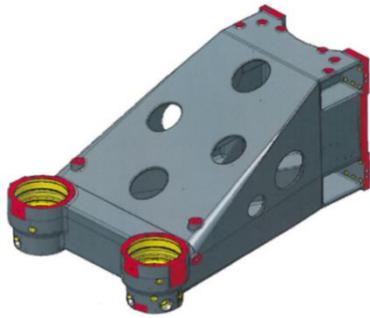
- Auswirkungen der geringeren Masse auf das Prozessverhalten
- Möglichkeit der Erzeugung mehrdimensional gekrümmter Flächen aus ebenen CFK-Halbzeugen
- Überprüfung des Einflusses von KSS auf Klebungen und thermoplastische Matrices

Angestrebte Forschungsergebnisse

Als Ergebnis des Forschungsvorhabens soll gezeigt werden, dass durch die Verwendung von CFK-Komponenten die Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen gesteigert werden kann. Aus technischer Sicht sind dabei folgende Kriterien ausschlaggebend:

- höhere Antriebsdynamik durch geringere Massen
(größere Beschleunigungen möglich, niedrigere Taktzeiten realisierbar)
- Erhalt oder Steigerung der Bearbeitungsgenauigkeit
(höhere dynamische Steifigkeit bei bessere Dämpfungseigenschaften)
- mögliche Verbesserung der Prozessstabilität
(Verringerung von Rattermarken, Erhöhung der kritischen Eigenfrequenzen, Erhöhung des Zeitspanvolumens)
- Ausnutzung von Sekundäreffekten
(leichtere und kostengünstigere Antriebe oder Führungen)

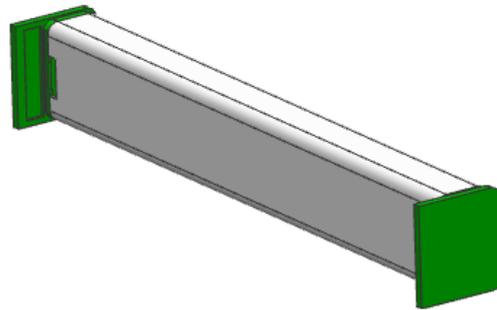
Die Untersuchung der angestrebten Ziele soll an Hand konkreter Bauteile erfolgen. Hierzu werden, in Absprache mit dem PA, drei WZM-Komponenten ausgewählt und durch Demonstratoren aus CFK ersetzt. Diese werden aus CFK-Halbzeugen gefertigt, um eine einfache und schnelle Umsetzung zu ermöglichen. Beispiele für repräsentative WZM-Komponenten im direkten Kraftfluss und Anforderungen an diese werden Tabelle 8 in gezeigt. Sie können als Referenzkomponenten angesehen werden. Zum einen stellen sie typische Strukturkomponenten dar, die in ähnlicher Form in einer Vielzahl von WZM zu finden sind und ähnliche dynamische Anforderungen haben. Zum anderen liegen hier WZM-spezifische Problemstellungen vor, wie beispielsweise die Anbindung von metallischen Führungen an eine CFK-Struktur oder die Einleitung mehraxialer Kräfte und Momente über eine zylindrische Buchse. Somit ist eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bauteile gegeben.



Spindelstock, 450 kg

Ziele:

- Reduktion der Masse und damit Erhöhung der Beschleunigung
- Reduktion der thermischen Ausdehnung
- Reduktion der Schwingungsamplituden am TCP im Bearbeitungsprozess



Portalquerbalken, 100 kg

Ziele:

- Reduktion der Masse und damit von Nickbewegungen des Portals
 - Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf die Bearbeitungsgenauigkeit
 - Verbesserung des Prozessverhaltens durch Schwingungsreduktion
-

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die dargestellten Bauteile und die resultierenden Problemstellungen nur beispielhaften Charakter besitzen. Eine detaillierte Bewertung des Potenzials von ausgewählten WZM-Komponenten muss in Absprache mit dem PA erfolgen.

Die Steigerung der Leistungsfähigkeit soll direkt zu einer höheren Wirtschaftlichkeit der modifizierten Werkzeugmaschinen führen. Gleichzeitig soll gezeigt werden, dass durch die Ausnutzung von kostengünstigen Konstruktionsmethoden und Sekundäreffekten nicht zwangsläufig eine Erhöhung der Investitionskosten erfolgen muss. Zu den Herausforderungen gehört insbesondere die Diskrepanz zwischen den sehr kostengünstigen Produktionsverfahren für herkömmliche Werkstoffe (z.B. Gussteile) und den hohen Werkstoffkosten für CFK. Überwunden werden soll diese Problematik durch mehrere Ansätze, So können Arbeitsschritte wegfallen, die für Metallbauweisen unumgänglich sind (z.B. Schweißen, Richten). Durch das geringere Bauteilgewicht ist unter Umständen eine einfachere Montage der Bauteile möglich, wodurch auf günstigere Manipulatoren zurückgegriffen werden kann. Darüber hinaus werden für die Fertigung von CFK-Bauteilen nur wenige und kostengünstige Fertigungsmittel benötigt.

3. Projektpartner

Seitens der Wirtschaft wurde das Forschungsvorhaben von den folgenden Firmen durch ihre Mitarbeit im Projektbegleitenden Ausschuss (PA) unterstützt:

- Chiron Werke GmbH & Co. KG, Tuttlingen
- ICM Composites, Weiterstadt
- Datron AG, Mühlthal
- EiMa Maschinenbau GmbH, Frickenhausen
- Franz Kessler GmbH, Bad Buchau
- GROB-Werke GmbH, Mindelheim
- Trumpf GmbH & Co. KG, Ditzingen
- SMS Group, Mönchengladbach

Durchführende Forschungsstellen:

- Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, Technische Universität Darmstadt
- Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen, Technische Universität Darmstadt

4. Komponentenauswahl und Potenzialanalyse

Zur Auswahl der zu fertigenden Demonstratoren wurden in Gesprächen mit den einzelnen Firmen des PA potentielle Komponenten ausgesucht. Dabei konnte auf die im Vorgängerprojekt durchgeführte Analyse der unterschiedlichen Komponenten aufgebaut werden. Diese wurde sofern notwendig aktualisiert und die Komponenten wurden abschließend in Absprache mit dem PA ausgewählt.

Folgende Maschinenstrukturen wurden im Projekt als CFK-Struktur in Halbzeugbauweise ausgewählt:

1. x--Schlitten einer Portalfräsmaschine (Datron M10 Pro)
2. Spindelstock eines Doppelspindlers (Chiron)
3. Hubbalken einer Gesenkschmiedeanlage (SMS Group)

5. Demonstrator 1: x-z-Aufbau einer Portalfräsmaschine

5.1. Ausgangssituation und Anforderungen

Der x-z-Aufbau der Datron M10 Pro ist in Abbildung 5 dargestellt. Eine Übersicht der wichtigsten Daten ist in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Übersicht für ersten Demonstrator. Die Informationen wurden von der Datron AG bereitgestellt.

Bauteilbezeichnung	x-z-Aufbau
Einsatzzweck	
Masse in kg	ca 50 kg
Abmessungen	ca 600 x 250 x 350 mm
Bislang verwendete Materialien	Aluminium
Herstellung (Guss, Schweißkonstruktion, ...)	Plattenbauweise

Eine Übersicht über die Anforderungen ist in Tabelle 10 aufgelistet. In Gesprächen mit der DATRON AG wurde festgehalten, dass die Massenreduktion zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens das primäre Entwicklungsziel ist. Zusätzliche positive Effekte werden durch die höhere Materialdämpfung von CFK im Vergleich zu Aluminium erwartet. Die statische Steifigkeit soll möglichst beibehalten werden.

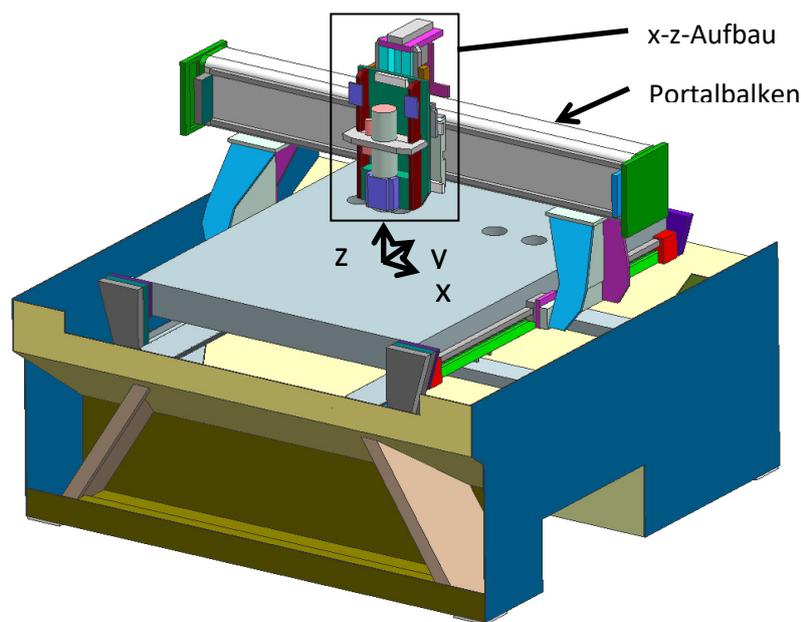


Abbildung 5: Portalfräsmaschine M10 Pro von DATRON nach [20]

In Vorarbeiten wurde gezeigt, dass die Anordnung der Schienen mit einer Zug-Druck-Belastung normal zur x-z-Ebene einen versteifenden Einfluss auf den Gesamtaufbau hat. Eine weitere Versteifung des Aufbaus kann erlangt werden, indem die Werkzeugspindel beidseitig befestigt wird. Die beschriebene Ausrichtung der Führungsschienen sowie die zweite Halterung für die Werkzeugspindel ist Abbildung 6 zu entnehmen. Der Ansatz der zweiten Halterung wird im vorliegenden Projekt nicht weiterverfolgt, da diese Art der Klemmung vom Spindelhersteller nicht freigegeben ist.



Abbildung 6: Gedrehte Führungsschienen und zusätzliche Spindelklemmung [21]

Tabelle 10: Anforderungsliste. Die verschiedenen Anforderungen sind hierbei in Festforderungen (FF), Bereichsforderungen (BF), Zielforderungen (ZF) und Wünsche (W) eingeteilt.

Nr.	FF, BF, ZF, W	Bezeichnung	Werte, Daten	Quelle/Klärung
1	ZF	Belastungen mit Prozesskräften	$F_x = 2300 \text{ N}$ $F_y = 2300 \text{ N}$ $F_z = 400 \text{ N}$ (in Simulation als 500 N angenommen)	Prozesskraftabschätzung
2	BF	Maximal zulässige Verformung am TCP (Simulation)	Lastfall F_x : $s \leq 72,5 \mu\text{m}$ Lastfall F_y : $s \leq 187,87 \mu\text{m}$ Lastfall F_z : $s \leq 10,7 \mu\text{m}$	Auswerten der Simulation des Ursprungsmodells
3	FF	Einsatz der Werkzeugspindel	Präzisions-PowerS Syncro 8.0 8,0 kW Synchron HF-Spindel bis 34.000 1/min Drehmoment $M = 3,5 \text{ Nm}$	[20]
4	BF	Bauraum des x-z-Aufbaus	$l_x \leq 650 \text{ mm}$ $l_y = \text{minimal}$ $l_z = 530 \text{ mm}$	DATRON: CAD Daten
5	BF	Bearbeitungsraum des x-z-Aufbaus	Verfahrweg (z-Richtung) 240 mm, tiefste Position muss erhalten bleiben	[20]
6	ZF	Verfahrdynamik	Beschleunigung und Vorschub (30 m/min) in z-Richtung = DATRON M10 Pro (Massereduktion des x-z Aufbaus)	[20]
7	FF	Beständigkeit	Korrosionsbeständigkeit Schutz vor Spänen Schutz vor Aerosol und Ethanol	[21]
8	BF	Leichtbau	Masse < Ursprungsmasse	Projektziel
9	FF	Anbauteile	Übernahme bestehender Anbauteil (ggf. Integration)	Rücksprache Datron
10	BF	Bearbeitungsraum des x-Schlittens	$l_x \leq 250 \text{ mm}$ $l_y > 40 \text{ mm}$ $l_z \leq 650 \text{ mm}$	DATRON: CAD Daten
11	ZF	Einfache Fertigung	Fertigbarkeit: ohne umfangreiche Kenntnisse in der Fertigung mit FKV weiterverarbeitbar	Projektziel
12	W	Erhöhung der Dämpfung	Nutzung der Strukturdämpfung von CFK	Projektziel
13	FF	Statische Steifigkeit	Mindestens gleichbleibende Steifigkeiten	Rücksprache Datron
14	FF	Dynamisches Verhalten	Mindestens gleichbleibendes dynamisches Verhalten	Rücksprache Datron

Zur Ermittlung der maximal zulässigen Verformungen wurde der ursprüngliche x-z-Aufbau mit den vorgegebenen Prozesskräften für die verschiedenen Lastfälle numerisch untersucht. Hierfür wurde ein vereinfachtes Modell des x-z-Aufbaus erstellt, das in Abbildung 7 dargestellt ist.

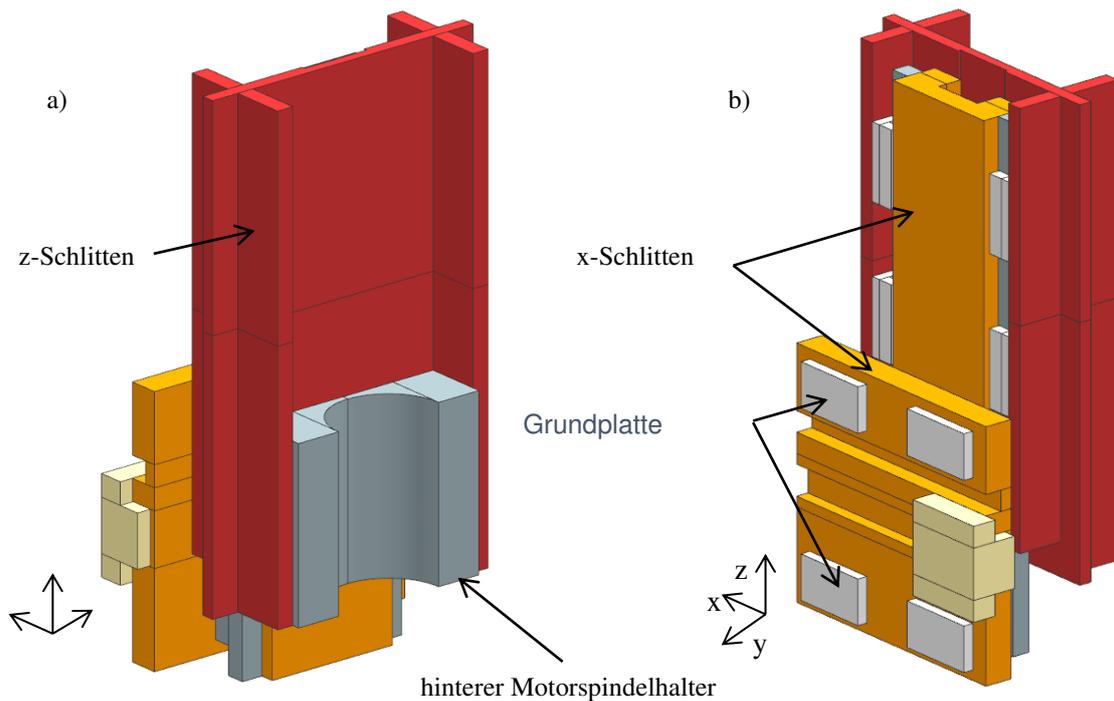


Abbildung 7: Darstellung des vereinfachten CAD-Modells als Basis für die FEA zur Ermittlung der zulässigen Verformungen

Beim Aufbau des FE-Modells wurden folgende Vereinfachungen und Annahmen getroffen:

- Fokus auf reine Strukturbauteile
- Vereinfachung der Geometrie der Führungsschienen und der Führungswagen
 - Entfall von Bohrungen und Schraubverbindungen
- Einleitung der Kraft in eine Hälfte der Spindelhalterung über eine kinematische Kopplung des Kräfteinleitungspunkts (entspricht TCP) mit Oberfläche der Spindelhalterung
- Nichtberücksichtigung der Führungen am Maschinentisch und des Portalbalkens
- Feste Einspannung des x-Schlittens an den Führungswägen
- Berechnung der Steifigkeiten an den Führungswagen und –schienen gemäß dem in Abbildung 8 dargestellten Vorgehen

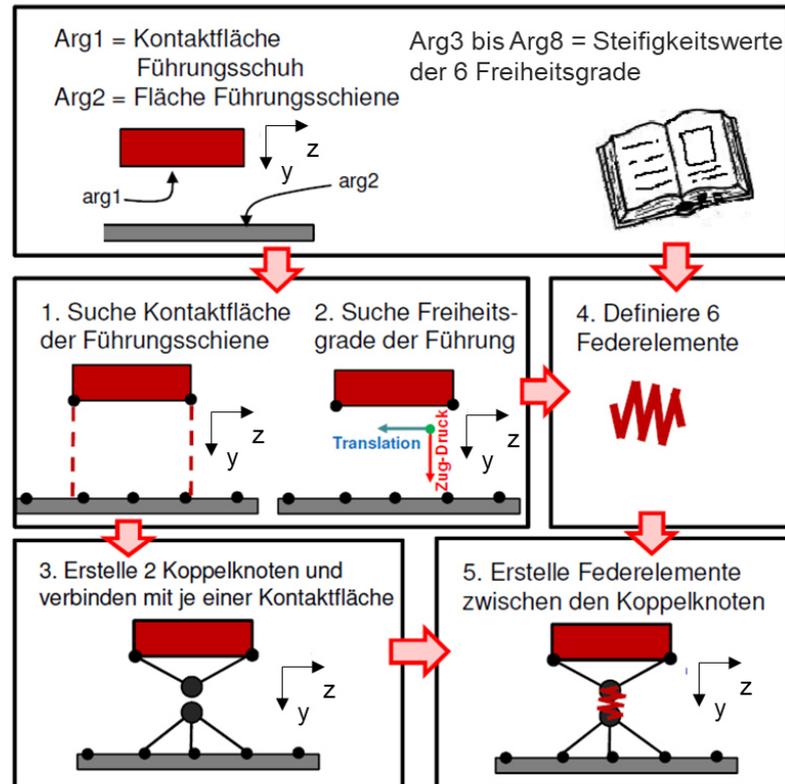
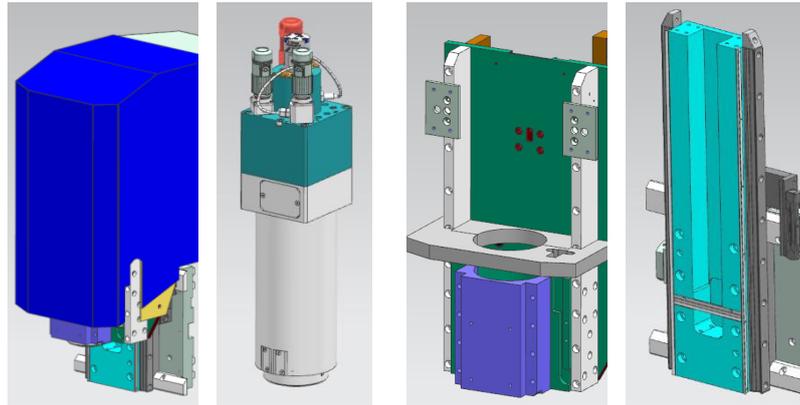


Abbildung 8: Ablauf des Makros zur Erstellung des Führungskontakts zwischen Führungsschienen und Führungswagen nach [22]

Im letzten Schritt vor der Lösung des Systems werden die Lagerungen des Systems sowie die angreifenden Kräfte definiert. Im Falle des vorliegenden x-z-Aufbaus der DATRON M10 Pro werden die x-Führungswagen über eine Verschiebungsrandbedingungen in y- und z-Richtung sowie die Kugelgewindtriebmuttern in x-Richtung fixiert. Die Kugelgewindtriebmuttern am Kugelgewindtrieb des z-Antriebs wird in z-Richtung blockiert, um die Verschiebung der Schlitten zueinander zu verhindern, die in Realität durch die Drehung des Kugelgewindtriebs bestimmt wird.

Vor der eigentlichen Konzeptentwicklung wird zunächst eine Potentialabschätzung hinsichtlich der erreichbaren Masseneinsparung durchgeführt. Diese ist in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Potentialabschätzung durch reine Werkstoffsubstitution von Aluminium durch CFK. Anbauteile wie der z-Motor, Kabel, etc. wurden nicht berücksichtigt.



		Abdeckung	Motor- spindel	z-Schieber*	x-Achse	Gesamt
Masse in kg	Orig.	5,3	18	15	16,5	57,8
	CFK	2,3	18	8,9	13,5	45,4
Einspar- ung in %		57	0	40	19	20

Systematische Parametervariation und Konzeptentwicklung

Für die Teilfunktionen der Konstruktion werden einzelne Lösungsmöglichkeiten in einem morphologischen Kasten (Tabelle 12) zusammengestellt und mittels systematischer Parametervariation die sich ergebenden Lösungen für die zuvor definierten Anforderungen ermittelt. Die Ergebnisse der Konzeptentwicklung wurden in [23] veröffentlicht.

Tabelle 12: Morphologischer Kasten

Teilfunktionen	Varianten				
Position des Wandlers (falls vorhanden)	Oben	Seitlich	Vorne	Zwischen x- und z-Schlitten	Hinter dem x-Schlitten
Wandlertyp der z-Richtung	Kugelgewindetrieb	Zahnstange	Keiner		
Antrieb in z-Richtung	Elektrisch-rotatorisch	Pneumatisch	Hydraulisch	Linearmotor	
Anzahl der Antriebe	1	2	n		
Position des Antriebs	Hinter dem x-Schlitten	Oberhalb der Spindel	Seitlich der Spindel	Vor der Spindel	
Führung in z-Richtung	Führungsschienen	Linearlager			
Position der z-Führung	Vor Spindel	Beidseitig der Spindel	Hinter der Spindel		
Ausrichtung der z-Führung	Ausrichtung in x	Ausrichtung in y			
Einbaurichtung z-Führung	Wagen bewegt	Schienen bewegt			
Geometrie der Schlitten	Stäbe	Balken	Platte		
x-Kugelgewindetrieb umschließendes Schutzblech	Ja	Nein			

Für die systematische Parametervariation der zuvor erarbeiteten Varianten wird ein Lösungsstammbaum erstellt. Dieser besteht aus fünf großen Ästen, welche jeweils eine Positionierung des Wandlers und die sich dafür ergebenden Gesamtkonzepte betrachten. In Abbildung 9 ist beispielhaft der erste Ast dargestellt.

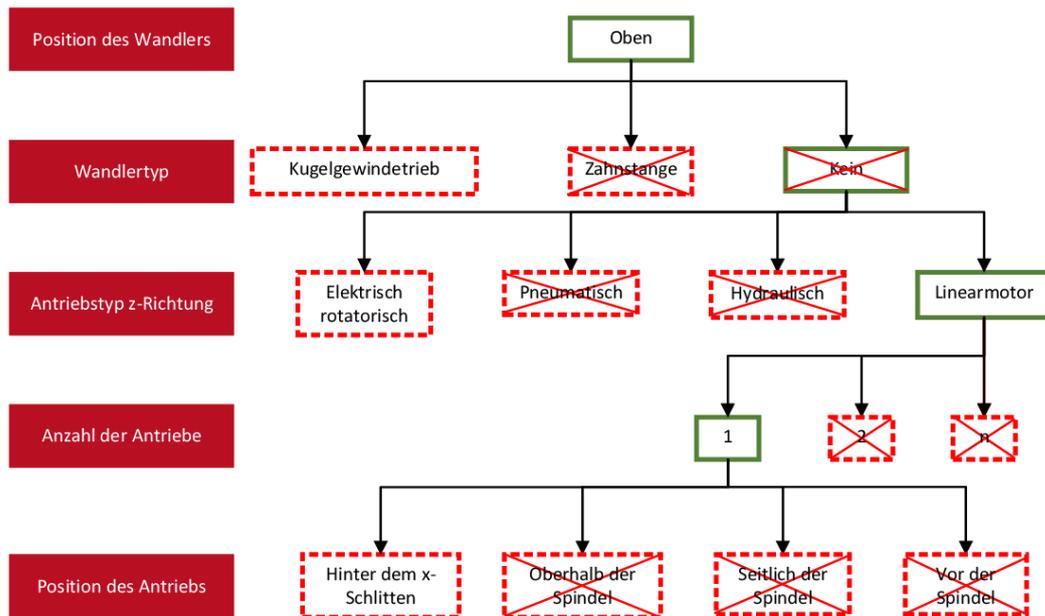


Abbildung 9: Beispielhafter Ast des Lösungsstammbaums. Rot gestrichelt sind bei dieser Lösung nicht verfolgte Möglichkeiten. Durchgestrichene Kästen bedeuten, dass diese Lösungsmöglichkeit ausgeschlossen wird.

Konzeptbeschreibung

Aus den verschiedenen Lösungsstammbäumen ergeben sich drei Konzepte, die nachfolgend dargestellt sind. In Abbildung 10 ist Konzept 1 dargestellt. Dieses entspricht dem aktuellen x-z-Aufbau, wobei die z-Führungsschienen um 90° gedreht sind.

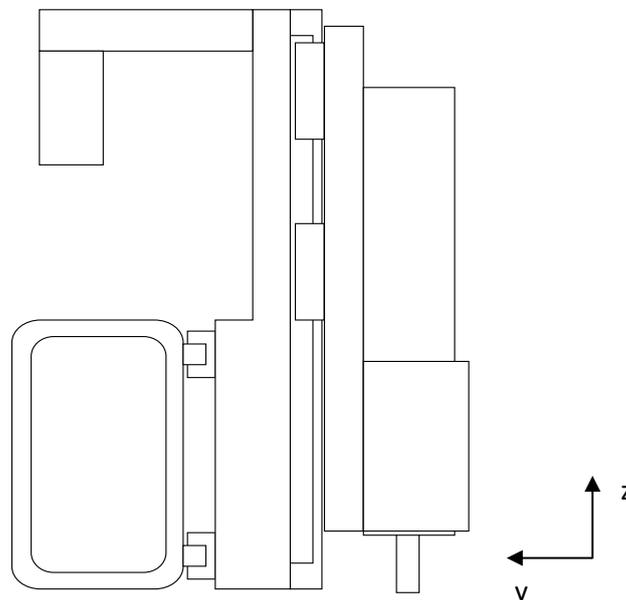


Abbildung 10: Originalaufbau mit in z-x-Ebene gedrehten Führungen für den z-Schlitten

Weiterhin wurde Konzept 2 entwickelt, dessen Aufbau in Abbildung 11 dargestellt ist. Auch hier sind die Führungsschienen um 90° gedreht angeordnet und außerdem die Führungswagen am x-Schlitten montiert. Führungsschienen, z-Kugelgewindetrieb sowie z-Antrieb sind nun am z-Schlitten befestigt, sodass die mitbewegte Masse der Anbauteile des z---Schlittens gegenüber dem Istzustand steigt.

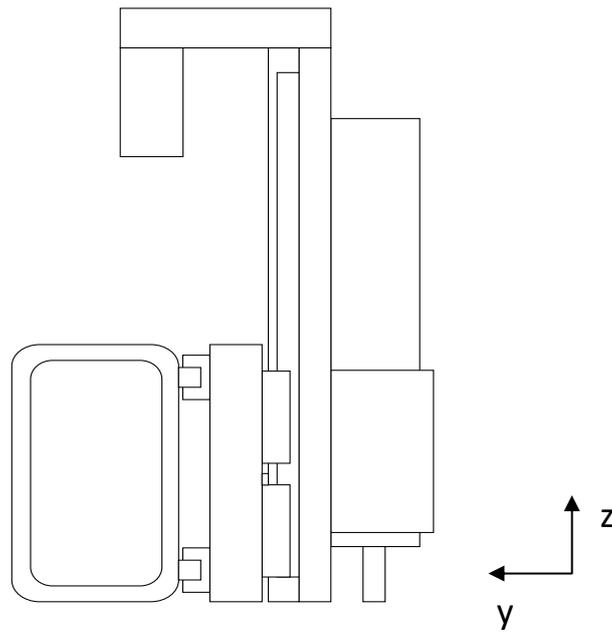


Abbildung 11: Konzept 2: an z Schlitten befestigte z Führungsschienen, z Kugelgewindetrieb und z Antrieb sowie belastungsgünstige Ausrichtung der Führungsschienen

Mittels des fünften Lösungsasts wurde Konzept 3 entwickelt, das in Abbildung 12 dargestellt ist. X- und z-Schlitten können im Vergleich am nächsten zueinander angeordnet werden, indem die Führungsschienen seitlich der Spindel und des z-Kugelgewindetriebs hinter dem x-Schlitten angeordnet werden. Insgesamt kann so der Lasthebelarm verkürzt werden, jedoch ist durch diese Anordnung des z-Kugelgewindetriebs ein erhöhter Bauraum in z-Richtung erforderlich.

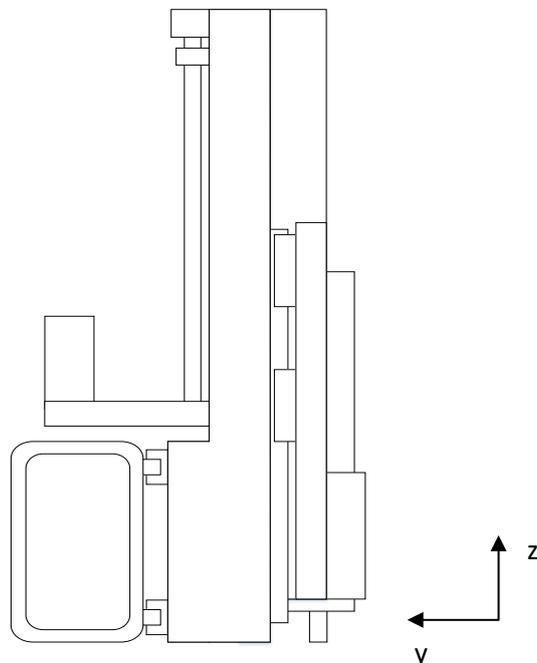


Abbildung 12: Konzept 3: Anordnung des z Kugelgewindetriebs hinter dem x-Schlitten sowie belastungsgünstig ausgerichtete z-Führungsschienen seitlich der Spindel

Bewertung der Konzepte

Die drei vorgestellten Konzepte werden mittels einer Punktebewertung nach [24] kategorisiert. Dieses wird als Grundlage für die Masse- und Steifigkeitsoptimierung verwendet und ausgearbeitet. Zur Bewertung der Konzepte werden die in Tabelle 13 beschriebenen Bewertungskriterien und Bewertungsskala entwickelt. Der vorliegende x-z-Aufbau der Portalfräsmaschine wird hier als Mittelwert, also mit zwei Punkten, angenommen. Daraus folgt, dass die Bewertung einer Lösung mit zwei Punkten -die Bewertungskriterien ausreichend erfüllt [24].

Tabelle 13:Paarvergleich der Bewertungskriterien zum Festlegen der Priorisierung einzelner Bewertungskriterien

Bewertungs-kriterien	Steifigkeit	Masse, Dynamik	Kraftfluss	Schwerpunkt	Montage	Kosten, Fertigung	Abdichtung	Summe	Gewichtung
Steifigkeit	1	1	1	2	2	2	2	11	0,2245
Masse, Dynamik	1	1	1	1	2	2	2	10	0,2041
Kraftfluss	1	1	1	1	2	2	2	10	0,2041
Schwerpunkt	0	1	1	1	2	2	2	9	0,1837
Montage	0	0	0	0	1	1	1	3	0,0612
Kosten, Fertigung	0	0	0	0	1	1	1	3	0,0612
Abdichtung	0	0	0	0	1	1	1	3	0,0612
								49	1

Der Vergleich ergibt, dass die Steifigkeit das wichtigste Bewertungskriterium für die Konstruktion darstellt. Masse und Dynamik sowie der realisierbare Kraftfluss werden gleichermaßen als sehr wichtig für die Konstruktion gewertet. Hierbei wird die Minimierung der Masse zur Verbesserung der Dynamik gefordert. Darüber hinaus wird der Massenschwerpunkt des Konzepts mit einem hohen Stellenwert belegt. Ideal wäre dabei die Anordnung des Schwerpunkts über den x-Führungsschienen, sodass die Gewichtskraft kein zusätzliches Moment ausübt. Hingegen werden der Montage, Kosten und Fertigung sowie der Abdichtung eine niedrigere Priorität zugeordnet.

Die detaillierte Beschreibung der einzelnen Bewertungskriterien für die Konstruktion ist in Tabelle 14 dargestellt. Die eigentliche Bewertung der einzelnen Konzepte bezüglich der aufgestellten und gewichteten Bewertungskriterien ist in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 14: Bewertungskriterien zur Konzeptidentifizierung

Kriterium:	Beschreibung:	0	1	2	3	4
Steifigkeit	Widerstand gegen Verformung in x-, y-, z-Richtung	Verschlechterung	Original z-Aufbau	Minimale Verbesserung	Erweiterte Verbesserung	Erhebliche, deutliche Verbesserung
Masse, Dynamik	Volumenänderung, Anteil des durch FKV ersetzten Volumens, Anteil der bewegten Masse in z-Richtung	Massezunahme und mehr mitbewegte Masse in z-Richtung	Entweder Massezunahme oder mehr mitbewegte Masse in z-Richtung	Istzustand analog in FKV	Entweder Massereduktion oder weniger mitbewegte Masse in z-Richtung	Massereduktion und weniger mitbewegte Masse in z-Richtung
Kraftfluss, Lasthebelarm	Direkte Leitung, kurzer Lasthebelarm	Verschlechterung in x-, y- und z-Richtung und längerer Lasthebelarm	Verschlechterung in z-Richtung oder in x- und y-Richtung oder längerer Lasthebelarm	Istzustand oder Ausgleich von mehreren Merkmalen	Verbesserung in z-Richtung oder in x- und y-Richtung oder kürzerer Lasthebelarm	Verbesserung in x-, y- und z-Richtung und kürzerer Lasthebelarm
Lage des Schwerpunkts	Ziel: Lage am x-Schlitzen	$z > 300$ mm $y > 150$ mm	$z \geq 250$ mm $y \geq 120$ mm	$z = 187,8$ mm $y = 81,0$ mm	$z \leq 100$ mm $y \leq 40$ mm	$z < 50$ mm $y = 0$ mm
Montage	Schlitzen, Anbauteile, Spindel, Wartung	Aufwandssteigerung von 3 - 4 Punkten	Aufwandssteigerung von 1 - 2 Punkten	Istzustand	Aufwandsreduktion von 1 - 2 Punkten	Aufwandsreduktion von 3 - 4 Punkten
Kosten, Fertigung	Zukaufteile, Fertigungsverfahren	Kostensteigerung von beiden Anteilen	Kostensteigerung für einen der beiden Anteile	Istzustand	Kostenreduktion für einen der beiden Anteile	Kostenreduktion von beiden Anteilen
Abdichtung	Anzahl der Teile, Aufwand	Verschlechterung	Istzustand	Istzustand		Verbesserung

Tabelle 15: Bewertung der Konzepte

Bewertungskriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Steifigkeit	3	3	2
Masse, Dynamik	2	2	1
Kraftfluss	3	3	2
Schwerpunkt	2	3	3
Montage	3	2	3
Koste, Fertigung	1	2	1
Abdichtung	3	0	2
Gesamtbewertung	2,4898	2,4899	1,9796

Aufgrund der Anordnung der Komponenten zueinander kann für Konzept 3 kein kurzer Kraftfluss realisiert werden. Dies wirkt sich sowohl auf die realisierbare Steifigkeit als auch auf die Masse aus. Die durchgeführte Bewertung schließt daher Konzept 3 aus. Hingegen werden Konzept 1 und Konzept 2 ähnlich gut bewertet. Für beide ist der z-Kugelgewindetrieb zwischen x- und z-Schlitten angeordnet, alleinig die Anordnung der z-Führungsschienen ist verändert. Der wesentliche Unterschied ergibt sich hierbei durch die Verkürzung des x-Schlittens für Konzept 2. Dadurch gestaltet sich die Abdichtung des z-Kugelgewindetriebs und der z-Führungsschienen gegen Späne als sehr kompliziert, da diese zum Portal hin offen sind. Obwohl das zweite Konzept eine minimal bessere Gesamtbewertung hat, wird wegen der Herausforderung einer guten Abdichtung das Konzept 1 priorisiert.

Für dieses Konzept 1 besteht die Möglichkeit, die bisher verwendete Jalousie anzupassen, um in der Gestaltung des x-Schlittens- freier zu sein. Alternativ zu der im ursprünglichen Modell realisierten Jalousie wäre die in Abbildung 13 dargestellte Jalousie zu verwenden. Durch einen beweglich realisierten Schutz nach oben und vorne, kann das obere Schutzblech verkürzt werden und der x-Schlitten nach oben verlängert werden.

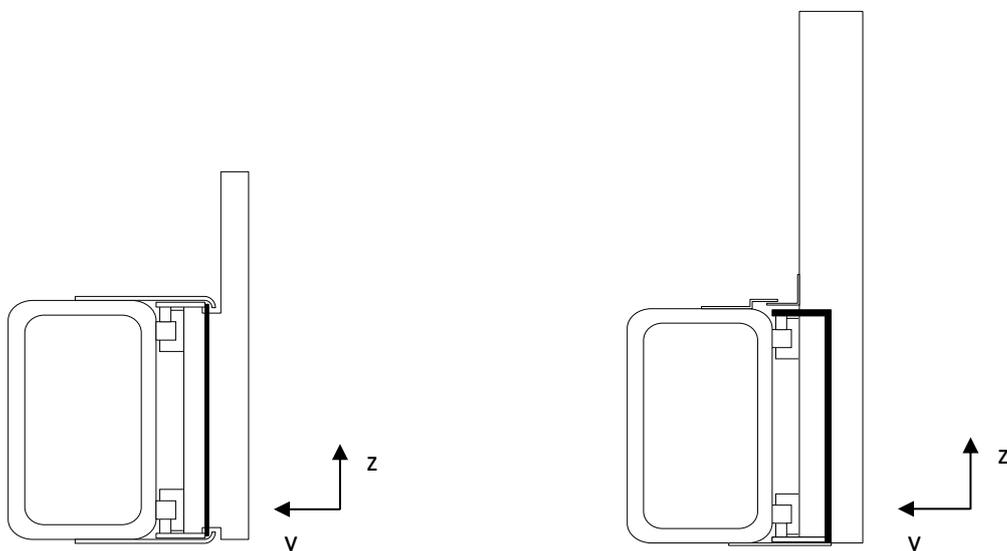


Abbildung 13: Schnittansicht des Aufbaus mit bisher verwendeter Jalousie (links) und

Die genannten Vorteile einer freien Gestaltung des x-Schlittens und die Möglichkeit den Lasthebelarm in y-Richtung deutlich zu verkürzen werden bei der Kombination von Konzept 1 mit der alternativen Jalousie genutzt. Daher wird dieses Konzept für die folgende Konstruktion als Grundlage verwendet.

Die Konstruktionsphase lässt sich in drei Schritte unterteilen. Im ersten Schritt wird die Geometrie der Strukturteile des x-z-Aufbaus angepasst. Darunter fallen der x-Schlitten, der z-

Schlitten sowie die Spindelhalterung. Darauf folgt die Auslegung des Laminataufbaus. Abschließend werden alle Anbauteile betrachtet, auf Kompatibilität geprüft und gegebenenfalls an die neue Struktur angepasst.

Geometrieoptimierung

Für die Auskonstruktion der Konzeptgeometrie werden die Grundmaße des x- und z--Schlittens übernommen und so erweitert, dass die beiden Schlitten die gleiche Breite haben. Die Position der x-Führungswagen soll hierbei beibehalten werden, um den Stützabstand nicht zu verändern. Um einen kurzen Kraftfluss vom z- in den x-Schlitten zu ermöglichen, werden die z-Führungsschienen in x-Richtung auf eine Höhe mit den x-Führungswagen gesetzt. Des Weiteren werden die z-Führungsschienen und der z-KGT in einer Ebene positioniert. Form und Abmaße der Nut für den z-Kugelgewindetrieb sind identisch zum Original. An den Außenseiten des x-Schlittens werden Rippen angebracht, um die Steifigkeit zu erhöhen. Dies wird in Abbildung 14 veranschaulicht.

Der z-Schlitten wird, wie oben beschrieben, als C-Profil konstruiert, wobei Grundmaße wie Höhe und Breite vom Original übernommen werden, da diese an den vorgegebenen Bauraum angepasst sind. Die Rippenbreite auf der Vorderseite des z-Schlittens wird von der verwendeten Motorspindel und deren Halterung sowie dem nach außen festgelegtem Bauraum begrenzt.

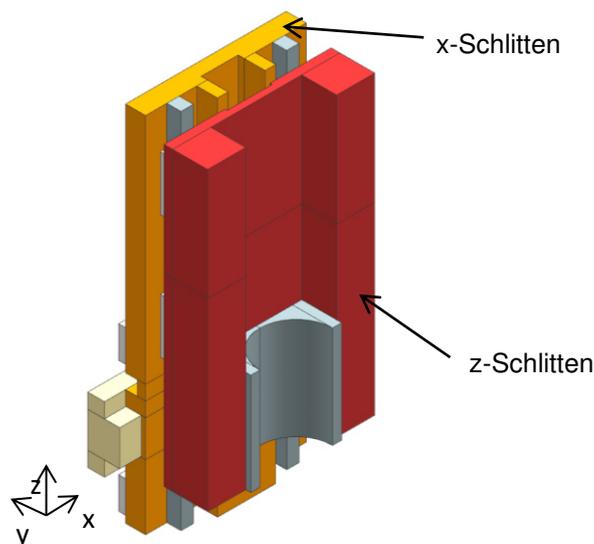


Abbildung 14: Geometrie Konzept 1

Folgende Optimierungsmaßnahmen werden untersucht

1. Kürzen des z-Schlittens um 50 mm
2. Reduktion der Rippenbreite an der Nut des z-Kugelgewindetriebs
3. Reduktion der x-Schlittenbreite (11,75 mm auf jeder Seite)
4. Reduktion der Rippenbreite am z-Schlitten
5. Variationen der Spindelhalterung (Abbildung 15)

6. x-Schlitten ohne äußere Rippen

Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in Tabelle 16 zusammengefasst und geben Auskunft über die prozentuale Massenreduktion und die prozentuale Steifigkeitsreduktion. Ist die Massenreduktion größer als der Steifigkeitsverlust, wird die jeweilige Änderung als Option der Massenreduktion weiter betrachtet. Gekennzeichnet ist dies in Tabelle 16 durch die Spalte „Umsetzung“. Bei Maßnahmen, die zu einer Massenerhöhung führen, muss der prozentuale Steifigkeitszugewinn deutlich über der prozentualen Massenerhöhung liegen, damit die Anpassung als Option aufgenommen wird.

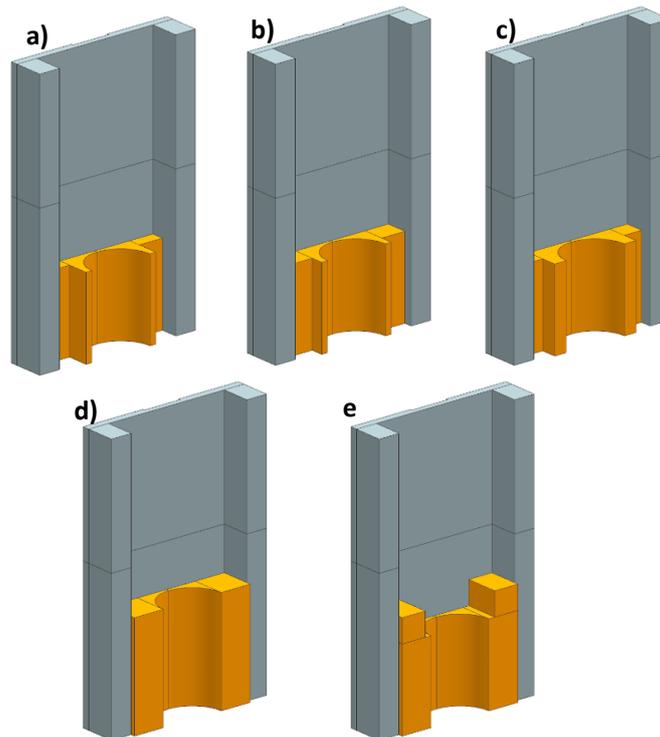


Abbildung 15: Spindelhaltervariationen a) Spindelhalterung seitlich dünner 1 b) Spindelhalterung seitlich dünner 2 c) Spindelhalterung seitlich dünner 3 d) Spindelhalterung länger 1 e) Spindelhalterung länger 2

Tabelle 16: Einfluss der verschiedenen Geometrieanpassungen auf Masse und Steifigkeit

Anpassung	$\frac{\Delta m}{m_0}$ in %	s_{\max} in mm	Steifigkeit in %	Umsetzung
Spindelhalterung seitlich dünner 1	4,100	166,21	44,317	Nein
Spindelhalterung seitlich dünner 2	2,343	125,74	9,178	Nein
Spindelhalterung seitlich dünner 3	2,196	123,72	7,424	Nein
z-Schlitten gekürzt (50 mm)	3,291	118,33	2,744	Ja
x-Schlitten schmaler (11,75 mm)	6,959	117,17	1,737	Ja
Spindelhalterung länger 1	-2,959	101,99	-11,444	Nein
Spindelhalterung länger 2	-1,841	105,92	-8,032	Ja
x-Schlitten dünner (2 mm)	2,615	117,34	1,884	Ja
x-Schlitten im oberen Bereich dünner	7,530	130,89	13,649	Nein
z-Schlitten Rippen schmaler	5,173	126,03	9,430	Nein
x-Schlitten Rippen um Kugelgewindetrieb schmaler	2,236	115,95	0,677	Ja
x-Schlitten ohne äußere Rippen	7,005	118,05	2,501	Ja
z-Schlitten Rippen breiter; Grundplatte schmaler	-6,031	87,109	-24,365	Ja
x-Schlitten Versteifungsband mittig	-1,642	113,19	-1,719	Nein

Aus den Ergebnissen in Tabelle 16 wird die optimierte Geometrie abgeleitet. Diese ist in Abbildung 16 dargestellt. Insbesondere kann im Vergleich zum Ursprungszustand eine Massereduktion von 10 % erzielt werden.

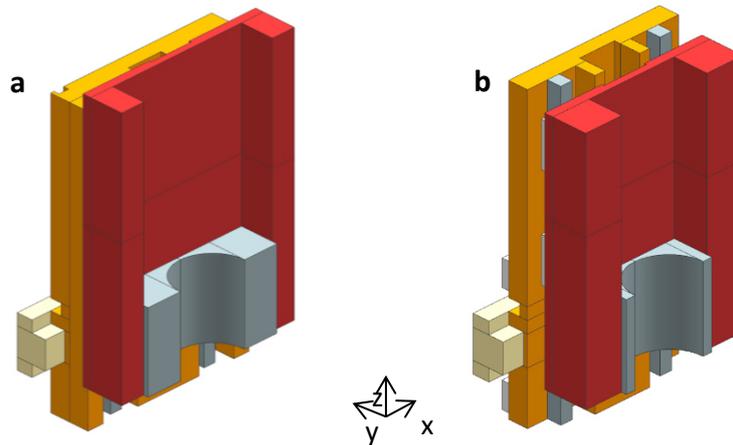


Abbildung 16: a) Ausgangsgestaltung, b) optimierte Geometrie

Laminatauslegung

Die Laminatauslegung wird in vier Schritten durchgeführt und ist ein iterativer Prozess. Das Vorgehen erfolgt in Anlehnung an die Netztheorie. Die Fasern werden in Richtung der Hauptspannungen orientiert und die Schichtdicken anhand der Absolutwerte der Hauptspannungen festgelegt. Im Detail wird wie folgt vorgegangen.

1. Einteilung der Schlitten in Laminatplatten
2. Ableiten der Faserrichtungen
3. Auslegen des Laminataufbaus (Schichtdicken, -anzahl)
4. Berechnen und Bewerten des Laminataufbaus

Gemäß der Projektidee werden Halbzeugplatten anstatt Nasslaminat vorgesehen. Die Platten werden zugekauft und sollen je nach Bedarf aus UD-Schichten, Kreuzverbänden oder Geweben bestehen.

Eine Werkstoffsubstitution ist nicht bei allen Bauteilen sinnvoll. Die Mutternhalter der Kugelgewindetriebmutter in x- und z-Richtung, die Spindelhalterung und die Motorplatte werden weiterhin aus Aluminium gefertigt.

Einteilung der Schlitten in Laminatplatten

Die Schlitten werden aus mehreren Laminatplatten zusammengeklebt, die wiederum aus verklebten Halbzeugplatten bestehen können. Dadurch ist es möglich einen beanspruchungsgerechten Laminataufbau zu erreichen und somit endgeometrienah zu fertigen, sodass nur wenig Nachbearbeitung notwendig ist. Zusätzlich kann die Ausrichtung einiger Laminatplatten an eine dreidimensionale Beanspruchung angepasst werden. Gleichzeitig steigt die Anzahl an Klebstellen und Halbzeugen mit unterschiedlicher Faserorientierung und Plattendicke.

In Abbildung 17 ist eine Explosionsdarstellung des eingeteilten x-Schlittens dargestellt. Der x-Schlitten wird aus 17 Laminatplatten und einem Aluminiumblock gefertigt.

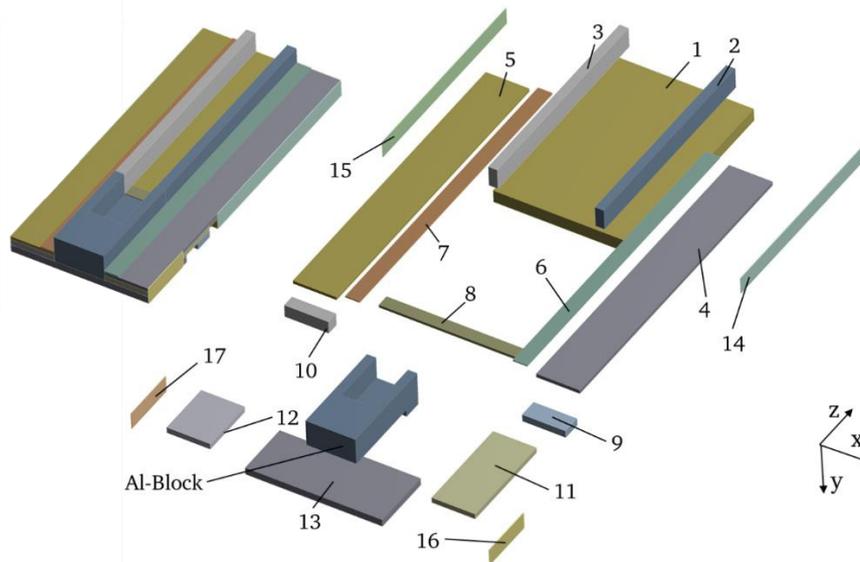


Abbildung 17: Explosionsdarstellung x-Schlitten

Ein großer Vorteil dieses Konzepts ist der reduzierte Nachbearbeitungsaufwand. Nur die Nuten in Querrichtung auf der Rückseite müssen gefräst werden. Obwohl eine Teilung der Grundplatte des x-Schlittens entlang der x-Achse vorliegt, sind beide Teile, oben und unten, durch die Laminatplatten 4 und 5 miteinander verbunden. Somit verläuft nicht der gesamte Kraftfluss über eine Klebfläche in der x-y-Ebene. Zusätzlich wird eine stark vergrößerte Klebfläche erzeugt. Gleiches wird durch die Laminatplatte 13 zur Verbindung des Aluminiumblocks mit dem unteren Plattenteil erreicht. Es werden hier zwei Klebflächen in der y-z-Ebene zwischen Aluminiumblock und Laminatplatte 11 bzw. 12 überbrückt.

Die Einteilung des z-Schlittens erfolgt in Grundplatte und Rippen. Folglich setzt sich der z-Schlitten aus drei Laminatplatten zusammen. Dies ist Abbildung 18 dargestellt.

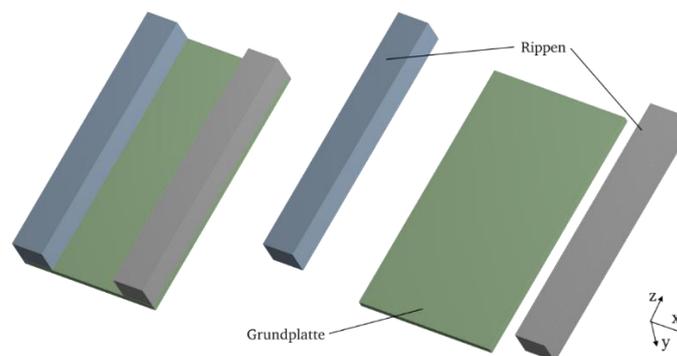


Abbildung 18: Explosionsdarstellung: Laminatplatten z-Schlitten

Ableitung der Faserrichtungen

Grundlage der Laminatauslegung ist die Simulation der optimierten Geometrie mit einem isotropen Werkstoff, um die Hauptspannungen und Hauptspannungsrichtungen zu berechnen. Außerdem werden ausschließlich die Faserrichtungen $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ und $\alpha = \pm 45^\circ$ benutzt, um den Verschnitt zu minimieren. Die Halbzeugplatten werden danach anhand der mittleren Hauptspannungen und der Hauptspannungen mit dem größten Betrag ausgerichtet.

Nachfolgend werden alle zu untersuchenden Lastfälle und Positionen des x-z-Aufbaus einzeln untersucht und daraus die Faserrichtung sowie die Schichtdicke bestimmt. Das Vorgehen wird beispielhaft am x-Schlitten für die Position $z = 0$ mm und eine Kraft in x-Richtung dargelegt.

Die resultierenden Hauptspannungsrichtungen sind in Abbildung 19 dargestellt. Eine Kraft in x-Richtung führt zu einer Belastung des x-Schlittens auf Torsion und Biegung. Bedingt durch die Torsionsbelastung sowie die Querkraft, die zu einer Schubbeanspruchung führt, bilden sich die Hauptspannungen in $\pm 45^\circ$ -Richtung zur x-Achse aus. Zusätzlich sind Hauptspannungsrichtungen entlang der z-Achse an den Rändern der Platte zu erkennen. Diese sind auf die Kraftleitung vom z-Schieber auf den x-Schlitten durch die Führungsschienen zurückzuführen. Diese Hauptspannungen sind betragsmäßig am größten. Durch die Führungswagen, die die Verbindung zum Portal herstellen, werden ebenfalls Hauptspannungen in y-Richtung (senkrecht zur Plattenebene) erzeugt. Diese können allerdings aufgrund des geringen Spannungsbetrags vernachlässigt werden.

Ein idealer Laminataufbau für das Schubfeld ist ein Kreuzverbund mit Faserrichtungen $\alpha = (+45^\circ/-45^\circ)$. Zusätzlich sind UD-Schichten an den Rändern vorzusehen. Außerdem ist zu beachten, dass die Belastung auch in negativer x-Richtung auftreten kann. Dies führt dazu, dass die Hauptspannungsrichtungen an der y-z-Ebene in der Mitte der Platte gespiegelt werden. Dadurch wird ein in x-Richtung symmetrischer Aufbau des Laminats nötig. Der Laminataufbau ist in Tabelle 17 aufgelistet.

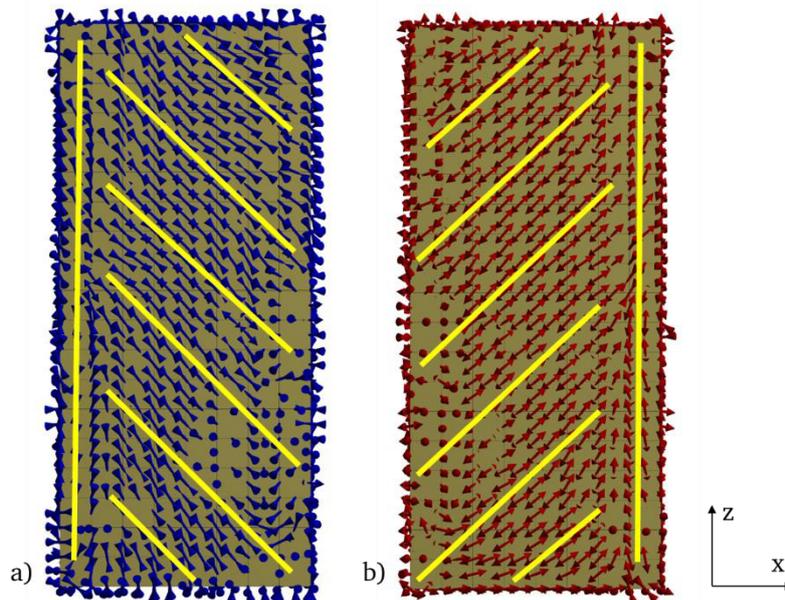


Abbildung 19: Hauptspannungsrichtungen des Ersatzmodells des x-Schlittens, $z = 0$ mm Lastfall; F_x , Vorderseite a) minimale Hauptspannungen b) maximale Hauptspannungen

Tabelle 17: Faserrichtungen x-Schlitten Grundplatte, F_x , $z=0$ mm, Die Faserrichtung ist auf die x-Achse des Maschinenkoordinatensystems bezogen.

Faserrichtung in °	Ebene	Spannungsbetrag in N/mm^2
0	XZ	2,5
±45	XZ	2
90	XZ	3,5

Mithilfe der oben bestimmten Faserrichtungen und Spannungen werden die Schichtdicken und die Richtungsverteilungen in den Laminaten bestimmt.

Bestimmung der Schichtdicken

Nach der Einteilung der Schlitten und der Bestimmung der Faserrichtungen für die einzelnen Platten folgt die Festlegung der Schichtdicken. Die Schichtdicken werden anhand des maximal wirkenden Spannungsbetrags einer Schicht bestimmt. Der Anteil der Schichtdicke t_i zur Laminatdicke t_{ges} entspricht dem Verhältnis des Spannungsbetrags σ_i dieser Richtung zur Summe aller im Laminat wirkenden Spannungen.

$$\frac{t_i}{t_{ges}} = \frac{\sigma_i}{\sum_i \sigma_i}$$

Hierbei wird vorausgesetzt, dass das Laminat aus einzelnen Platten aufgebaut wird. Ist ein räumlicher Aufbau des Laminats erforderlich, sodass nicht alle Halbzeugplatten in einer Ebene auszurichten sind, muss anstelle des Schichtdickenanteils der Querschnittsflächenanteil berechnet werden. In der Formel werden dafür die Schichtdicken t durch Querschnittsflächen A ersetzt.

$$\frac{A_i}{A_{ges}} = \frac{\sigma_i}{\sum_i \sigma_i}$$

Die Schichtreihenfolge im Laminat wird unter Berücksichtigung der Beanspruchungen gewählt. So werden beispielsweise in biegebelasteten Bauteilen Fasern unter Zug- und Druckbeanspruchung in die Randbereiche gelegt.

Zur Bestimmung der Schichtdicken der x-Schlitten-Grundplatte werden zunächst folgende Vereinfachungen angenommen. Zum einen werden die maximalen Spannungsbeträge eines Lastfalls als Summe aller Spannungen aller Richtungen des Lastfalls genutzt. Die dadurch benötigten Faserrichtungen sind in Tabelle 18 zu finden. Zum anderen werden nur Kreuzverbunde eingesetzt. Die maximale Spannung bei Belastung in y-Richtung wird auf beide Faserrichtungen gleich aufgeteilt.

Tabelle 18: Faserrichtungen und Hauptspannungen x-Schlitten-Grundplatte. Die Faserrichtung ist auf die x-Achse des Maschinenkoordinatensystems bezogen.

Faserrichtung in °	Ebene	$[\sigma] = N/mm^2; F_x$	$[\sigma] = N/mm^2; F_y$
0/90	XZ	-	2,25
±45	XZ	3,5	2,25

Um die Auslegung des Laminataufbaus zu vervollständigen, muss die Schichtreihenfolge im Laminat festgelegt werden. Als Lösung werden die 0/90-Faserrichtungen geteilt und an den Rand der Platte gelegt. Dies ist sinnvoll, da die 90°-Schichten unter Belastung in y-Richtung

die Zug- und Druckspannungen am Rand aufnehmen können. Zur Vermeidung von Verzug wird das Laminat symmetrisch aufgebaut, dadurch ergibt sich folgender Laminataufbau: (90/0/+45/-45) S (14%/14%/36%/36%).

Der Aufbau der Laminatplatten ist in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19: Aufbau der Laminatplatten 1, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12 und 13. Die Faserrichtung ist auf die x-Achse des Maschinenkoordinatensystems bezogen.

Laminatplatte	t_{ges} in mm	Laminataufbau
1	21	(90/0/+45/-45) (10%/10%/40%/40%)
4, 5	6,5	(-45/+45/0/90) (19%/19%/31%/31%)
6,7	1	(+45/-45) (50%/50%).
8	12,5	(+45/-45) (50%/50%)
9	9	(+45/-45) (50%/50%)
10	10	(+45/-45) (50%/50%)
11	12	(90/0/+45/-45) (17%/17%/33%/33%)
12	22	(90/0/+45/-45) (10%/10%/40%/40%)
13	12	(90/0/+45/-45) (17%/17%/33%/33%)

Zuletzt werden die Rippen des x-Schlittens (Laminatplatten 2 und 3) ausgelegt. Um den Aufbau zu vereinfachen werden Faserrichtungen $\alpha = 0^\circ$ vernachlässigt. Diese treten nur bei Belastung in x-Richtung bei eingefahrenem z-Schieber auf und die Spannungen sind, verglichen mit anderen Richtungen, gering. Als weitere Vereinfachung werden in 90° -Richtung die Halbzeuge der Laminatplatten 14-17 genutzt. Dadurch ist die Dicke dieser Halbzeugplatten auf $t = 1$ mm festgelegt. Als zweite Faserrichtung ist ein Schublaminat vorzusehen, welches sich nach den Hauptspannungen ergibt. Der Laminataufbau der Rippen ist in Abbildung 20 dargestellt.

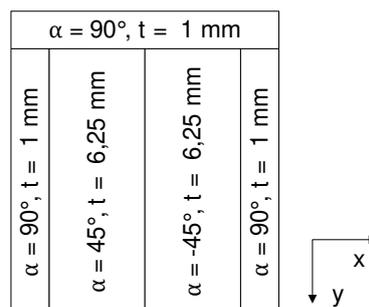


Abbildung 20: Aufbau Rippen x-Schlittens (nicht maßstabsgetreu). Die Faserrichtung ist auf die x-Achse des Maschinenkoordinatensystems bezogen.

Nachfolgend wird der Laminataufbau des z-Schlittens ausgelegt. Die Ergebnisse der Untersuchung der Grundplatte ($t = 12$ mm) sind in Tabelle 20 zusammengefasst. Die Auslegung erfolgt anhand der oben vorgestellten Methode.

Tabelle 20: Faserrichtungen und Hauptspannungen der Grundplatte des z-Schlittens. Die Faserrichtung ist auf die x-Achse des Maschinenkoordinatensystems bezogen.

Faserrichtung in °	Ebene	$[\sigma] = \text{N/mm}^2; F_x$	$[\sigma] = \text{N/mm}^2; F_y$
0	XZ	-	3
±45	XZ	2	-
90	XZ	-	12

Die 90°-Schichten werden analog zum x-Schlitten nach außen gelegt, um Zug- und Druckspannungen infolge der Biegung durch eine y-Kraft aufzunehmen. Die 0°-Schichten werden in die Mitte gelegt, sodass ein Laminataufbau (90/+45/-45/0)S (70%/6%/6%/18%) entsteht.

Die Ergebnisse der Untersuchung der z-Schlitten Rippen sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

Tabelle 21: Faserrichtungen und Hauptspannungen der Rippen des z-Schlittens. Die Faserrichtung ist auf die x-Achse des Maschinenkoordinatensystems bezogen.

Faserrichtung in °	Ebene	$[\sigma] = \text{N/mm}^2; F_x$	$[\sigma] = \text{N/mm}^2; F_y$
±45	XZ	1	-
±45	YZ	1	1
90	XZ	-	12
90	YZ	1,5	-

Die Faserorientierungen in den Rippen sind in Abbildung 21 dargestellt. Entgegen der Berechnungen wird ein größerer Teil als Schublaminat ausgelegt. Dies ist mit der Verteilung der Schubspannungen zu begründen, welche die Hälfte der Rippen einnehmen. Außerdem werden nur 90°-Faserrichtungen in der x-z-Ebene eingesetzt, da sich die Steifigkeiten von UD-Schichten senkrecht zu den Fasern nicht unterscheiden. Für die Biegung um die x-Achse bei Belastung in y-Richtung wird die 90°-Faserrichtung auf die Oberseite der Rippen gelegt. Um das Schublaminat der x-z-Ebene nicht weiter teilen zu müssen, ist es in die Mitte positioniert.

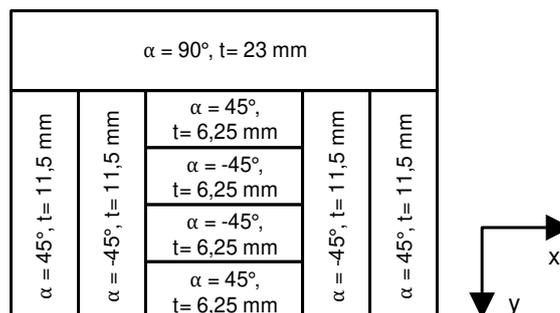


Abbildung 21: Aufbau Rippen z-Schlitten (nicht maßstabsgetreu). Die Faserrichtung ist auf die x-Achse des Maschinenkoordinatensystems bezogen.

An diese erste Auslegung schließt sich die Simulation der ersten Variante des CFK-Aufbaus an. Darauf aufbauend werden verschiedene Varianten iterativ erarbeitet und miteinander verglichen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Optimierung der Grundplatte des z-Schiebers. Die verschiedenen Versionen sind dabei wie folgt bezeichnet.

1. Original
2. Optimierte Geometrie aus Aluminium
3. CFK z-Grundplatte 0/45/-45/90/-45/45/0; HT
4. CFK z-Grundplatte Aluminium
5. CFK z-Grundplatte: Ausrichtung 0/90/0/-45/45/-45/0/90/0; HT
6. CFK z-Grundplatte: Ausrichtung 0/90/0/-45/45/-45/0/90/0; 45/-45 HT, sonst UHM
7. CFK z-Schlitten komplett aus UHM

Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in Tabelle 22 aufgelistet.

Tabelle 22: Vergleich der Verschiebungen für verschiedene Laminataufbauten

Lastfall	Version	1	2	3	4	5	6	7
F_x	Verschiebung u in μm	34,5	24,7	46,2	38,7	30,7	28,4	27,6
	Bezogen auf V1	1	0,71	1,33	1,12	0,88	0,82	0,7
F_y	Verschiebung v in μm	111	65,1	98,5	79,6	76,5	69,5	68,2
	Bezogen auf V1	1	0,58	0,88	0,71	0,69	0,62	0,61

Die Massenanalyse des Originals im Vergleich mit der optimierten CFK-Variante ist in Tabelle 23 aufgelistet. Es ergibt sich eine deutliche Masseneinsparung von ca. 35 % über die gesamte Baugruppe.

Tabelle 23: Massenvergleich der Originalvariante und der CFK-Variante

	z-Schlitten		x-Schlitten		Gesamt	
	Original	CFK	Original	CFK	Original	CFK
	Masse in kg					
Führungsschuhe	2,29	2,29	2,35	2,35		
Messsystem	1,71	1,71	2,32	2,32		
KGT-Komponenten	0,47	0,47	1,63	1,63		
Strukturbauteile	10,40	5,61	9,87	4,97	20,27	10,58
Einsparung Masse Strukturbauteile						
		-46,0 %		-49,6 %		-47,8%
Gesamt	14,86	10,08	16,18	10,11	31,04	20,19
Einsparung Masse Baugruppe						
		-32,2 %		-37,5 %		-34,9 %

Folgende Anbauteile wurden im Rahmen der Neukonstruktion angepasst:

- Halterung für die Kugelgewindetriebmuttern
- Motorplatte z-Achse
- Motorspindelhalterung:
Die Spindelhalterung ist wie bisher auch zweiteilig. Der hintere Teil wird mit dem z-Schlitten verklebt, der vordere Teil dient dazu die Spindel durch eine Klemmung mit dem hinteren Teil zu fixieren. Zur Anpassung an die neue Geometrie des z-Schlittens wird der hintere Teil in seiner Gesamtbreite reduziert. Damit die z-Führungswagen oberhalb der Spindelhalterung mit dem z-Schlitten verschraubt werden können, werden beide Teile in der Höhe reduziert. Die jeweils halbrunde Aussparung in beiden Teilen wird wie bisher vorgesehen. Um die halbrunden Aussparungen mit geeigneten Funktionsflächen für die Klemmung einfach fertigen zu können, werden beide Teile aus Aluminium gefräst und geschliffen.
- Sensorbefestigung Maßstäbe x- und z- Achse
- Schmierung
- Kabelführung
- Abdeckung

Kostenbetrachtung und daraus resultierende Laminatanpassung

In Tabelle 24 sind die kostenbezogenen Steifigkeiten für die oben genannten Versionen 5 und 6 der z-Grundplatte aufgelistet. Für die beiden Lastfälle in x- und y-Richtung ergibt der Vergleich, dass die Version 6 mit UHM-Fasern ca. doppelt so teuer ist (1123,00 € im Vergleich zu 2160,00 €). Für den weiteren Verlauf und den Aufbau des Demonstrators wird deswegen Version 5 als Laminataufbau für die Grundplatte des z-Schlittens gewählt.

Tabelle 24: Kostenbezogene Steifigkeit für die Version 5 und 6 der z-Grundplatte Preise für die Halbzeuge Version 5: 1123,00 € Version 6: 2160,00 €. Preise basierend auf Angeboten der Carbon-Werke GmbH.

Lastfall		5	6
F_x	Steifigkeit in N/ μm	68,40	73,94
	Kostenbezogene Steifigkeit in N/($\mu\text{m}^*\text{€}$)	0,061	0,034
F_y	Steifigkeit in N/ μm	76,5	69,5
	Kostenbezogene Steifigkeit in N/($\mu\text{m}^*\text{€}$)	0,024	0,014

5.2. Aufbau des Demonstrators

Sämtliche spanende Bearbeitungen der CFK-Halbzeuge wurde am PTW auf der Werkzeugmaschine Datron M10Pro sowie einem 5-Achs BAZ durchgeführt. Bei der spanenden Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen sind verschiedene Aspekte zu beachten, die im Folgenden kurz erläutert werden.

- Absaugung:
Die Absaugung bzw. Bindung des entstehenden Staubs ist eine zentrale Herausforderung bei der Bearbeitung von FKV. Dieser ist aufgrund der enthaltenen Fasern, insbesondere bei Verwendung von Kohlenstofffasern, gesundheitsschädlich. Die Bearbeitung der Platten wurde auf der Datron M10Pro ohne Einsatz eines Kühlmediums durchgeführt und unter Einsatz einer Absauganlage (Staubklasse M). Bei der Bearbeitung auf dem BAZ wurde mit einer Schwallkühlung mit herkömmlichen KSS gearbeitet. Dabei wird der Staub im KSS gebunden.
- Fräser:
Bei der Bearbeitung von FKV kommt es nicht zu einer Spanbildung wie bei metallischen Werkstoffen. Vielmehr wird der Werkstoff an der Bearbeitungsstelle „pulverisiert“. Hierfür sind sowohl Zweischneider als auch mikroverzahnte Fräser geeignet. Im Hinblick auf die Standzeit erzielen diamantbeschichtete Schneiden/Fräser deutlich bessere Ergebnisse. Die stark abrasiven Kohlenstofffasern führen zu einem hohen Verschleiß bei nicht beschichteten Werkzeugen.
- Frässtrategie:
Ein grundlegendes Problem bei der Verarbeitung von FKV ist die Abfuhr der Wärme aus dem Bauteil. Die aufgestaute Wärme kann im schlimmsten Fall zur Zerstörung der Matrix führen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll Gegenlaufräsen zu bevorzugen (siehe Abbildung 22). Hier wird die Wärme in den Bereich des abzutragenden Materials eingebracht. Andererseits kann es beim Gegenlaufräsen leichter zu Delaminationen kommen, da durch das Werkzeug Risse in der Laminebene induziert werden können.

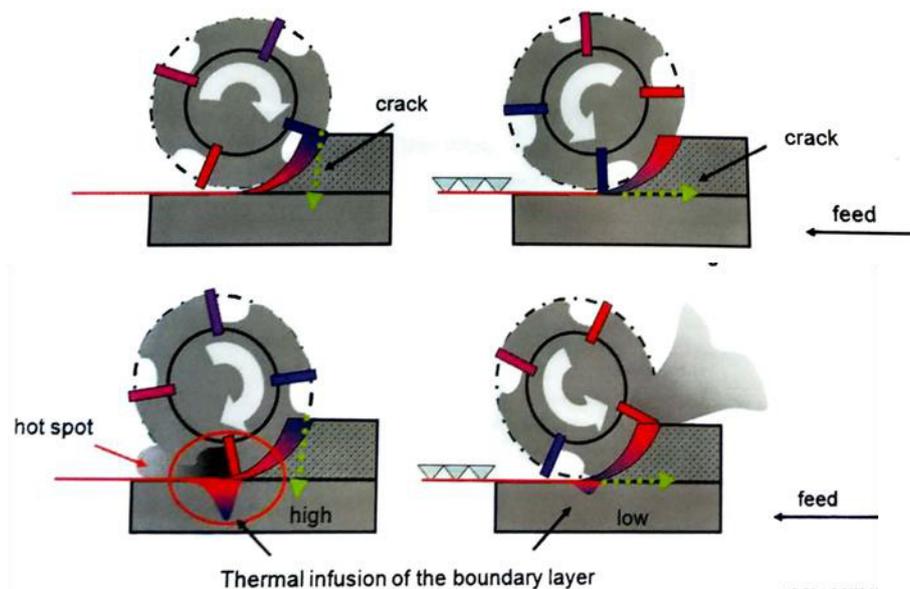


Abbildung 22: Rissausbildung und Wärmeeinbringung beim Gleichlauf-(links) und Gegenlaufräsen [25].

Zu Beginn des Projekts wurde mit einem sehr großen Aufmaß von 5 mm in Länge und Breite gearbeitet. Hintergrund ist ein mögliches Verrutschen der einzelnen Halbzeuge beim Verkleben. Im Laufe der Arbeiten zeigte sich, dass dies nicht

notwendig ist und ein geringeres Aufmaß von ca. 2 mm ausreichend ist. Bis auf wenige Ausnahmen, wie bspw. bei den Bohrungen, ist die Fertigungsplanung so gestaltet, dass die Bearbeitung auf einer 3-Achs-Maschine durchgeführt werden kann.

- Bohrungen in CFK:
Bei der Einbringung von Durchgangsbohrungen in die Bauteile hat sich im Rahmen des Projekts gezeigt, dass es bei der Verwendung konventioneller Bohrer häufig zu Delamination auf der Austrittseite des Bohrers kommt. Grund hierfür ist die erhöhte Temperatur beim Bohren und die damit verbundene Schwächung der Matrix. Als Gegenmaßnahmen sind der Einsatz von Unterlagen/Unterfütterungen auf der Austrittseite, die Verringerung der Schnittgeschwindigkeit oder der Strategiewechsel hin zum Bohrfräsen möglich. Das Bohrfräsen ermöglicht das Einbringen von Bohrungen ohne Delamination und ohne Einsatz aufwändiger Unterfütterungen. Beim Bohren der Schlitten kam es im Bereich der Bohrungen für die Führungswagen zu Delaminationen. Dieser Bereich wurde komplett spanend entfernt. Anschließend wurden Aluminiumplatten aufgeklebt und geplant, damit die Führungswagen auf einer Ebene liegen.
- Werkstückspannung:
Die Spannung der Werkstücke wurde bei der Bearbeitung der Halbzeugplatten auf einem Vakuumspanntisch umgesetzt. Für die abschließende Bearbeitung (Bohrungen, Planen) der Baugruppen x- und z-Schlitten wurden diese in einem Schraubstock gespannt.

Im Folgenden werden weitere Aspekte der Fertigung erläutert:

- Kleberauswahl:
Zur Verklebung der CFK-Platten wurde Loctite HY4090 verwendet. Dies ist ein Hybridklebstoff aus Cyanacrylat und Epoxidharz. Als wesentliche Vorteile sind die kurze Verarbeitungszeit von 180 s bei einer Temperatur von 25°C, eine Glasübergangstemperatur von $T_g = 88 \text{ °C}$ und eine hohe chemische Beständigkeit gegenüber Ethanol und Wasser zu nennen.
- Vorbereitung der Klebung:
Die bearbeiteten Halbzeuge mussten zunächst von den Rückständen der Opferschicht des Vakuumspanntisches befreit werden. Dazu wurden diese mit Isoporpanol gereinigt. Die Anschläge und die CFK-Platten wurden beim Verkleben durch ein dünnes, engmaschiges PTFE-Gewebegitter getrennt, um ein gegenseitiges Anhaften zu vermeiden. Zusätzlich wurden alle Platten an den Außenseiten angefast.
- Nachbearbeitung:
Nach der Fertigung der Laminatplatten und Aluminiumkomponenten wurden die Schlitten mithilfe von Lehren geklebt. Im Anschluss mussten die Schlitten nachbearbeitet werden, um deren endgültige Geometrie zu erzeugen. Folgende Bearbeitungsvorgänge sind durchgeführt worden:
 - x-Schlitten:
 - Fräsen (Nut für x-Positionssensor, Nut für x-Kugelgewindetriebmutterhalternut)
 - Bohren (Aufnahme z-Führungsschienen, Durchgangsbohrungen für x-Führungswagen, Aufnahme des Halters für die x-Kugelgewindetriebmutter, Aufnahme Motorplatte, Verlegung Energieleitungen, Verkleidung)
 - Funktionsflächen erzeugen (Planen der Fläche für x-Führungswagen)
 - z-Schlitten:
 - Fräsen (Aufnahme des Halters für die z-Kugelgewindetriebmutter)

- Bohren (Durchgangsbohrungen für z-Führungswagen, Aufnahme des Halters für die z-Kugelgewindetriebsmutter, Verlegung Energieleitungen, Bohrungen für Schmierung, Aufnahme z-Positionssensor, Aufnahme Messtaster)
- Funktionsflächen erzeugen (Planen der Fläche für z-Führungswagen)
- Der untere Bereich der Rippen des x-Schlittens wurde aus Aluminium gefertigt. Die Geometrie des Blocks ist in Abbildung 23 dargestellt. Die Geometrie des Bauteils wurde weitestgehend von der Originalkomponente übernommen. Die treppenförmigen Absätze an der Vorderseite des Blocks wurde für die Verklebung des Blocks mit den Laminatplatten 2 und 3 eingefügt. Durch die Abstufung wurde eine vergrößerte Klebfläche erzeugt.

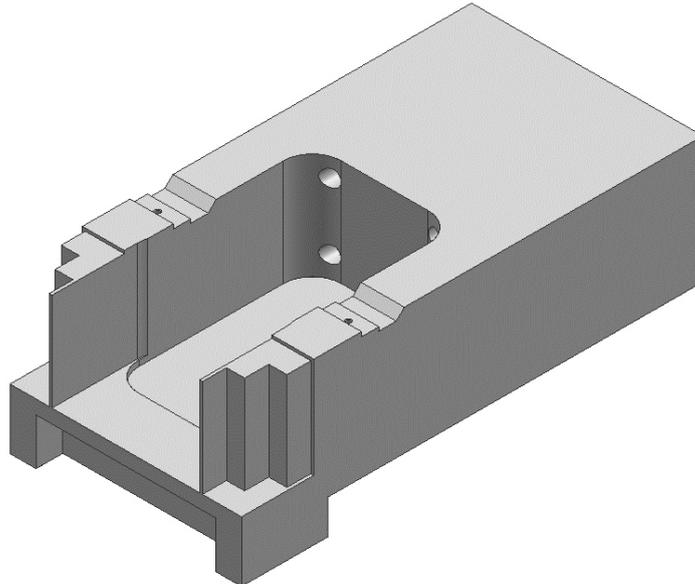


Abbildung 23: Aluminium Block

5.2.1. x-z-Schlitten

Das prinzipielle Vorgehen bei der Fertigung ist für x- und z-Schlitten gleich und lässt sich in folgende Schritte gliedern:

1. Zuschnitt der plattenförmigen Halbzeuge
2. Verklebung der einzelnen Platten zu Subbaugruppen, etc.
3. Nachbearbeitung auf Endmaß

Die Schritte 2 und 3 werden je nach Positionierung der einzelnen Platte in der Gesamtbaugruppe gegeben falls mehrfach durchlaufen. Die Verklebung der Platten erfolgt dabei mit Hilfe von Anschlägen und Lehren, um die Winkligkeit der einzelnen Platten zueinander sicherzustellen.

Der Aufbau des x-Schlittens als Explosionsdarstellung ist in Abbildung 24 dargestellt. Hier wird deutlich, dass der Aufbau viele Zwischenschritte erfordert. Abbildung 25 bis Abbildung 29 zeigen unterschiedliche Zwischenschritte bei der Verklebung und dem Aufbau sowohl des x- als auch des z-Schlittens.

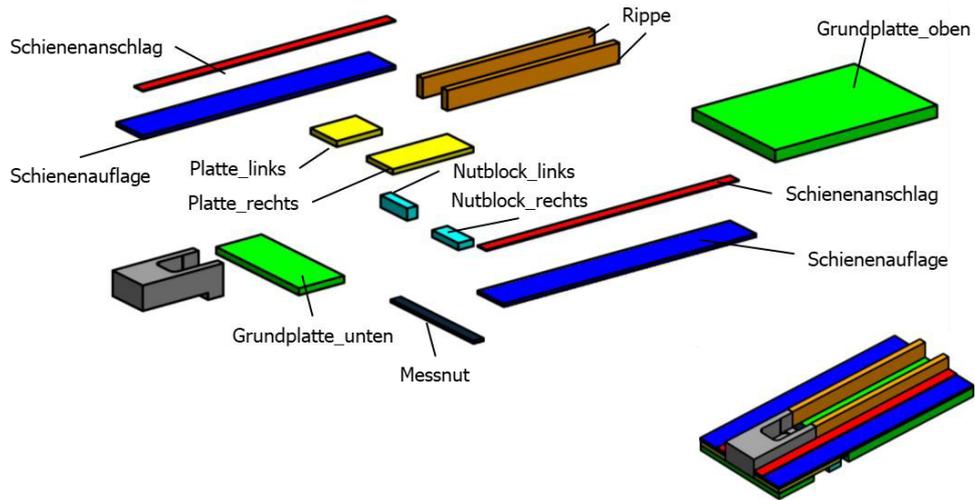


Abbildung 24: Aufbau des x-Schlittens



Abbildung 25: Zwischenschritt bei der Verklebung des x-Schlittens. Da eine exakte Dosierung des Klebers händisch nur schwierig möglich und im Vorhinein schwer abzuschätzen ist, kommt es häufig zur Überdosierung. Die Überschüsse müssen dann anschließend entfernt werden



Abbildung 26: Zwischenschritt bei der Verklebung der Rippen für den z-Schlitten



Abbildung 27: Zwischenschritt beim Aufbau des z-Schlittens. Dargestellt ist die rechte Rippe des z-Schlittens. Zur Aufnahme des Messtasters wird eine zusätzliche CFK-Platte auf der Oberseite aufgeklebt.

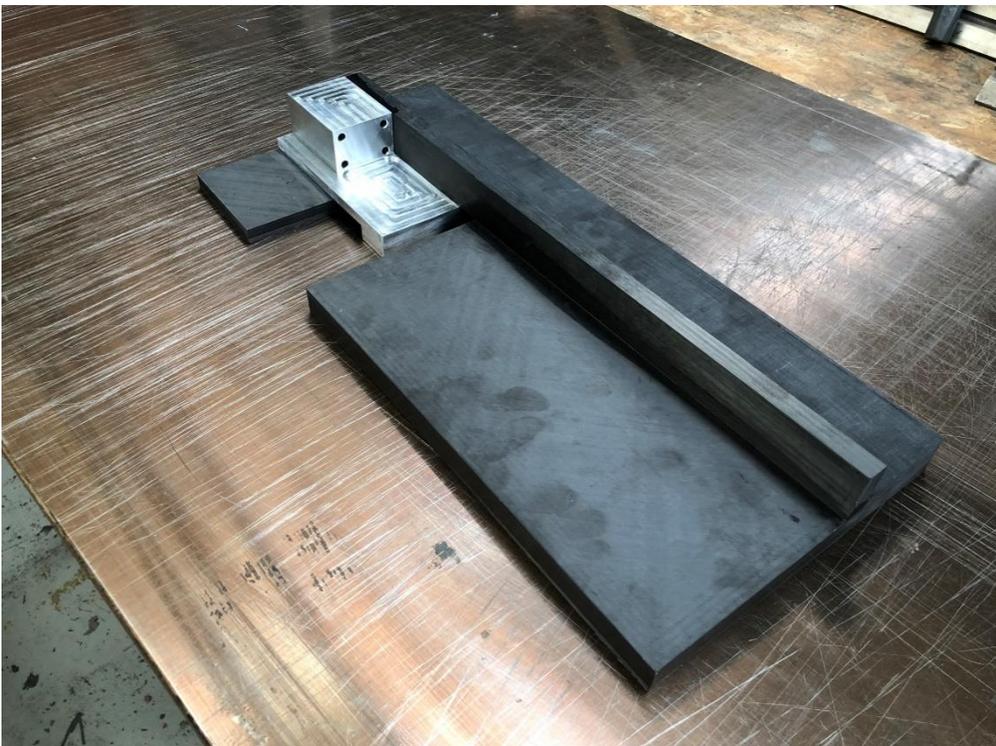


Abbildung 28: Zwischenschritt bei der Verklebung des x-Schlittens. Der Aluminiumblock ist bereits einseitig seitlich sowie an der Unterseite verklebt.



Abbildung 29: Abschließend verklebter und nachbearbeiteter x-Schlitten



Abbildung 30: Einbau des x-z-Schlitten bei der Datron AG

In Abbildung 30 ist der Einbau des Demonstrators in eine Versuchsmaschine der Datron AG. Abbildung 31 zeigt den fertig montierten x-z-Schlitten.



Abbildung 31: x-z-Aufbau in CFK-Bauweise in einer Versuchsmaschine der Datron AG.

5.2.2. Abdeckung

In der Baugruppe der Abdeckung (siehe Abbildung 32) liegt ein hohes Leichtbaupotenzial, da sie in der aktuellen Bauweise als reines Verkleidungsbauteil aus Stahl und Aluminium ausgeführt ist. In Tabelle 25 ist eine erste Potentialabschätzung dargestellt.

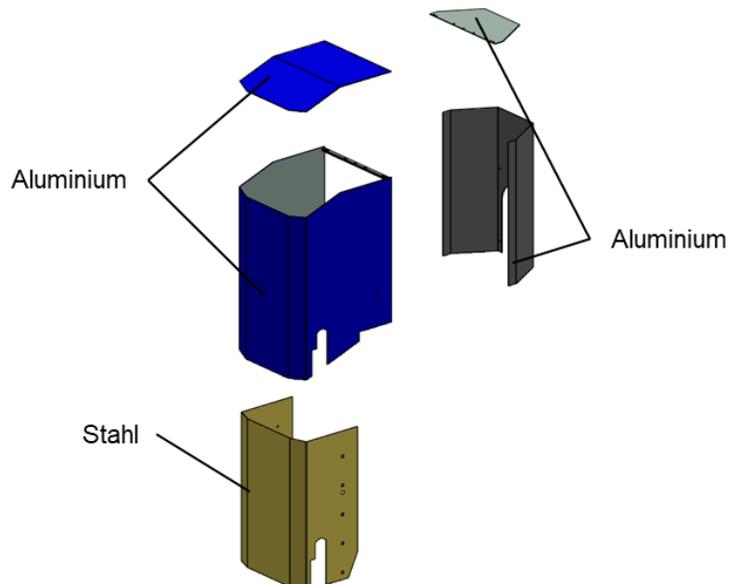


Abbildung 32: Abdeckungsbaugruppe

Demnach eignen sich vor allem Kunststoffe wie Polyethylen oder -propylen (PE/PP) sowohl aus wirtschaftlicher Sicht als auch im Hinblick auf Massenreduktion. In der Serienproduktion wäre hier ein Fertigungsprozess im Tiefziehverfahren geeignet. Für einen Demonstrator ist der hiermit verbundene Aufwand (Fertigung des Werkzeugs, etc.) nicht vertretbar. Aus diesem Grund wurden in Absprache mit dem PA sowohl ein Demonstrator aus Alupanel als auch CFK gefertigt.

Tabelle 25: Vergleich verschiedener Werkstoffe für den Einsatz in der Abdeckungsbaugruppe

Werkstoff	Dichte in g/cm ³	Gewicht in kg	Potenzial Baugruppe in %	Potenzial Gesamt in %	Senkung Werkstoffkosten in %
Stahl/Alu		5,3	0	0	0
CFK	1,8	2,3	-57	-5,5	+504
Alupanel (2mm)	1,45	2,48	-53	-4,8	-19
PE/PP	0,9	1,15	-79	-7,2	-75

Im Projekt wurde für die Originalvariante des x-z-Aufbaus jeweils eine Variante aus Alupanel sowie CFK gefertigt. Dabei erfolgte der Zuschnitt der einzelnen Platten auf einer Portalfräsmaschine.

Alupanel ist ein Verbundwerkstoff, der aus einer Mittelschicht aus Polyethylen sowie zwei Deckschichten aus Aluminium besteht. Dadurch kann eine geringere Dichte als CFK erreicht werden. Gleichzeitig bietet der Werkstoff den Vorteil, dass die Deckschichten lackierfähig und abriebresistent sind. Diese Aspekte sind insbesondere im Vergleich zu PE und PP als vorteilhaft zu bewerten.

Die Verarbeitung der Alupanel beginnt mit dem Zuschnitt der plattenförmigen Halbzeuge. Dabei werden neben den Außenkonturen zusätzlich Nuten eingefräst sowie die zu fügenden Kanten angefast. Die optimale Nutgeometrie wurde dabei in Biegeversuchen ermittelt. Begrenzende Parameter sind bei der Biegung ohne zusätzliche Nut der Biegeradius und -winkel. Hier sind lediglich Winkel $<30^\circ$ ohne Beschädigung der äußeren Aluminiumschicht möglich.

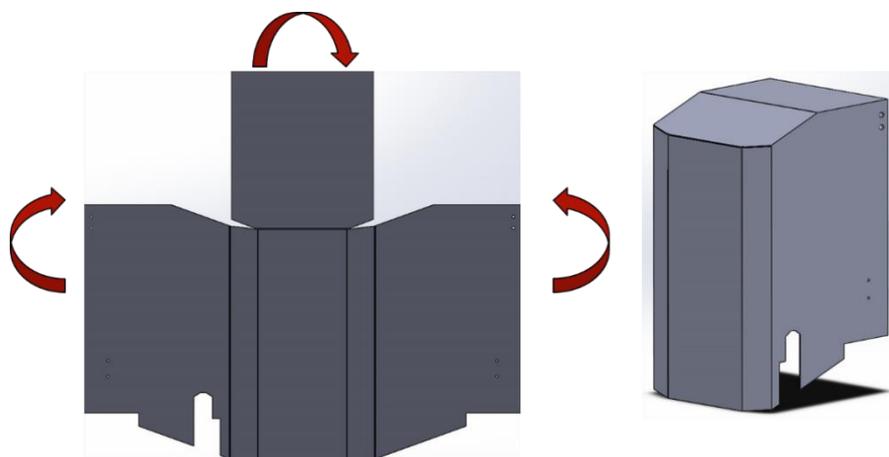


Abbildung 33: Fertigungskonzept zur Herstellung der Abdeckung aus Alupanel

Im zweiten Schritt werden die einzelnen Platten bis zur Endgeometrie gebogen (siehe Abbildung 33). In Abbildung 34 ist der fertig gestellte Demonstrator aus Alupanel dargestellt.



Abbildung 34: Fertig gestellter Demonstrator für die Abdeckung aus Alupanel

Der Aufbau wurde am PTW in einer Datron M10Pro über einen Zeitraum von 12 Monaten eingesetzt. Dabei wurden verschiedenste Werkstoffe wie CFK, Holz und Aluminium zerspannt. Als Kühlsystem kam eine Minimalmengenschmierung mit Ethanol zum Einsatz. Über den genannten Zeitraum konnten keine Abnutzungserscheinungen durch Spänebeschuss oder an den relativ zueinander bewegten Teilen festgestellt werden.

5.2.3. Gewindeinserts

Die Befestigung der Führungsschienen wird mit Gewindeinserts durchgeführt. Es gibt eine breite Auswahl an Gewindeinserts von verschiedenen Firmen, u.A. Kerbkonus, Böllhof und KVT Fastening. Zunächst werden selbstschneidende Ensat-Gewindeinserts ausprobiert, die ausdrücklich zur Verwendung in FKV geeignet sind. In Abbildung 35 sind die Gewindeinserts im Querschnitt und die in verschiedenen Werkstoffen ermittelten Auszugskräfte dargestellt. Die erreichbaren Auszugskräfte in Duroplasten und FKV sind dabei laut Kerbkonus noch einmal deutlich höher.

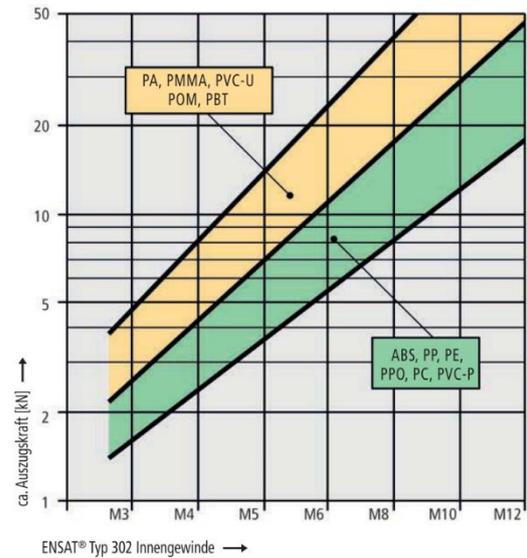
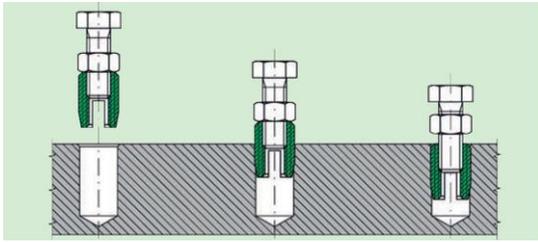


Abbildung 35: links: behelfsmäßige Montage der Gewindeeinsätze mit Hilfe einer Schraube und einer Mutter; rechts: Auszugskräfte in unterschiedlichen Kunststoffen und für unterschiedlichen Innengewinde. [26]

Bei der Verwendung der Gewindeeinsätze in Probekörpern zeigen sich einige Probleme, die gegen einen Einsatz sprechen. Sowohl bei einer stirnseitigen Verwendung als auch beim Einbringen senkrecht zum Laminat, kommt es zu einer Aufspaltung des Laminats (siehe Abbildung 36). Beim Einbringen des Gewindeinserts senkrecht zur Laminebene kommt es zu einer Aufpilzung rund um die Bohrung. Die große Abmaße der Gewingegänge führen dazu, dass das Laminat an diesen Stellen aufgesprengt wird bzw. eine Delamination auftritt, sobald die Gewindespitze auf eine Grenzschicht trifft.

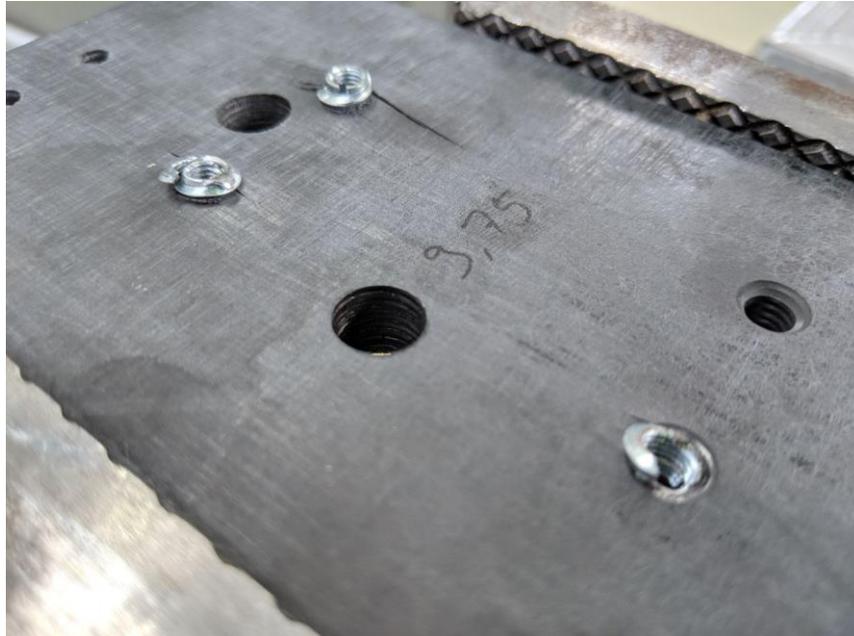


Abbildung 36: Probekörper zur Untersuchung der Gewindeinserts. Beim Eindrehen der Inserts in die Vorbohrung kommt es zu einer Aufpilzung rund um die Bohrung und zum Riss der obersten Laminatschichten. Ebenso kommt es zur Zerstörung der Gewindeinserts im Bereich des Innengewindes.

Als Alternative wird anschließend die Verwendung von Schrauben bzw. Gewindestangen mit Normgewinde, in die nachträglich Innengewinde eingebracht wurden, untersucht. Die Verwendung von Gewindestangen, die in Bohrungen mit geringem Untermaß eingebracht und verklebt werden, wird am Fachgebiet KLuB untersucht. Mit unterschiedlichen Klebern

können dabei für ein M8 Außengewinde mit einer Klebe- bzw. Verankerungslänge von 30 mm und ca. 0,5 mm Klebschichtdicke Auszugskräfte von bis zu 31 kN erreicht werden. Dies übersteigt die Mindestbruchkraft für ein ISO-Regelgewinde M8 mit der Festigkeitsklasse 8.8 (29,2 kN). Vor dem Hintergrund dieser Forschungsergebnisse wurde entschieden die Verschraubungen der Führungsschienen und die Aufnahme der Motorplatte mit Gewindestangen und nachträglich eingebrachten Innengewinden durchzuführen. Die geringen belasteten Verschraubungen, wie z.B. die Aufnahme für die Messsysteme am z-Schieber werden z.T. direkt in CFK ausgeführt.

Die Verschraubungen werden dabei wie folgt hergestellt:

1. Bohren des Kernlochs mit 0,2 mm Untermaß
2. Vorformen des Gewindes durch Eindrehen einer Schraube mit gewünschtem Außendurchmesser
3. Füllen des Lochs mit Kleber
4. Eindrehen der Gewindestange
5. Abfräsen des Überstands
6. Einbringen des Innengewindes
7. Planen der Fläche

5.2.4. Kostenbetrachtung

Ein deutlicher Kostenfaktor beim Aufbau des Demonstrators ist der Verschnitt der Halbzeugplatten. Dieser ist für die einzelnen Dicken in Tabelle 26 dargestellt. Die benötigten Dicken und Laminataufbauten zählen beim gewählten Lieferanten z.T. als Sonderanfertigungen und sind nur mit dem Maximalabmaß bestellbar. Theoretisch lassen sich mit den vorhandenen Platten mehrere Demonstratoren fertigen. Für die einzelnen Platten ergeben sich für die maximale Ausnutzung der Plattenfläche unterschiedliche Multiplikatoren. Insgesamt lässt sich der Verschnitt so von ca. 87 % auf ca. 50 % verringern.

Tabelle 26: Verschnittberechnung. Der Multiplikator gibt die maximale Plattenausnutzung an.

Dicke in mm	Fläche in mm ²	Zuschnitt in mm ²	Multiplikator	Verschnitt in mm ²	Verschnitt in %	Mindestverschnitt in mm ²	Mindestverschnitt in %
1	770.00	130.105	4	639.895	83,1	249.581	32,4
1,8	385.00	34.750	5	350.250	91,0	211.250	54,9
2,4	385.00	23.000	7	362.000	94,0	224.000	58,2
3	385.00	34.750	5	350.250	91,0	211.250	54,9
4,2	385.00	162.765	3	222.235	57,7	281.705	73,2
4,8	192.50	28.452	3	164.048	85,2	107.144	55,7
8,4	192.50	21.686	4	170.815	88,7	105.758	54,9
9	192.50	11.085	10	181.415	94,2	81.648	42,4
10,2	52.500	6.220	3	46.280	88,2	33.839	64,5
12	385.00	40.800	4	344.200	89,4	221.800	57,6
15	385.00	34.000	5	351.000	91,2	215.000	55,8

20,4	385.00	95.652	1	289.349	75,2	289.349	75,2
	0						
23	770.00	42.840	10	727.160	94,4	341.600	44,4
	0						
12	770.00	93.840	4	676.160	87,8	394.640	51,3
	0						
	Σ	Σ		Σ	\emptyset	Σ	\emptyset
	5.635.0	759.944		4.875.056	86,5	2.968.563	52,7
	00						

Die Verteilung der Gesamtkosten ist in Abbildung 37 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass der Zusammenbau und die spanende Nachbearbeitung über 50 % der Kosten ausmachen.

Kostenverteilung CFK Demonstrator

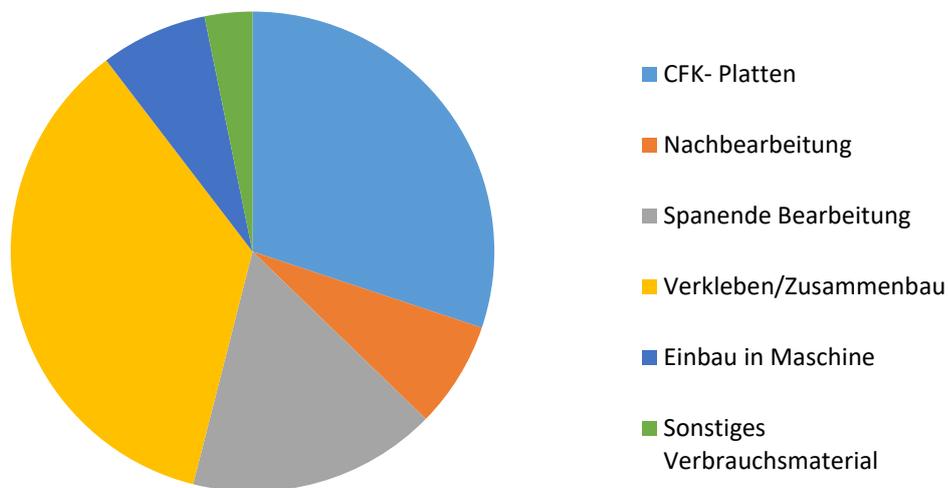


Abbildung 37: Kostenverteilung des CFK-Demonstrators. Die Kosten für das Verkleben, die spanende Bearbeitung, die Nachbearbeitung und den Einbau sind lediglich Personalkosten ohne Maschinenstundenkosten. Die Gesamtkosten belaufen sich auf 21.000 €.

5.3. Messtechnische Untersuchung des Demonstrators

5.3.1. Statische Steifigkeit

Die statischen Steifigkeiten werden durch die Messung der Verschiebung nahe des TCP und gleichzeitige Messung der aufgebrachten Kraft ermittelt. Die Kraft wird mit einem Pneumatikzylinder auf die Werkzeugaufnahme aufgebracht und mittels einer Kraftmessdose aufgenommen. Die resultierenden Verschiebungen werden mittels Lasertriangulationssensorik ermittelt. Die Untersuchungen in den jeweiligen Lastrichtungen werden jeweils mehrfach durchgeführt, um gemittelte Steifigkeits- und Nachgiebigkeitswerte ermitteln zu können.

X-Richtung:

Der Messaufbau für die Messung der statischen Steifigkeit in x-Richtung ist in Abbildung 38 dargestellt.

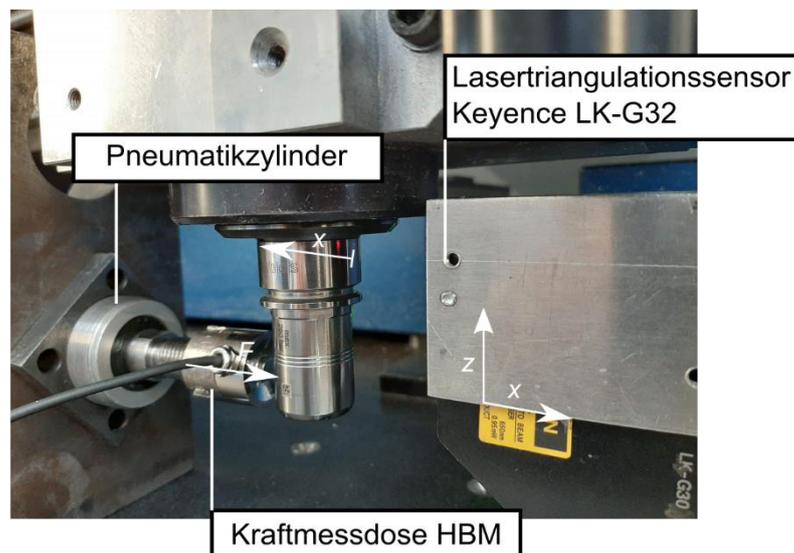


Abbildung 38: Messaufbau zur Untersuchung der Steifigkeit am TCP in x-Richtung

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 39 und Tabelle 27 für die Originalvariante sowie in Abbildung 40 und Tabelle 28 für die CFK-Variante dargestellt. Es zeigen sich deutliche Nichtlinearitäten im Kraft-Verschiebungs-Verlauf für beide Varianten. Diese Nichtlinearitäten folgen z.T. aus der Lagerung der Motorspindel. Dabei zeigt die CFK-Variante insgesamt ein deutlich konsistenteres Verhalten bei den Untersuchungen. Die Steifigkeiten der CFK-Variante liegen nahezu auf dem gleichen Niveau wie die des Originalaluminiumaufbaus.

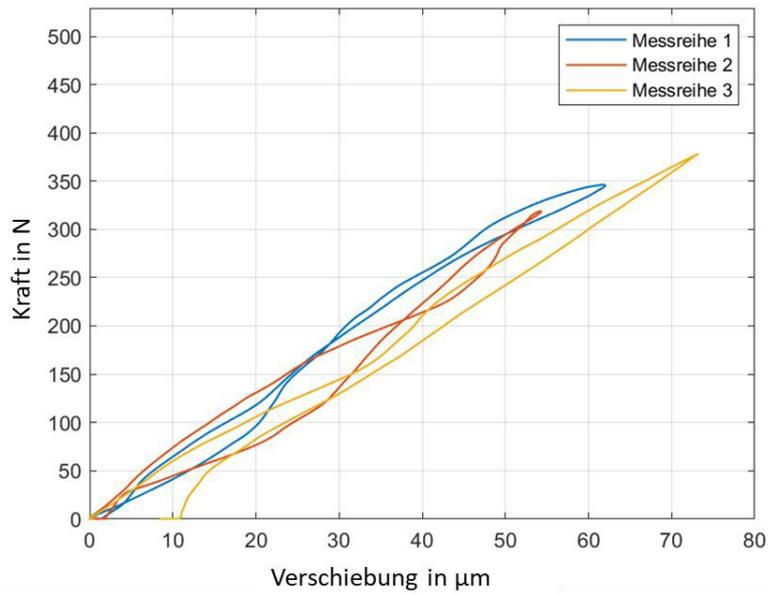


Abbildung 39: Kraft-Weg-Diagramm zur Steifigkeitsermittlung in x-Richtung (Original x-z-Aufbau)

Tabelle 27: Steifigkeitsermittlung in x-Richtung normiert auf höchste Kraft und Verlagerung (Original x-z-Aufbau)

TCP	X: 561,910	Y: 575,436	Z: -242,769
Messreihe	1	2	3
Kraft	0,92	0,84	1,00
Verlagerung	0,85	0,74	1,00

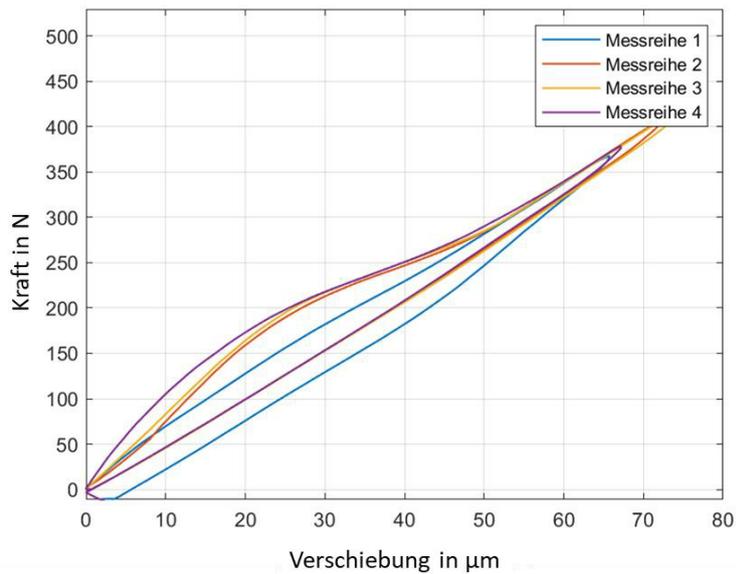


Abbildung 40: Kraft-Weg-Diagramm zur Steifigkeitsermittlung in x-Richtung (CFK x-z-Aufbau)

Tabelle 28: Steifigkeitsermittlung in x-Richtung normiert auf höchste Kraft und Verlagerung (CFK x-z-Aufbau)

TCP	X: 569,774	Y: 582,551	Z: -53,606	
Messreihe	1	2	3	4
Kraft	0,91	1,00	0,96	0,99
Verlagerung	0,91	1,00	0,97	0,99

Y-Richtung:

Der Messaufbau für die Messung der statischen Steifigkeit in y-Richtung ist in Abbildung 41 dargestellt.

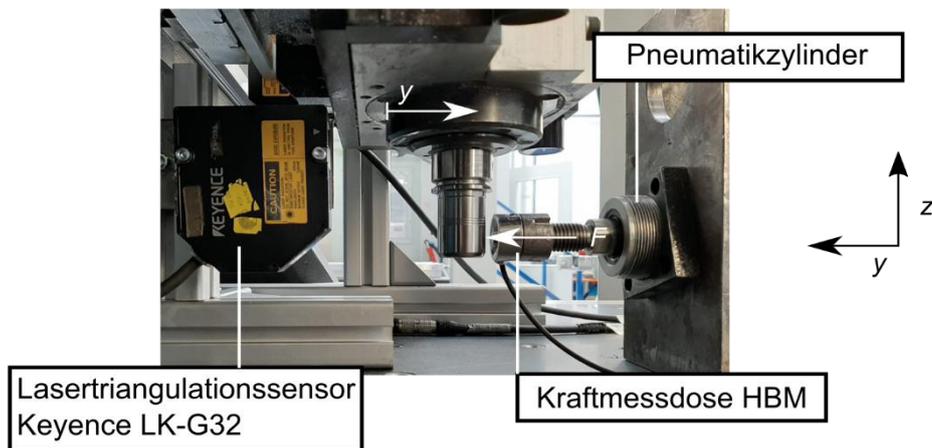


Abbildung 41: Messaufbau zur Untersuchung der Steifigkeit am TCP in y-Richtung

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 42 und Tabelle 29 für die Originalvariante sowie in Abbildung 43 und Tabelle 30 für die CFK-Variante dargestellt. Die Steifigkeiten der CFK-Variante liegen bei 81,5% der Ursprungssteifigkeit.

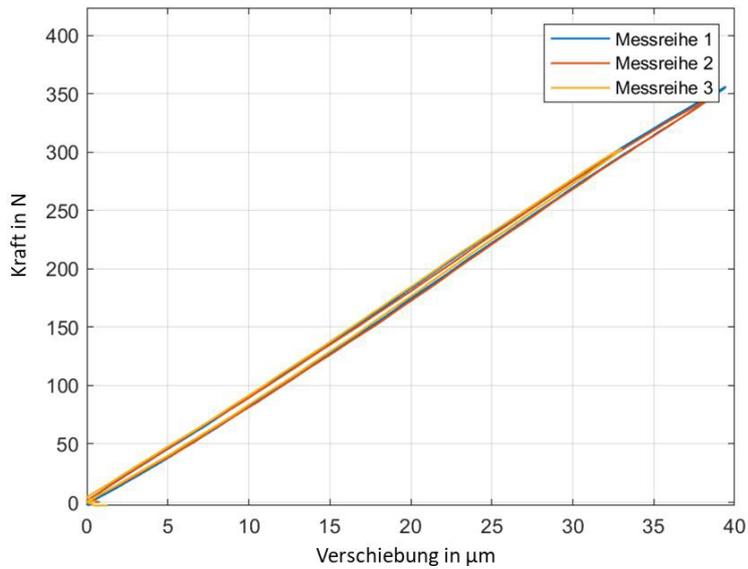


Abbildung 42: Kraft-Weg-Diagramm zur Steifigkeitsermittlung in y-Richtung (Original x-z-Aufbau)

Tabelle 29: Steifigkeitsermittlung in y-Richtung normiert auf höchste Kraft und Verlagerung (Original x-z-Aufbau)

TCP	X: 561,910	Y: 575,436	Z: -242,769
Messreihe	1	2	3
Kraft	1,00	0,98	0,85
Verlagerung	1,00	0,98	0,84

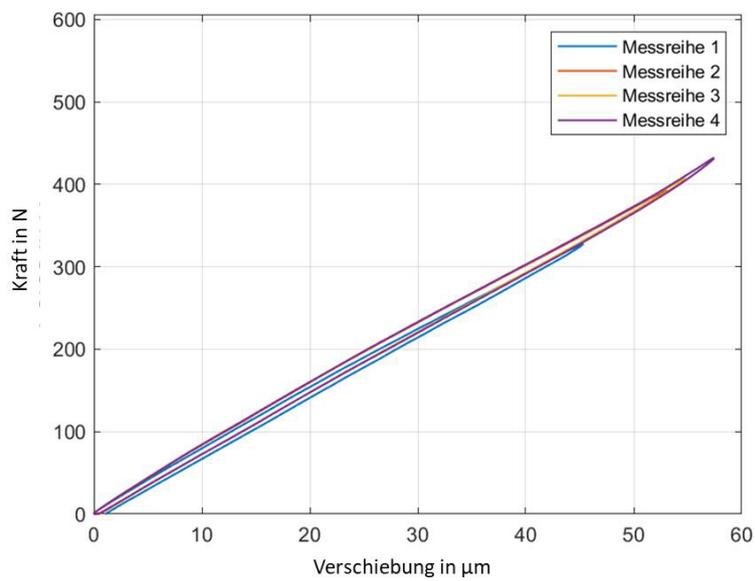


Abbildung 43: Kraft-Weg-Diagramm zur Steifigkeitsermittlung in y-Richtung (CFK x-z-Aufbau)

Tabelle 30: Steifigkeitsermittlung in y-Richtung normiert auf höchste Kraft und Verlagerung (CFK x-z-Aufbau)

TCP	X: 569,774	Y: 582,551	Z: -53,606
Messreihe	1	2	3
Kraft	0,81	0,96	1,00
Verlagerung	0,83	0,97	1,00

Z-Richtung:

Der Messaufbau für die Messung der statischen Steifigkeit in z-Richtung ist in Abbildung 44 dargestellt.

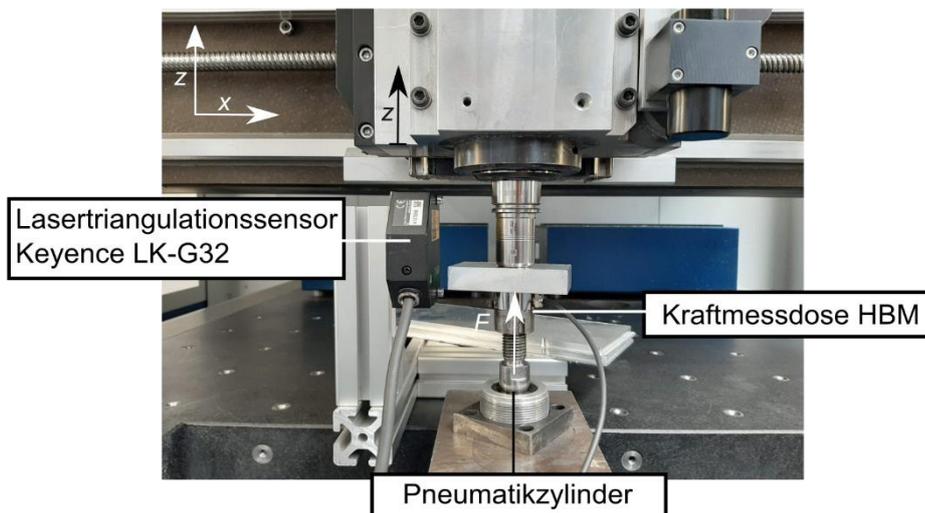


Abbildung 44: Messaufbau zur Untersuchung der Steifigkeit am TCP in z-Richtung

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 45 und Tabelle 31 für die Originalvariante sowie in Abbildung 46 und Tabelle 32 für die CFK-Variante dargestellt. Die Steifigkeiten der CFK-Variante liegen bei ca. 50 % der Ursprungssteifigkeit.

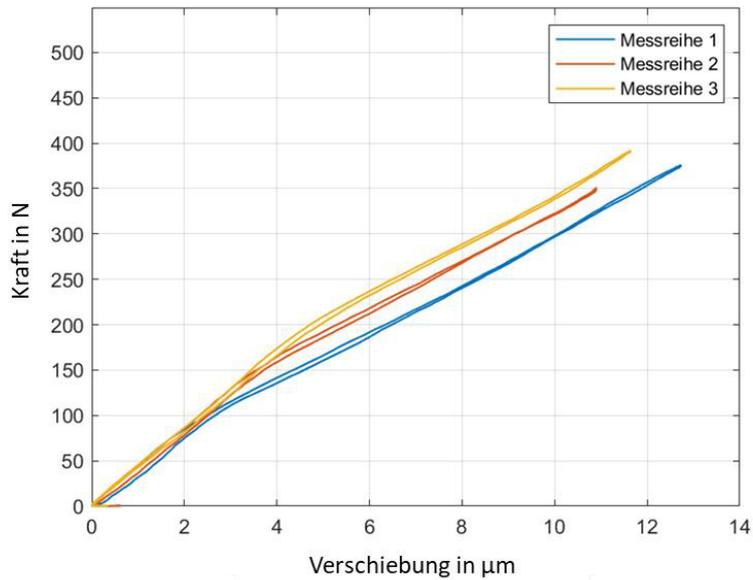


Abbildung 45: Kraft-Weg-Diagramm zur Steifigkeitsermittlung in z-Richtung (Original x-z-Aufbau)

Tabelle 31: Steifigkeitsermittlung in z-Richtung normiert auf höchste Kraft und Verlagerung (Original x-z-Aufbau)

TCP	X: 461,667	Y: 191,019	Z: - 165,727
Messreihe	1	2	3
Kraft	0,96	0,90	1,00
Verlagerung	1,00	0,86	0,91

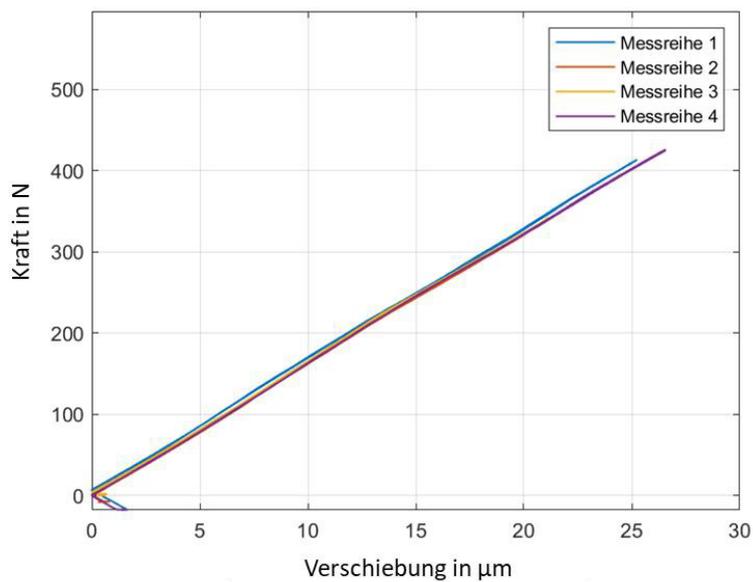


Abbildung 46: Kraft-Weg-Diagramm zur Steifigkeitsermittlung in z-Richtung (CFK x-z-Aufbau)

Tabelle 32: Steifigkeitsermittlung in z-Richtung (CFK x-z-Aufbau)

TCP	X: 566,225	Y: 153,438		Z: 41,013
Messreihe	1	2	3	4
Kraft	0,97	0,94	0,80	1,00
Verlagerung	0,95	0,94	0,80	1,00

Tabelle 33 Übersicht durchschnittliche Steifigkeit normiert auf weichste Achse

Lastrichtung	Original x-z-Aufbau	CFK x-z-Aufbau
X	1	1,01
Y	1,64	1,33
Z	5,74	2,92

5.3.2. Modalanalyse

Die Modalanalyse der unterschiedlichen Aufbauten soll Aufschluss darüber geben, inwiefern sich die Eigenformen und -frequenzen durch die konstruktiven Änderungen und den Einsatz von CFK verändert haben. Hierbei wird erwartet, dass durch die höhere spezifische Steifigkeit die Eigenfrequenzen nach oben verschoben sind und die Dämpfungsparameter durch die höhere Werkstoffdämpfung von CFK ebenfalls gesteigert sind.

Der Messaufbau ist in Abbildung 47 dargestellt. Die Messung wird mit einem Brüel & Kjær Messsystem durchgeführt. Der Fokus bei der Auswertung der Modalanalyse liegt auf den Eigenformen des x-z-Aufbaus. Die Eigenformen des Portalbalkens spielen eine untergeordnete Rolle.

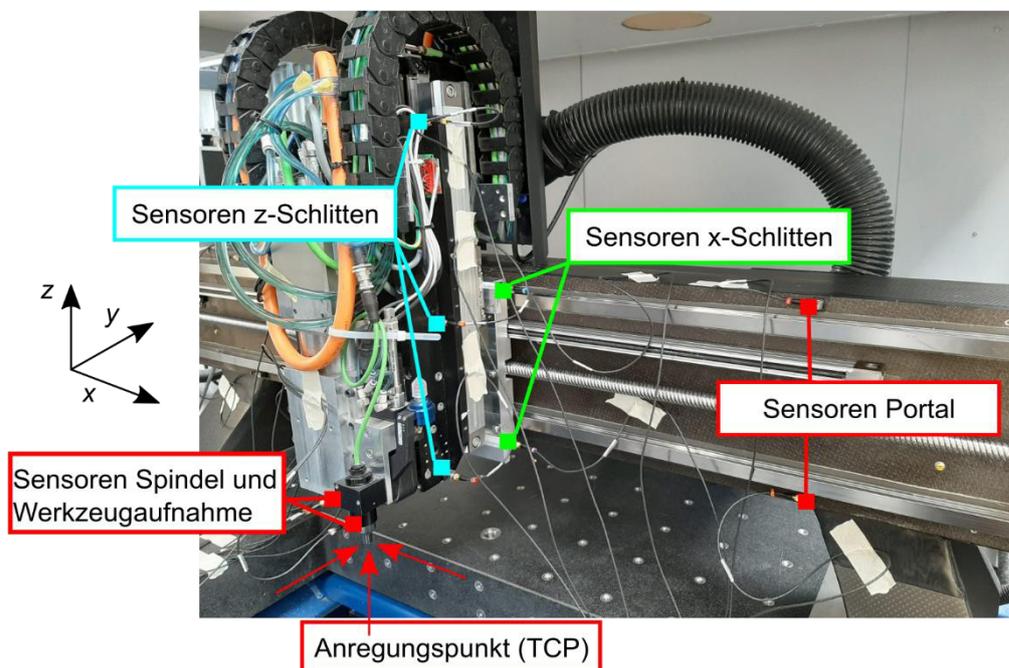


Abbildung 47: Messaufbau zur Modalanalyse. Die Sensoren am Portal, x- und z-Schlitten befinden sich in gleicher Anordnung auf der linken Seite des x-z-Aufbaus.

Um die Modalanalyse durchzuführen wurde ein vereinfachtes Modell des Portalaufbaus, bestehend aus Portalbalken, X-Schlittenplatte und Z-Schlittenplatte, in der Messsystemsoftware vereinfacht modelliert und die Position und Ausrichtung der 16 Sensoren im Messaufbau auf das Modell übertragen. Das Modell besteht aus drei ebenen Platten, die flexibel miteinander verbunden sind. An der z-Schlittenplatte ist, nach vorne versetzt, der Anregungspunkt modelliert. Konstruktive und geometrische Unterschiede zwischen dem Aufbau aus Aluminium und der CFK Bauweise, die auch die Positionierung der Beschleunigungsaufnehmer beeinflussen, wurden in das Modell übernommen, daher wurden zwei Modelle entworfen. Das Modell des CFK X-Z-Schlittens ist in Abbildung 48 dargestellt.

Der Portalaufbau wurde mit Hilfe eines Impulshammers angeregt. Die Anregung erfolgte an einem geschliffenen Stahlzylinder der als Fräserersatz mit einem Polygonspannfutter in der Spindel eingespannt ist. Anregung und Auswertung erfolgte für jede der drei Raumrichtungen nacheinander und unabhängig voneinander. Die Auswertung umfasst den Bereich 0-1600 Hz.

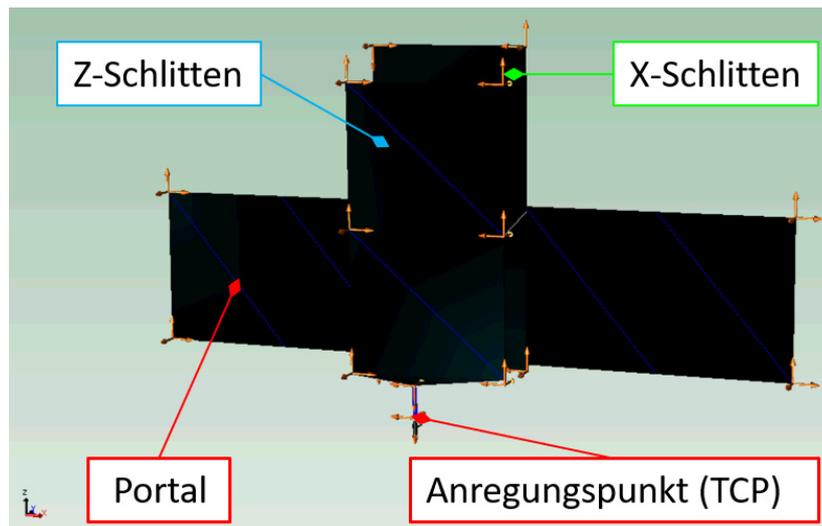


Abbildung 48: Modell des x-z-Schlittens und des Portals in CFK Ausführung. Orange Koordinatensysteme zeigen Position und Ausrichtung der Sensoren.

Zur Auswertung wird die, durch das Messsystem berechnete, Complex Mode Indicator Funktion (CMIF) genutzt. Eine CMIF ist in Abbildung 49 dargestellt. Diese Funktion zeigt über Peaks in ihrem Verlauf die mögliche Lage einer Eigenmode. Zum Auffinden der verschiedenen Eigenmoden wird die CMIF abschnittsweise betrachtet, die Messsoftware schlägt mit Hilfe eines iterativen Verfahrens verschiedene Eigenmoden des betrachteten Abschnitts vor. Dabei kann Genauigkeit und Aufwand der Auswertung durch die Größe des betrachteten Bereichs und die Anzahl der Iterationen beeinflusst werden. Eine hohe Anzahl von Iterationen und eine Einteilung der CMIF in kleinere Abschnitte erhöhen zwar die Genauigkeit der Auswertung, haben aber auch in hohem Maße Einfluss auf den Zeitaufwand für eine Auswertung. Im Mittel wurde mit etwa 100 Hz großen Abschnitten und 20 Iterationen ausgewertet, beides allerdings auch nach Bedarf optimiert. Weiterhin wurden Frequency Response Functions (FRF), die die Antwort einzelner Sensoren gegenüber einem Anregungspunkt darstellen, mit in die Auswertung einbezogen.

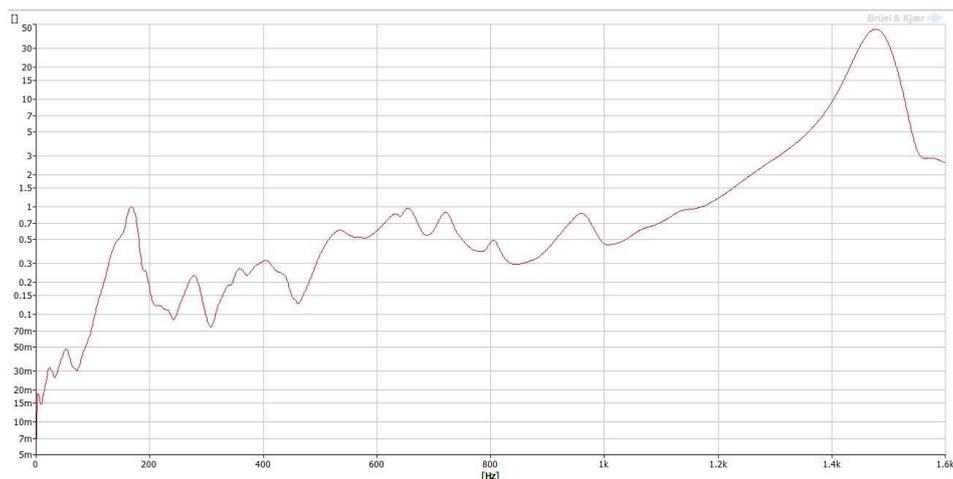


Abbildung 49: CMIF der Anregung der Aluminiumkonstruktion in x-Richtung

Zum Abschluss der Auswertung einer Eigenmode muss deren Plausibilität geprüft werden und Verknüpfungen mit anderen Eigenmoden betrachtet werden. Ziel ist es zu prüfen, ob die gefundene Eigenmode einen für die reale Maschine möglichen Bewegungsablauf darstellt. Weiterhin sollten die Eigenmoden unabhängig voneinander sein und nicht eine Kombination oder Überlagerung aus bereits gefundenen Eigenmoden darstellen.

In niedrigen Frequenzbereichen finden sich Eigenmoden, die eine Bewegung der drei Platten des Modells relativ zueinander zeigen, in höheren Frequenzbereichen treten Eigenmoden auf, die eine ausgeprägte Verformung der einzelnen Platten zeigen. Weiterhin zeigen alle Auswertungen zwei Eigenmoden der eingesetzten Motorspindel, die bei etwa 430 Hz und 1440 Hz liegen.

Ergebnisse der Analyse, Vergleich Aluminium- und CFK-Konstruktion

Schon bei der Betrachtung der einzelnen CMIFs und im späteren Verlauf einzelner FRFs zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Konstruktionsvarianten. Der Verlauf der einzelnen Funktionen ähneln sich, allerdings zeigen die Funktionen der CFK-Konstruktion einen glatteren Verlauf mit weniger Peaks, die zudem oftmals geringere Amplituden ausweisen, was in Abbildung 30 dargestellt ist. Das hat zur Folge, dass sich das Auffinden der Eigenmoden schwieriger gestaltet und auch insgesamt, in jeder Anregungsrichtung, weniger Eigenmoden gefunden wurden. Weiterhin zeigten sich die Moden der CFK-Konstruktion sehr viel stärker verknüpft.

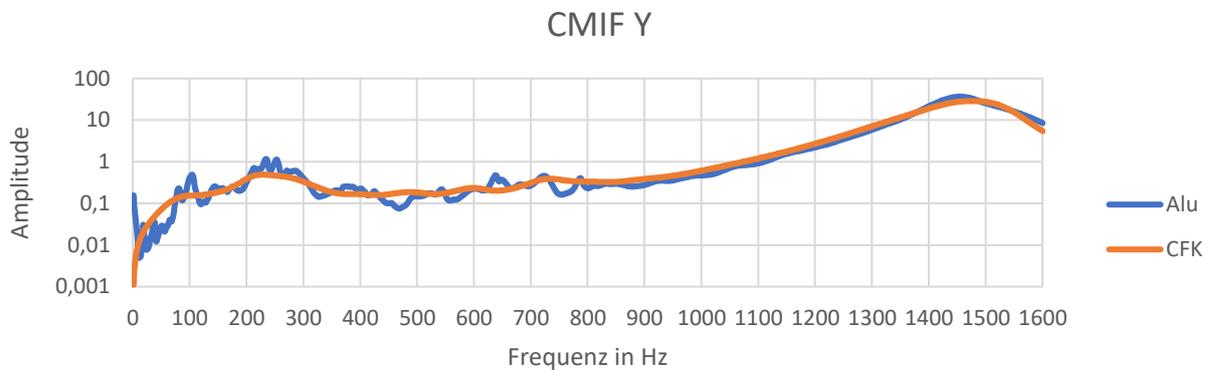


Abbildung 50: Vergleich der CMIFs der Anregung in y-Richtung

Bei Eigenmoden, die einen identischen Bewegungsablauf für beide Konstruktionsvarianten zeigten, konnte die, zu Beginn vermutete, Verschiebung der Eigenfrequenzen nach oben bestätigt werden. Die Eigenfrequenzen wurden um bis zu 37 Hz angehoben. Auch die vom Messsystem berechneten Dämpfungswerte der Moden sind bei der CFK-Variante höher als die der Aluminium-Variante. Exemplarisch ist dies in Abbildung 50 und Abbildung 51 dargestellt.

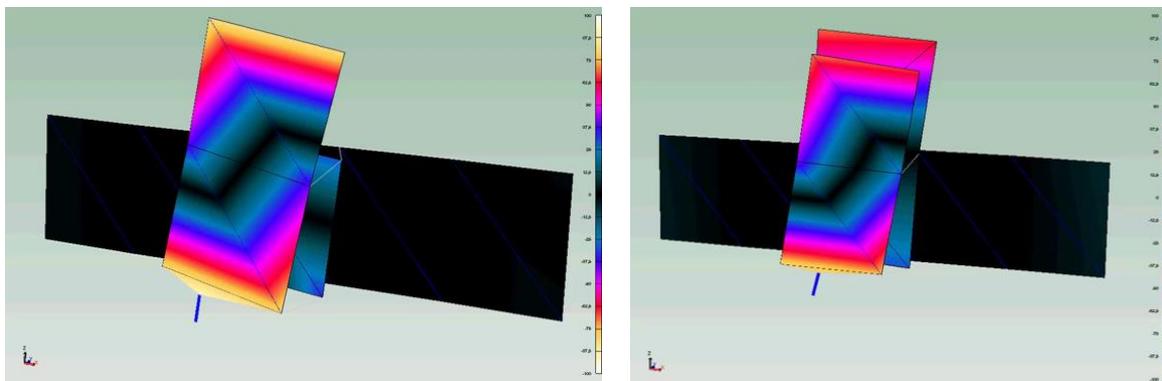


Abbildung 51: Eigenmode Aluminium Anregung in-x Frequenz: 162 Hz Dämpfungswert: 5,78 (links); Eigenmode CFK Anregung in -x Frequenz: 196 Hz Dämpfungswert: 13,9 (rechts)

5.3.3. Untersuchung des Portalnickens

Der Messaufbau zur Untersuchung des Portalnickens ist in Abbildung 52 dargestellt. Mittels eines Lasertriangulationssensors wird die Verlagerung des TCPs in z-Richtung infolge einer Verfahrbewegung in y-Richtung gemessen. Der Verfahrweg beträgt 120 mm bei einem Vorschub von 20 m/min. Untersucht werden die Beschleunigungen $a = 5 \text{ m/s}^2$; $a = 3 \text{ m/s}^2$, $a = 1,5 \text{ m/s}^2$. Die Position in y-Richtung wird als Spannungssignal an einer I/O-Klemme der Steuerung abgegriffen. Ziel ist es, die Verlagerung in z-Richtung über der y-Position und in Abhängigkeit der Masse des x-z-Aufbaus sowie unterschiedlicher Beschleunigungen darzustellen. Zur Vorbereitung der Messungen werden jeweils Referenzfahrten mit sehr geringem Vorschub durchgeführt, um z.B. eine Schräglage des Endmaßes aus den eigentlichen Messungen herausrechnen zu können.

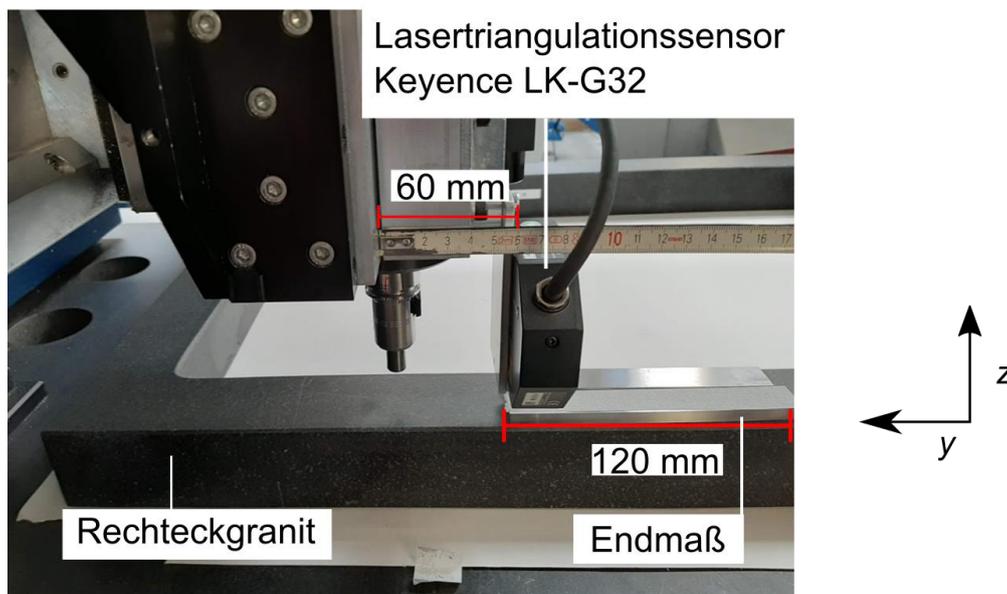


Abbildung 52: Messaufbau zur Ermittlung des Portalnickens.

Die Ergebnisse der Messungen für die unterschiedlichen Beschleunigungen sind in Abbildung 53, Abbildung 54 und Abbildung 55 dargestellt. Die CFK-Variante zeigt für alle Beschleunigungen ein verringertes Portalnicken. Dies ist sowohl auf die verringerte Masse als auch auf den kleineren Lasthebelarm in y-Richtung zurückzuführen.

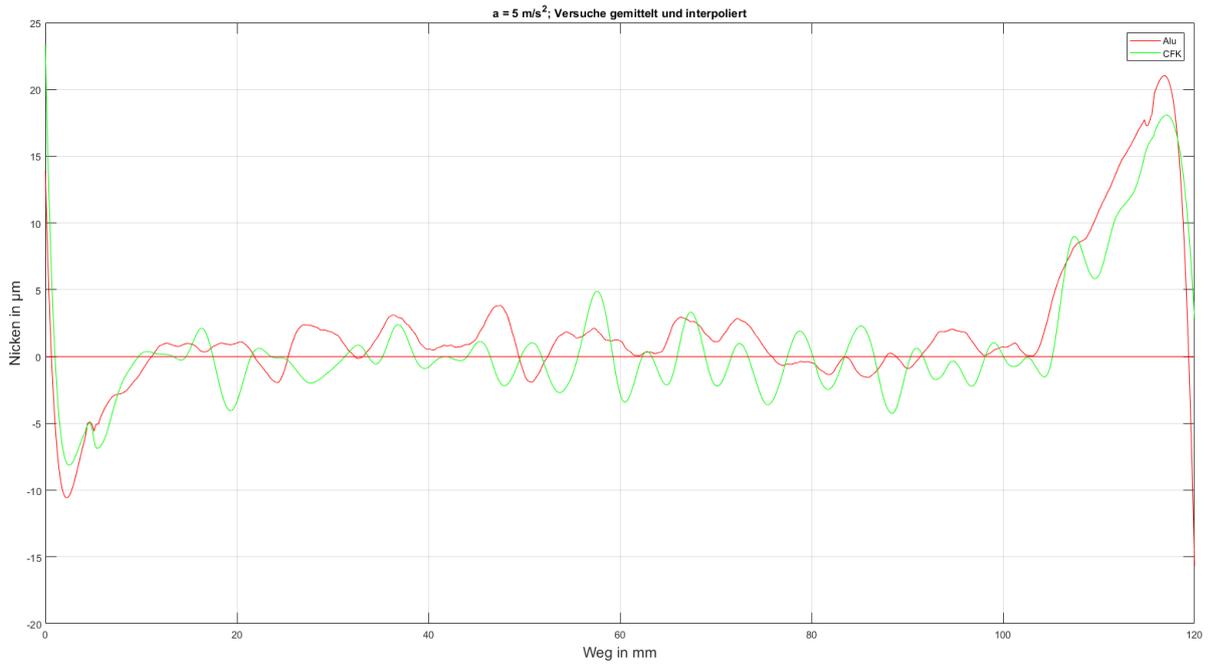


Abbildung 53: Vergleich des Portalnickens bei einer Beschleunigung von $a = 5 \text{ m/s}^2$ für die CFK- und Aluminiumvariante.

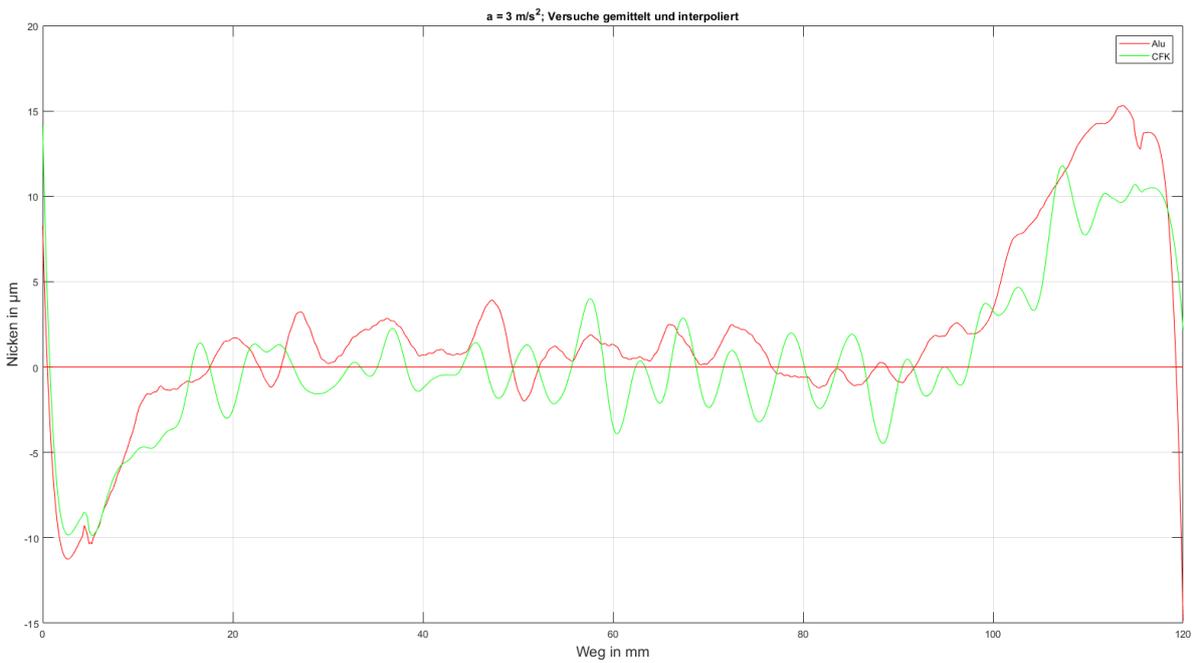


Abbildung 54: Vergleich des Portalnickens bei einer Beschleunigung von $a = 3 \text{ m/s}^2$ für die CFK- und Aluminiumvariante.

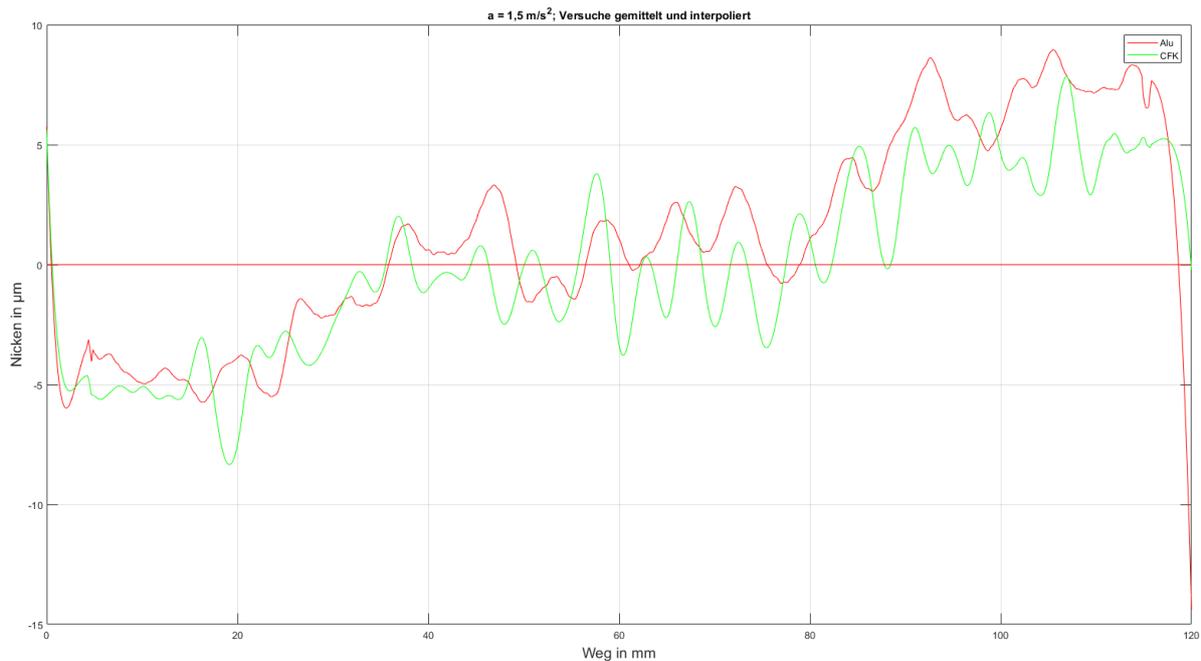


Abbildung 55: Vergleich des Portalnickens bei einer Beschleunigung von $a = 1,5 \text{ m/s}^2$ für die CFK- und Aluminiumvariante.

5.3.4. Stabilitätskarten

Zur Untersuchung des Verhaltens im Betrieb werden Fräsversuche zur Ermittlung von Stabilitätskarten durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 56 dargestellt. Als Werkzeug kam ein Einschneider (Art.-Nr. 0068.090X) zum Einsatz und die Gesamtlänge des Werkzeugs ab der Planlage wurde auf 120 mm festgelegt. Als Bearbeitungsschritt wurde ein Vollnutenschnitt mit Minimalmengenschmierung mit Ethanol gewählt.



Abbildung 56: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Stabilitätskarten

Während der Bearbeitung wurden die Beschleunigungen an Werkstück und Spindel mit triaxialen Beschleunigungsaufnehmern gemessen. Falls die Beschleunigungswerte um mehr als 20 % im Vergleich zur vorherigen Fräsbahn angestiegen sind, wurde die Bearbeitung als instabil gewertet. Die so durchgeführte Auswertung der Beschleunigungswerte ergibt die in Abbildung 57 dargestellten Stabilitätsbereiche. Für die CFK-Variante ergeben sich im Bereich von $n = 29.000 - 32.000 \text{ U/min}$ höhere stabile Zustellungen a_p . Für eine Drehzahl von $n = 27.000$ konnten mit der Aluminiumvariante höhere Zustellungen erreicht werden. Für

$n = 28.000$ und im Bereich $n > 33.000$ ergaben sich gleiche Werte. In Kombination mit den Ergebnissen aus der Modalanalyse lässt sich daraus schließen, dass die Verwendung von CFK durch die höhere Werkstoffdämpfung die Zustellung a_p über einen weiten Bereich erhöhen lässt.

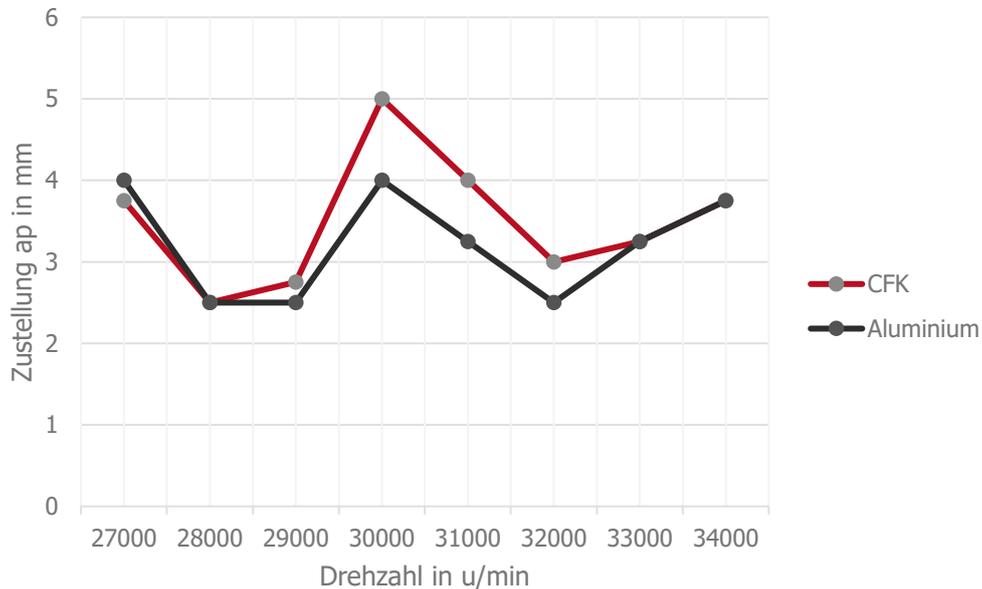


Abbildung 57: Vergleich der Stabilitätsuntersuchungen

5.4. Fazit

Im Rahmen des Projekts konnte der x-z-Aufbau der Portalfräsmaschine Datron M10 Pro erfolgreich in CFK-Halbzeugbauweise umgesetzt werden. Folgende Ergebnisse wurden dabei erzielt:

- Die Strukturmasse konnte um fast 50 % reduziert werden. Dies entspricht 35 % der Masse der gesamten Baugruppe. In den Versuchen zum Portalnicken konnte eine Verringerung der Maximalauslenkung um bis zu 4 μm festgestellt werden.
- Die Steifigkeit wurde in der numerischen Untersuchung iterativ um 13 % (x-Richtung) bzw. 45 % in y-Richtung verbessert. Dies konnte im Versuch nicht bestätigt werden. Hier ergab sich eine Verringerung der Steifigkeit in y- und z-Richtung um 18,5 % bzw. 50 %. Mögliche Ursachen für die Abweichungen liegen in abweichenden Laminatkennwerten in Versuch und Simulation (Faservolumenanteil, Faserorientierung), unzureichender Modellierung der Spindelanbindung, fehlende Modellierung des Portalbalkens (Unterschiedliche Steifigkeiten der Einzelkomponenten führen zu unterschiedlichem Verformungsverhalten) und Nichtlinearitäten, die vor allem bei der Untersuchung der z-Steifigkeit auftraten. Gleichzeitig ist durch die Veränderung der Geometrie und dem vorliegenden überstimmten mechanischen System keine einfache Abschätzung möglich, welche Anteile der veränderten Steifigkeit auf die Geometrie oder den veränderten Werkstoff zurückzuführen ist. Zusätzlich führte die Forderung nach einem reduzierten Lasthebelarm direkt zu einer Verringerung des nutzbaren Flächenträgheitsmoments für die CFK-Variante. Die spezifischen Steifigkeiten in die Belastungsrichtungen ändern sich um +94 % in x-; +56 % in y- und -3 % in z-Richtung.

- Die Modalanalyse zeigt, dass durch den Einsatz von CFK die Eigenfrequenzen nach oben/unten verschoben wurden. Zusätzlich konnte die modale Dämpfung erhöht werden. Beispielhaft bei einer Anregung in x-Richtung: +34 Hz und +140 % Dämpfung.
- Bei den Stabilitätsuntersuchungen ergeben sich im Bereich von $n = 29.000 - 32.000$ U/min höhere stabile Zustellungen a_p für die CFK-Variante.
- Die Kosten des Demonstrators belaufen sich auf ca. 21.000 €. Hierbei entfällt ein Großteil auf die Arbeit beim Verkleben und Zuschneiden der einzelnen Halbzeugplatten. Hier zeigen sich die wirtschaftlichen Grenzen der Halbzeugbauweise. Eine Bauweise mit Prepreg und Aluminiumformen liegt nach einer ersten Abschätzung bei einem ähnlich hohen zeitlichen Aufwand.

6. Demonstrator 2: Spindelstock eines Doppelspindlers (KLuB)

6.1. Ausgangssituation, Anforderungen

Das in diesem Arbeitspaket betrachtete Bauteil ist ein Spindelstock der CNC-Fräsmaschine *DZ08FX Precision plus* des Herstellers *Chiron-Werke GmbH & Co. KG*. Der Spindelstock ist als Doppelspindler ausgeführt und kann somit zwei Teile gleichzeitig bearbeiten. Es handelt sich um eine verschweißte Blechkonstruktion aus Baustahl S235, die in Abbildung 58 dargestellt ist.

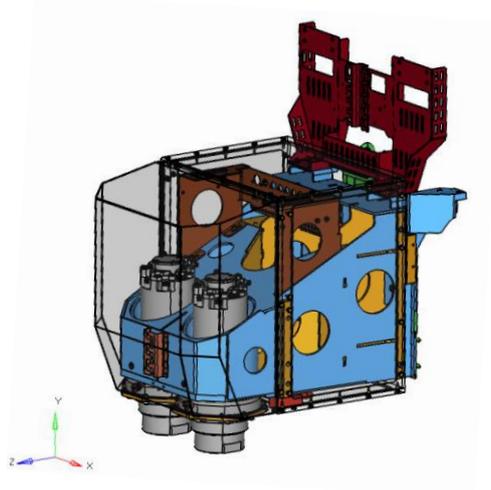


Abbildung 58: CAD-Modell des betrachteten Spindelstocks der Fa. Chiron-Werke GmbH & Co. KG

Der Spindelstock kann strukturell in zwei Substrukturen aufgeteilt werden: einerseits die äußeren Strukturen mit seitlichen Wänden, Gewichtsausgleich, Rückwand und Bodenplatte (Abbildung 58); und andererseits die inneren Strukturen mit versteifenden Platten, Spindelhalterung und Sekundärstrukturen wie Schmierverteiler oder Durchflusswächter (Abbildung 59). Die per CAD-Modell geschätzte Masse des Spindelstocks beträgt ca. 75 kg, die Masse der angebauten Sekundärstrukturen wurden mit ca. 10 kg abgeschätzt und die mit der Bodenplatte verschraubten Spindeln wiegen insgesamt 75 kg. Die gesamte bewegte Masse der Fräsmaschine berücksichtigt noch eine Abdeckungshaube (ca. 20 kg) und andere Peripherieelemente wie den Linearantrieb, die Führungsschienen und -wagen oder Medienversorgung. Das Gesamtgewicht des Spindelstocks beträgt 250 kg.

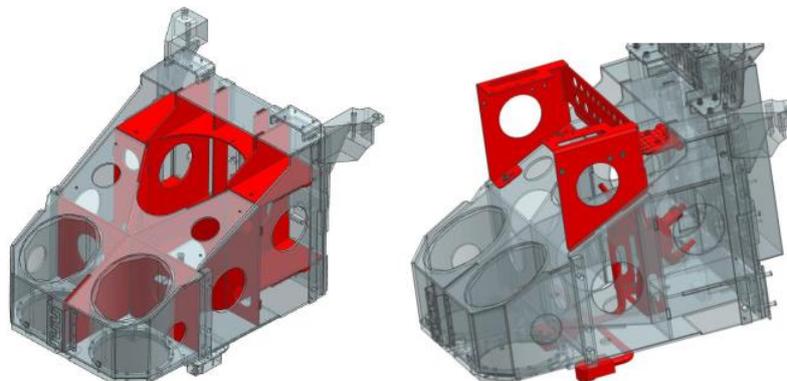


Abbildung 59: Innere Strukturen des Spindelstocks – versteifende Platten (links), angebauten Sekundärstrukturen (rechts)

Im Betrieb der Fräsmaschine treten folgende Belastungen auf, die für die Dimensionierung betrachtet wurden:

- Aufgrund verbauter Permanentmagnete erfährt die Rückwand des Spindelstocks lokale Anziehungskräfte des Linearantriebs von $F_{\text{Anzug}} = 10,3 \text{ kN}$ (Abbildung 60 rechts).
- Bei ausgeschaltetem Linearantrieb ist es notwendig den Spindelstock gegen Herunterfallen zu sichern. Dies wird über einen Gewichtsausgleich sichergestellt, welcher an den beiden ohrenförmigen Aufnahmen, die links und rechts auf der Rückseite. An den beiden Punkten wirkt jeweils $0,5 F_{\text{Ausgleich}}$ (Abbildung 60 rechts).
- Die eingesetzten HSK-E 40 Spindeln haben eine Maximaldrehzahl von 40.000 U/min, was einer maximalen Anregungsfrequenz von ca. 666 Hz entspricht.
- Im Betrieb greifen Prozesskräfte an den beiden Tool Center Points (TCP) an, welche sich 150 mm unter den Spindeln befindet (Abbildung 60 links). Diese Vorschubkräfte können in alle drei Raumrichtungen positiv wie negativ wirken und betragen laut Herstellerinformationen maximal 2 kN in der vertikalen Richtung (die Y-Achse auf der Abbildung 60) und, senkrecht dazu, maximal 3,5 kN (die XZ-Ebene auf der Abbildung 60). Die vom TCP erfahrenen Kräfte sind für beide Spindeln gleich, da stets die gleichen Bearbeitungsoperationen durchgeführt werden.
- Die maximalen Beschleunigungskräfte, die im Eilgang entstehen können, sind 18 m/s^2 in der vertikalen Richtung zzgl. Berücksichtigung der Erdbeschleunigung und 16 m/s^2 in der dazu senkrechten Ebene.

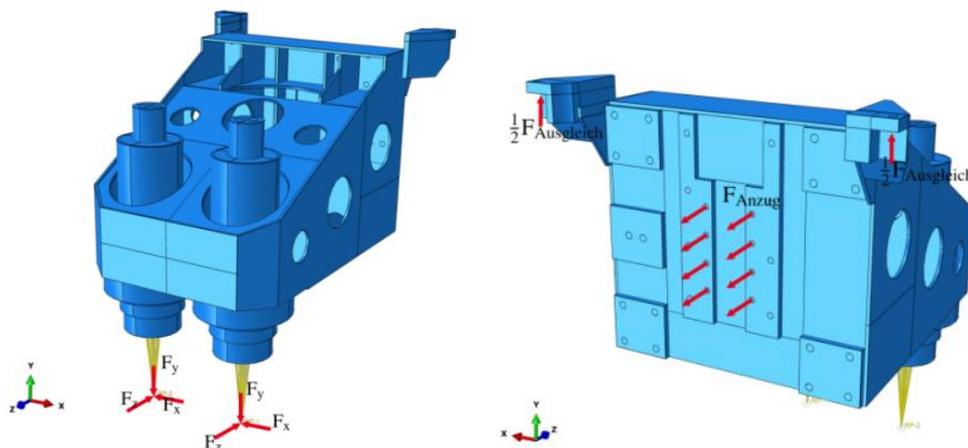


Abbildung 60: Schematische Darstellung der auftretenden Lasten – Prozesskräfte (links), Gewichtsausgleichskräfte und Linearantriebskräfte (rechts)

Der Spindelstock kann als gewöhnliche Fachwerkstruktur betrachtet werden. Aufgrund der vielfältigen Belastungen führt eine lastgetriebene Laminatauslegung jedoch zu komplexen Laminataufbauten und die halbzeugbasierte Konstruktionsweise könnte dadurch an ihre Grenzen stoßen. Die mit der Fa. Chiron-Werke GmbH & Co. KG abgesprochenen Anforderungen und Rahmenbedingung zur Konstruktion eines CFK-Demonstrators können wie folgt zusammengefasst werden:

- Erzielte Leistung:
eine Verbesserung der spezifischen Steifigkeit durch eine geringere Masse.
- Plug & Play:
Es dürfen keine Änderungen an Schnittstellen vorgenommen werden. Der Spindelstock soll ohne Anpassungen in die aktuelle Anlage eingebaut werden können. Diese betrifft die Rückwand und die vorderen Spindelhalterungen.
- Alle Sekundärstrukturen sind grundsätzlich für die neue Konzipierung verlegbar.
- Durch die Verwendung von Spindeln mit integrierten Kühlkanälen ist eine Betrachtung der thermischen Dehnungen am Spindelflansch nicht notwendig.

6.2. Leistungsanalyse des Originalbauteils

6.2.1. Numerische Analyse

Anhand bereitgestellter Daten der *Fa. Chiron-Werke GmbH & Co. KG* wurde die Leistungsanalyse des Originalbauteils durchgeführt. Folgende Kriterien wurden untersucht: Steifigkeit, Festigkeit, Schwingverhalten und Stabilitätsverhalten. Da sowohl die Gestaltung als auch die Belastung des Spindelstocks komplex sind und zu einer Kombination von Biegung und Torsion mit Spannungserhöhung durch lokale Kräfte führen können, wurde direkt auf die finite-Elemente (FE) Methode mit der Software *ABAQUS* [27] zurückgegriffen. Die Materialdaten aus Tabelle 34 wurden bei der Modellierung verwendet. Sowohl die Analyse und als auch die daraus entstehende Konzipierung beschränken sich lediglich auf den Spindelstock.

Aus allen möglichen Lastfallkombinationen wurde ein Lastfall für das Stahlkonzept als kritisch identifiziert. Es handelt sich um einen Betriebslastfall, bei dem die Prozesskräfte in allen Richtungen maximal negativ ausgerichtet sind (vgl. Abbildung 60). Aus der Spannungsanalyse ist ersichtlich, dass die Materialausnutzung nicht homogen ist. Viele Bereiche sind mit weniger als 15 N/mm² gering beansprucht und andere lokalen Stellen weisen Spannungsspitzen bis zu 128 N/mm² auf, was einem Sicherheitsfaktor von knapp 1,7 entspricht. Dieser nicht versagenskritische Wert wurde als oberste Grenze der Abbildung 61 verwendet, wobei der maximale Wert der Skala (in rot) 15 N/mm² entspricht. Die angezeigten roten bis grauen Bereiche sind auf dieser Abbildung mit 40 N/mm² nicht kritisch für die Struktur. Nach erneuter Durchführung der Festigkeitsanalyse durch eine verfeinerte Modellierung wurde eine Maximalspannung in Höhe von 53 N/mm² (Sicherheitsfaktor = 4,06) festgestellt.

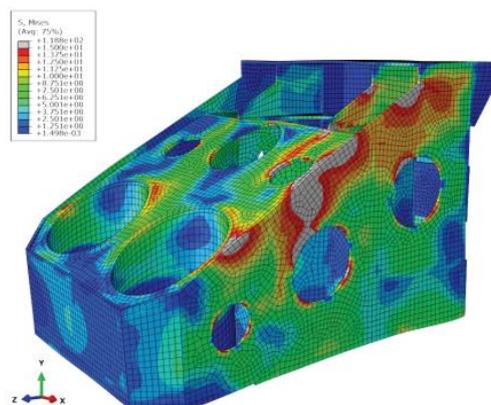


Abbildung 61: Darstellung der Beanspruchung im Spindelstock für den identifizierten kritischen Lastfall

Eine weitere Untersuchung der Spannungsverteilung mit Fokus auf den Kraftfluss deutet darauf hin, dass die vorgesehenen lokalen Aussparungen ungünstig platziert sind, da sie den natürlichen Kraftfluss unterbrechen, wie z.B. bei dem Schubfeld in der Bodenplatte der Abbildung 62 links.

Tabelle 34: Verwendete Werkstoffkennwerte vom Stahl S235 [28]

Kennwert	Wert
ρ [kg/mm ³]	$7,85 \times 10^{-6}$
E [N/mm ²]	210
ν [-]	0,33
$R_{p0.2}$ [N/mm ²]	215

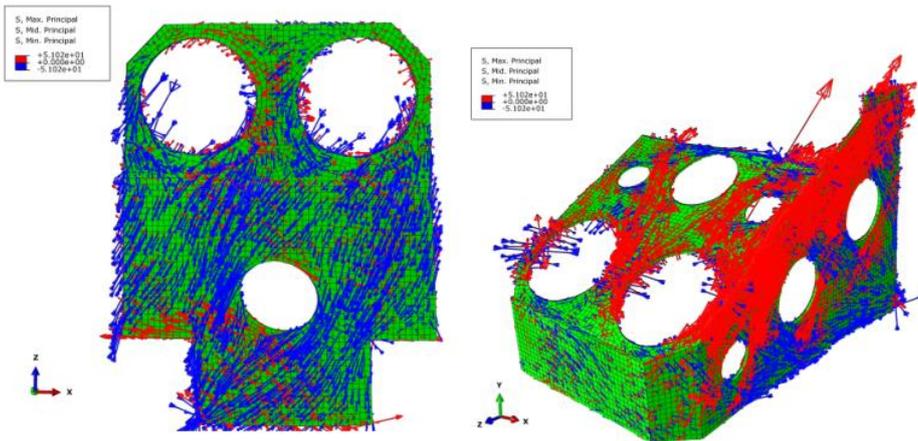


Abbildung 62: Darstellung der Kraftflüsse für unterschiedliche Spindelstockkomponente, Bodenplatte (links) und äußere Wände (rechts)

Die Stabilitätsanalyse liefert kein Versagen. Der Sicherheitsfaktor beträgt hier 14,8. Im Gegensatz dazu liefert die Modalanalyse Eigenfrequenzen, die in das Betriebsintervall von 0-666 Hz fallen. Dabei sind zwei Eigenschwingungsformen zu erkennen: das Nicken und das Rollen (Abbildung 63). Während der Analyse ist aufgefallen, dass die Gesamtstruktur durch die Spindeln, die insgesamt 30 % der bewegten Masse ausmachen, stark geschwächt ist. Für alle identifizierten Schwingungsformen wurde die Eigenfrequenz durch die Modellierung von Spindeln um ca. 50 % des Werts ohne Spindeln verringert; und dies unabhängig von dem Modellierungsansatz (ideal starre Spindeln oder Stahlspindeln). Die gesamten Ergebnisse sind in Tabelle 35 aufgetragen, wobei die nicht kritischen Eigenfrequenzen grau hinterlegt sind. Laut Betriebsdaten der *Fa. Chiron-Werke GmbH & Co. KG* liegt die erste kritische Frequenz bei ca. 400 Hz. Grund dafür sind die modellierungsbedingten vernachlässigten umgebenden Nachgiebigkeiten. Die Ergebnisse der Schwingungsanalyse durch FE-Modelle werden nicht weiter diskutiert, weil diese durch die Modellierung der starren Einspannung und der Vernachlässigung der Nebenstrukturen zu stark vom Realfall abweicht. Wichtiger ist das Verhältnis von den Eigenfrequenzen des Originalbauteils zu denjenigen des Demonstrators.

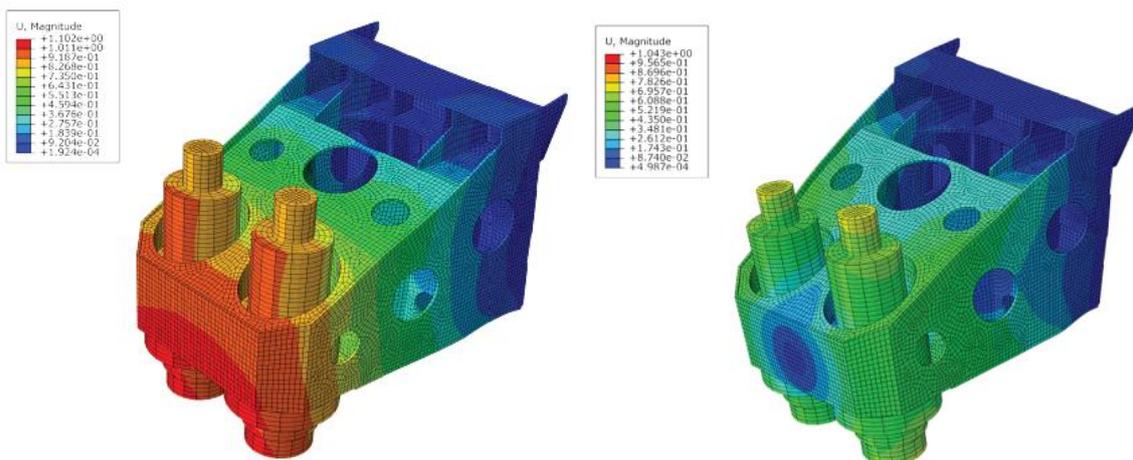


Abbildung 63: Beispiele für das Nicken (links) und das Rollen (rechts) des Spindelstocks bei der Modalanalyse

Tabelle 35: Ergebnisse der Modalanalyse für unterschiedliche Modellierungsansätze

Eigenform Nr.	Schwingungstyp	Mit Spindel (starr) [Hz]	Mit Spindel (stahl) [Hz]	Ohne Spindel (stahl) [Hz]
1	Nicken	229	228	478
2	Nicken	247	245	481
3	Rollen	411	406	834
4	Nicken	646	629	> 1000

6.2.2. Statische Steifigkeit

Die statischen Steifigkeiten werden durch die Messung der Verschiebung nahe des TCP und gleichzeitige Messung der aufgebrachtten Kraft ermittelt. Die Kraft wird mit einem Pneumatikzylinder auf die Werkzeugaufnahme aufgebracht und mittels einer Kraftmessdose aufgenommen. Die resultierenden Verschiebungen werden mittels Lasertriangulationssensorik ermittelt. Die Untersuchungen in den jeweiligen Lastrichtungen werden jeweils mehrfach durchgeführt, um gemittelte Steifigkeits- und Nachgiebigkeitswerte ermitteln zu können.

Der Messaufbau für die Messung der Steifigkeit in x-Richtung ist sowohl in Abbildung 64 (schematisch) als auch in Abbildung 65 dargestellt. Die Ergebnisse der statischen Steifigkeitsuntersuchungen sind in Tabelle 36 aufgelistet sowie in Abbildung 66 als Kraft-Weg-Diagramme dargestellt.

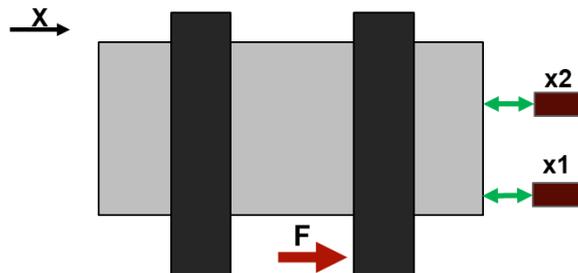


Abbildung 64: Schematische Darstellung der Steifigkeitsmessung in x-Richtung

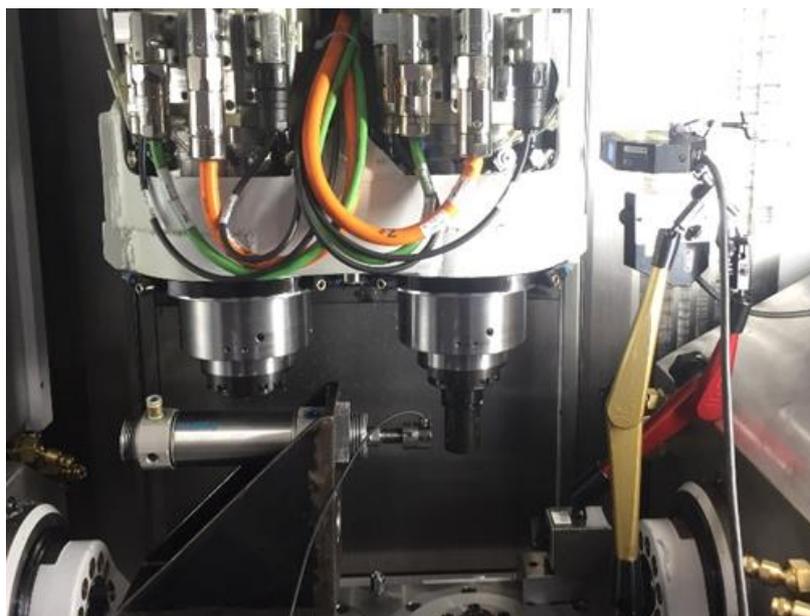


Abbildung 65: Messaufbau zur Steifigkeitsuntersuchung in x-Richtung

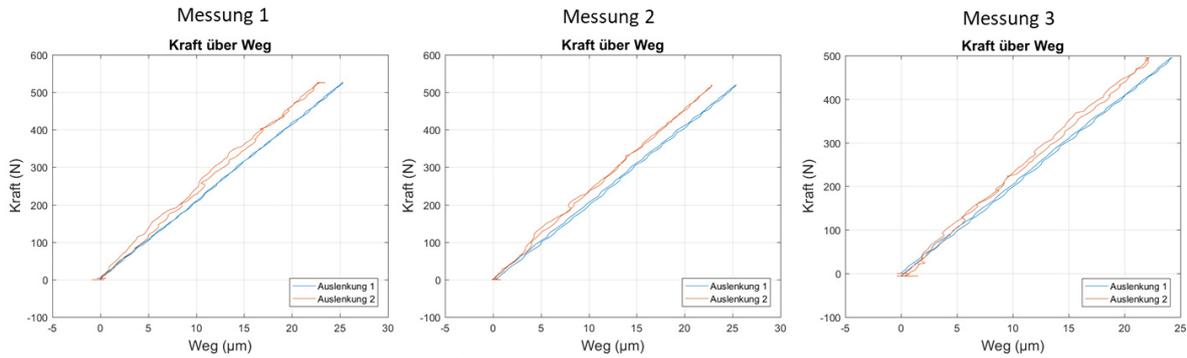


Abbildung 66: Kraft-Weg-Diagramme der Steifigkeitsuntersuchungen in x-Richtung

Tabelle 36: Statische Steifigkeitsmessung in x-Richtung

Messung	F_{\max} in N	Kraft normiert	Weg 1 normiert	Weg 2 normiert	F/x_1 normiert	F/x_2 normiert
1	526	1	1	0,927	1	1,079
2	519	0,986	1,004	0,904	0,982	1,091
3	495	0,941	0,960	0,878	0,979	1,071

Der Messaufbau für die Messung der Steifigkeit in x-Richtung ist sowohl in Abbildung 67 (schematisch) als auch in Abbildung 68 dargestellt. Die Ergebnisse der statischen Steifigkeitsuntersuchungen sind in Tabelle 36 aufgelistet sowie in Abbildung 69 als Kraft-Weg-Diagramme dargestellt.

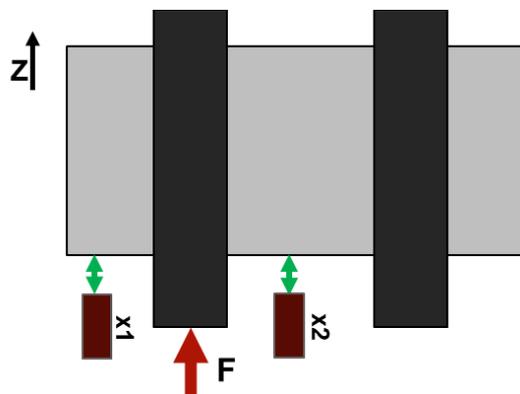


Abbildung 67: Schematische Darstellung der Steifigkeitsmessung in z-Richtung



Abbildung 68: Messaufbau zur Steifigkeitsuntersuchung in z-Richtung

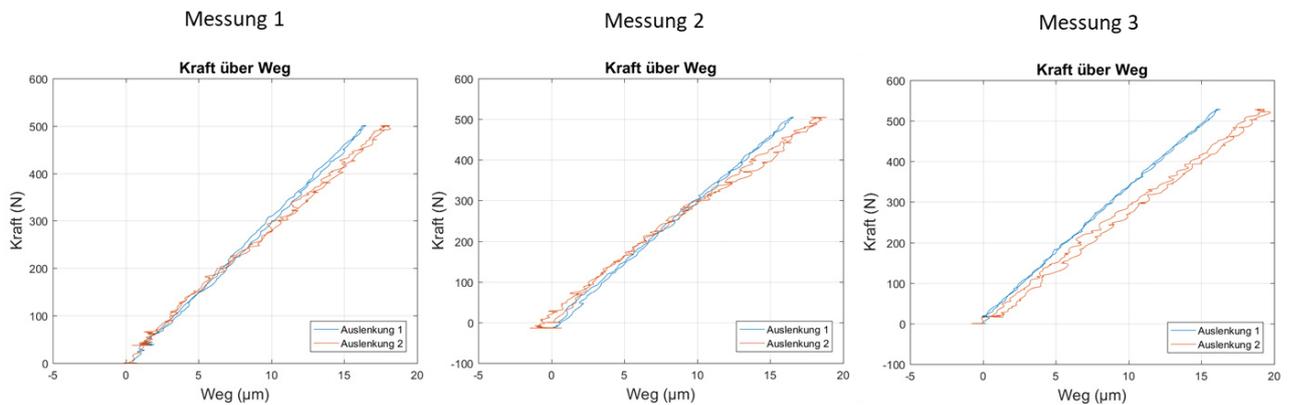


Abbildung 69: Kraft-Weg-Diagramme der Steifigkeitsuntersuchungen in z-Richtung

Tabelle 37: statische Steifigkeitsmessung in z-Richtung

Messung	F_{\max} in N	Kraft normiert	Weg 1 normiert	Weg 2 normiert	F/x1 normiert	F/x2 normiert
1	501,0	0,952	0,653	0,718	1,459	1,326
2	504,7	0,959	0,657	0,746	1,461	1,285
3	528,8	1,005	0,644	0,780	1,559	1,288

Eine Messung der Steifigkeit in y-Richtung war mit dem verwendeten Pneumatikzylinder und dessen Aufnahme aus Platzgründen im Bearbeitungsraum nicht möglich.

6.2.3. Modalanalyse

Der Messaufbau der Modalanalyse ist in Abbildung 70 dargestellt. Die Messung wird mit einem Brüel & Kjær Messsystem durchgeführt.

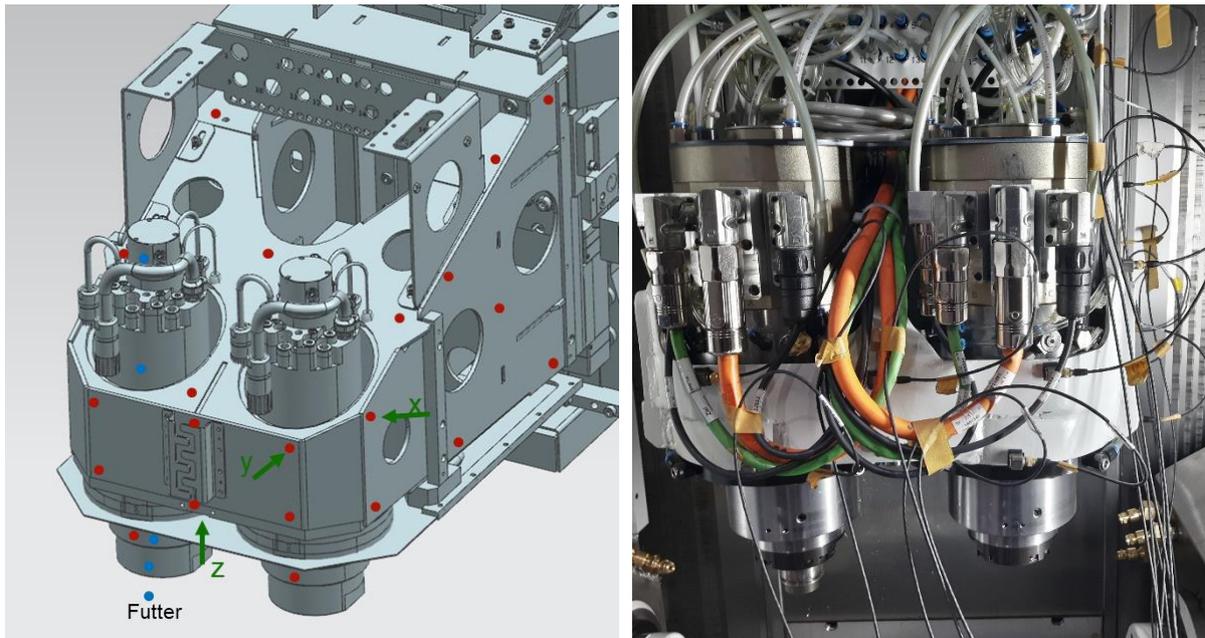


Abbildung 70: links: schematische Darstellung der Messpunkte Modalanalyse (rot) und Frequenzgangmessung (blau); rechts: Foto der Messung. Der Anregungspunkt (driving point) befindet sich an einer Werkzeugaufnahme in der linken Motorspindel.

Eine Auswertung der Modalanalyse in x-Richtung war trotz guter Kohärenz im Driving-Point nicht möglich.

Die Ergebnisse der Modalanalyse in y- und z-Richtung, sowie bei gekoppelter Auswertung sind in Tabelle 38 aufgelistet.

Tabelle 38: Ergebnisse der Modalanalyse in y- und z-Richtung, sowie bei gekoppelter Auswertung

z-Richtung			y-Richtung			Gekoppelt			
Mode	f in Hz	d in %	Komplexität	f in Hz	d in %	Komplexität	f in Hz	d in %	Komplexität
1							68,07	5,39	0,07
2	75,74	8,34	0,05						
3							102,09	4,19	0,24
4							107,65	7,12	0,04
5	111,76	7,12	0,04	110,39	9,84	0,06			
6	118,06	3,87	0,21				120,06	3,59	0,05
7	151,60	4,28	0,19				151,93	4,21	0,32
8							187,60	1,45	0,48
9	295,15	3,10	0,21						
10				303,21	6,04	0,17	302,98	3,11	0,27
11	333,90	0,55	0,04	334,18	4,01	0,27	335,31	1,52	0,69
12							347,16	4,04	0,89
13							352,63	1,13	0,12
14	365,74	3,21	0,12				368,98	2,74	0,23
15	441,55	2,24	0,25						
16	475,06	1,02	0,07	474,99	2,75	0,30	475,06	1,06	0,10
17							483,89	1,07	0,36
18							649,89	4,92	0,72
19				672,68	2,76	0,70	681,53	0,99	0,65
20							691,16	3,35	0,30
21				734,99	3,94	0,39	736,54	3,51	0,76
22				1011,97	1,51	0,40			

6.3. Konstruktion

Durch eine erste Potentialanalyse wurde das Leichtbaupotential des Spindelstocks auf 23 % geschätzt. Die zuvor durchgeführte Leistungsanalyse weist darauf hin, dass das Originaldesign für entscheidende Komponente nicht lastgerecht ist und aus verschweißten Blechen besteht. Eine direkte Übertragung des Designs in eine CFK-Bauweise ist aufgrund der Anisotropie von CFK nicht zielführend.

Zunächst wurde eine Topologieoptimierung mit der Software Altair HyperWorks [29] durchgeführt, um weiteres Optimierungspotential durch ein lastgerechteres Design zu erreichen. Durch Absprache mit der *Fa. Chiron-Werke GmbH & Co. KG* wurde der zulässige Bauraum definiert und entsprechend modelliert (Abbildung 71). Neben der Reduzierung der Strukturmasse wurde die Erhöhung der Steifigkeit der Struktur als zusätzliches Ziel gesetzt.

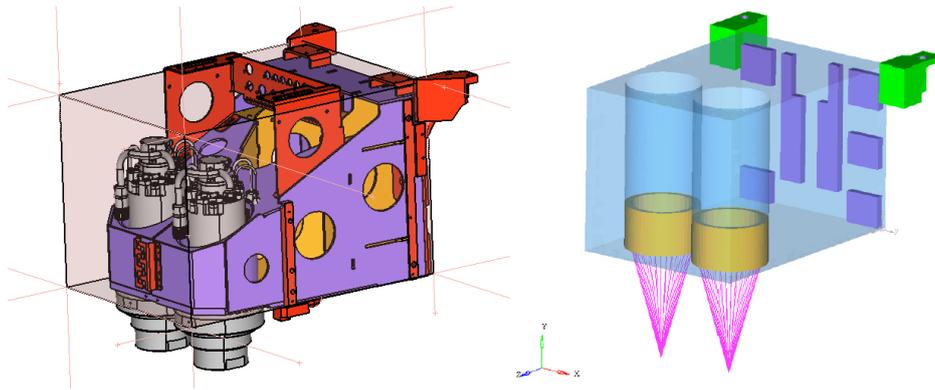


Abbildung 71: Zulässiger Bauraum, CAD (links) und FE-Modell (rechts)

Zur Optimierungsanalyse wurden alle möglichen Lastfälle ohne Gewichtung berücksichtigt. Die Berücksichtigung einzelner Kräfte zeigt, dass der Spindelstock hauptsächlich auf Beschleunigungen konzipiert wurde (Abbildung 72), was der Philosophie der *Fa. Chiron-Werke GmbH & Co. KG* entspricht, und dass die lokalen wirkenden Kräfte erfolgreich keinen weiteren Optimierungsbedarf aufweisen (Abbildung 74 und Abbildung 75). Allerdings würde eine Konzipierung nach Prozesskräften zu einer geringeren Nachgiebigkeit des Spindelstocks führen, da die Ergebnisse dieser Analyse (Abbildung 73) sich weiter von dem Originaldesign entfernen.

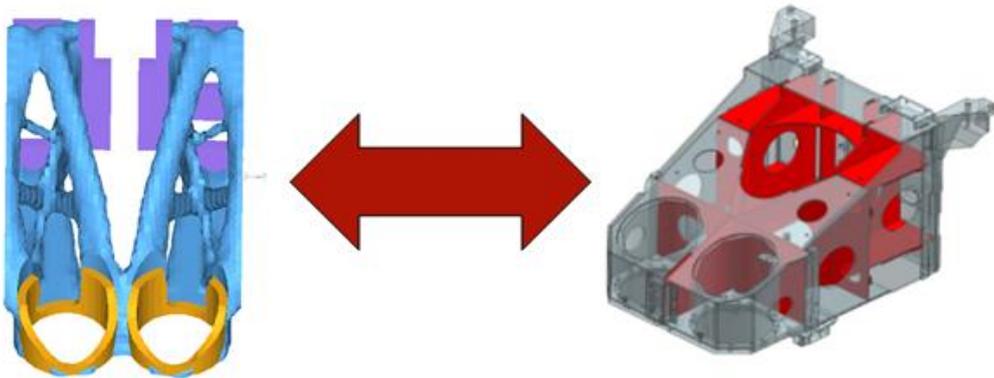


Abbildung 72: Vergleich zwischen Topologieoptimierungsergebnissen und Originalbauteil - Beschleunigungskräfte

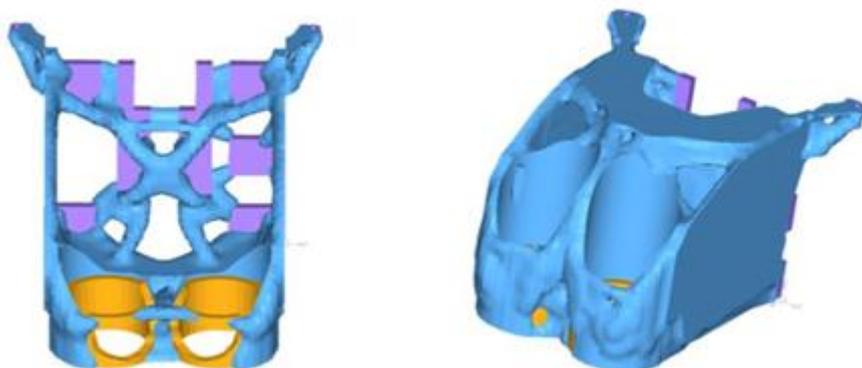


Abbildung 73: Topologieoptimierungsergebnisse für unterschiedliche Füllgrade - Prozesskräfte

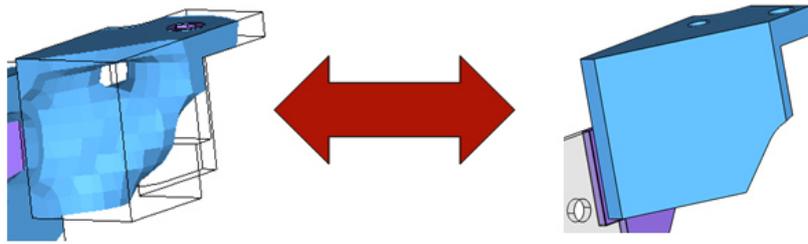


Abbildung 74: Vergleich zwischen Topologieoptimierungsergebnissen und Originalbauteil - Ausgleichskräfte

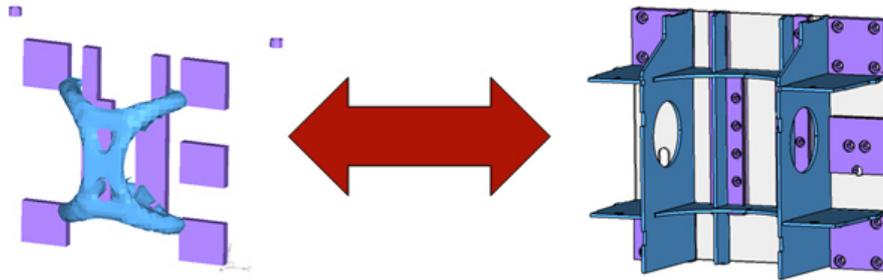


Abbildung 75: Vergleich zwischen Topologieoptimierungsergebnissen und Originalbauteil - Vorspannkkräfte

Die Ergebnisse der Leistungsanalyse werden durch die Gegenüberstellung der Topologieoptimierungsergebnisse unter Berücksichtigung aller wirkenden Kräfte und des CAD-Modelles des Originalbauteils bestätigt (Abbildung 76). Die notwendigen konstruktiven Maßnahmen zu einer verbesserten Struktur, die in CFK-Bauweise umgesetzt werden kann, sind unter anderem eine Fachwerk- oder Schalenbauweise mit massiver Bodenplatte, lange, steife Spindelanbindungen und verlagerte Aussparungen.

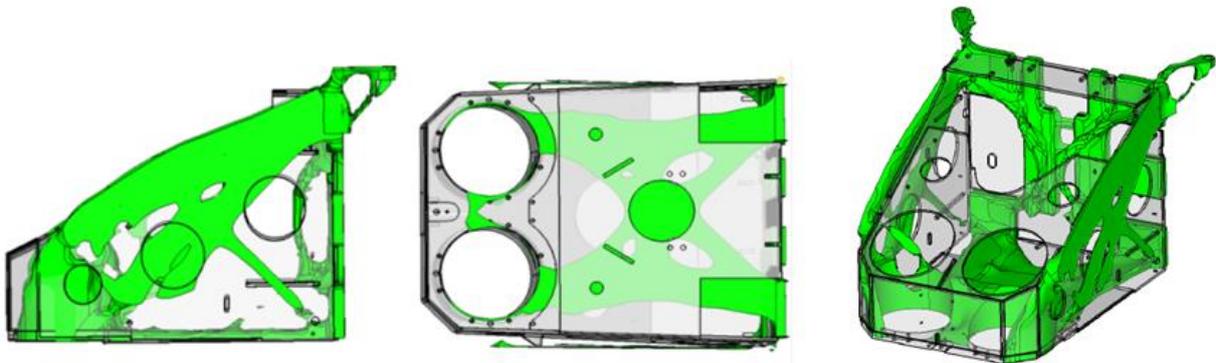


Abbildung 76: Vergleich zwischen Topologieoptimierungsergebnissen und Originalbauteil - Berücksichtigung aller Kräfte

Die entsprechende Konzeptfindung wurde in einem Produktentwicklungsprozess nach VDI-Richtlinie 2221 durchgeführt, wobei unterschiedliche Konzepte in einem morphologischen Kasten zugeordnet wurden und nach Vergleichskriterien wie Herstellung, Gewicht oder die Verwendung von Halbzeugen bewertet und ausgewählt wurden. Die unterschiedlichen konstruktiven Lösungen sind aus aufwendiger Literaturrecherche im Archiv des Fachgebiets KLuB entstanden.

Durch den Produktentstehungsprozess wurden folgende Konstruktionsmerkmale als zielführend identifiziert:

- Die äußere Struktur wurde als Hohlkasten aus Halbzeugplatten vorgesehen. Dazu werden Aussparungen für die wenig belasteten Bereiche vorgesehen, die mit nicht tragenden Deckeln verschlossen werden können.
- Die inneren lastgerechten Versteifungselemente aus Platten und Profilen wurden iterativ entwickelt. Dabei lag der Fokus auf den Prozesskräften, wobei die Beschleunigungskräfte mitberücksichtigt worden sind.
- Zur Maximierung der Steifigkeit der Bodenplatte wurden die unteren Aussparungen auf die Seitenplatten verlegt.
- Die Ansätze zur Aufnahme von Vorspann- und Ausgleichkräfte wurden übernommen.
- Die Abdeckungshaube wurde integriert, da ein geschlossenes Profil aufgrund der auftretenden Biege- und Torsionsbelastungen besser geeignet ist. Damit kann 44 % der gesamten bewegten Masse entfallen (gegenüber nur 37 % bei einer alleinigen Optimierung des Spindelstocks).
- Die Spindelhalterung wurde durch die Integration eines eingepressten Stahlflansches mit Stiften umgesetzt (Abbildung 77).
- Die angebauten Sekundärstrukturen wurden entweder integriert oder leicht verlegt.

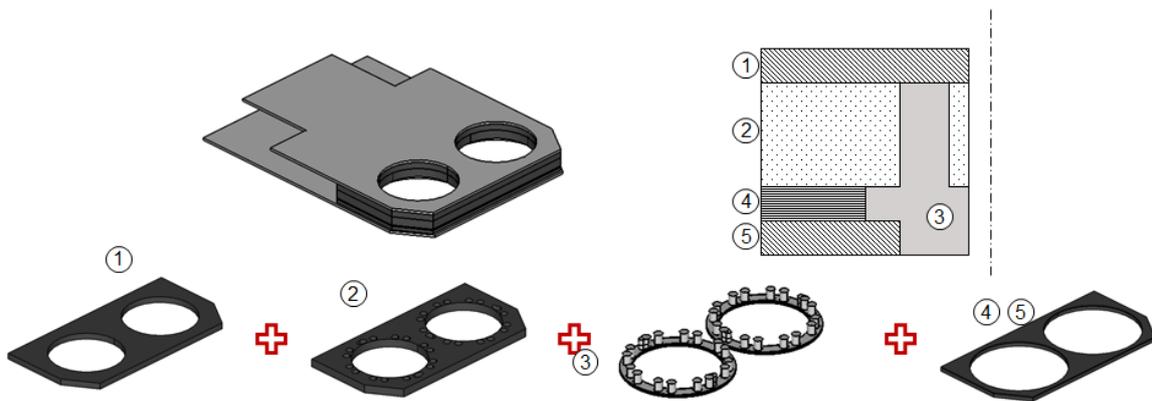


Abbildung 77: Konzept zur Spindelbindung

Um beide Auslegung und Dimensionierung durchführen zu können wurde das neue Konzept modelliert (Abbildung 78) und die Identifizierung des kritischen Lastfalls wurde für dieses Design mit der Software *ABAQUS* [27] erneut durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass der kritische Lastfall unverändert geblieben ist. Die Laminatauslegung könnte dann nur für einen Lastfall durchgeführt werden, was den numerischen Aufwand erheblich reduzieren konnte. Die zur Auslegung und Dimensionierung verwendeten Kennwerte einer Einzelschicht sind in Tabelle 39 aufgetragen.

Tabelle 39: Verwendete Werkstoffkennwerte von einer Kohlefaser-Epoxyd-Lage, STS40/LY556, Faservolumenanteil = 0,6 [30], [31] [32]

Kennwert	Wert
E_{\parallel} [N/mm ²]	144080
E_{\perp} [N/mm ²]	8916
$\nu_{\parallel\perp}$ [-]	0.26
$G_{\parallel\perp}$ [N/mm ²]	5557
$G_{\perp\parallel}$ [N/mm ²]	5557
$G_{\perp\perp}$ [N/mm ²]	3300
ρ [kg/mm ³]	1.57×10^{-6}
R_{\parallel}^{+} [N/mm ²]	1920
R_{\parallel}^{-} [N/mm ²]	1000

R_{\perp}^{+} [N/mm ²]	40
R_{\perp}^{-} [N/mm ²]	150
$R_{\parallel\perp}$ [N/mm ²]	60

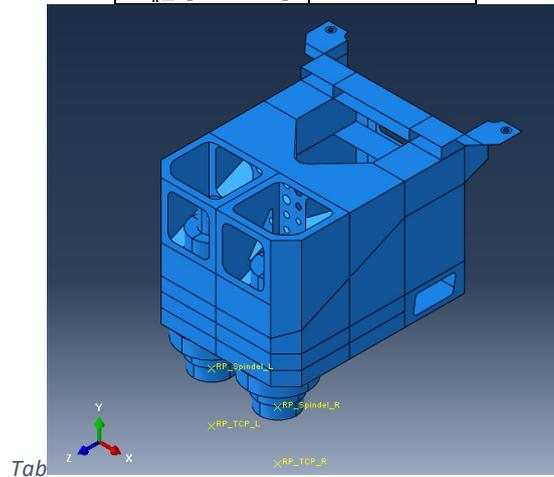


Abbildung 78: FE-Modellierung zur Auslegung und Dimensionierung des Demonstrators

Bei der Laminatauslegung wurden lediglich folgende Winkel berücksichtigt: 0°, 0°/90°, +45° und ein Winkelkombinationen aus mehreren 0° / +45° Platten mit einem Verhältnis von 60 % zu 40 % oder 40 % zu 60 %.

Das CFK-Design wurde abschließend mit dem Originalbauteil verglichen. Das CFK-Konzept zeigt eine Reduktion der Masse in Höhe von 66 % (Spindelstock + Abdeckungshaube) sowie eine verbesserte spezifische Steifigkeit am Tool Center Point von ca. 40 % ausgewertet. Die eingesparte Masse entspricht 33 % der gesamten bewegten Masse. Die Spannungsanalyse, die mit einer ähnlichen Modellierung wie beim Originalbauteil stattgefunden hat, weist eine Spannungsspitze von 67 N/mm² nach, was einem Sicherheitsfaktor von 2,98 entspricht, wenn die am Fachgebiet KLuB ermittelte Querdruckbelastbarkeit einer Laminatschicht von 200 N/mm² angenommen wird. Die Modalanalyse liefert eine ähnliche Aussage wie bei der Analyse des Stahlbauteils: ohne Spindeln wurde eine kritische Schwingungsfrequenz von 469 Hz ermittelt (-3 % im Vergleich zum Stahlbauteil) und 172 Hz (-23 %) mit modellierten Spindeln. Der große Unterschied mit modellierten Spindeln erklärt sich dadurch, dass die Spindeln bei der CFK-Bauweise selbst einen größeren Anteil an der Gesamtmasse aufweisen (Abbildung 79).

Massenverteilung CFK Demonstrator

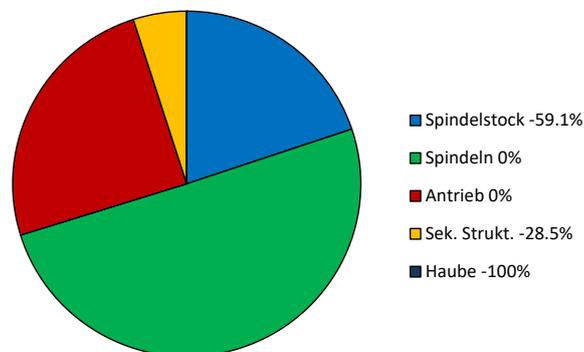


Abbildung 79: Massenverteilung des CFK-Demonstrators

Die Herstellung des Demonstrators fand am Fachgebiet KLuB statt (Abbildung 80). Verwendete Halbzeuge waren Platten, Profile und Fasermatte bzw. Faserbänder. Solche

Halbzeuge sind bei verschiedenen Webshops verfügbar [33] [34] [35]. Dabei wurde ein Arbeitsplan ermittelt, der 51 Platten für 33 Subkomponenten (davon 14 aus verklebten Platten) beinhaltet. Die Halbzeuge wurden bei der *Fa. Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co. KG* bestellt. Dabei war es möglich, große 0°/90° Platten herstellen zu lassen, und gewünschte Winkelkombinationen durch Wasserstrahlschneiden herzustellen. Der Anteil an Verschnitt ist aufgrund der Herstellung eines einzelnen Demonstrators ähnlich hoch wie beim x-z-Aufbau. Weitere verwendeten Verarbeitungsmethoden waren folgende herkömmliche Verfahren: das Sägen, das Bohren, das Schleifen, das Fräsen und das Drehen. Dazu wurden viele Übergänge überlappend laminiert und mit Harz eingetränkt.



Abbildung 80: Herstellung des CFK-Demonstrators - Bodenplatte (links), Spindelhalterung und äußere Wände (mittig), fertiger Demonstrator (rechts)

In Absprache mit der *Fa. Chiron-Werke GmbH & Co. KG* wurden alle CFK-Komponente ausschließlich von den beiden Forschungsstellen bearbeitet und die metallische Spindelanbindung abschließend von *Chiron* bearbeitet.

Die Gesamtkosten des Demonstrators liegen bei ca. 30.000 €, was deutlich über dem Wert des Originalbauteils (ca. 4.000 €) liegt. Die Kostenaufteilung des Demonstrators ist in der Abbildung 81 dargestellt. Die Halbzeuge machen dabei fast die Hälfte der Gesamtkosten aus. Der zweite große Kostenfaktor sind die Arbeitsstunden. Die sonstigen Materialkosten wie Struktur- oder Konstruktionskleber oder Handlaminat können vernachlässigt werden. Die Verklebung und der Zusammenbau der vielen einzelnen Komponenten sind zeit- und arbeitsintensiv. Die Gesamtsteifigkeit des Demonstrators wird dabei aber maßgeblich durch die zusätzlich aufgetragenen Laminatlagen an den Schnittstellen der einzelnen Platten beeinflusst.

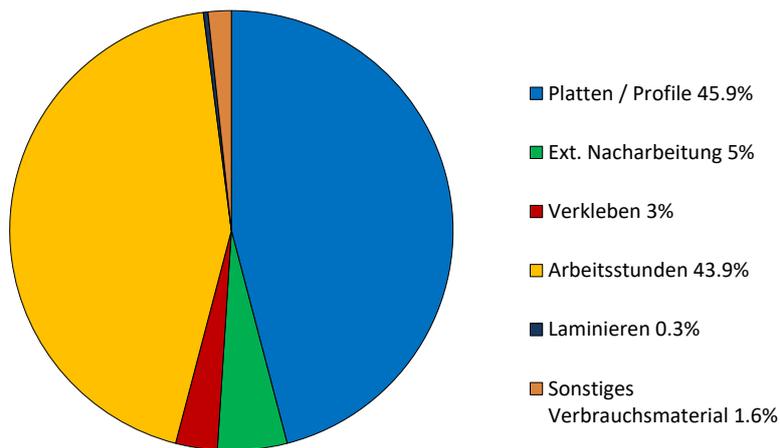


Abbildung 81: Kostenaufteilung des CFK-Demonstrators

6.4. Messtechnische Untersuchung des Demonstrators

Eine messtechnische Untersuchung des Demonstrators konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht durchgeführt werden.

6.5. Fazit

Im Rahmen des Projektes wurde erfolgreich ein neuer Spindelstock konzipiert und hergestellt. Dafür wurde auf herkömmliche Halbzeuge zurückgegriffen. Eine Massenreduktion von ca. 66 % wurde erreicht, was 33 % der gesamten bewegten Masse entspricht. Die spezifische Steifigkeit konnte um 40 % erhöht werden, ohne die Struktur versagenskritisch zu gefährden. Die Gesamtkosten des Demonstrators belaufen sich auf ca. 30.000 €. Diese Summe deutet darauf hin, dass die Halbzeugbauweise für komplex-belastete Bauteile an ihre Grenzen stößt und keine oder kaum wirtschaftliche Vorteile generiert. Eine Alternative dazu wäre eine Modularbauweise, die weniger Schnittstellen und Halbzeuge durch das Laminieren auf Holzformen vorsehen würde. Die ersten Kostenabschätzungen für einen CFK-Demonstrator liegen bei ca. der Hälfte der Kosten bei gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften. Weiteres Optimierungspotential liegt in der Spindelmasse, die mehr als die Hälfte der gesamten bewegten Masse im CFK-Konzept beträgt.

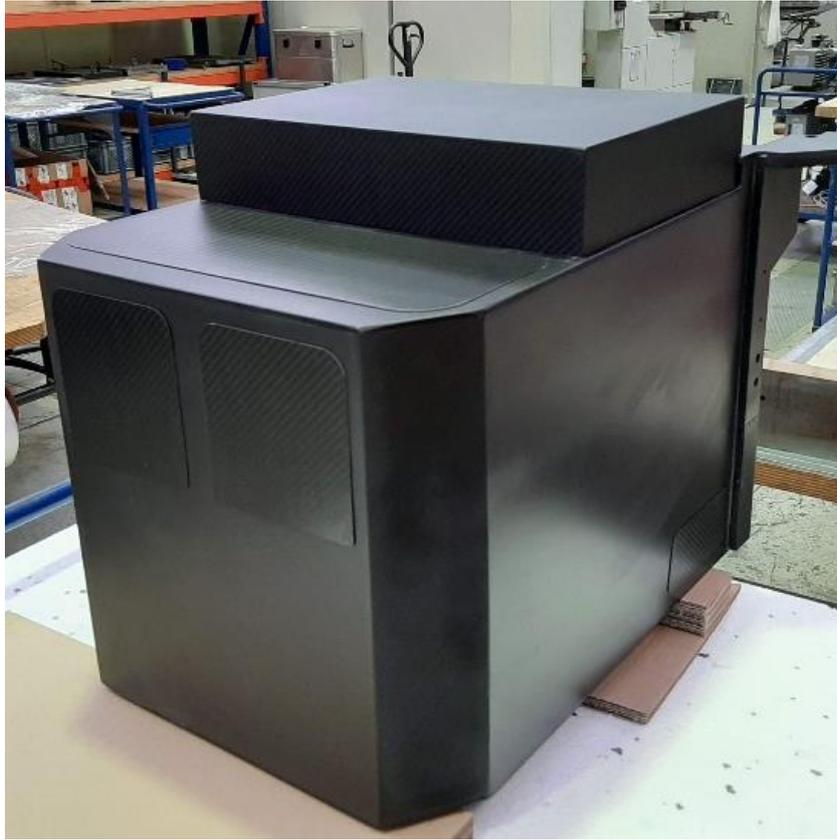


Abbildung 82: CFK-Demonstrator – Spindelstock

7. Demonstrator 3: Hubbalken einer Gesenkschmiedeanlage (KLuB)

Die in diesem Arbeitspaket betrachteten Bauteile sind Hubbalkenarme einer Gesenkschmiedeanlage der Fa. *SMS-Group*, welche zum Transport von insgesamt fünf Werkstücken zwischen den einzelnen Gesenken dienen. Das CAD-Modell der beiden Hubbalkenarme wurde von Fa. *SMS-Group* zur Verfügung gestellt und ist in der Abbildung 83 dargestellt.

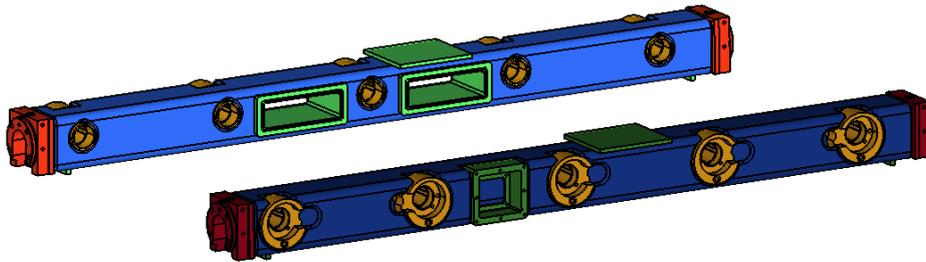


Abbildung 83: CAD-Modell des betrachteten Hubbalkens der Fa. *SMS-Group*

Die dargestellten Komponenten der Hubbalkenarmen sind nachfolgend aufgeführt:

- **Hubbalkenarm (blau):**
Der Hubbalkenarm ist 1457 mm lang und hat ein quadratisches Profil mit 110 mm Kantenlänge und einer Wandstärke von 6,3 mm und wiegt laut CAD-Daten 23,6 kg. Im symmetrischen Kastenprofil sind Aussparungen zur Anbindung der weiteren Bauteile vorgesehen. Der Hubbalkenarm besteht aus dem Stahl S355J2G3, dessen Werkstoffdaten in Tabelle 42 zu finden sind.
- **Aufnahmen der Klammerpatronen (orange):**
Die Aufnahmen der Klammerpatronen sind als Stahl-Drehteile ausgeführt und besitzen eine Durchgangsbohrung, durch die die Klammerpatronen gesteckt werden. Die Werkstücke werden beim Transport durch die Klammerpatronen mit einer Kraft von 330 N zwischen den beiden Balken eingespannt. Die Kraft dafür liefern Federn, die in den Klammerpatronen verbaut sind und beim Zusammendrücken der beiden Arme gegen die Werkstücke gespannt werden. Ein zusätzlich stirnseitig eingesteckter Stift dient als Verdrehsicherung beim Verstellen der Klammerpatrone. Eine seitliche Aussparung dient zur Anbringung der Tastsensoren, die über die Werkstückbelegung Auskunft geben. Die Masse einer Aufnahme einer Klammerpatrone beträgt 2,5 kg.
- **Steckerkasten (grüner Kasten im vorderen Hubbalken):**
Die Kabel der Tastsensoren verlaufen innerhalb des Hubbalkens und werden im Steckerkasten zusammengeführt. Durch einen Hartingstecker, der aus Platzgründen mit dem Steckergehäuse seitlich des Hubbalkens angebracht werden muss, wird das Signal zur Datenverarbeitung weitergeleitet. Der Steckerkasten wird an der entsprechenden Aussparung mit dem Hubbalken verschweißt. Das Steckergehäuse wird anschließend mit dem Steckerkasten verschraubt. Die Masse des Steckerkastens beträgt 2,5 kg und die des Deckels des Steckerkastens ebenfalls 2,5 kg.
- **Seitliche Krafteinleitungen (rot):**
Die Lagerung der Hubbalken wird durch Einspannungen ausgeführt. Dazu werden die Hubbalken beidseitig an ihren Lagern auf einen konischen Zapfen gesteckt. Die stirnseitige Vorspannkraft an der Krafteinleitungen beträgt ca. 21,5 kN. Eine Adapterplatte, die zuvor an die Lager des Balkens geschraubt wird, verhindert das Herausziehen des Zapfens aus den Lagern des Balkens, welche dadurch gegen die Lager der Aufnahme gepresst werden. Die geschätzte Masse einer Einspannung beträgt 2,45 kg.

- Weitere konstruktive Details:
Der Balken verfügt über weitere konstruktive Details, wie beispielsweise Aussparungen am hinteren Balken oder die oberen Deckelbleche (grüne Bleche bei beiden Hubbalken). Diese entfallen für den weiteren Konstruktionsprozess und müssen daher nicht berücksichtigt werden.

Der Transport der Werkstücke zwischen den einzelnen Gesenken erfolgt in fünf Schritten: das Schließen der Klammerpatronen (S), Anheben (He), ein horizontaler Versatz (T_V), das Absenken (Se), das Öffnen der Klammerpatronen (\ddot{O}) und schließlich der erneute horizontale Versatz (T_R); wobei der gesamte Arbeitszyklus 0,2 s beträgt. Die umgebende Temperatur wurde am Balken im Einsatz bei der *Fa. Neumayer* in Hausach [36] überprüft und beträgt maximal 40°C, was nicht gegen den Einsatz von Faserverbunden spricht (Abbildung 84). Dieses niedrige Temperaturniveau wird durch die Verwendung von Kühlmittel erreicht werden. Die Kühlmedien werden unter den Namen *Deltaforge F-31* und *Deltaforge 1105M* von den Firmen *Henkel AG & Co.KGaA* sowie *Acheson Colloiden B.V.* vertrieben. Zum reibungsarmen Betrieb der Klemmpatronen wird Schmiermittel eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein Hochtemperaturfett mit der Bezeichnung *Mobilgrease XHP 222(KP2N-10)* der *Fa. Mobil*.



Abbildung 84: Temperaturmessung einer CFK-Platte, die am Stahlbalken befestigt wurde

Der Hubbalkenarm kann als gewöhnliche Balkenstruktur betrachtet werden und daher bietet sich die CFK-Bauweise an, wobei eine halbzeuggerechte Konstruktion möglich und vielversprechend ist. Die mit der *Fa. SMS Group* abgesprochenen Anforderungen und Rahmenbedingung zur Konstruktion eines CFK-Demonstrators können wie folgt zusammengefasst werden:

- Erzielte Leistung:
Reduzierung der Taktzeit durch z.B. eine geringere Masse bei vergleichbarer Steifigkeit. Abgesprochen mit der *Fa. SMS Group* wurde eine maximale zugelassene Absenkung des Bauteils um 200 μm .
- Plug & Play:
Es dürfen keine Änderungen an Schnittstellen vorgenommen werden. Der CFK-Hubbalken soll ohne Anpassungen in die aktuelle Anlage eingebaut werden können. Diese Maßnahme betrifft die seitlichen Krafteinleitungen und die Aufnahmen der Klammerpatronen.
- Die Herstellungskosten für Serienbauteile (von ca. vier bis sechs Stück pro Jahr) sollen möglichst 2.400 € nicht übersteigen.

- Aufgrund des zusätzlichen Steckerkastens, welcher zu einer versagenskritischen Belastung führen konnte, wird nur der vordere Hubbalkenarme analysiert und neu konzipiert.

7.1. Leistungsanalyse des Originalbauteils

Zur Neuauslegung eines Demonstrators wird zunächst die Leistung des aktuellen Produktes ermittelt und analysiert. Hierbei wurden Steifigkeit-, Festigkeit-, Modal- und Stabilitätsanalysen durchgeführt.

Zur Analyse wurden ein analytisches und ein Finite-Element-(FE)Modell erstellt. Das analytische Modell dient dazu, eine Vorabschätzung der Kraftflüsse und der kritischen Absenkungen ohne numerischen Aufwand durchführen zu können, was zur Identifizierung von kritischen Lastfällen führt und eine erste Vorauslegung ermöglicht. Das FE-Modell liefert durch die Modellierung lokaler Designmerkmale und die Betrachtung von Sekundäreffekten präzisere Ergebnisse, die als Grundlage der neuen Konzipierung dienen. Der analytische Ansatz basiert auf dem Euler-Bernoulli Ansatz für Balken (Abbildung 85, links) und die FE-Variante wird anhand eines dreidimensionalen Balkenmodell aus zweidimensionalen Flächenelementen mit der Software *ABAQUS* [27] erstellt (Abbildung 85, rechts).

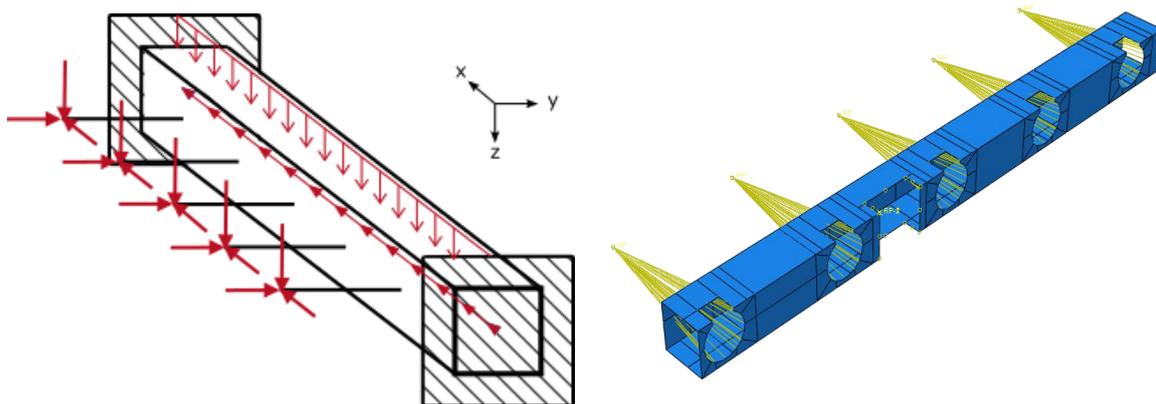


Abbildung 85: Analytische Modellierung (links) und FE-Modellierung (rechts) des betrachteten Balkens

Da die Hubbalkenarme im Betrieb unterschiedliche Beschleunigungen in verschiedenen Richtungen erfahren, ergeben sich verschiedene Lastfälle. Wie bereits erwähnt, erfolgt die Identifizierung der kritischen Lastfälle durch das analytische Modell, welches mit dem FE-Modell im Nachhinein verifiziert wurde.

Zur Definition der Lastfälle wurden folgenden Belastungen berücksichtigt:

- Das Eigengewicht der Hubbalken
- Die Beschleunigung für einen Zeitraum von 0,2 s
- Das Eigengewicht der Werkstücke (100 kg auf allen Patronen verteilt) und entsprechenden wirkenden Reaktionskräfte, die durch die verschobenen Kraftangriffspunkte zu Biege- und Torsionsmomenten führen
- Die Klemmkraft an den Klammerpatronen
- Die stirnseitige Vorspannkraft an der Krafteinleitungen

Die dimensionierenden Lastfälle sind das Heben / Senken (He / Se) mit einer vertikalen Beschleunigung von $8,5 \text{ m/s}^2$ und die horizontale Beschleunigung des beladenen Hubbalkenarms T_V / T_R mit $a_H = 22,721 \text{ m/s}^2$.

Die entsprechenden Ergebnisse der Analyse für beide Lastfälle sind in Tabelle 40 aufgelistet, wobei die Ergebnisse in der Form von Sicherheitsfaktoren angegeben sind. Der Sicherheitsfaktor für die Festigkeitsanalyse ergibt sich durch das Verhältnis der ermittelten Von-Mises Spannungen zur Materialstreckgrenze, der Faktor für die Modalanalyse aus dem Verhältnis zwischen der Anregungsfrequenz der Struktur und der Taktzeit und der Sicherheitsfaktor für die Stabilitätsanalyse wird direkt von ABAQUS [27] ermittelt.

Tabelle 40: Leistungsanalyse des Stahlbauteils

Kriterium	He / Se	T_V / T_R
CAD Gesamtmasse [kg]	43,3	
Kritische Absenkung [μm]	35	18
Sicherheitsfaktor - Festigkeit [-]	31	47
Sicherheitsfaktor - Stabilitätsanalyse [-]	2995	3705
Sicherheitsfaktor - Modalanalyse [-]	77	

Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass der Lastfall He / Se dimensionierend ist, und zum anderen, dass das Stahlbauteil bei einer tolerierten Absenkung von $200 \mu\text{m}$ überdimensioniert ist. Daher weist diese Balkenstruktur ein hohes Leichtbaupotential auf. Die spezifische Absenkung, wie in Abbildung 86 dargestellt, ist in Absprache mit der SMS Group bei der Vorauslegung das entscheidende Kriterium.

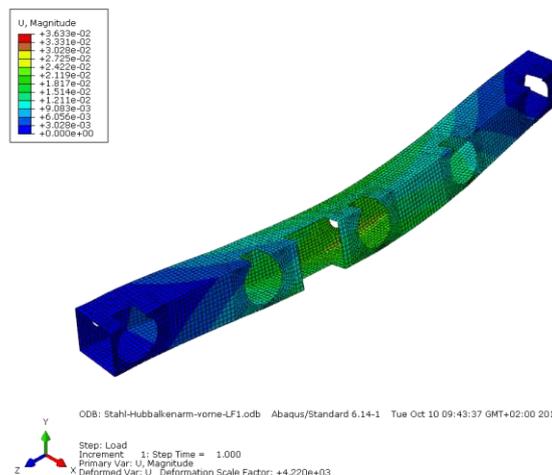


Abbildung 86: Absenkung des Stahlbalkens beim He / Se Lastfall

7.2. Konzipierung, Auslegung, Herstellung und Auswertung des CFK Demonstrators

Zunächst wurde das durch die Leistungsanalyse ermittelte Leichtbaupotential durch die durchgeführte Potentialanalyse bestätigt. Durch eine reine Materialsubstitution lassen sich 18 % der gesamten Masse einsparen. Da die Originalbauweise aus verschweißten Teilen mit vielen Schnittstellen besteht, ist eine Übertragung auf eine CFK-Bauweise bedingt realisierbar und ungünstig für die Integrität einer Faserverbundstruktur. Aus diesem Grund war eine neue Konstruktion notwendig. Zur Konzeptfindung wurde ein Produktentstehungsprozess nach der VDI-Richtlinie 2221 durchgeführt, wobei unterschiedliche Konzepte entwickelt und nach

Vergleichskriterien wie Herstellung, Masse oder Verwendung von Halbzeugen ausgewertet und aussortiert wurden.

Durch den Produktentstehungsprozess wurden folgende Varianten als geeignete Lösungen identifiziert:

- Der Hubbalkenarm besteht aus einem gewickelten Balken mit quadratischem Querschnitt, der durchgängig die gleiche Faserorientierung besitzt. Pultrudierte Profile wurden nicht berücksichtigt, weil die benötigten Maße nicht auf dem Markt verfügbar sind und die Faserorientierung zur Auslegung eingeschränkt ist. Einzelne zusammengefügte Platten wurden aufgrund einer erhöhten Zahl an Schnittstellen für eine Serienproduktion als wirtschaftlich ungeeignet und von der Steifigkeit ungeeignet bewertet. Aussparungen für weitere Einbauteile wurden in dem Balken vorgesehen, siehe Abbildung 87.

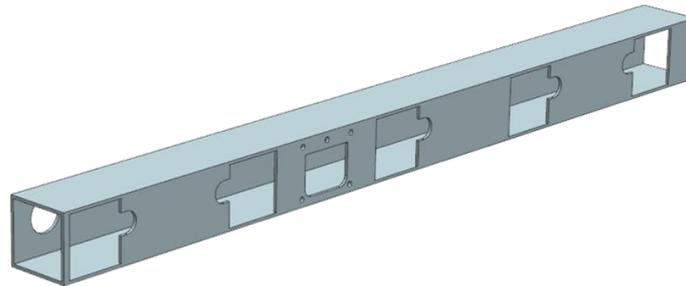


Abbildung 87: CFK-Konzept zum Balken

- Für die fünf Aufnahmen der Klammerpatronen wurde auf eine differentiale Bauweise zurückgegriffen, bestehend aus einer rechteckigen Platte mit eingepresstem gewickelten Rohr, welche durch pultrudierte Profile am Balken verklebt und eingepresst werden (Abbildung 88). Stirnseitig wurden Bohrungen für die Befestigung der Klammerpatronen mit Gewindestangen vorgesehen. Die CAD-Baugruppe hat eine Masse von 0,5 kg pro Stück.

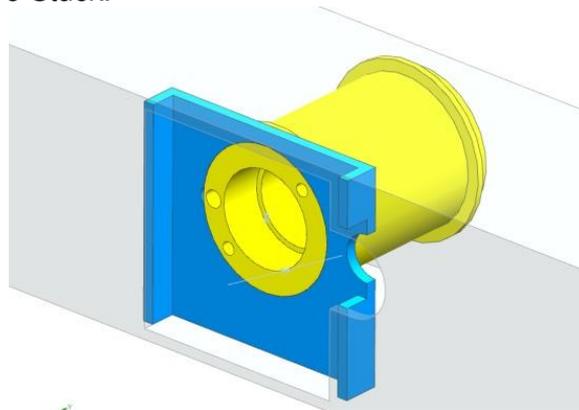


Abbildung 88: CFK-Konzept zur Aufnahme der Klammerpatronen

- Der zweiteilige Steckerkasten wurde in den Balken integriert und die äußere Geometrie sowie der Werkstoff in Absprache mit der *SMS Group* beibehalten (Abbildung 89). Ein vielversprechendes Konzept zur Reduzierung der Strukturmasse ist die Werkstoffsubstitution durch PE oder PP (0,3 kg). Die Verbindung mit dem Balken findet durch Blindnietmuttern statt.

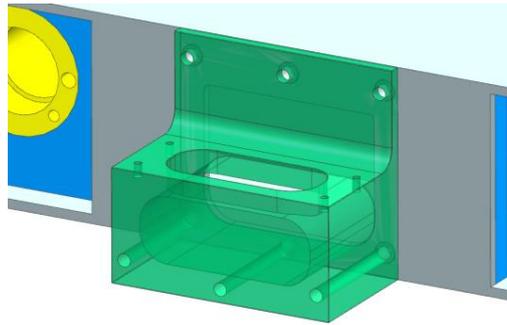


Abbildung 89: Konzept zum Steckerkasten

- Die seitlichen Krafteinleitungen wurden in Absprache mit der *SMS Group* nicht in einer CFK-Bauweise entwickelt. Aufgrund der hohen Vorspannkraft wurde entschieden weiterhin die Stahlbauweise zu verwenden. Im Konzept sind das Einpressen und das Einkleben der Krafteinleitungen in den Balken vorgesehen. Das Verstiften ist theoretisch auch möglich. Dieses Design benötigt eine längere Fase als beim Originaldesign, was bei der Abbildung 90 (rechts) zu sehen ist. Die Masse beträgt 3,4 kg pro Teil.

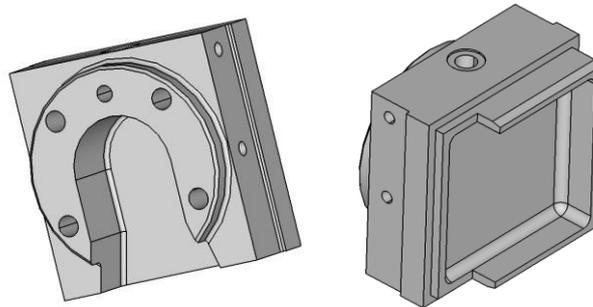


Abbildung 90: Konzept zur seitlichen Krafteinleitungen

Nach der erfolgreichen Konzipierung der einzelnen Komponenten erfolgt die Auslegung und Dimensionierung der CFK-Hubbalkenarme, wodurch die Wanddicken und Faserorientierungen jeweiligen Laminaten festgelegt werden können. Zu diesem Zweck wurde auf das analytische und das FE-Modell zurückgegriffen, die im Rahmen der Analyse des Stahlbauteils entwickelt worden sind. Die weiteren bereitgestellten Zahlen und Darstellungen basieren auf den Ergebnissen der FE-Untersuchung.

Zwecks Dimensionierung wurde eine Wanddickenvariation an einem quasi-isotropen CFK-Balken mit verschmierten Eigenschaften ($E = 60\,000\text{ N/mm}^2$, $\nu = 0,3$) durchgeführt. Zusätzlich wurden die sogenannte „Leichtbaugüte“ eingeführt κ , was das Verhältnis zwischen den spezifischen Absenkungen beider Konzepte darstellt, um den Vergleich mit der Stahlkonstruktion gewährleisten zu können.

$$\kappa = \frac{w_{WS3,St} \cdot m_{St}}{w_{WS3,CFK} \cdot m_{CFK}}$$

wobei:

- $w_{WS3,St}$ die numerische Absenkung des Stahlbalkens ist
- $w_{WS3,CFK}$ die numerische Absenkung des CFK-Balkens ist
- m_{St} die Masse des Stahlbalkens ist
- m_{CFK} die Masse des CFK-Balkens ist

Abbildung 91 zeigt beide oben eingeführten Leichtbaugüten aufgetragen über die Wanddicke des CFK-Balkens. Erkennbar ist ein leichter Anstieg der Leichtbaugüte aufgrund der hohen Absenkung bei sehr kleiner Wanddicke. Nach dem Erreichen des Maximums bei einer Wanddicke von 2 mm fallen beiden Leichtbaugüte mit unterschiedlichen Intensitäten degressiv ab.

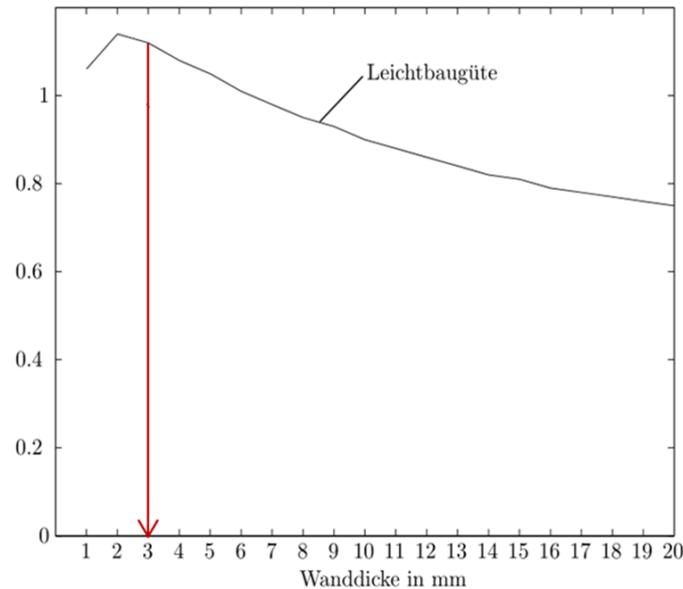


Abbildung 91: Wanddickenabhängige Leichtbaugüte und Kostengewichtete Leichtbaugüte über die Wanddicke des CFK-Balkens

Die Wanddicke des CFK-Balkens wird aus folgenden Gründen auf 3 mm festgelegt:

- Der Wert der *Leichtbaugüte* κ liegt 1,12. Damit ist die Leichtbaugüte des CFK-Balkens deutlich besser als die der Stahl-Variante.
- Eine Steigerung der Wanddicke von 2 mm auf 3 mm verbessert die Absenkung um 15 %.

Die Analyse der Richtungen der Hauptspannungen für ein homogenes Material liefert Hinweise auf die Lastpfade und daher Empfehlungen für die Faserorientierung. Die daraus, unter Berücksichtigung der beiden dimensionierenden Lastfälle, abgeleiteten Winkel betragen $+25^\circ$ und $+45^\circ$. Der Lagenaufbau wird mit diesen Winkeln variiert. Dabei wird der Einfluss unterschiedlicher Anordnungen von $\pm 45^\circ$ - und $\pm 25^\circ$ Lagen mit 1 mm Schichtdicke auf die maximale Absenkung des mittleren Werkstückes untersucht. Insgesamt ergeben sich dadurch acht Möglichkeiten eines Laminataufbaus. (Abbildung 92).

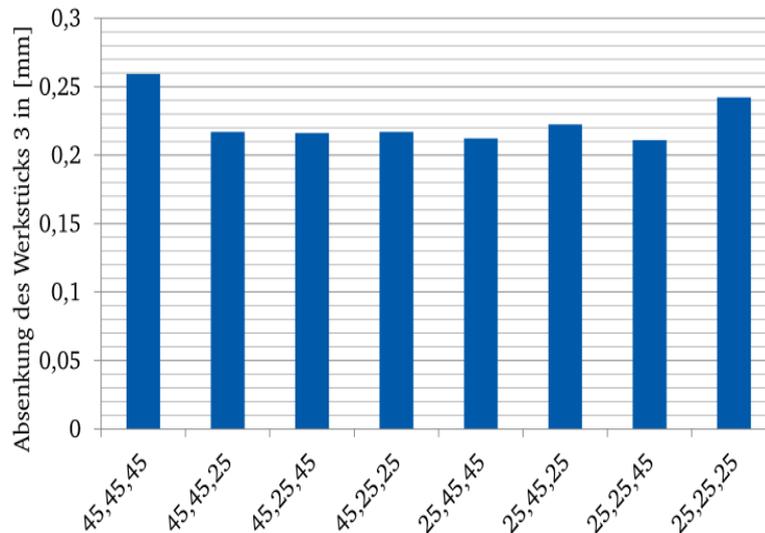


Abbildung 92: Maximale Absenkung der Werkstücke in Abhängigkeit des Laminataufbaus bei einer 3 mm Wanddicke

Die kritischen Absenkungen unterscheiden sich lediglich im hundertstel Millimeterbereich, wobei die Absenkung für den Laminataufbau von (25; 25; 45) minimal wird. Obwohl das Querschnittprofil symmetrisch ist, können die lokalen Aussparungen zu weiteren Einbauelementen Wölbspannungen verursachen. Um diese potentiellen Spannungsspitzen zu vermeiden, ist ein symmetrischer Aufbau des Laminats empfehlenswert. Dies hat nur einen geringen Einfluss auf die Absenkung. Aufgrund der einfachen Fertigung und des geringeren Verschnitts wurde der Hubbalken in als reines $\pm 45^\circ$ -Wickelbauteil gefertigt.

Die abschließende Leistungsanalyse des CFK-Balkens wurde in *ABAQUS* [27] mit einem *Composite Layup* mit einer Schichtdicke von 0,75 mm durchgeführt. Dazu wurden die Werkstoffkennwerte aus Tabelle 41 verwendet. Der Sicherheitsfaktor für die Festigkeit ergibt sich auf Basis des *Maximum Stress Theory* Kriteriums von *ABAQUS*. Dies Kriterium ist konservativ gewählt, da das Bauteil auf Steifigkeit ausgelegt ist. Die Ergebnisse aus der Tabelle 41 zeigen, dass eine Absenkung von 150 μm beim kritischen Lastfall erreicht wird. Dies liegt unterhalb der maximal tolerierbaren Absenkung von 200 μm . Die Gesamtmasse des Hubbalkens in CFK-Bauweise basierend auf den CAD-Daten beträgt 15,4 kg. Somit wurde die Masse um 64 % reduziert. Die spezifische Absenkung ist dennoch geringer als bei der Stahlvariante.

Tabelle 41: Leistungsanalyse des CFK-Bauteils

Kriterium	He / Se	T _V / T _R
CAD Gesamtmasse [kg]	15,4	
Kritische Absenkung [μm]	150	80
Sicherheitsfaktor - Festigkeit [-]	14	20
Sicherheitsfaktor - Stabilitätsanalyse [-]	342	367
Sicherheitsfaktor - Modalanalyse [-]	54	

Die Herstellung des Demonstrators fand am Fachgebiet KLuB statt. Die einzelnen Komponenten wurden bei verschiedenen Zulieferern bestellt oder eigenständig hergestellt. Die Platten und Profile (Abbildung 93, links) und Gewindestangen zur Aufnahme der Klammerpatrone sind auf dem Markt erhältlich. Das Rohr für die Aufnahme der Klammerpatrone (Abbildung 93, links) und der Balkenarm selbst (Abbildung 93, mittig), wurden am Klub mit heißhärtendem (T_g bei ca. 120° C) und kalthärtendem (T_g bei ca. 80° C) Harzen gewickelt. Die Nachbearbeitung der Komponente erfolgte teilweise extern: die Dreharbeiten

der Klammerpatroneaufnahmen wurden bei der *Fa. R.O.S. Kunststofftechnik GmbH* in Gelnhausen [37] durchgeführt, die komplizierten Profilausschnitte am Hubbalken wurden mittels Wasserstrahl bei der *Fa. Michalski & Müller GbR* in Lautertal [38] geschnitten und die Säge- und Klebearbeiten mit 2 Komponente-Konstruktionskleber genauso wie der weitere Zusammenbau (inkl. Pressverband) erfolgten am Fachgebiet KLuB.

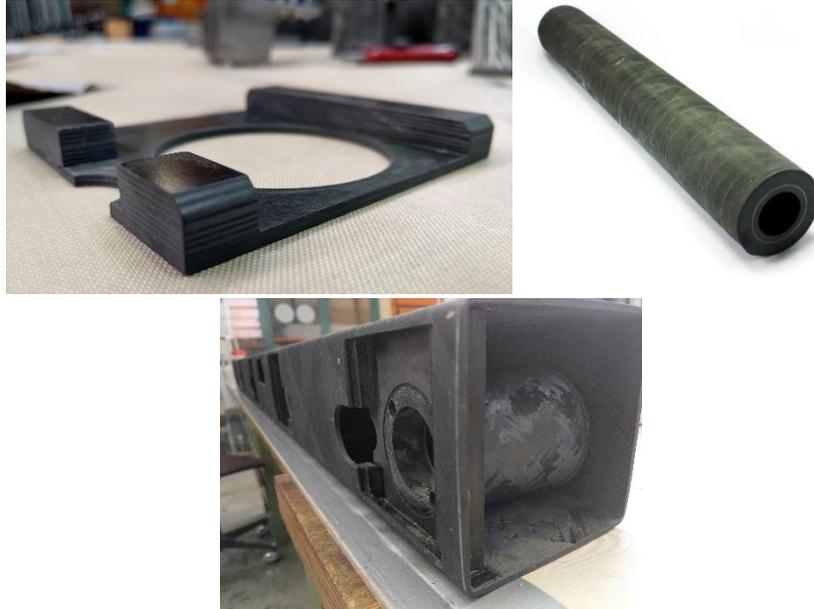


Abbildung 93: Hinblick auf die Herstellung des Demonstrators – Profile (links), Rohr zur Aufnahme der Klammerpatrone (mittig), im Balken eingebauter Zustand (rechts)

Die einzigen metallischen Komponenten, nämlich die seitlichen Krafteinleitungen (auf den Abbildung 90 und Abbildung 94 zu sehen), wurden intern hergestellt. Da die Krafteinleitungen am Demonstrator nicht eingepresst werden konnten, wurde lediglich eine Verklebung durchgeführt. Hierzu wurde ein Klebenachweis durchgeführt. Empfehlungswert wäre auch eine neue Konzipierung integrierter Krafteinleitungen.

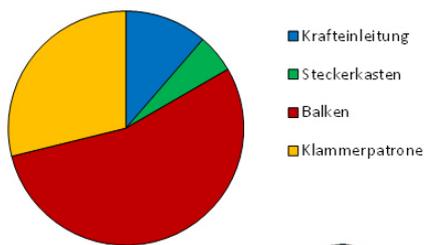
Die Gesamtmasse des Demonstrators beträgt 13,8 kg (Abbildung 94). Dies ist geringer als die Abschätzung aus dem CAD-Modell, wodurch die Reduktion 68 % Gewichtsreduzierung im Vergleich zum CAD-Modell des Stahlbauteils (43,3 kg) beträgt.



Abbildung 94: Masse des Demonstrators mit einem Steckerkasten aus Stahl

Abbildung 95 zeigt die Massenverteilungen sowohl des Stahl- als auch des CFK-Hubbalken. Durch die reduzierte Wanddicke und die geringere Dichte von CFK konnte die Masse des Hubbalkenarms um die Hälfte reduziert werden. Die Masse des Steckerkastens konnte nicht reduziert werden, da das Originalteil aufgrund von Anforderungen der *Fa. Neumayer* beibehalten werden sollte. Hier gibt es noch großes Leichtbaupotential. Bei der Aufnahmen der Klammerpatrone konnte ca. 80 % Masse eingespart werden. Lediglich die Krafteinleitungen sind schwerer geworden, da für die Fase mehr Material benötigt ist.

Massenverteilung Stahl Konzept



Massenverteilung CFK Konzept

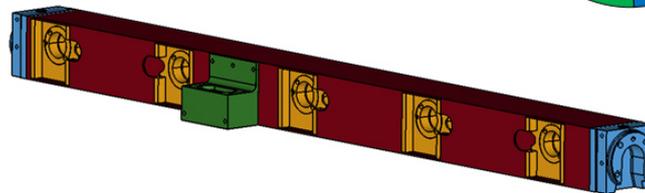
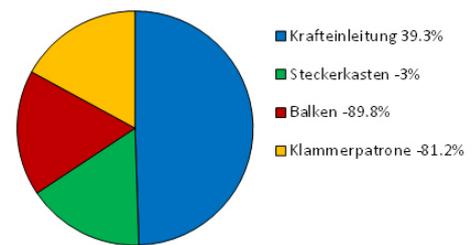


Abbildung 95: Massenverteilungen der beiden Hubbalkenkonzepte (links: Stahl; rechts: CFK)

Der Preis des Demonstrators beträgt ca. 11.5000 € und liegt somit +480 % höher als die Herstellungskosten des Serienbauteils aus Stahl. Abbildung 96 stellt die Kostenaufteilung dar. Dabei wird zwischen fünf Kategorien unterschieden:

- Die einmalige Kosten, die sich ausschließlich auf einen neuen Wickelkern mit quadratischem Querschnitt (100 mm Innendurchmesser) im Wert von 2.000 € ergeben;
- Die Materialkosten, die sowohl die Bestellung fertiger Halbzeuge als auch die Herstellung der Halbzeuge (Hubbalkenarm, Aufnahme der Klammerpatrone) inklusive der dafür notwendigen Mitarbeiterlöhne abdecken
- Interne Nachbearbeitungskosten, die nur Mitarbeiterlöhne berücksichtigen
- Externe Nachbearbeitungskosten (Drehen, Wasserstrahlschneiden), die - basierend auf Rechnungen – die gesamte Leistung bis zum Endprodukt betrachten
- Der Zusammenbau des Demonstrators mit Mitarbeiterlöhne und Materialkosten wie Kleber

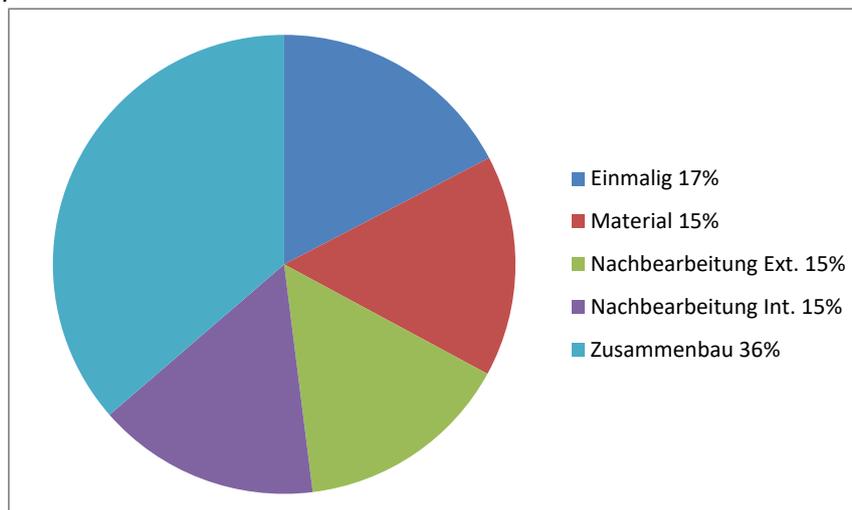


Abbildung 96: Kostenaufteilung des CFK-Demonstrators

Die Kosten für Kleinserienbauteile können durch Großmengenbestellung und die Vernachlässigung einmaligen Kosten um ca. 4.300 € senken. Dieser Zahl ist aus weiteren Anfragen an bereits mitbeteiligte KMUs und an anderen potentiellen Geschäftspartnern entstanden.

Zur Inbetriebnahme wurden weitere Anbaukomponenten wie die Klammerpatronen von der Fa. SMS Group zur Verfügung gestellt (Abbildung 97). Der Einbau fand bei der Fa. Neumayer

statt. Nennenswert ist der deutlich geringere Aufwand beim Einbau aufgrund der geringen Eigenmasse der Struktur. Während des Versuchs ist ein Problem bei der Klemmung des Balkens aufgetreten. Dies konnte nicht auf die veränderte Steifigkeit der Struktur zurückgeführt werden. Das Problem ließ sich nicht beheben. Eine Erklärung für das Verhalten konnte sowohl von der *Fa. Neumayer* als auch von der *SMS-Group* nicht gefunden werden. Weitere Versuche der *Fa. Neumayer* in Eigenregie sind zukünftig eingeplant.



Abbildung 97: Demonstrator mit zusätzlichen Komponenten für die Inbetriebnahme

7.3. Fazit

Im Rahmen des Projektes wurde erfolgreich ein neuen Hubbalken konzipiert und hergestellt (Abbildung 98). Dafür wurde auf herkömmliche Halbzeuge und Verfahren zur Fertigung von Halbzeugen zurückgegriffen. Im Vergleich zum Originalbauteil wurde eine Massenreduktion in Höhe von 68 % für eine Steifigkeit im tolerierten Bereich erreicht. Die Gesamtkosten des Demonstrators belaufen sich auf 11.500 €, wobei die Materialkosten lediglich 15% davon ausmachen. Diese Kosten können für einen Serienbauteil noch gesenkt werden. Durch seine geringere Eigenmasse kann der CFK-Hubbalkenarm langfristig rentabler als die Stahlvariante sein, da die Betriebskosten die Mehrkosten potentiell amortisieren können. Im Rahmen des Projektes wurde keine weitere vertiefte Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Weiteres Optimierungspotential liegt in der Konzipierung der seitlichen Krafteinleitungen, die zurzeit noch aus Stahl bestehen und theoretisch in die Struktur integriert werden können. Dazu gehört eine vertiefte Untersuchung der Schnittstelle zum Balken und entsprechende Nachweisführungen. Es wurde nachgewiesen, dass die umgebende Temperatur für Bauteile aus CFK unkritisch ist, und somit ist der Einsatz von CFK in der Schmiedetechnik dank Kühlschmierstoffe möglich. Beide *Fa. SMS Group* und *Fa. Neumayer* zeigten sich äußerst zufrieden mit dem Demonstrator und mit der erreichten Leistung des CFK-Designs.



Abbildung 98: CFK-Demonstrator - Hubbalkernarm

7.4. Zusatzinformationen

a. Werkstoffkennwerte - Stahl

Tabelle 42: Verwendete Werkstoffkennwerte vom Stahl S355J2G3 [39]

Kennwert	Wert
ρ [kg/mm ³]	7.85×10^{-6}
E [N/mm ²]	210
R_{min} [N/mm ²]	295

b. Werkstoffkennwerte - CFK

Tabelle 43: Verwendete Werkstoffkennwerte von einer Kohlefaser-Epoxid-Lage, STS40/LY556, Faservolumenanteil = 0,6 [30] [31] [32]

Kennwert	Wert
$E_{ }$ [N/mm ²]	144080
E_{\perp} [N/mm ²]	8916
$\nu_{ \perp}$ [-]	0.26
$G_{ \perp}$ [N/mm ²]	5557
$G_{\perp }$ [N/mm ²]	5557
$G_{\perp\perp}$ [N/mm ²]	3300
ρ [kg/mm ³]	1.57×10^{-6}
$R_{ }^+$ [N/mm ²]	1920
$R_{ }^-$ [N/mm ²]	1000
R_{\perp}^+ [N/mm ²]	40
R_{\perp}^- [N/mm ²]	150
$R_{ \perp}$ [N/mm ²]	60

c. Klebenachweis

Für den Einsatz des Demonstrators sollte einen Klebenachweis durchgeführt sein, weil die Verbindung an die Schnittstelle vom Balken zur seitlichen Krafteinleitung nur durch Klebung gewährleistet wurde (Abbildung 99). Diese Zone ist aufgrund Dehnungsunterschiede zwischen Fügeteile und Kleber, die zu lokalen Spannungsspitzen führen. Der Kleber, der eine seine geringere Zugscherfestigkeit besitzt, sieht sich dadurch gefährdet [30]. Die kritische Stelle

kann durch ihre Geometrie in drei Bereiche unterteilt werden, die getrennt nachgewiesen wurden.

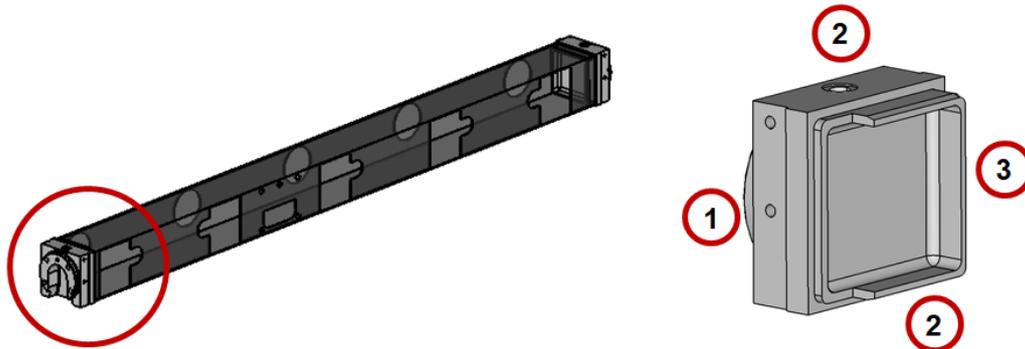


Abbildung 99: Identifizierte kritische Klebestelle

Da der Bereich 1 dimensionierend ist, werden alle Daten und Ergebnisse sich darauf einschränken. Diese kritische Verbindungsstelle besitzt eine Überlappungslänge $l_{\text{Ü}}$ von 5 mm und der betrachtete CFK-Rohrinnendurchmesser b ist gleich 100 mm. Der bei der Herstellung erzielte Klebespalt t_K beträgt 0.15 mm und wird folglich so angenommen. Die betrachteten Wanddicken sind $t_1 = 3$ mm für das CFK-Balken und $t_2 = 5$ mm für die Krafteinleitung aus Stahl. Die Steifigkeiten zum Nachweis sind $E_1 = 48\,000$ N/mm² für CFK und $E_2 = 210\,000$ N/mm² für Stahl.

Die Klebereigenschaften aus dem Datenblatt [40] hängen von der Temperatur und Fügezeit ab. Der Schubmodul G_K wurde für eine Temperatur von 50°C entnommen und beträgt 1200 N/mm². Da die Kennwerte zur Festigkeit stark vom Substrat und Umgebungsbedingungen abhängen, wurde für diesen Wert auf eine interne studentische Arbeit von 2013 am Fachgebiet KLuB zurückgegriffen, wobei die nachgewiesene Zugscherfestigkeit R_{\perp} für CFK-Platten für ähnliche Wanddicken und Laminataufbauten ca. 17 N/mm² beträgt.

Laut Eingaben von der Fa. Neumayer, findet die kritischste Zugkraft beim Lastfall T_V / T_R durch das Drehmoment am Ritzel statt und beträgt 3400 N. Durch eine Ausnutzung der Symmetrieebenen wird die Annahme auf homogene Kraftverteilung getroffen, was auf eine wirkende Kraft F von 850 N zurückführt. Damit lässt Mittlere Schubspannung $\bar{\tau}$ sich auf einem einfachen Weg statisch nachweisen:

$$\bar{\tau}_K = \frac{F}{b \cdot l_{\text{Ü}}} = 1,7 \text{ N/mm}^2$$

Der Sicherheitsfaktor ist dann 10.

Dieser Nachweis gibt eine grobe Größenordnung der Belastungsart aber ist leider nicht ausreichend, weil er die Spannungsspitzen in der Klebeschicht nicht abbildet. Dafür wurde ein elasto-statischer Nachweis nach Volkersen durchgeführt, der die Einleitung von Kräften in eine Scheibe über eine Längsurte modelliert. Die Modellierung bei einer Belastung der Fügeiteile mit Normalkräften wurde gewählt [30]. Zur Berechnung des Schubspannungsverlaufes $\tau_K = f(x)$ sind der Klebungskennzahl ρ und das Steifigkeitsverhältnis der Fügeiteile ψ eingeführt:

$$\rho = \sqrt{\frac{(1 + \psi) \cdot G_K \cdot l_{\text{Ü}}}{E_1 \cdot t_1 \cdot t_k}}$$

und

$$\psi = \frac{E_1 \cdot t_1}{E_2 \cdot t_2}$$

Der Schubspannungsverlauf $\tau_K = f(x)$ ist wie folgt berechnet und für den kritischen Bereich 1 in der Abbildung 100 dargestellt. Die Spannungsspitzen betragen 8,9 N/mm² und der Sicherheitsfaktor ist daher 1.91. Die Struktur ist daher an die Stelle als nicht versagenskritisch einzustufen. Aufgrund der hohen erreichten Sicherheitsfaktoren wurde keine weitere und komplexere Modellierung der Spannungsverteilung in der Klebeschicht vorgenommen.

$$\tau_K = \frac{\rho}{2} \left[\frac{\cosh(\rho x / l_{\bar{U}})}{\sinh(\rho / 2)} - \frac{(1 - \psi) \cdot \sinh(\rho x / l_{\bar{U}})}{(1 + \psi) \cdot \cosh(\rho / 2)} \right] \cdot \frac{F \cdot t_1}{b \cdot l_{\bar{U}}^2}$$

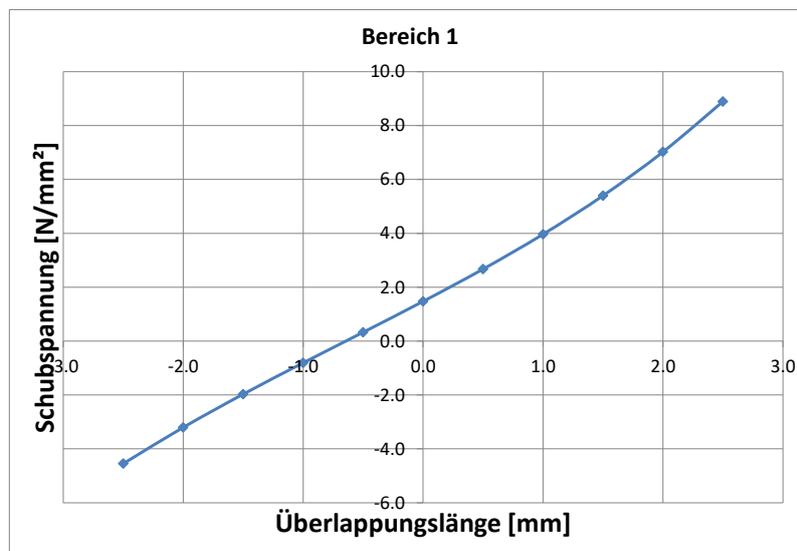


Abbildung 100: Spannungsverlauf in der Klebeschicht für den kritischen Bereich der Fügestelle

Wirksame und effektive Konstruktionsmaßnahmen zur Spannungsspitzenvermeidung wie eine optimale Klebeschichtdicke oder Oberflächenrauheit wurden während der Herstellung berücksichtigt. Erfahrungsgemäß sind Klebungen auf einem entsprechend niedrigerem Lastniveau gebrauchstüchtig [30]. Zum Vollständigkeitshalben werden die Spannungsspitzen in der Realität durch die Betrachtung der Plastizität des Klebers, was nichtlineare Spannungs-Verzerrungsverhalten aufweist, umgelagert. Die herrschende Druckspannung an den beiden Balkenenden könnte als Passung dienen und die Spannungen verringern. Dazu kann der positive Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Festigkeit bei der tatsächlichen Betriebstemperatur von ca. 43°C erwähnt werden (Abbildung 101). Zusätzlich kann eine potenzielle Kompensierung durch Kriech- und Relaxationsvorgänge stattfinden.

Zugscherfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur (ISO 4587) (typische Mittelwerte)
Härtung: (a) = 7 Tage/23°C; (b) = 24 Stunden/23°C + 30 Minuten/80°C

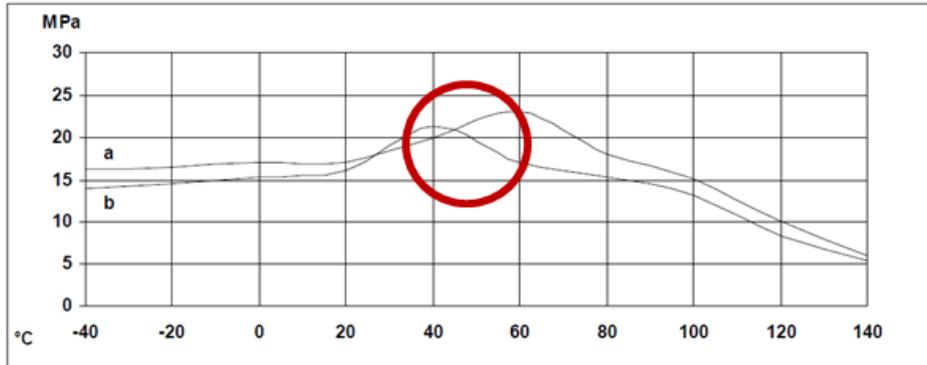


Abbildung 101: Zugscherfestigkeit des Klebers auf die Temperatur aufgetragen [40]

8. Untersuchung der Umgebungseinflüsse auf CFK-Komponenten

8.1. Motivation

Ziel des Arbeitspakets ist, zu eruieren, welchen Einfluss typische Umgebungsmedien auf die Festigkeit von Klebungen und Matrixwerkstoffen haben. Im Allgemeinen verursacht die Feuchtigkeit nicht vernachlässigbare Eigenschaftsänderungen von Matrixsystemen. Die wichtigsten Änderungen sind unter anderen eine sinkende Glasübergangstemperatur, eine Massezunahme sowie eine Zunahme der Bruchdehnung und eine sinkende Festigkeit [30]. Daher ist neben der Temperatur auch die Feuchteaufnahme für den Festigkeitsnachweis entscheidend.

Um den Einfluss von Umgebungsmedien auf die Festigkeit zu untersuchen, wird die Querkzugfestigkeit von Laminaten auf Basis von Epoxidharzsystemen untersucht. Bei einem ebenen Spannungszustand einer UD-schicht ist der Bruchmodus A, was einer Querkzugbeanspruchung entspricht, bei einem Festigkeitsnachweis entscheidend (Abbildung 102).

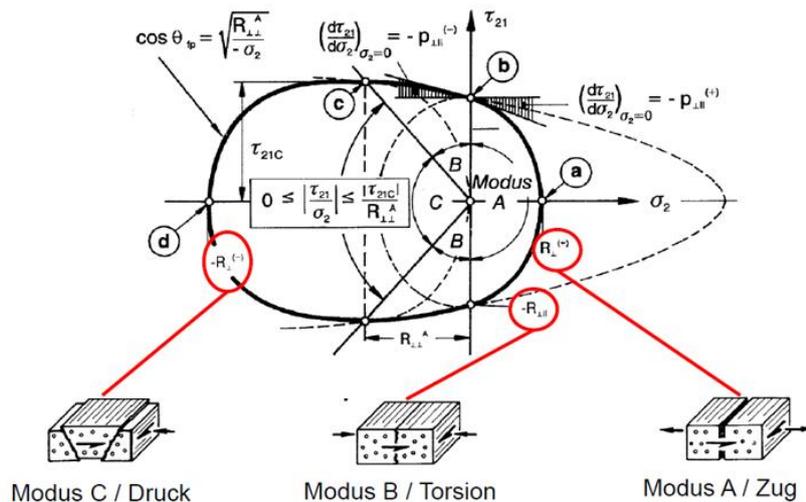


Abbildung 102: Bruchkurve für Zwischenfaserbruch einer UD-Schicht im ebenen Spannungszustand – Bild überarbeitet aus [30]

Die Ermittlung von Grundfestigkeiten erfolgt durch mechanische Versuche an einer Zug-Druck-Torsion (ZDT) Maschine. Die Probekörper sind gewickelte Rohre mit Umfangslagen, damit ausschließlich die Matrix beansprucht wird (Abbildung 103).

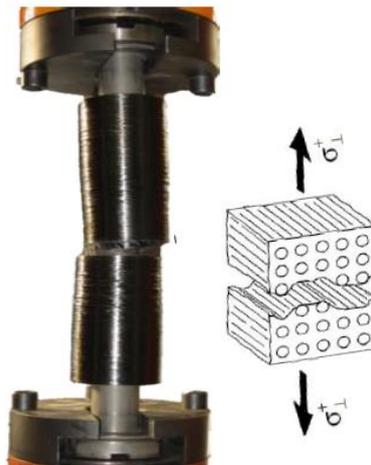


Abbildung 103: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Querkzugfestigkeit – Bild überarbeitet aus [30]

Im vorherigen Forschungsvorhaben [41] wurde bereits der Einfluss von Kühlschmierstoff (KSS) auf CFK mit duroplastischer Matrix untersucht. Dabei wurden in Tauchbad und Nebelkammer eingelagerte Probekörper aus zwei unterschiedlichen Epoxidharztypen (anhydritisch und aminisch heißhärtend) untersucht. Die Querkzugfestigkeit wurde für KSS auf Mineralöl- und Esteröl-Basis für unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten ermittelt und mit den Werten von Wasser als Referenzmittel verglichen. Dabei wurden eine Sättigung der Feuchtigkeitsaufnahme nach 150 Tagen und sowie ein Abfall der Querkzugfestigkeit festgestellt, wobei die Einlagerung im Tauchbad bei 52,5°C den Faktor 9,5 zu einer äquivalenten KSS-Exposition bei Raumtemperatur (RT) ergab. Als Fazit kann festgehalten werden, dass kein Unterschied zwischen dem Einfluss von Wasser und von KSS auf die Querkzugfestigkeit nachgewiesen werden konnte und eine starke Exposition zu KSS innerhalb der Bauteillebensdauer zu einer Abnahme der Querkzugfestigkeit von mehr als 50 % führt.

Im Rahmen des gegenwärtigen Forschungsvorhabens wurden die am Fachgebiet KLuB zur Verfügung stehenden Versuchsanlagen genutzt, um den Einfluss von Minimalschmierstoffen (Alkohole, Fette, Öle) und salzhaltigen Schmiermitteln auf Epoxidharzsystemen zu untersuchen. Das Ziel der Untersuchung ist dabei den maximalen Abfall der Querkzugfestigkeit quantifizieren zu können.

8.2. Untersuchung von MMS-Einfluss

Der Einfluss folgender Schmierstoffe auf die Querkzugfestigkeit wurde untersucht:

- Lubrioil E47 (Esterbasis)
- Lubrifluid F110 (Fettalkohol)
- Graconol (Ethanol)
- ProCut 56 (Pharmazeutisches Weißöl)
- BONDERITE L-FG F 497 (Graphitdispersion der Umformtechnik)

Hierbei wurde lediglich das Schmiermittel der Umformtechnik in einer Nebelkammer eingelagert (Abbildung 104). Die Probekörper wurden im Tauchbad bei RT für eine Dauer von 352 Tagen eingelagert, die Einlagerungsdauer in der Nebelkammer betrug 108 Tage bei RT. Zusätzlich wurden zwei Arten von Referenzprobekörpern vorgesehen, nämlich eine trocken gelagerte Probe sowie eine im destillierten Wasser eingelagerte Probe.



Abbildung 104: Einlagerungsbedingungen – Tauchbad (links) & Nebelkammer (Rechts)

Die Daten der eingelagerten Probekörper, die am Fachgebiet KLuB hergestellt wurden, lauten:

- Material: Epoxyharz - anhydritisch heißhärtend
- Faser: STS40
- Harz / Härter: LY556 / 917
- Faservolumanteil: 55 %

Im Rahmen der Untersuchung diente der standardisierte Zugversuch an CFK-Rohrkörpern nach ASTM D5450 als Untersuchungsmethode. Zur Untersuchung wurde die am Fachgebiet KLuB vorhandenen ZDT-Versuchsanlage verwendet (Abbildung 105). Die geprüften Rohrkörper bestehen lediglich aus Umfangslagen (88,9° Winkel zur Längsachse).

Dehnmessstreifen (DMS) vom Typ 1-LY11-6/120 (K-Faktor: 2.09 + 1.0 %) und Lötstützpunkte LS212 wurden zur Ermittlung der Verzerrungen eingesetzt. Die Auswertung der Proben erfolgte durch ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm, aus dem sich die resultierenden Festigkeiten ablesen ließen. Zudem wurde eine optische Analyse zur Ermittlung von potentiellen Ablagerungen und zur Untersuchung der Bruchstelle durchgeführt.

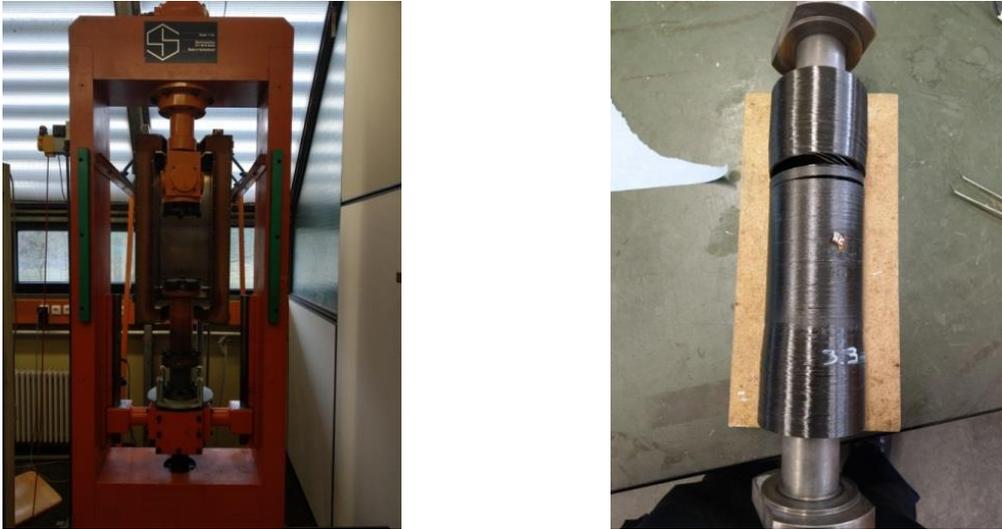


Abbildung 105: ZDT- Maschine (links) und Probe (rechts)

12 Probekörper pro Einlagerungsbedingung wurden mechanisch untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 106 und in Tabelle 44 aufgetragen. Die Stoffe, die zum größten Abfall der Querkzugfestigkeit führen, sind Wasser, Ethanol und Graphitdispersion. Der maximal beobachtete Festigkeitsabfall beträgt 12,4 %. Dieser Wert kann als maximal angenommen werden, da nach [41] der Festigkeitsabfall asymptotisch verläuft und sein Maximum nach ca. 150 Tagen erreicht wird. Wie beschrieben war die Einlagerungszeit mit 352 Tagen deutlich länger. Bemerkenswert ist, dass eine Einlagerung in einer Nebel- bzw. Sprühkammer zu einem schnelleren Abfall der Festigkeit führt.

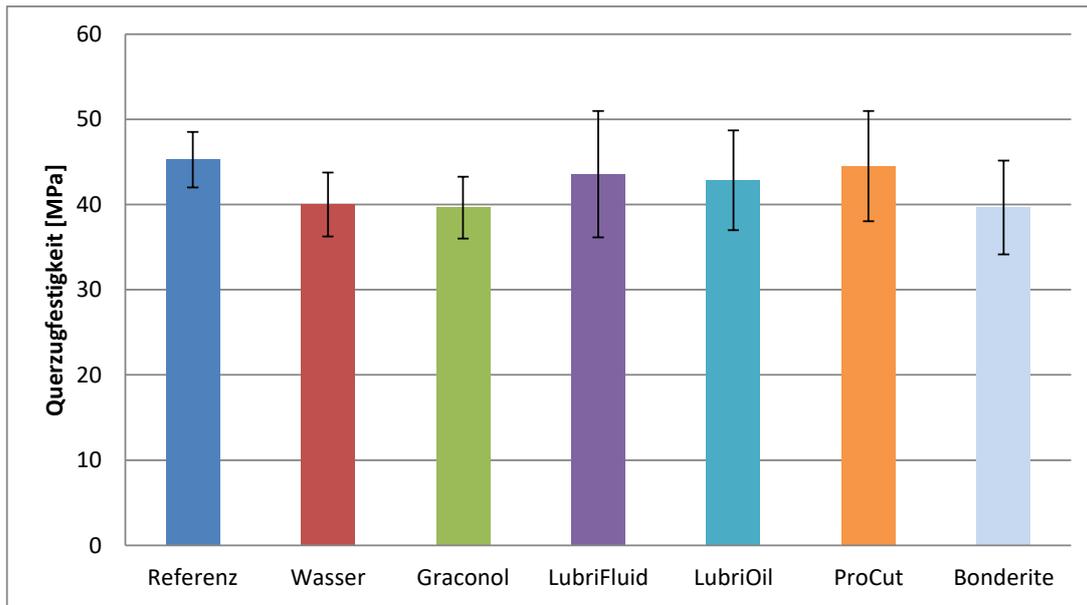


Abbildung 106: Resultierende Querzugfestigkeiten der eingelagerten Probekörper

Tabelle 44: Querzugfestigkeitsvergleich für unterschiedliche Einlagerungsbedingungen

Kriterium	Referenz	Wasser	Graconol	LubriFluid	LubriOil	ProCut	Bonderite
Min. [N/mm ²]	42,7	32,4	33,8	30,6	34,7	33,5	32,4
Max. [N/mm ²]	49,9	43,8	46,0	60,1	51,5	53,4	50,3
Mittelwert [N/mm ²]	45,3	40,0	39,6	43,6	42,8	44,5	39,7
Δ [%]	0	-11,7	-12,6	-3,8	-5,5	-1,8	-12,4

8.3. Fazit

Die Festigkeitsabfall der Querzugfestigkeit von Epoxidharzsystemen wurde für sieben unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ermittelt, wobei der maximale feststellbare Abfall der Festigkeit bei ca. 12,4 % liegt. Es konnte kein Unterschied zwischen dem Einfluss von Wasser, MMS und Ethanol auf die Querzugfestigkeit festgestellt werden. Diese Ergebnisse sind mit denjenigen vom Vorgängerprojekt konsistent. Dort wurde ein Abfall der Festigkeit von 14 % bis 20 % bei KSS festgestellt und, wenn die Matrix gesättigt ist, ein maximaler Abfall der Festigkeit um 50 % beobachtet [41].

Nimmt man an, dass der Unterschied im Einfluss der einzelnen eingesetzten KSS und MMS auf CFK vernachlässigbar ist, dann liegt die Vermutung nahe, dass nach 250 Tagen Einlagerungsdauer unter realen Bedingungen ebenfalls der Festigkeitsabfall gegen einen asymptotischen Wert von etwa 20 % läuft, da sich trotz unterschiedlich langer Einlagerungsdauer die Festigkeitswerte auf ähnlichem Niveau befinden [41].

Trotz des drastischen Abfalls der Festigkeit der Matrix sind für die Entwicklung von CFK-Komponente keine Einschränkungen zu berücksichtigen. Zunächst spiegeln die

Einlagerungsbedingungen die realen Betriebsbedingungen nicht wieder. Dazu sind die angesprochenen CFK-Komponenten für dynamische Bauteile vorgesehen, wobei die Festigkeitsnachweise durch ihre hohen Sicherheitsfaktoren unproblematisch sind und die Glasübergangstemperatur nicht erreicht wird. Ein Festigkeitsabfall der Matrix ist bei fasergerechten Konstruktionen unkritisch.

9. Fazit

Abschließen soll ein kurzer Überblick über die im Antrag angestrebten wissenschaftlichen Fragestellungen gegeben werden.

- Berücksichtigung thermischer Einflüsse auf Schnittstellen zwischen CFK und Metallen
Hierzu wurden keine vertieften Untersuchungen durchgeführt. Erste numerischen Untersuchungen am x-z-Aufbau zeigten allerdings, dass es bei größeren Temperaturdifferenzen zu Zwangskräften kommen kann. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Schnittstellen (Führungsschienen) als fester Verbund modelliert wurden. Ein „Setzen“ oder „Rutschen“ der Verbindungen ist allerdings in der Realität möglich. Darüber hinaus treten ähnliche Probleme bei der ursprünglichen Konstruktion aus Aluminium in Kombination mit Stahl ebenfalls auf. Ebenso wurde im Entwicklungsprozess in Absprache mit Datron klar definiert, dass die thermischen Einflüsse neben der Massenreduktion und der Steifigkeit eine untergeordnete Rolle spielen.
Für den Spindelstock wurden im Entwicklungsprozess die thermischen Lasten nicht weiter berücksichtigt, da hier von Chiron der Einsatz von Spindel mit gekühltem Flansch angestrebt wird.
- Anpassung und Entwicklung geeigneter Krafterleitungskonzepte
Am x-z-Aufbau wurden eingeklebte Gewindestangen mit nachträglich eingebrachtem Innengewinde zur Befestigung der Führungsschienen genutzt. Ansonsten wurden die Flächen zur Aufnahme der Führungskomponenten im Vergleich zum konventionellen Aufbau nicht anders bearbeitet. Die Spindelaufnahme wurde vollflächig verklebt und um die Klebschicht gegen Schälbelastungen zu schützen zusätzlich verschraubt.
- Evaluierung der richtungsabhängigen Dämpfung von CFK und von Klebverbindungen bei der Verbesserung des dynamischen Verhaltens
Die Dämpfung wurde nicht explizit richtungsabhängig evaluiert, sondern in der experimentellen Modalanalyse nachgewiesen.
- Auswirkungen der geringeren Masse auf das Prozessverhalten
Dies wurde am Beispiel des x-z-Aufbaus mit Versuchen zum Portalnicken untersucht.
- Möglichkeit der Erzeugung mehrdimensional gekrümmter Flächen aus ebenen CFK-Halbzeugen
Hierzu wurden keine Untersuchungen durchgeführt. Aufgrund der gewählten Demonstratoren haben sich keine Anwendungsfälle ergeben.

- Überprüfung des Einflusses von KSS auf Klebungen und thermoplastische Matrices
Die Untersuchungen wurde in abgewandelter Form durchgeführt. Es wurde der Effekt von MMS auf die Steifigkeit und Festigkeit von ZDT-Probekörpern untersucht.

Angestrebte Forschungsergebnisse

Folgende Kriterien wurden aus technischer Sicht untersucht, um den Nachweis zu erbringen, dass durch die Verwendung von CFK die Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen gesteigert werden kann.

- höhere Antriebsdynamik durch geringere Massen
(größere Beschleunigungen möglich, niedrigere Taktzeiten realisierbar)
Dies wurde sowohl am Beispiel des x-z-Aufbaus als auch am Hubbalkenarm demonstriert. Beim x-z-Aufbau konnte eine geringeres Portalnicken bei gleicher Beschleunigung festgestellt werden. Im Umkehrschluss sind bei gleichbleibenden Bearbeitungsqualitäten höhere Beschleunigungen möglich.
Beim Hubbalkenarm sind theoretisch höhere Beschleunigungen möglich.
Entsprechende Versuche konnten allerdings nicht durchgeführt werden, da die Versuchsanlage bei einem Kunden der SMS-Group steht. Hier war eine Untersuchung der Taktzeitverringerung und die damit einhergehende höhere Beschleunigung nicht möglich.
- Erhalt oder Steigerung der Bearbeitungsgenauigkeit
(höhere dynamische Steifigkeit bei bessere Dämpfungseigenschaften)
Dies wurde am am Beispiel des x-z-Aufbaus demonstriert. Beim x-z-Aufbau konnte eine geringeres Portalnicken (bis zu 4 µm) bei gleicher Beschleunigung festgestellt werden.
- mögliche Verbesserung der Prozessstabilität
(Verringerung von Rattermarken, Erhöhung der kritischen Eigenfrequenzen, Erhöhung des Zeitspanvolumens)
Am Beispiel des x-z-Aufbaus konnte folgendes nachgewiesen werden: Erhöhte Zustellung und damit Erhöhung des Zeitspanvolumens in einem Drehzahlbereich von $n = 29.000 - 32.000$ U/min höhere für die CFK-Variante. In diesem Drehzahlbereich sind dementsprechend die Rattermarken verringert. Im Rahmen der Modalanalyse konnten eine Erhöhung der Eigenfrequenzen und der modalen Dämpfung nachgewiesen werden.
- Ausnutzung von Sekundäreffekten
(leichtere und kostengünstigere Antriebe oder Führungen)

10. Ergebnistransfer

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden fortlaufend den Mitgliedern des PA sowie dem VDW durch Sachstandsberichte präsentiert. Die Mitarbeiter der beteiligten Unternehmen bekamen somit schon während der Laufzeit ständig neue Erkenntnisse aus dem Bereich der CFK-Konstruktion und wurden für dieses Thema sensibilisiert.

Zur weiteren Publikation sind/wurden folgende Maßnahmen geplant/durchgeführt:

- Veröffentlichung in der wt-online (durchgeführt)
- Veröffentlichung im International Journal of advanced manufacturing (in Planung)
- Veröffentlichung des Abschlussberichts auf der Institutshomepage (nach Freigabe)
- Präsentation der Demonstratoren im Rahmen von Unternehmensbesuchen

Darüber hinaus wurde während der Projektlaufzeit einer Vielzahl von Studenten im Rahmen von Abschlussarbeiten, Seminaren und der Tätigkeit als studentische Hilfskraft Einblick in das Projekt gegeben.

▪ Durchgeführte Transfermaßnahmen:

Maßnahme	Erreichte Ziele	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	Präsentation des Projektstandes, Diskussion des weiteren Vorgehens	1. PA Sitzung an der TU Darmstadt	07.06.2017
		2. PA Sitzung bei der Firma DATRON AG	11.10.2017
		3. PA Sitzung bei der CHIRON Werke GmbH & Co KG in Tuttlingen	10.04.2018
		4. PA Sitzung an der TU Darmstadt	11.09.2018
		5. PA Sitzung an der TU Darmstadt	22.05.2019
		6. PA Sitzung an der TU Darmstadt	24.09.2019
Treffen des VDW	Präsentation des Projektstandes	AK Sitzung in Schlierbach	04.04.2017
		AK Sitzung in Köln	17.10.2017
		AK Sitzung bei der DATRON AG in Darmstadt	12.04.2018
		AK Sitzung bei Grob-Werke GmbH & Co. KG in Mindelheim	27.10.2018
		AK Sitzung bei Trumpf in Nettlingen	09.04.2019
		AK Sitzung bei der CHIRON Werke GmbH & Co KG in Tuttlingen	08.10.2019
Studentische Arbeiten	Ausbildung künftiger Ingenieure an aktuellen Forschungsfragen	Abschlussarbeiten, Forschungsseminare, Advanced Design Projects	3 x ADP; 4 x Bachelorarbeit; 2 x Masterarbeiten
Wissenschaftliche Veröffentlichungen	Präsentation wichtiger Detailergebnisse	Paper in Fachzeitschriften	WT-Online 10/2018

▪ Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
----------	------	------------	----------------

Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	Präsentation des letzten ausstehenden Teilarbeitspakets	Coronabedingt Online	Abschlussstreffen des PbA nach Durchführung der messtechnischen Untersuchungen des letzten Demonstrators. Dieser konnte erst nach Projektlaufzeitende an Chiron übergeben werden. Bedingt durch die Covid-19-Pandemie kam es zu Lieferschwierigkeiten bei einem Zulieferer. Dadurch konnte der Einbau in die Versuchsmaschine nur verzögert stattfinden. Die Untersuchungen sind terminiert und die Vorstellung der Ergebnisse wird in Q4/2020 stattfinden. Sämtliche anderen Projektergebnisse wurden sowohl mit dem PbA als auch im AK V des VDW diskutiert
Dialog mit der Industrie, Einbindung interessierter Unternehmen außerhalb des PA	Information über Tätigkeiten, Diskussion über Forschungs-/Wissensbedarf und mögliche Integration in Forschungsaktivitäten	Besuch von Fachmessen, Industriebesuche	Aktuell finden aufgrund der Covid-19-Pandemie keine Fachmessen statt. Ebenso sind Industriebesuche nur sehr eingeschränkt möglich. Nach Projektende konnten die Ergebnisse bereits auf dem Festkolloquium des PTW im Rahmen von Versuchsfeldführungen präsentiert werden.
Präsentation des Projektes mittels Fachvorträgen	Erhöhung der Sichtbarkeit, Sensibilisierung für das Thema	Konferenzen, sowohl eigene als auch externe	Bedingt durch die Coronapandemie finden die Konferenzen nicht statt. Geplant war die Präsentation der Ergebnisse auf der HSM Conference in Darmstadt. Diese ist auf 2021 verschoben.
Wissenschaftliche Veröffentlichungen	Präsentation wichtiger Detailergebnisse	Paper in Fachzeitschriften	Die Einreichung der Artikel erfolgt erst nach der Auswertung der Messergebnisse. Folgende konkrete Veröffentlichungen sind geplant: Journal of advanced manufacturing technology; Einreichung Q4 2020 WT- Online 01/2021

11. Verwendung der Zuwendung

Tabelle 45: Verwendung der Zuwendung über die gesamte Projektlaufzeit

Forschungsstelle	Personenmonate wiss.- techn. Personal	Ausgaben für Gerätebeschaffung in €	Ausgaben für Leistungen Dritter in €
PTW	24	0	0
KLuB	24	0	0
Summe	48	0	0

12. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufgrund der eingeschränkten Erfahrung mit dem Einsatz von Faser-Kunststoffverbunden (FKV) innerhalb der Werkzeugmaschinenindustrie ist es lohnenswert die konstruktiven Möglichkeiten sowie das hohe Leichtbaupotential infolge der hohen spezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten zu untersuchen. Die Auslegung und Herstellung der Demonstratorbauteile leistet hierbei einen entscheidenden Beitrag zur Steigerung der Akzeptanz von FKV im Umfeld von Werkzeugmaschinen.

Um die besonderen Anforderungen im Betrieb zu untersuchen wird die Exposition mit Minimalmengenschmierung untersucht. Ziel ist es den Einfluss auf die Steifigkeiten und Festigkeiten von CFK-Probekörpern zu ermitteln und somit die Eignung nachzuweisen. Die erstellten Simulationen und Konzepte auf Basis von Halbzeugen erleichtern die zukünftige Auslegung von FKV-Bauteilen in Differentialbauweise. Insbesondere die Verwendung von leicht zu beziehenden und üblichen Halbzeugen in Kombination mit gut beherrschbarer Fügetechnik senkt den Aufwand für kommende Entwicklungen im Werkzeugmaschinenbereich. Die Arbeiten werden als zwingend notwendig und vom geleisteten Aufwand als angemessen angesehen.

13. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Im Rahmen des Projekts wurden drei Demonstratoren in CFK-Halbzeugbauweise erfolgreich umgesetzt. Hierbei kamen lediglich Fertigungstechniken und Halbzeuge zum Einsatz, die ohne größeren Aufwand in einem Unternehmen, das zuvor keine FKV-Fertigung oder -Verarbeitung betrieben hat, implementiert werden können. Die Verwendung vorgefertigter Halbzeuge, die mit Hilfe einfacher Lehren verklebt werden, ist ohne nennenswerte Investition in eine eigene FKV-Werkstatt möglich und somit auch für KMU eine wirtschaftlich rentable Möglichkeit in die Fertigung von FKV-Bauteilen einzusteigen. Im Projekt wurde zusätzlich darauf geachtet, dass die Krafteinleitungen einfach herzustellen sind. Im Projekt wurden

dafür zwei verschiedene Konzepte betrachtet. Einerseits die Variante Gewindestangen einzukleben, um Komponenten, wie z.B. Führungsschienen, zu befestigen. Andererseits die Möglichkeit Gewinde direkt in CFK zu schneiden. Dies ist für niedrige belastete Verbindungen geeignet.

Zusätzlich wurde die Untersuchung des Einflusses von Umgebungsmedien auf die Steifigkeit und Festigkeit von ZDT-Probekörpern weitergeführt. Hierbei konnte in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus dem Vorgängervorhaben bestätigt werden, dass die Exposition von CFK gegenüber KSS oder MMS bei fasergerechter Konstruktion der Komponenten unkritisch ist. Hierdurch wird bestätigt, dass die industrielle Anwendungsmöglichkeit von FKV durch den Einsatz von KSS, MMS, und den untersuchten Schmierstoffen aus der Umformtechnik nicht eingeschränkt wird.

Der x-z-Aufbau (-35 % Baugruppenmasse) ist eine plattenförmige Struktur. Die Halbzeuge wurden vollflächig verklebt. Die Führungsschienen wurden mit eingeklebten Gewindeeinsätzen in der Struktur befestigt. Untersuchungen der Prozessstabilität haben gezeigt, dass mit dem CFK-Aufbau höhere Zustellungen möglich waren. Zusätzlich konnte die Dämpfung erhöht werden. Dies zeigt, dass die Bearbeitungsparameter durch die Verwendung von CFK nachhaltig gesteigert werden können. Die Bauweise kann auf Maschinenschlitten und plattenförmige Primärstrukturen von Werkzeugmaschinen angewandt werden.

Der Spindelstock eines Doppelspindlers wurde als eine schalenförmige Struktur optimiert. Die CFK-Bauweise führt zu einer Reduzierung der Strukturmasse um 66 % und einer Erhöhung der spezifischen Steifigkeit um 40 %. Wie bei dem x-z-Aufbau, kann diese Bauweise ebenso auf plattenförmige Primärstrukturen von Werkzeugmaschinen angewandt werden, wobei der wirtschaftliche Nutzen solcher Bauweise bei komplexem Aufbau und Belastungen an seine Grenzen stoßen kann.

Insbesondere in diesem Bericht wurde die Vorgehensweise bei der Auslegung und Konzeption der CFK-Demonstratoren gezeigt. Die dargestellte Vorgehensweise kann so direkt bei KMU implementiert werden, um CFK-Komponenten aus vorgefertigten Halbzeugen zu entwickeln.

Im Rahmen des Projektes wurde erfolgreich einen neuer Hubbalkenarm konzipiert, hergestellt und in Einsatz gebracht. Im Vergleich zum Originalbauteil wurde eine Massenreduktion in Höhe von 68 % für eine Steifigkeit im tolerierten Bereich erreicht. Im Gegensatz zu den anderen Demonstratoren wurde aufgrund der Wirtschaftlichkeit auf das Wickelverfahren zu Herstellung des Demonstrators zurückgegriffen.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Schürmann, E. Abele und M. Klimach, „Kohlenstofffasern inspirieren den Werkzeugmaschinenbau,“ *forschen: Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität Darmstadt*, p. 68–71, 2011.
- [2] N.N., Studie von Roland Berger und des VDMA: „Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen – Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau“, 2012.
- [3] Y. Karpat und N. Polat, „Mechanistic force modeling for milling of carbon fiber reinforced polymers with double helix tools,“ *CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 62*, pp. 95-98, 2013.
- [4] A. Sadek, H. Attia, M. Meshreki und B. Shi, „Characterization and optimization of vibration-assisted drilling of fibre reinforced epoxy laminates,“ *CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 62*, pp. 91-94, 2013.
- [5] A. V. Jens Peter Wulfsberg, K.-H. Wurst, S. Grimske, C. Batke und T. Heinze, „Modularity in small machine tools,“ *Production Engineering, Volume 7*, pp. 483-490, 2013.
- [6] H.-W. Hoffmeister und A. Gerdes, „Development and design of micro machine tool components via numerical simulation,“ *Production Engineering, Volume 7*, pp. 527-533, 2013.
- [7] „LaFT Helmut-Schmidt-Universität Hamburg,“ [Online]. Available: http://www.hsu-hh.de/laft/index_vjZ42aPxtfMBdnxz.html.
- [8] B. Bhandari, G.-Y. Lee, D. Choi, J. Kim und S.-H. Ahn, „18th International Conference on composite materials,“ in *Development of CFRP precision gantry beams for 11th generation LCD panel manufacturing*, 2011.
- [9] P. H. Nebeling, Handout zum Thema „Leichtbau bei Werkzeugmaschinen“, Hochschule Reutlingen, 2012.
- [10] P. H. Nebeling, „CFK-Pinolen bieten der Zerspanung Ansätze für Verbesserungen,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/konstruktion/konstruktionselemente/articles/393657/>.
- [11] „IWF Technische Universität Berlin,“ [Online]. Available: <http://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Projekte/FVK-Bandage.pdf>.
- [12] „IWF Technische Universität Berlin,“ [Online]. Available: https://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Projekte/Adaptronik_Flyer_07.pdf.
- [13] „Fraunhofer IWU,“ [Online]. Available: http://www.iwu.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/wzm_und_produktionssysteme/CFKQuerbalcken.html.
- [14] „Schunk GmbH & Co. KG,“ [Online]. Available: http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/LCx_Highlights_2013-04_DE.pdf.
- [15] „Vogel Business Media GmbH & Co. KG,“ [Online]. Available: <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/werkstoffe/verbundwerkstoffe/articles/248802/>.
- [16] „Blum-Novotest GmbH,“ [Online]. Available: <http://www.blum-novotest.de/de/messkomponenten/produkte/messtaster/tc53-tc63.html>.
- [17] „Hainbuch GmbH,“ [Online]. Available: <http://www.hainbuch.com/de/startseite/produkte/spannfutter/leichtbau-spannfutter-aus-carbon/toplus-futter-axzug-cfk.html>.
- [18] „R+W Antriebselemente GmbH,“ [Online]. Available: <http://www.rw-kupplungen.de/news/fachbeitraege/08/>.
- [19] W.-G. Drossel, „Vortragsreihe "Energieeffiziente Produktion - Forschung und Praxis",“ in *Energieoptimale Strukturen durch Leichtbau und Mechatronik*, 2013.
- [20] „Datron AG: DATRON M10 Pro,“ 2017. [Online]. Available: https://www.datron.de/de_de/cnc-fraemaschinen/maschinen/m10-pro.html. [Zugriff am 08 10 201].
- [21] D. Beyer, „Entwicklung und Konstruktion eines z-Achsschiebers für eine Portalfräsmaschine in der HPC-Zerspanung von Leichtmetallen,“ Masterthesis PTW TU Darmstadt, Darmstadt, 2016.
- [22] R. Rahäuser, „RAHÄUSER, R.: Untersuchung des statischen und dynamischen Strukturverhaltens eines Portalroboters sowie dessen Modellbildung in ANSYS,“ Diplomarbeit PTW TU Darmstadt, Darmstadt, 2009.

- [23] E. Abele, F. Ali, A. Bretz, I. Lorenz, F. Schulte, A. Sperling und B. Tichi, „Einsatz von CFK-Komponenten in Werkzeugmaschinen - Entwicklung eines Schlittens einer Portalfräsmaschine.“ *wt Werkstattstechnik online*, pp. S. 718-723, 2018.
- [24] V.-G. E. K. Vertrieb, VDI 2225 Blatt 3: Konstruktionsmethodik, Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, Technisch-wirtschaftliche Bewertung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1998.
- [25] I. f. Verbundwerkstoffe, *Interne Tagung*.
- [26] K. GmbH. [Online]. Available: <https://www.kerbkonus.de/proddb/pdf/frame.php?pdf=de.ds.30&lang=de>.
- [27] Simulia, „Abaqus 6.12 Analyses User's Manual,“ 2012. [Online]. Available: <http://srvdom01:2080/v6.12/books/usb/default.htm>. [Zugriff am 11 Dezember 2017].
- [28] Weltstahl, „S235 Datenblatt,“ [Online]. Available: <https://www.weltstahl.com/werkstoff-1-0038-s235-stahl-s235jr-datenblatt/>.
- [29] Altair, „Hyperworks 14.0 Documentation,“ 2018. [Online].
- [30] H. Schürmann, Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [31] T. Dickhut, Beitrag zur Auslegung und Gestaltung von Antriebswellen aus Faser-Kunststoff-Verbunden: Eigenfrequenz, Schlagbelastung, Crashverhalten, Torsionsbeulen, Krafteinleitung, Aachen: Shaker Verlag, 2014.
- [32] A. Bleier, Prüfverfahren zur Ermittlung exakter Werkstoffkennwerte einer unidirektionalen Schicht unter besonderer Berücksichtigung physikalischer Nichtlinearitäten, Aachen: Shaker Verlag, 2012.
- [33] „Carbon Express,“ [Online]. Available: www.carbon-express.com.
- [34] „Carbon-Werke,“ [Online]. Available: www.carbon-werke.com.
- [35] „R&G Kunststofftechnik,“ [Online]. Available: https://shop1.r-g.de/shop_d.
- [36] Richard Neumayer Gesellschaft für Umformtechnik mbH, „Richard Neumayer,“ 2019. [Online]. Available: www.r-neumayer.de.
- [37] R.O.S. Kunststofftechnik, „R.O.S. Kunststofftechnik,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.ros-kunststofftechnik.de/>.
- [38] Michalski & Müller GbR, „Metall- und Wasserstrahltechnik Michalski & Müller GbR,“ 2019. [Online]. Available: www.stahltec-lautertal.de/.
- [39] Batz+Burgel GmbH, „Werkstoffdatenblatt: Planstahl (S355J2G3) 1.0570,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.batz-burgel.de/produkte/planstahl.php>. [Zugriff am 18 Juli 2017].
- [40] Huntsman Advanced Materials, „Huntsman Advanced Materials Araldite® 2014-1 Structural Adhesives,“ 2009. [Online]. Available: <https://us.aralditeadhesives.com/us/adhesives/request-a-tds/227-araldite-2014-us-e/file.html>. [Zugriff am 08 Juni 2017].
- [41] H. Schürmann und E. Abele, „Technische und wirtschaftliche Integration von CFK-Strukturen in den Werkzeugmaschinenbau,“ 2014.
- [42] H. Schürmann und A. Elter, „Beitrag zur Gestaltung von Schraubverbindungen bei Laminaten aus Faser-Kunststoff-Verbunden,“ *Konstruktion Januar/Februar 1/2 2013*, pp. 62-66, 2013.
- [43] H. Schürmann und M. v. d. Thüsen, „Hochbelastbare CFK-Biege- und CFK-Querkraftträger,“ *Stahlbau* 82, p. 452–458, 2013.
- [44] A. Schiffler, Steuerungsintegrierte Prozessüberwachung bei der Zerspanung mit Motorspindeln, 2011: Shaker-Verlag.
- [45] H. Hanselka, Ein Beitrag zur Charakterisierung des Dämpfungsverhaltens polymerer Faserverbundwerkstoffe, TU Clausthal, 1992.