

Hochbelastbare Biegefedern aus Holzwerkstoffen

Patrick Kluge¹,
Niels Dallinger²,
Christine Schubert²,
Max Geister²,
Sven Eichhorn²,

*Technische Universität Chemnitz
 Fakultät Maschinenbau
 Institut für Förder- und Kunststofftechnik
 Professur Förder- und Materialflusstechnik*

Biegefedern finden als Lagerelemente Einsatz in Vibrationsfördermaschinen und erfahren dort hochfrequente dynamische Belastungen mit bis zu 100 Mio. Lastwechseln und mehr. Standardmäßig werden diese Elemente aus Stahllegierungen oder glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) hergestellt. Diese Materialien sind energieintensiv in der Herstellung und daher unvorteilhaft im Hinblick auf den CO₂-Fußabdruck. Das von August 2022 bis Oktober 2024 gelaufene Projekt "Hochbelastbare Biegefedern aus Holzwerkstoffen" an der Technischen Universität Chemnitz untersuchte das Substitutionspotential nachhaltiger Holzwerkstoffe für Biegefedern. Insbesondere die dynamischen Materialeigenschaften von Holzwerkstoffen sind bisher unzureichend untersucht und stehen im Fokus der Untersuchungen.

[Schlagwörter: Biegefeder, Holzwerkstoffe, Dynamik, Ermüdung, Berechnung]

1 Motivation

Die übergeordnete Zielstellung des Projektes HoBieFed ist die Gestaltung des Forschungsgebietes hochbelasteter Biegefedern aus Holzwerkstoffen in technischen Anwendungen. Als Einstieg in dieses Gebiet dient die Substitution der aktuell am Markt verfügbaren, hochbelastbaren Biegefeder aus glasfaserverstärktem Kunststoff (kurz: GFK, siehe Abbildung 1) mit alternativen Biegefedermaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Im Fokus der Untersuchungen stehen verschiedene Holz furnierlagenverbundwerkstoffe (engl. Wood Veneer Composites; kurz WVC). Die industrielle Nutzbarkeit alternativer Werkstoffe in hochdynamischen Anwendungen wird erst durch die

Möglichkeit der technischen Beschreibung dieser Materialien ermöglicht. Deshalb liegt der Fokus des vorliegenden Vorhabens auf der Erforschung des mechanischen Verhaltens der Substitutionswerkstoffe unter dynamischer Kurzzeit- und Langzeitbelastung.

Die alternativen Biegefederwerkstoffe müssen sich wie die GFK-Varianten für den Einsatz bei hoher Belastungsfrequenz (25 - 100 Hz) mit hohen ertragbaren Lastwechselzahl ($> 10^7$) eignen. Die Substitutionswerkstoffe sollen nach aktuellem Stand der Technik sicher berechenbar sein und dabei technisch, wirtschaftlich und ökologisch vorteilhaft im Vergleich zu GFK-Bauweisen ausgeführt werden. Innerhalb des Projektes wurden die nachfolgend aufgezeigten wissenschaftlichen und technischen Frage- und Zielstellungen weiter konkretisiert und schrittweise geklärt.

- Welche Versagensgrenzen liegen im statischen Bereich unter anwendungsrelevanter Biegebelastung vor?
- Welche Ermüdungsgrenzen liegen im kurzzeit- und langzeitdynamischen Bereich unter anwendungsrelevanter Biegebelastung vor?
- Welche Spannkraftverluste sind bei anwendungsrelevanter Einspannung der Federn zu erwarten?
- Welche Versuchsmethodik kann für die alternativen Federwerkstoffe auf Holzbasis angewendet werden, um zeitlich umfangreiche Dauerversuche abkürzen zu können?
- Welchen einfachen Berechnungsansatz für den Festigkeits- und den Funktionsnachweis kann man nutzen?

- Existieren ökonomische und ökologische Vorteile der Substitutionswerkstoffe gegenüber den am Markt befindlichen GFK-Varianten?

2 Stand der Technik

Biegebeanspruchte Federn sind Standardmaschinenelemente im Maschinenbau, deren Eigenschaften und Optimierung nach wie vor Gegenstand aktueller Forschungen sind [1, 2, 3, 4]. Innerhalb des Projekts liegt der Fokus auf geraden Biegefedern mit Rechteckquerschnitt (Abbildung 1). Diese sind in Abhängigkeit der geforderten Steifigkeit als Einzelfeder oder als Paket aus mehreren Einzelfedern ausgeführt. Diese sogenannten Biege- oder auch Blattfedern werden bspw. im Fahrzeugbau, in der Fördertechnik, in der Agrartechnik und im Messgerätebau verwendet [5, 6, 7]. Sie dienen als Lager-/Stützelemente für translatorisch oder rotatorisch begrenzte Bewegungen. Vorherrschende Werkstoffe sind: Federstähle in verschiedenen Vergütungsformen, korrosionsträge Stähle, GFK (Glas-Faser-Kunststoffe) und CFK (Carbon-Faser-Kunststoffe). Allgemeine Grundlagen der Federauslegung von Metallfedern sind Stand der Technik und können bspw. in den Büchern von MEIßNER [8, 9] nachvollzogen werden.

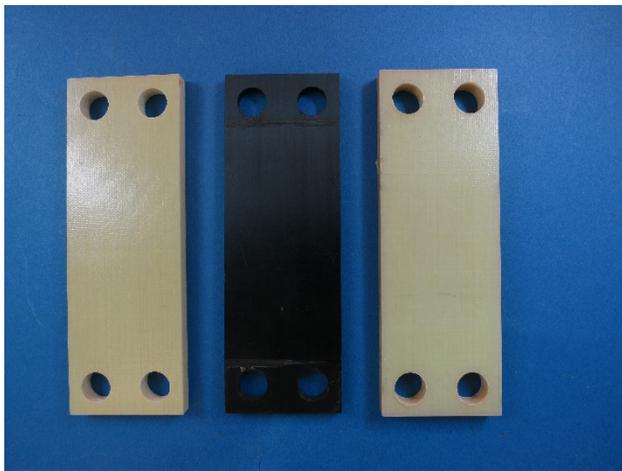


Figure 1: Biegefedern aus GFK (gelb) oder CFK (schwarz)

Holzbauteile von Biegefedern werden vor allem im Möbelbau (z. B. in Lattenrosten) eingesetzt. Vereinzelt Anwendungen von Holz-Stahl-Hybridbauteilen sowie Biegefedern aus hochverdichtetem Kunstharzpressholz [10], z. B. für die Instandhaltung historischer Anlagen, sind zwar durch die Hersteller bekannt, jedoch nicht mehr belegbar. Weitere Anwendungen von dauerhaft wechselbiegebelasteten Federn in Holzbauteile konnten nicht ermittelt werden. Dies gilt besonders für den Einsatz im Frequenzbereich von 25 Hz bis 100 Hz.

EICHHORN hat sich eingehend mit einer Versuchsmethodik zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens unter dynamisch-schwingender Belastung von Strukturbauteilen aus WVC beschäftigt. Diese Arbeit fasst zudem den Stand der Technik zum Ermüdungsverhalten von Holz- und Holzwerkstoffen umfangreich zusammen [11]. Weitere Untersuchungen zu dynamischen Langzeiteigenschaften von Holzwerkstoffen wurden in [12] oder [13] durchgeführt. Dabei wurde ein Ansatz über die Betrachtung der Brucharbeit gewählt. Aus statischen Dreipunktbiegeversuchen wurden über die berechneten Brucharbeiten Grenzwerte für Belastungskräfte im Dauerversuch abgeleitet. Im Ergebnis der Analysen wurde eine Ermüdungsgrenze bei 40 % der maximalen Bruchkraft ermittelt ($k_{Fat} = 0,4$). Es ist anzumerken, dass eine Grenzwertbetrachtung der Oberkraft im Dauerversuch nicht stattgefunden hat, d. h. die tatsächliche Ermüdungsgrenze kann höher liegen als der in dem Bericht angegebene Wert von 40 % der maximalen Bruchkraft.

3 Materialuntersuchungen

Im Rahmen des Projektes wurden insgesamt neun Holzwerkstoffe mit unterschiedlichen Lagenaufbauten (Lagenanzahl, -orientierung) untersucht. Der Fokus lag auf handelsüblichen Birkenperrhölzern und in Harz getränkten Buchensperrhölzern, sogenannten Kunstharzpresshölzern. Im vorliegenden Beitrag werden ausschließlich die beiden Holzwerkstoffe mit den vielversprechendsten Ergebnissen dargestellt und mit den Kennwerten von GFK als Referenzwerkstoff verglichen [14]. Dabei handelt es sich um ein Birkenperrholz (kurz: WVC-03, Holzfeuchte 8,6 %) und ein Kunstharzpressholz (kurz: WVC-05, Holzfeuchte 3,7 %). Alle Ergebnisse werden in eine existente Holzwerkstoffdatenbank eingepflegt [15]. Die wesentlichen Kennwerte für eine Federauslegung sind die maximal zulässige Biegespannung sowie der Elastizitätsmodul [16].

Zur Prüfung der Eignung von Holzwerkstoffen für den Einsatz in Biegefedern wurden quasistatische Materialtest sowie dynamische Kurz- und Langzeitversuche durchgeführt und Materialkennwerte ermittelt. Aus den statischen und dynamischen Kennwerten wurden Faktoren abgeleitet, die deren Zusammenhänge beschreiben und eine Bemessung von Biegefedern auf Grundlage quasistatischer Berechnungsmodelle ermöglichen. Im Zuge der Materialuntersuchungen wurden u. a. auch Ausschwing- und Dämpfungsversuche durchgeführt. Deren Ergebnisse können im Abschlussbericht nachvollzogen werden [17].

Bei quasistatischen Kurzzeitversuchen werden Kraft- und Wegsignale über die Prüfdauer aufgezeichnet und ausgewertet (vgl. Abbildung 2 links). Im ersten Auswertungsschritt wird die statische Bruchkraft als maximal gemessene Kraft ermittelt (vgl. Abbildung 2 links, rotes

Kreuz). Anschließend wird mit allen Messwerten im Intervall von 10 – 40 % der statischen Bruchkraft eine lineare Regression durchgeführt und der Anstieg bestimmt (vgl. Abbildung 2 links, grüne Strich-Punkt-Gerade). Mithilfe des Hooke'schen Gesetzes wird der Anstieg in den Elastizitätsmodell umgerechnet. Dieses Vorgehen entspricht der aktuellen Normung zur Bestimmung der Elastizitätsmoduln von Holzwerkstoffen nach DIN EN 789[18]. Im letzten Schritt wird die Proportionalitätsgrenze als ein für Holzwerkstoffe relevanter Bemessungspunkt ermittelt, bei dem der annähernd lineare Kurvenverlauf in einen nichtlinearen Verlauf übergeht. Die Proportionalitätsgrenze wird definiert als der Punkt, bei dem der Anstieg des Tangentenmoduls erstmals kleiner ist, als 95 % des Anstieges im linearen Bereich zw. 10 – 40 % der Bruchkraft (vgl. Abbildung 2 links, oranges Kreuz). [19]

Bei Stufenversuchen handelt es sich um Biegeschwellversuche, bei denen auf Grundlage der Bruchkräfte aus den statischen Versuchen zu prüfende Laststufen abgeleitet werden. Jede Laststufe wird bei einer Prüffrequenz von 20 Hz mit 20000 Lastzyklen wiederholt. Für die Auswertung werden je Laststufe die letzten zehn Zyklen aufgezeichnet. Zur Verdeutlichung der Auswertemethodik wird zunächst die Hysteresekurve dargestellt (Abbildung 2 rechts, schwarze Kurve). Darin zu sehen sind die einzelnen Schleifen (jeweils die letzten 10 Lastwechsel) aller durchlaufenen Laststufen bis zum Bruch. Im nächsten Schritt werden die Kraftmaxima der einzelnen Laststufen ermittelt (Abbildung 2 rechts, blaue Punkte). Die Kraftmaxima werden zu einer neuen Kurve verbunden, der Hüllkurve (Abbildung 2 rechts, orange Kurve). Die Hüllkurve wird nach der gleichen Auswertemethodik ausgewertet, wie die Kraft-Verformungs-Kurven der quasistatischen Kurzzeitversuche, d. h. Anstiegsbestimmung durch lineare Regression zw. 10 – 40 % der Bruchkraft sowie Bestimmung der Proportionalitätsgrenze über den Tangentenmodul (Abbildung 2 rechts).

Die ermittelten Proportionalitätsgrenzen aus den Stufenversuchen wurden als Ausgangspunkt für die Belastungskraft im Dauerversuch genutzt. In diesem Kraftbereich wurden Dauerversuche mit 10^7 Lastwechseln durchgeführt und geprüft, ob während der Prüfung eine Steifigkeitsveränderung (Änderung E-Modul) auftritt bzw. ein Bruch erfolgt. Trat keines der Ereignisse ein, wurde die nächsthöhere Kraftstufe gewählt und erneut geprüft. Das wurde solange wiederholt, bis die maximale Kraft ermittelt wurde, bei der keines der Kriterien auftrat.

Die maximal zulässigen Spannungen und Elastizitätsmoduln (wesentliche Kennwerte für die Bemessung) für WVC-03 und WVC-05 sind in Abbildung 3 dargestellt. Für WVC-03 liegen die drei Spannungswerte tendenziell auf einem Niveau innerhalb des Streubereichs von Holzwerkstoffen. Bei WVC-05 sind die im quasistatischen Kurzzeitversuch ermittelten Spannungswerte höher als

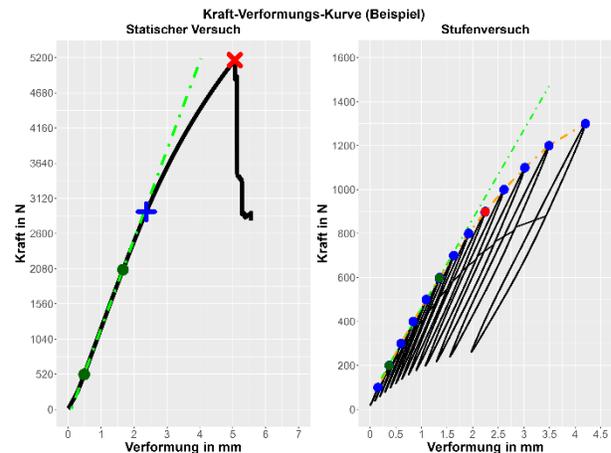


Figure 2: Exemplarische Kraft-Verformungs-Kurven zur Auswertung

in den dynamischen Versuchen. Der Vergleich zw. den Spannungswerten aus den Stufen- und Dauerversuchen weist ähnliche Werte auf. Die Elastizitätsmoduln aus statischen Versuchen und Stufenversuchen weisen tendenziell ähnliche Werte auf, sodass beide Versuche zur Bestimmung des Kennwertes taugen. Dabei sollte generell der Einfluss der Schubbeanspruchung bei veränderlichem Stützweiten-Höhen-Verhältnis beachtet werden [Klu24].

Zusammenfassend deuten die Ergebnisse der Materialuntersuchungen darauf hin, dass durch kurzweilige Stufenversuche die mechanischen Langzeiteigenschaften abgeleitet werden können. Dadurch werden langwierige Dauerversuche tendenziell obsolet. Für genauere Aussagen sind weitere Materialuntersuchungen notwendig, wodurch insbesondere die statistische Aussagekraft erhöht wird.

4 Praxisnahe Bauteiltests

Ein zentraler Bestandteil des Projektes war die Entwicklung eines Dauerprüfstands für dynamische Langzeittests im Belastungsregime der dynamischen Wechselbiegung mit Krümmungsspannung. Der Prüfstand soll hochfrequente Tests erlauben, um bis zu 10^8 Lastzyklen in relativ kurzer Zeit zu generieren. Der Prüfstand besitzt zwei Messstellen, einen Frequenzumrichter zur Steuerung der vier Unwuchtmotoren, eine Fangvorrichtung für den Fall des Probenbruchs und zwei Messkanäle für die Überwachung der Beschleunigungssignale.

Eine Prüfstelle innerhalb des Prüfmoduls wird durch einen linearen Kraftvektor ausgelenkt. Um die schnellen Biegewechsel der Versuche kostengünstig und verlässlich zu erzeugen, werden zwei Unwuchterreger (Asynchronmotoren) pro Prüfkörper seitlich befestigt. Die Selbstsynchro-

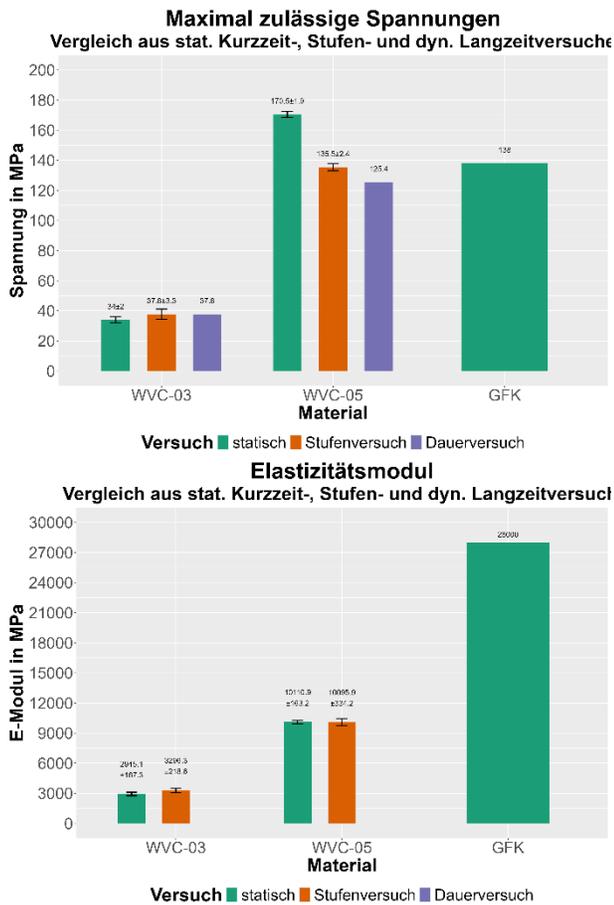


Figure 3: Maximal zulässige Spannungen und Elastizitätsmoduln für die ausgewählten Materialien

nisation dieser beiden Antriebe führt zu einem linearen Kraftvektor und somit zur Auslenkung der Feder. Zwischen den Prüfstellen stellt sich während des Prüfbetriebs ein dynamisches Gleichgewicht ein. Eine Unwuchterregung mit konstanter Drehzahl erzeugt eine konstante Erregerkraft. Kommt es zu Änderungen im Beschleunigungsverlauf, ist ein direkter Rückschluss auf eine Änderung der Federsteifigkeit (E-Modul) möglich.

Zwei Prüfstellen liegen sich innerhalb des Prüfmoduls gegenüber. Dies führt zu einem weiteren Selbstsynchronisationseffekt. Die linearen Kraftvektoren der gegenüber liegenden Probenhalter löschen sich gegenseitig aus. Dadurch entstehen nur minimale dynamische Einflüsse auf die Umgebung. Die elastischen Verankerungen des Modulrahmens im Boden unterstützen die Selbstsynchronisation. Sie werden besonders beim Hochlaufen und Abbremsen des Prüfstands belastet sowie im Fall eines Federbruchs. Im Falle des Bruchs einer Probe betätigt einer der beiden Probenhalter ein Stahlseil, welches einen Notaus-Schalter auslöst und die Motoren abschaltet.

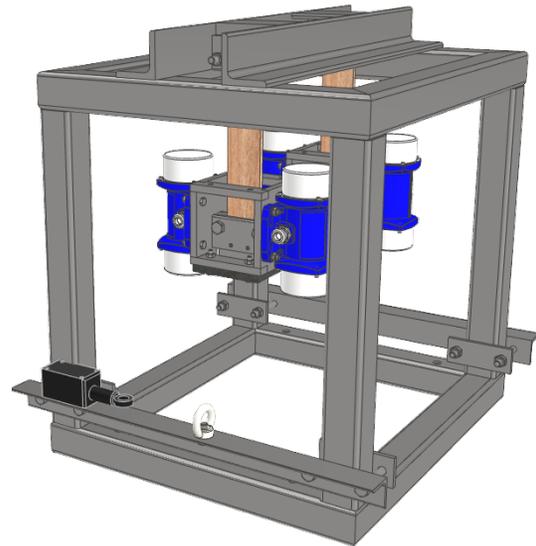


Figure 4: Biegewechselprüfstand mit hoher Prüffrequenz bis 50 Hz

Abbildung 5 zeigt den für die praxisnahe Prüfung von Biegefedern entwickelten Demonstrator. Dabei handelt es sich um einen Vibrationsförderer mit Förderrinne, die mittels Unwuchtmotoren in Schwingung versetzt wird. Unterhalb der Förderrinne befinden sich die vier Biegefedern. Des Weiteren wurde eine Fangvorrichtung installiert, welche im Falle des Versagens der Federn die Förderrinne auffängt und verhindert, dass diese zu Boden fällt. Eine Datenaufzeichnung findet nicht statt, lediglich ist anhand der Prüfzeit und -frequenz die Anzahl an durchgeführten Lastwechseln bestimmbar. Im Projekt wurden Biegefedern aus WVC-05 und WVC-07 über einen Zeitraum von ca. 6 Stunden bei einer Prüffrequenz im überkritischen Bereich von 20,1 Hz getestet (entspricht ca. 400.000 Lastwechseln). An den Biegefedern wurden keinerlei Schäden festgestellt.

5 Oekonomische und oekologische Bewertung

Zur ganzheitlichen Bewertung des Substitutionspotentials wurde eine ökonomische und ökologische Bewertung der konventionellen Federn aus GFK und den untersuchten Holzwerkstoffen durchgeführt. Im vorliegenden Beitrag werden nur die Ergebnisse der beiden Werkstoffe WVC-03 und WVC-05 der GFK-Referenz gegenübergestellt. Die vollständigen Ausführungen hierzu finden sich im Abschlussbericht [17].

5.1 Oekonomie

Eine erste finanzwirtschaftliche Betrachtung der Investitionsalternativen soll mithilfe einer Kostenvergleichsrech-

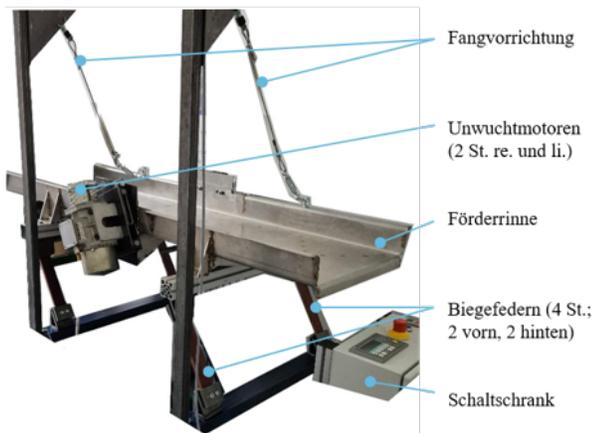


Figure 5: Demonstrator - Förderrinne mit Unwuchtmotoren und Biegefedern aus WVC-05

nung, einem eindimensionalen, statischen Rechnungsverfahren, erfolgen. Dabei werden ausschließlich jene Kosten gegenübergestellt, die unmittelbar durch den Kauf (respektive die Herstellung) und den Einsatz der jeweiligen Biegefedern entstehen. Somit werden vorerst nur die monetären Auswirkungen durch die Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe (bzw. allen damit einhergehenden Auswirkungen) aufgezeigt.

In den Kostenvergleich sind neben den durch den Einsatz der unterschiedlichen Biegefedern verursachten Betriebskosten, auch die mit dem Kauf verbundenen "Abschreibungen und kalkulatorischen Zinsen [...] aufzunehmen" [20]. Die Betriebskosten stellen sich als die Instandhaltungs- und Reparaturkosten in Abhängigkeit der Nutzungsdauer eines Vibrationsförderers und somit als die variablen Kosten dar. Diese sollen den unterschiedlichen Verschleiß bzw. den damit einhergehenden Wartungsaufwand der Vibrationsförderanlagen im Zusammenhang mit den verwendeten Werkstoffen abbilden. Die unterschiedlichen Werkstoffe wirken sich weiterhin auch auf den Materialbeschaffungspreis und die Herstellungskosten und somit auf den Anschaffungspreis bzw. die Investitionskosten aus. Diese gelten als die Fixkosten. Die Abschreibungen und Zinsen, welche sich aus diesen Investitionskosten ohne Einbeziehung der Nutzungsdauer sowie dem kalkulatorischen Zinssatz errechnen, ergänzen schließlich die jeweiligen Fixkosten.

Für die sechs verschiedenen Investitionsalternativen ergibt sich über die Nutzungsdauer der Förderanlage die in Abbildung 6 visualisierten Kostenverläufe. Es ist zu sehen, dass sich die Federn aus WVC-03, die bei der alleinigen Betrachtung der jährlichen Gesamtkosten als die günstigste Investitionsalternative hervorgehen, bei der Berücksichtigung der gesamten Nutzungsdauer nicht mehr als die vorteilhafteste Alternative gelten. Aufgrund der

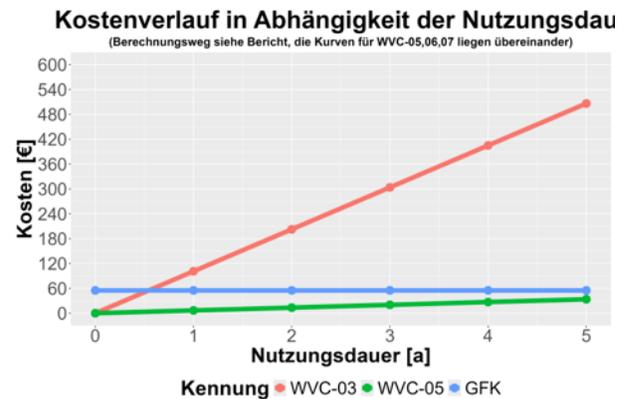


Figure 6: Kostenverlauf für Federpakete unterschiedlicher Materialien in Abhängigkeit der Nutzungsdauer

wesentlich höheren variablen Kosten und der nur minimal geringen Fixkosten (im Vergleich zu WVC-05), sind die Federn aus WVC-03 nach fünf Jahren teurer als die beiden genannten Alternativen. Als vorteilhafteste Alternative stellen sich nun die Federn aus WVC-05 heraus.

5.2 Ökologie

Die ökologische Bewertung wird als gewichtsbezogener Vergleich der tatsächlich eingebauten Federn im System durchgeführt und im zweiten Schritt mit der Nutzungsdauer einer Vibrationsförderanlage erweitert. Dabei wurden unterschiedliche Szenarien abgeschätzt, wobei hier nur das Szenario "gleiche Nutzungsdauer für alle Federn" dargestellt wird. Die funktionelle Einheit beträgt 1 kg des technischen Bauteils (Gewicht pro Feder). Zur Bewertung der Umweltauswirkung werden die Kennwerte Primärenergiebedarf (PE in MJ) und das Global Warming Potential (GWP in kg CO₂-Äqv.) bezogen auf die funktionelle Einheit von 1 kg Biegefeder herangezogen. Der Vergleich basiert auf eine "cradle-to gate"-Analyse mit den Produktionsstadien A1 – Rohstoffversorgung, A2- Transport und A3- Herstellung. Es ist zu beachten, dass die notwendigen Zusatzteile aus Stahl für die Federnaufnahmen nicht mit einkalkuliert worden sind. Zudem ist die Senkenfunktion des Holzwerkstoffes durch das beim Wachstum aufgenommene CO₂ nicht mit einkalkuliert. Daraus resultieren weitere ökologische Vorteile wie z. B. negative GWP-Werte bei WVC-03. Ebenfalls ist zu erwähnen, dass Kunstharzpressholz (WVC-05) bei der thermischen Verwertung rückstandslos verbrennt. Bei der Verbrennung von GFK bleiben die Glasfasern hingegen als deponierpflichtiger Müll bestehen. Die freigesetzte Verbrennungswärme aller Werkstoffe wurde nicht gutgeschrieben bzw. als potentielle Gutschrift verrechnet.

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung bei gleicher Nutzungsdauer für alle Federn zeigt Tabelle 1. Es

zeigt sich, dass sowohl der Primärenergiebedarf als auch das GWP bei WVC-03 um ein Vielfaches geringer ist als bei GFK. Im Gegensatz dazu fallen die ökologischen Vorteile bei WVC-05 (PE: 68 % von GFK, GWP: 38 % von GFK) geringer aus. Bezieht man die Anzahl der benötigten Federn in die Analyse ein, so wird der Unterschied zw. WVC-03 und WVC-05 geringer, da auch die mechanischen Eigenschaften von WVC-05 um ein Vielfaches höher sind als bei WVC-03. Für den Betrieb einer fiktiven Anlage mit vergleichbaren Federpaketen ergeben sich dennoch ökologische Vorteile durch den Einsatz von WVC-05 (PE: 61 % von GFK; GWP: 35 % von GFK).

Table 1: Umweltauswirkung der Einzelfeder und des Federpakets für den Betrieb der Anlage bei gleichlangem Einsatz der Federn

Material	Umweltauswirkung der Einzelfeder		N	Umweltauswirkung des Federpakets für Betrieb der Anlage	
	PE MJ/kg	GWP Kg CO ₂ -Äqv./kg		PE MJ/kg	GWP Kg CO ₂ -Äqv./kg
GFK	7,34	0,317	20	146,87	6,34
WVC-03	0,55	0,027	62	34,39	1,68
WVC-05	4,98	0,122	18	89,7	2,19

6 Zusammenfassung

Im Projekt HoBieFed wurde die technische Einsatzfähigkeit von Holzwerkstoffen auf Furnierbasis zur Anwendung in Biegefedern untersucht und nachgewiesen. Diverse Materialuntersuchungen (statische Kurzzeit-, Stufen- bzw. Laststeigerungsversuche) haben insbesondere für Kunstharzpressholz ein ähnliches technische Potential aufgezeigt wie bei GFK. Durch die Analyse der Kennwerte konnten Zusammenhänge zwischen statischen und dynamischen Eigenschaften abgeleitet werden.

Insgesamt zeigt der Vergleich der Materialkennwerte der untersuchten Holz- und GFK-Werkstoffe, dass die Holzwerkstoffe prinzipiell für den Einsatz als Biegefedern geeignet sind. Die ökonomische und ökologische Bewertung zeigte Vorteile beim Einsatz von Holzwerkstoffen gegenüber GFK-Werkstoffen.

7 Quellen

- [1] Lehnert, W., Arndt, J.; Lehmann, G.: Erhöhte Leistungsfähigkeit von Blattfedern durch Thermomechanische Behandlung. ATZ Automobiltech Z 100, 52–57 (1998). <https://doi.org/10.1007/BF03221479>
- [2] Kröger, H. T.: Einfluss hybrider 3D-Gewebe auf das Ermüdungsverhalten von GFK-Blattfedern. Dissertation. RWTH Aachen
- [3] Petrich, M.: Entwicklung einer Auslegungsmethode für Federn aus faserverstärkten Kunststoff und Anwendung am Beispiel der Evolutfeder. Bericht, TU Ilmenau. DOI: 10.22032/dbt.64252
- [4] Janetzko-Preisler, A.; Wolf-Monheim, F.; Dafins, A., Schröder, K.-U.; van der Jagt, P.; Wolfgang, D.; Zandberg, P.: Faseroptische Schadensüberwachung von GFK-Blattfedern mittels struktureller Schadensindikatoren.
- [5] NetterVibration: Schwingungselemente – Blattfedern. <https://www.nettervibration.com/zubehoer-fuer-vibrationsantriebe/blattfedern>
- [6] Vibrationsfördertechnik.de: Lagerelemente. <http://www.vibrationsfoerdertechnik.de/schwingfoerdertechnik/vibrationsfoerderer--aufbau/lagerung-der-foerderorgane/lagerelemente.php>
- [7] Vibrationsfördertechnik.de: Lagerelemente. http://www.vibrationsfoerdertechnik.de/schwingfoerdertechnik/vibrationsfoerderer--aufbau/antriebssysteme/stuetzerregende-antriebe.php?searchresult=1&string=Biegefeder#wb_55
- [8] M. Meisner; K. Wanke, Handbuch Federn: Berechnung Und Gestaltung Im Maschinen- Und Gerätebau, 2. Bearb. Aufl ed. Berlin: Verl. Technik, 1993, ISBN 3-341-01087-4.
- [9] M. Meissner; H.-J. Schorcht; K. Wanke, Metallfedern: Grundlagen Werkstoffe Berechnung Gestaltung Und Rechnereinsatz, 2. Erg. Aufl ed. Berlin: Springer, 2007. ISBN 9783540498681.
- [10] Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG. <https://www.dehoni.de/>
- [11] Eichhorn, S.: Berechnungsansatz für Strukturbauteile aus Holzfurnierlagenverbundwerkstoff – WVC. Dissertation TU Chemnitz, 2012.
- [12] Eichhorn, S.; Feig, K.; Müller, C.; Krug, D.; Weber, A.: Entwicklung von Qualitätshalbzeugen aus Spezialwerkstoffen für Anwendungen im Maschinenbau und in der Fördertechnik. Forschungsbericht 2015. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-188704>

[13] Mueller, C.U., Mayer, T.A. & Eichhorn, S. Damping and layer configuration in wood veneer composites. *J Wood Sci* 57, 532–535 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10086-011-1206-x>

[14] Ehrenstein, G. W.: Hysteresis-Messverfahren, das flexible Verfahren zur dynamischen Werkstoff- und Bauteilprüfung nach R. Renz. ISBN 3-9802740-4-7.1993.

[15] Forschungsgruppe Anwendung erneuerbarer Werkstoffe der Professur Förder- und Materialflusstechnik an der TU Chemnitz. <https://www.tu-chemnitz.de/projekt/FT/Projektarchiv/Holzwerkstoffe/hwc.php>. 2024

[16] Okabe, S., and Yokoyama, Y. (January 1, 1981). Study on Vibratory Feeders: Calculation of Natural Frequency of Bowl-Type Vibratory Feeders. *ASME. J. Mech. Des.* January 1981; 103(1): 249–256. <https://doi.org/10.1115/1.3254873>

[17] Dallinger, N.; Kluge, P.; Schubert, C.; Geis-tert, M.; Eichhorn, S.: Hochbelastbare Biegefedern aus Holzwerkstoffen. Abschlussbericht, TU Chemnitz, FNR. DOI: <https://doi.org/10.60687/2025-0125>

[18] DIN EN ISO 789 (2005) Holzbauwerke – Prüfverfahren – Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen

[19] Kluge, P.: Dimensionierungs- und Bemessungsgrundlagen für statisch beanspruchte Bauteile aus Holz furnierlagenverbundwerkstoffen zur Anwendung im Maschinenbau. Dissertation. Universität Chemnitz (2024).

[20] Müller, D.: Investitionscontrolling. Berlin Heidelberg Springer-Verlag, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41990-4>

Dr.-Ing. Patrick Kluge, seit 2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Förder- und Materialflusstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Er studierte von 2007 - 2013 Maschinenbau an der TU Chemnitz und befasst sich seither mit der Entwicklung modularer Holzbauweisen für Maschinenbauanwendungen und dem Schaffen notwendiger Voraussetzungen für deren Einsatz.

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland, Phone: +49 371 531-34373
E-Mail: patrick.kluge@mb.tu-chemnitz.de