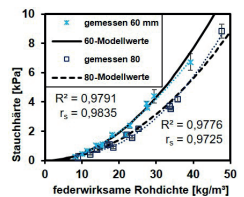
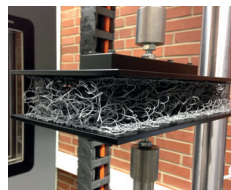
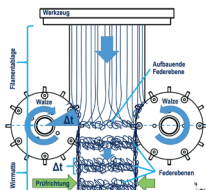


## Ansatz zur Beschreibung von unregelmäßig gefügten Kunststofffilamenten aus Thermoplasten in Wirrmattenstrukturen unter mechanischer Belastung zur Substitution von Schaumstoffen in Polstern und Matratzen

Tobias Westhues

Band  
2021/53



*Ansatz zur Beschreibung von unregelmäßig gefügten Kunststofffilamenten aus  
Thermoplasten in Wirmattenstrukturen unter mechanischer Belastung zur  
Substitution von Schaumstoffen in Polstern und Matratzen*

zur Erlangung des akademischen Grades  
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Tobias Thomas Westhues, M.Sc.  
aus Ahlen in Westfalen

Tag des Kolloquiums: 07.10.2021  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer  
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Bremser



Schriftenreihe Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen

Band 53/2021

**Tobias Westhues**

**Ansatz zur Beschreibung von unregelmäßig gefügten  
Kunststofffilamenten aus Thermoplasten in  
Wirrmattenstrukturen unter mechanischer Belastung  
zur Substitution von Schaumstoffen  
in Polstern und Matratzen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Düren 2021

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8292-0

ISSN 2196-2200

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl von Prof. Moritzer, der Kunststofftechnik Paderborn (KTP) der Universität Paderborn in den Jahren 2015 bis 2020.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer für die Ermöglichung der Promotion und die kontinuierliche Unterstützung sowie die zahlreichen Diskussionen und Anregungen.

Für die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Bremser.

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen von Forschungsaktivitäten zusammengetragen, die von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) finanziert worden sind. Für die Zusammenarbeit danke ich der AiF und den Projektpartnern.

Den Mitarbeitern der Fachgruppe, den zahlreichen Abschlussarbeitern sowie den studentischen Hilfskräften sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt. Im Speziellen danke ich den Laboringenieurinnen und Laboringenieuren für ihren überdurchschnittlichen und herausragenden Arbeitseifer. Hier danke ich im Besonderen Rudi, Helmut und Tamay für die Unterstützung. Mit Rat und Tat ermöglichten sie die Entstehung und den Abschluss dieser Forschungsarbeit.

Gerne danke ich den Abschlussarbeitern und studentischen Hilfskräften. Hier haben sich durch besondere Leistungen die Herren Conze, Schach, Shady, Vogt, Wiechel, Amirov, Dadiev, Dann, Berse, Ottens, Ostapez, Richert, Ferah und Oldemeier hervorgetan.

Der Firma Dr. Karl Wetekam & Co. KG danke ich für die unproblematische und kooperative Zusammenarbeit, die Unterstützung und die Möglichkeit die Werkzeugaufnahme nutzen zu dürfen.

Nils und Habbe danke ich für die Unterstützung in allen Software- und Hardwarebelangen. Ein großer Teil der benötigten Materialmenge wurde vom Hersteller direkt und kostenneutral für die experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zur Verfügung gestellt. Für die Materialspende des Queo 0230 danke ich der Firma Boreales.

Meiner Familie – klein und groß – danke ich für die Unterstützung.

Tobias Thomas Westhues

Paderborn, August 2020



## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit stellt ein Modell zur Festigkeitsbeschreibung von Wirmatten vor, zeigt deren Potential zur Substitution von Schaumstoffen und die damit verbundenen Vorteile bezüglich Liegekomfort und Umweltfreundlichkeit im direkten Vergleich zu Schaumstoffprodukten. Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine Produktionsanlage zur Extrusion von Wirmatten konzipiert, gefertigt und in den Laboren der Kunststofftechnik Paderborn betrieben. Die Variationsmöglichkeiten der Kalibrier- und Abzieheinheit ermöglichten das Abfahren einer Vielzahl von Prozesspunkten. An den extrudierten Wirmattenprobekörpern und Schaumstoffreferenzen wurde die Rohdichte [ $\text{kg/m}^3$ ] sowie die Stauchhärte [ $\text{kPa}$ ] bestimmt. Zusätzlich wurde in dynamischen Druckprüfungen eine 10-jährige Nutzungsdauer als Matratze simuliert. Der Vergleich der Leistungsdaten zwischen Wirmatten- und Schaumstoffproben unterstreicht das hohe Potential der Wirmattenstrukturen als Schaumstoffsubstitute. Unter den Aspekten der guten Druckverteilung, der guten Belüftungseigenschaften, Hygiene sowie der möglichen Recyclingfähigkeit der thermoplastischen Polymere sind die Vorteile von Wirmattenstrukturen im Polster- und Matratzenbereich zur Substitution von Schaumstoffen ersichtlich. Anhand der Untersuchungsergebnisse wurde der Modellansatz des Spiralfeder-Masse-Äquivalents entwickelt, welcher die mathematische Beschreibung der Wirmatteneigenschaften, der Stauchhärte und der Rohdichte ermöglicht. Das erarbeitete Modell realisiert die Bestimmung der Wirmatteneigenschaften ohne aufwendige Try-and-Error-Untersuchungen. Durch die Berücksichtigung weiterer Randbedingungen kann der Modellansatz genutzt werden, um eine Auslegung von Wirmattenextrusionsanlagen zu vollziehen. Untersuchungsergebnisse zum Ablageverhalten der Einzelfilamente, der Knotenpunktfestigkeit und der Festigkeit des Gesamtmattenverbundes geben erstmalig einen umfänglichen Überblick zur Beeinflussbarkeit der Matteneigenschaften in Abhängigkeit der variierten Prozessgrößen.

## Abstract

This paper presents a model for the strength description of coiled filament mats (CFM), shows their potential for substitution of foams and the associated advantages with regard to lying comfort and environmental friendliness in direct comparison to foam products. Within the scope of the investigations a production plant for the extrusion of CFM was designed, manufactured and operated in the laboratories of Kunststofftechnik Paderborn. The variation possibilities of the calibration and take off unit allowed a large number of testing points to be run. The raw density [ $\text{kg/m}^3$ ] and the compression hardness [ $\text{kPa}$ ] were determined on the extruded CFMs specimens and foam references. In addition, a 10-year mattress service life was simulated in dynamic pressure tests. The comparison of the performance data between CFMs and foam samples underlines the high potential of CFM structures as foam substitutes. Under the aspects of good pressure distribution, good ventilation properties, hygiene as well as the possible recyclability of the thermoplastic polymers, the advantages of CFM structures in the upholstery and mattress sector for the substitution of foams are evident. Based on the results of the investigation, the model approach of the spiral spring-mass equivalent was developed, which allows the mathematical description of CFM properties, the compression hardness and the density. The developed model realizes the determination of CFM properties without complex try-and-error investigations. By taking other boundary conditions into account, the model approach can be used for the design of CFM extrusion lines. For the first time, the results of investigations on the deposition behavior of the individual filaments, the strength of the nodal points and the strength of the overall mat composite provide a comprehensive overview of the influence of the mat properties as a function of the varied process variables.





## Liste der Veröffentlichungen

Moritzer, E.; Westhues, T.:

„Analyse von Wirmattenstrukturen hinsichtlich der Substitutionsfähigkeit von Schaumstoffen in Polstern und Matratzen“, Universität Paderborn, Kunststofftechnik Paderborn (KTP), Tagungsbeitrag Technomer 26., Dresden, 2019

Moritzer, E.; Westhues, T.:

“Plant Design, Stress-Strain Characteristics in Compression and Lifecycle Description of Coiled Filament Mats Based on Production According to Fitzer”, Universität Paderborn, Kunststofftechnik Paderborn (KTP), Tagungsbeitrag PPS-35; 35th International Conference of the Polymer Processing Society; Çeşme-Izmir, Turkey; 2019

Moritzer, E.; Westhues, T.:

“Process-technical Examination and Analysis of Coiled Filament Mats Based on Production According to Fitzer”, Universität Paderborn, Kunststofftechnik Paderborn (KTP), Tagungsbeitrag ANTEC 2019; 77th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC), Detroit, USA, 2019

Moritzer, E.; Westhues, T.:

„Ansatz zur Beschreibung von unregelmäßig gefügten Kunststofffilamenten in Wirmattenstrukturen unter mechanischer Belastung“ Universität Paderborn, Kunststofftechnik Paderborn (KTP), Tagungsbeitrag Technomer 25., Dresden, 2017

Scharr, K.; Schöppner, V.; Westhues, T.:

„A New Sample Preparation Method to Investigate Melting Phenomena within a Partly Filled Melting Zone Of Co-Rotating Twin Screw Extruders” 32nd International Conference of the Polymer Processing Society (PPS), Lyon, Frankreich, 2016

Scharr, K.; Schöppner, V.; Westhues, T.:

„Melting Phenomena and Sample Preparation Method within a Partly Filled Melting Zone of Co-Rotating Twin Screw Extruders” 74th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC), Indianapolis, USA, 2016



## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b> .....	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung .....	3
1.2 Lösungsweg.....	4
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>6</b>
2.1 Verfahren und Patente zur Herstellung von Wirrmatten und ähnlicher Filamentprodukte .....	6
2.2 Übersicht und Entwicklung der Anlagentechnik zur Wirrmattenextrusion .....	8
2.3 Anwendungsbeispiele für Wirrmattenprodukte .....	14
2.4 Erfolgreiche Behandlung von Dekubitalgeschwüren mit Wirrmattenstrukturen .....	15
2.5 Bindemechanismen bei Polymeren und die Ausprägung der Knotenpunkte der Wirrmattenfilamente .....	18
<b>3 Prozessanalyse</b> .....	<b>22</b>
3.1 Beschreibung der Laboranlage zur Herstellung von Wirrmatten.....	22
3.2 Einfluss- und Zielgrößen des Herstellungsprozesses.....	31
3.2.1 Einflussgrößen (Prozessgrößen).....	31
3.2.2 Filamentablage im Zwickelbereich.....	34
3.3 Einfluss des Filamentablageverhaltens auf die Zielgrößen.....	39
3.4 Qualitätsrelevante Merkmale der Wirrmatte .....	45
3.4.1 Anlagenspezifische Prozessgrenzen.....	45
3.4.2 Randschichteneinstellung im Wirrmattenprozess .....	47
3.4.3 Fehlerentstehung im Wirrmattenextrusionsprozess .....	49
<b>4 Material- und Strukturprüfung</b> .....	<b>53</b>
4.1 Bestimmung von Rohdichte und Stauchhärte .....	55
4.2 Wirrmattenversuchsreihen und -probekörper .....	56
4.3 Schaumstoffvergleichsproben .....	58

4.4	Knotenpunktfestigkeit [N] belasteter und unbelasteter Filamentverbindungen.....	60
4.5	Festigkeit des Gesamtverbundes normiert auf die Rohdichte [ $\text{kPa}\cdot\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ ] belasteter und unbelasteter Mattenproben .....	65
4.6	Festigkeitsverlust [%] während und nach Dauerfestigkeitsuntersuchung in Anlehnung an DIN EN 1957 .....	70
4.7	IR-Messungen während der dynamischen Druckprüfung .....	72
4.8	Eingesetztes Polymermaterial; Queo™ 0230 .....	74
<b>5</b>	<b>Mathematische Betrachtung der Wirmatte .....</b>	<b>75</b>
5.1	Entwicklung des Modellansatzes: Spiralfeder-Masse- Äquivalent .....	76
5.1.1	Bestimmung der Stauchhärte: .....	76
5.1.2	Bestimmung der Rohdichte der Wirmatten .....	86
5.2	Validierung.....	88
<b>6</b>	<b>Mechanische Eigenschaften entlang der Lebensdauer .....</b>	<b>108</b>
6.1	Möglichkeitenanalyse zum Einsatz von Wirmatten als Schaumstoff- Substitut.....	109
6.2	Festigkeitswerte und Langzeitfestigkeit von Schaumstoffprodukten .....	110
6.3	Vergleich des Festigkeitsverlustes von Schaumstoff und Wirmatte .....	113
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>118</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>125</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>133</b>
<b>A1</b>	<b>Zu Kapitel 2, Stand der Technik.....</b>	<b>134</b>
<b>A2</b>	<b>Zu Kapitel 3, Prozessanalyse.....</b>	<b>137</b>
<b>A3</b>	<b>Zu Kapitel 4, Material- und Strukturprüfung .....</b>	<b>140</b>
<b>A4</b>	<b>Zu Kapitel 5, Auswertung und Modellierung .....</b>	<b>144</b>

## Abkürzungsverzeichnis

### Lateinische Symbole

$A_o$	Querschnittsfläche des Düsenaustritt einer Düse im Wirrmattenwerkzeug; Querschnittsfläche des Federdrahtes einer masseäquivalenten Spiralfeder
$A_p$	Oberfläche des Probekörpers
$A_{Probe}$	Querschnittsfläche einer Wirrmattenprobe
$Anz_{Federn}$	Anzahl der Federn je Federebene
$Anz_{Federebenen}$	Anzahl der Federebenen je Probe
$Anz_{Düse WKZ}$	Anzahl der Düsen im Werkzeug
$Anz_{Düse Rand}$	Anzahl der Düsen des Randbereichs
$Anz_{Düse Rand unten}$	Anzahl der Düsen über der extrudernahen Nadelwalze
$Anz_{Düse Rand oben}$	Anzahl der Düsen über der extruderfernen Nadelwalze
$Anz_{Düse federwirksam}$	Anzahl der Düsen über dem Zwickelbereich
$CC_{xx}$	Druckspannungs-Verformungseigenschaft bei einer Verformung von $xx$ %; Stauchhärte
$CFM$	Coiled filament mats (CFM)
$D$	Windungsdurchmesser der masseäquivalenten Spiralfeder
$d_{NW}$	Nadelwalzendurchmesser
$d_{Feder}$	Drahtdurchmesser des Federdrahtes
$d_{Filament}$	Filamentdurchmesser
$d_{Düse}$	Düsendurchmesser
$\bar{d}$	Effekt; Differenz zweier Stichprobenmittelwerte
$FES$	Abstand zweier aufeinander folgender Federebenen
$F_{xx}$	Kraft für eine Verformung von $xx$ %
$f_z$	Kurzzeit-Schweißfaktor
$G$	Schubmodul
$k$	Empirisch bestimmter Korrekturbeiwert (vgl. funktionalen Zusammenhang 5-27)
$KMS$	Abstand zwischen Kühlmediumoberfläche und Ebene der Drehachsen der Nadelwalzen

$KMS_{ist}$	Abstand zwischen Kühlmediumoberfläche und Ebene der Drehachsen der Nadelwalzen im jeweils betrachteten Fall
$L$	Länge der abgewickelten Windungen einer masseäquivalenten Spiralfeder
$l_p$	Länge der Probe
$m$	Masse
$\dot{m}$	Massedurchsatz des Extruders
$\dot{m}_{Düse}$	Massedurchsatz einer Düse
$m_{Feder}$	Masse einer Feder
$m_{Federebene}$	Polymermasse je Federebene
$m_{Federebene\ federwirksam}$	Polymermasse des federwirksamen Kerns einer Federebene
$m_{Federebene\ Rand}$	Polymermasse des Randbereichs einer Federebene
$m_{federwirksam}$	Polymermasse des federwirksamen Kerns
$m_{federwirksam\ Probe}$	Polymermasse des federwirksamen Kerns einer Probe
$m_{Rand}$	Polymermasse der Randschicht
$m_{Rand\ Probe}$	Polymermasse der Randschicht einer Probe
$m_{Probe}$	Gesamtmasse einer Probe
$MFR, (MFI)$	Schmelze-Massefließrate, (Melt Flow Index) Vergleichszahl für das Fließverhalten einer Schmelze; Masse einer Schmelze, die in 10 Minuten bei definierter Temperatur und definiertem Druck durch eine Kapillare definierter Abmessung [g/10 min] fließt [BBO+13]
$MVR$	Schmelze-Volumenfließrate, (Melt Volume Rate) Vergleichszahl für das Fließverhalten einer Schmelze; Volumen einer Schmelze, das in 10 Minuten bei definierter Temperatur und definiertem Druck durch eine Kapillare definierter Abmessung [cm <sup>3</sup> /10 min] fließt [BBO+13]
$NW_{Teilung}$	Nadelwalzenteilung; Bogenmaß zwischen den Nadelreihen auf der Oberfläche der Kalibrierwalzen; (Angabe auch möglich als Abstandswinkel zwischen den Reihen; s. $\alpha_{NW}$ )
$n$	Anzahl der Windungen; Nadelreihe; Stichprobenumfang
$N$	Versuchsumfang
$P_{WKZ}$	Werkzeugdruck
$RG$	Raumgewicht

$r_s$	Empirischer Spearman Korrelationskoeffizient
$r_{NW}$	Radius der Nadelwalzen
$R^2$	Empirisches Bestimmtheitsmaß
$R$	Federsteifigkeit einer Spiralfeder
$R_{Probe}$	Federsteifigkeit der Probe
$rg(x_i)$	Rang des Merkmals $x_i$
$\bar{r}g_x$	Mittlerer Rang des Merkmals $x$
$rg(y_i)$	Rang des Merkmals $y_i$
$\bar{r}g_y$	Mittlerer Rang des Merkmals $y$
$s$	Verformungsweg bei einer Druckprüfung
$s^2$	Varianz
$ST$	Schmelztemperatur Polymer
$T_0$	Gefrierpunkt des Kühlmittels (Wasser: 0°C)
$T_{Umgebung}$	Temperatur der Umgebungsluft
$T_{Zwickel}$	Temperatur im Zwickelbereich der Nadelwalzen
$T_{Schmelze}$	Temperatur der Schmelze im Extrusionsprozess
$t_n$	Zeitschritt
$t_{Extrusion}$	Extrusionszeit
$t_{Extrusion\ Feder\ ebene}$	Extrusionszeit einer Federebene
$t_{Extrusion\ Probe}$	Extrusionszeit einer Probe
$V$	Volumen; Volumen des Federdrahtes einer masseäquivalenten Spiralfeder
$v_1$	Extrusionsgeschwindigkeit; Filamentaustrittsgeschwindigkeit; rechnerischer Wert, welcher sich aus dem Massedurchsatz $\dot{m}$ , dem Düsendurchmesser $d_{Düse}$ und der Düsenanzahl $Anz_{Düse\ WKZ}$ ergibt.
$v_2$	Abzugsgeschwindigkeit der aufbauenden Wirrmatte
$V_{Probe}$	Gesamtvolumen einer Probe (Bestimmung anhand der äußeren Probenabmessungen)
$V_{RFK}$	Verhältnis von Masse der Randschicht bezogen auf die Masse des federwirksamen Kerns einer Wirrmatte
$v_{UmfN}$	Umfangsgeschwindigkeit der Nadelwalzen
$W_{abs}$	Lichtes Spaltmaß im Zwickelbereich der Nadelwalzen



$Wkz_{Breite}$	Werkzeugbreite (maximaler Abstand zwischen den äußeren Düsen)
$WKS$	Abstand der Kühlmediumsoberfläche zum Werkzeuaustritt (freie „Fallhöhe“ der Filamente bis zum Kühlmedium)
$WRRL$	Wasserrahmenrichtlinie
$X$	Merkmal X
$x_i$	Einstellgröße des Merkmals X
$\bar{x}$	Arithmetischer Mittelwert des Stichprobenumfangs
$x_{max}$	Maximalwert des Stichprobenumfangs
$x_{min}$	Minimalwert des Stichprobenumfangs
$x_{med}$	Median des Stichprobenumfangs
$x_{Q0,25}$	Untere Quartil des Stichprobenumfangs
$x_{Q0,75}$	Obere Quartil des Stichprobenumfangs
$Y$	Merkmal Y
$y_i$	Messwert des Merkmals Y
$\bar{y}$	Arithmetisches Mittel der Messwerte $y_i$
$\hat{y}_i$	Schätzwert des Merkmals Y

### Griechische Symbole

$\alpha_{NW}$	Nadelreihenversatzwinkel
$\beta_{KMS}$	Versatzwinkel im Drehpunkt der Nadelwalzen zwischen Bezugsniveau ( $KMS = 0$ ) und dem Nadelwalzenradius bei Berührung der aktiven Nadelreihe $n$ mit der Kühlmediumsoberfläche ( $KMS_{ist}$ )
$\delta$	Wahre Differenz der wahren Mittelwerte $\mu$ zweier Stichproben
$\varepsilon_{ex}$	Extrusionsgeschwindigkeitsüberhöhungsfaktor; das Verhältnis von Extrusionsgeschwindigkeit $v_1$ zu Abzugsgeschwindigkeit $v_2$
$\eta$	Viskosität
$l$	Spezifische Zugspannung $\iota$ ; Festigkeitskenngröße aus maximaler Zugkraft in y-Richtung bezogen auf die federwirksame Rohdichte $\rho_{federwirksam\ roh}$ und den Querschnitt $A_{probe}$ einer Wirrmattenprobe
$\mu$	Poissonzahl, Querkontraktionszahl; Wahrer Mittelwert

---

$\rho$	Dichte
$\rho_{\text{federwirksam roh}}$	Federwirksame Rohdichte einer Wirrmattenprobe (federwirksamer Kern)
$\rho_{\text{Kühlmedium}}$	Dichte des Kühlmediums (Reindichte)
$\rho_{\text{Polymer}}$	Dichte des Polymers (Reindichte)
$\rho_{\text{roh}}$	Rohdichte einer Wirrmattenprobe (Randschicht und federwirksamer Kern)
$\sigma_{GM}$	Streckspannung Grundmaterial
$\sigma_{Sch}$	Schweißnahtfestigkeit