

Parametrierung eines Halmstrukturmodells für Miscanthus anhand von 4-Punkt-Biegeversuchen

Niklas Barga-Herzog, Johannes Knapp, Benjamin Kazenwadel, Marcus Geimer

Miscanthus ist eine nachwachsende Energiepflanze mit großem Potenzial hinsichtlich des Einsatzes in bioökonomischen Wertschöpfungsketten. Als Grundlage für simulative Untersuchungen zur Handhabung und Umformung mittels der Diskrete-Elemente-Methode wurde ein Halmstrukturmodell für Miscanthus entwickelt und anhand von 4-Punkt-Biegeversuchen parametrierung. Unter Verwendung von Plackett-Burman-Versuchsplänen, einer darauf aufbauenden Varianzanalyse und der Methode des steilsten Anstiegs wurden die Signifikanz der Parameter und ihre optimalen Werte identifiziert. Die gefundene Parametrierung ermöglicht es, die wesentlichen Charakteristika des in den Versuchen beobachteten Materialverhaltens in der Simulation nachzubilden. Die in der Simulation auftretende maximale Biegekraft weicht um weniger als 2 % von den experimentell ermittelten Daten ab.

Schlüsselwörter

Diskrete-Elemente-Methode (DEM), Prozesssimulation, Parameterkalibrierung, Halmgut, Miscanthus

Der schonende Umgang mit begrenzt zur Verfügung stehenden Ressourcen und der damit einhergehende Ausbau der nachhaltigen Energieversorgung gehört zu den zentralen Herausforderungen unserer Zeit. Laut dem Umweltbundesamt leistete die Biomasse im Jahr 2024 in Deutschland sektorübergreifend (Strom, Wärme, Verkehr) einen Anteil von 47 % zur Bereitstellung von erneuerbarer Endenergie und stellt somit den wichtigsten erneuerbaren Energieträger dar (UMWELTBUNDESAMT 2025). Dies unterstreicht die hohe Relevanz der weiteren Entwicklung und Optimierung von bioökonomischen Wertschöpfungsketten.

Miscanthus ist eine aus dem ostasiatischen Raum stammende perennierende Pflanze, die geringe Anforderungen an Boden und Klima stellt. Durch diese Eigenschaften zählt die Pflanze zu den vielversprechendsten Energiepflanzen in der Bioökonomie (FISCHER et al. 2005). Neben der energetischen Nutzung bietet Miscanthus auch vielseitige stoffliche Verwertungsmöglichkeiten, beispielsweise als Baumaterial oder Kunststoffersatz (FRITZ et al. 2009). Zur Ernte und Verdichtung von Miscanthus wird heute auf vorhandene Maschinen, in erster Linie herkömmliche Feldhäcksler und Ballenpressen, zurückgegriffen. Nach KALTSCHMITT et al. (2009) lässt sich Miscanthus somit zu einer Trockenmasse-dichte von ca. 140 kg m^{-3} verdichten. Unter der Annahme eines zum Erntezeitpunkt vorliegenden Feuchtegehalts von 20 % (MEEHAN et al. 2013) ergibt sich daraus eine reale Dichte von 175 kg m^{-3} . Aufgrund der daraus resultierenden hohen Transport- und Lagervolumina lässt sich der Transport- und Logistikprozess von Miscanthus derzeit nicht wirtschaftlich skalieren.

Um die vorhandenen Potenziale zur energetischen Verwertung von Energiepflanzen wirtschaftlich auszuschöpfen, ist die Entwicklung innovativer Prozesse und Maschinen erforderlich. Dabei stellt die

Simulation ein unverzichtbares Instrument dar, das es ermöglicht, Prozesse zu untersuchen und ein umfassendes Systemverständnis zu erlangen, ohne den kostenintensiven Aufbau und Betrieb von Prüfständen sowie Prototypen. Zur Untersuchung von Materialgutflüssen hat sich die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) als geeignete Simulationsmethode erwiesen. Die Verwendung von Bindungsmodellen ermöglicht es, mehrere Einzelelemente beliebig miteinander zu verbinden, auf diese Weise flexible Halmstrukturen zu modellieren und damit Prozesse in landwirtschaftlichen Maschinen zu analysieren (BECKER 2020, JÜNEMANN et al. 2013).

Zur Simulation von halmgutartiger Biomasse stehen bereits diverse Halmstrukturmodelle zur Verfügung. Hinsichtlich der Anordnung mehrerer Einzelelemente zu einem Halm wird zwischen den drei Grundstrukturen Kettenstruktur, Hohlstruktur und Vollstruktur differenziert. Bei der Kettenstruktur handelt es sich um eine eindimensionale Aneinanderreihung von Einzelelementen. Die Hohlstruktur setzt sich aus mehreren Elementketten zusammen, die meist ringförmig angeordnet sind. Die Vollstruktur stellt eine Erweiterung der Hohlstruktur um mindestens eine weitere Elementkette im Inneren des Rings dar. Die überwiegende Mehrheit der existierenden Modellierungsansätze für Halmgut ist entweder einer der drei Strukturen zuzuordnen oder stellt eine hybride Form dar, die Elemente mehrerer Strukturen kombiniert (JÜNEMANN et al. 2013).

Während jüngste Forschungsarbeiten ein besonderes Augenmerk auf die Prozesssimulation von Mais (HAN et al. 2024, KOVACS et al. 2017, LENAERTS et al. 2014, WANG et al. 2024, ZHANG et al. 2020) und Stroh (JÜNEMANN et al. 2013, KATTENSTROTH et al. 2011, LIU et al. 2023, ZENG und CHEN 2019) legen, mangelt es bisher an umfassenden Studien zur Modellierung von Miscanthus. Die Anzahl wissenschaftlicher Untersuchungen zu den Materialeigenschaften von Miscanthus ist bislang ebenfalls begrenzt. Zu den wenigen systematischen Untersuchungen zu Miscanthus zählt eine groß angelegte Feldstudie von KAACK und SCHWARZ (2001), die Informationen zu mechanischen Eigenschaften von Miscanthus liefert, unter anderem zum E-Modul. Zudem finden sich in der Forschung von MIAO et al. (2015) und BARGEN-HERZOG et al. (2024) Angaben zum Kompressionsverhalten von Miscanthus.

Diese Arbeit setzt an dieser Forschungslücke an und befasst sich mit 4-Punkt-Biegeversuchen an Miscanthus sowie der darauf aufbauenden Entwicklung und Parametrierung eines Halmstrukturmodells für Miscanthus. Das Vorgehen orientiert sich an dem mehrstufigen Ansatz nach HAN et al. (2024), der ursprünglich für die Parametrierung eines Halmstrukturmodells für Mais entwickelt wurde. Demnach bilden Materialversuche, in diesem Fall 4-Punkt-Biegeversuche, die Grundlage für die Entwicklung des Halmstrukturmodells. Die Wertzuweisung der Parameter erfolgt unter Verwendung der Plackett-Burman-Versuchspläne, einer Varianzanalyse und der Methode des steilsten Anstiegs.

Das parametrierte Halmstrukturmodell ermöglicht die Simulation von Verarbeitungsprozessen von Miscanthus, bei denen die Halme einer Biegebeanspruchung ausgesetzt sind, etwa im Rahmen des Wickelvorgangs von Rundballen. Zudem sollen die Untersuchungen als Grundlage für weitere Forschung zur Simulation von Miscanthus dienen und die Entwicklung von neuartigen Maschinen und Prozessen unterstützen.

Material und Methoden

Im Folgenden werden zunächst das verwendete Versuchsmaterial und der Aufbau der 4-Punkt-Biegeversuche beschrieben. Darauf folgt eine kurze Einführung in die DEM-Simulation mit Fokus auf dem verwendeten Bindungsmodell. Abschließend wird das für diese Studie entwickelte Halmstrukturmodell vorgestellt und das methodische Vorgehen zu dessen Parametrierung aufgezeigt.

Versuchsmaterial

Beim untersuchten Material handelt es sich um Miscanthus-Pflanzen des Genotyps *Miscanthus x giganteus* (GREEF und DEUTER 1993). Charakteristisch für Miscanthus ist der segmentartige Aufbau der Halme, der durch die Unterteilung eines Halms in Knoten und Internodien entsteht (Abbildung 1). Der Durchmesser und die Steifigkeit der Knoten und Internodien nehmen entlang der Wuchsrichtung ab, wodurch Miscanthus-Stängel ein inhomogenes Materialverhalten aufweisen. Diese Struktur findet sich nicht nur bei Miscanthus, sondern ist ein typisches Merkmal vieler Halmgüter.

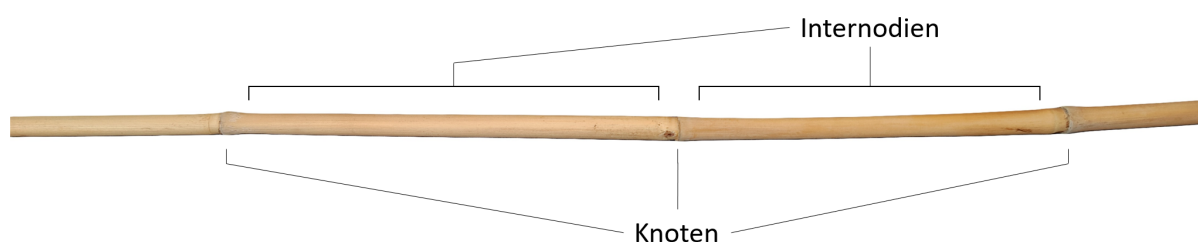


Abbildung 1: Segmentartiger Aufbau eines Miscanthus-Halms

Als Proben für die Materialversuche dienen etwa 12 cm lange Teilstücke von Miscanthus-Stängeln, die in Süddeutschland angebaut und im Frühjahr 2022 und 2023 geerntet wurden. Die Stängel wurden über mehrere Monate gelagert, wodurch der Feuchteanteil minimiert und sein Einfluss auf die untersuchten Materialeigenschaften als vernachlässigbar angenommen wird. Die insgesamt 196 zur Verfügung stehenden Probenausschnitte wurden unabhängig von ihrer Position entlang des Stängels entnommen. Aufgrund der inhomogenen Materialeigenschaften entlang der Wuchsrichtung weisen die in Tabelle 1 angegebenen Eigenschaften der Proben entsprechend hohe Variationskoeffizienten auf. Da das in der vorliegenden Studie untersuchte Halmstrukturmodell die Inhomogenitäten entlang des Stängels nicht abbildet, ist eine Differenzierung nach der Entnahmeposition einer Probe nicht Gegenstand der Materialversuche. Bedingt durch den großen Einfluss, den Knoten auf das Materialverhalten haben, wird jedoch eine Unterscheidung zwischen Proben mit und ohne Knoten vorgenommen. Bei den Proben, die einen Knoten enthalten, ist dieser stets mittig innerhalb des Probenabschnitts positioniert.

Tabelle 1: Eigenschaften der Miscanthus-Proben

Größe	Notation	Arithmetisches Mittel	Standardabweichung
Länge in mm	l	116,63	15,80
Durchmesser in mm	d	7,41	1,15
Gewicht in g	m	1,46	0,70
Dichte ¹⁾ in kg m ⁻³	ρ	274,00	67,00

¹⁾ Die Berechnung der Dichte beruht auf der Annäherung eines zylindrischen Volumens der Proben.

4-Punkt-Biegeversuch

Bei der Verarbeitung von Halmgut treten in vielen Prozessen, beispielsweise bei Förder- oder Wickelprozessen, Biegebeanspruchungen auf. 4-Punkt-Biegeversuche erzeugen gegenüber 3-Punkt-Biegeversuchen eine gleichmäßigere Biegespannung über einen definierten Probenabschnitt und erfassen

somit die mechanischen Eigenschaften der heterogenen Halme repräsentativer. Daher dienen diese Versuche als Grundlage für die Parametrierung des Halmstrukturmodells für *Miscanthus*. Der Versuchsaufbau gestaltet sich entsprechend dem in Abbildung 2 abgebildeten Schema. Der Pressstempel verfährt mit konstanter Geschwindigkeit vertikal nach unten, bis eine Durchbiegung von 12 mm erreicht ist. Diese Vorgabe basiert auf Vorversuchen, in denen bei diesem Verfahrensweg in jedem Fall wieder ein Kraftabfall erkennbar war. Ein Kraftsensor erfasst die über den Pressstempel aufgebrachte Kraft auf die Probe.

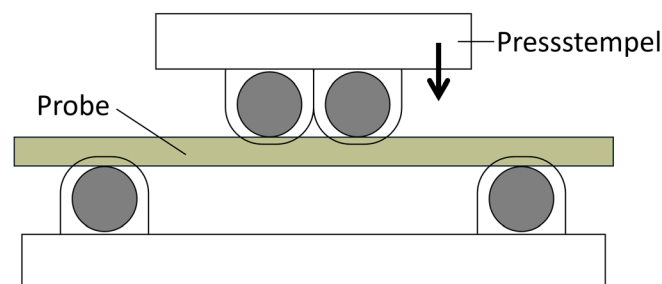


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche

DEM-Simulation

Zur Durchführung der DEM-Simulationen kommt die Software Altair EDEM zum Einsatz. In Form von Partikeln respektive Meta-Partikel (Zusammenschluss mehrerer Partikel) werden beispielsweise Schüttgut, körniges Material oder Halmgut modelliert. Die Umgebung, mit der die Partikel interagieren, wird durch Geometrien nachgebildet. Grundlegend basiert die Simulation auf der Auswertung der Newtonschen Bewegungsgleichungen. Zudem stehen zur Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen den Partikeln unterschiedliche Kontaktmodelle zur Verfügung. Zwingend erforderlich ist ein Basis-Kontaktmodell, das definiert, wie eine Kollision zwischen Partikeln und Geometrien oder Partikeln untereinander abläuft. In dieser Studie wird das Hertz-Mindlin (no slip) model (CUNDALL und STRACK 1979, HERTZ 1881, MINDLIN 1949, MINDLIN und DERESIEWICZ 1953, SAKAGUCHI et al. 1993, TSUJI et al. 1992) als Basis-Kontaktmodell verwendet, da es eine genaue und effiziente Berechnung der Kraft ermöglicht.

Um mehrere Einzelpartikel zu einem Meta-Partikel zusammenzufügen ist zusätzlich zum Basis-Kontaktmodell die Verwendung eines weiteren Kontaktmodells zur Beschreibung von Partikelverbindungen notwendig. Dafür wird das Bonding-V2-Modell eingesetzt, das auf den Arbeiten von POTYONDY und CUNDALL (2004) beruht. Die Verbindungen zwischen den Partikeln werden zu einem vorgegebenen Zeitpunkt (Creation Time) generiert. Anschließend werden die Kräfte in Normal- und Tangentialrichtung (F_n , F_t) auf null gesetzt und nach den Gleichungen 1 und 2 inkremental für jeden Zeitschritt berechnet. Die Kraftdifferenz pro Zeitschritt (δF_n , δF_t) ergibt sich demnach aus dem Produkt der Geschwindigkeit (v_n , v_t), der Normal- beziehungsweise Schersteifigkeit (S_n , S_t), der Kontaktfläche (A) und dem Zeitschritt (δt). Die Normal- und Schersteifigkeit bezeichnen dabei jeweils die Steifigkeit pro Flächeneinheit und sind daher in der Einheit N m^{-3} anzugeben. Analog dazu erfolgt unter Verwendung der Winkelgeschwindigkeit (w_n , w_t) und des Trägheitsmoments (J) die Berechnung der Momente (M_n , M_t) nach den Gleichungen 3 und 4. Zur Berechnung der Kontaktfläche (Gleichung 5) und des Trägheitsmoments (Gleichung 6) wird der Bindungsradius (R_B) verwendet.

Dieser ist als das Produkt aus dem kleinsten Partikelradius eines Kontaktpaares ($R_{\min}$) und dem Skalierungsfaktor Bonded Disk Scale (BDS) definiert (Gleichung 7) (HAN et al. 2024).

$$\delta F_n = -v_n S_n A \delta t \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\delta F_t = -v_t S_t A \delta t \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\delta M_n = -w_n S_t J \delta t \quad (\text{Gl. 3})$$

$$\delta M_t = -w_t S_n \frac{J}{2} \delta t \quad (\text{Gl. 4})$$

mit

$$A = \pi R_B^2 \quad (\text{Gl. 5})$$

$$J = \frac{1}{2} \pi R_B^4 \quad (\text{Gl. 6})$$

$$R_B = R_{\min} * BDS \quad (\text{Gl. 7})$$

Eine Verbindung zwischen Partikeln hält so lange, bis die auftretenden normalen und tangentialen Scherspannungen vorgegebene Maximalwerte ($\sigma_{\max}, \tau_{\max}$) überschreiten. Die Berechnung dieser Schwellenwerte erfolgt gemäß den Gleichungen 8 und 9 (HAN et al. 2024).

$$\sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J} R_B \quad (\text{Gl. 8})$$

$$\tau_{\max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{M_n}{J} R_B \quad (\text{Gl. 9})$$

Halmstrukturmodell für Miscanthus

Das in dieser Studie verwendete Halmstrukturmodell für Miscanthus setzt sich aus der Hohl- und Vollstruktur zusammen. Die Hohlstruktur bildet die Internodien nach, während die Vollstruktur die verholzte Beschaffenheit der Knoten widerspiegelt. Sowohl bei der Hohl- als auch bei der Vollstruktur sind zwölf Elemente bündig über einen Kreisumfang verteilt. Zusätzlich beinhaltet die Vollstruktur ein 13. Element im Inneren des Partikelkreises (Abbildung 3). Ein Miscanthus-Halm wird somit durch ein Meta-Partikel beschrieben, das sich aus drei unterschiedlichen Arten von Partikeln zusam-

men setzt: Elemente zur Darstellung der Internodien (*Typ A*), Elemente zur Darstellung der Knotenringe (*Typ B*) und Elemente zur Darstellung der Knotenmitte (*Typ C*).

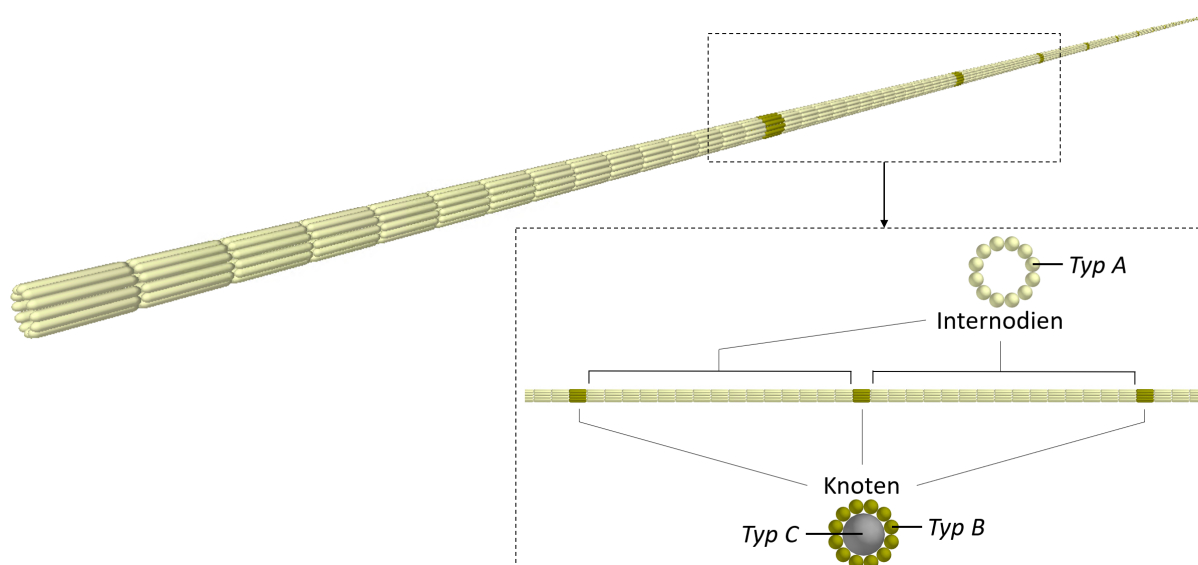


Abbildung 3: Halmstrukturmodell für Miscanthus

Bei allen verwendeten Elementen handelt es sich um sphärozyindrische Körper. Diese kommen häufig zur Modellierung von Halmgut zum Einsatz, da gegenüber Kugelementen weniger Elemente zur Abbildung eines Halms gleicher Länge erforderlich sind. Mit einer zunehmenden Anzahl an Elementen und damit einhergehend mehr zu lösenden Bewegungs- und Kontaktgleichungen steigen die benötigten Rechenressourcen signifikant an. Demgegenüber besteht die Gefahr, durch weniger und folglich größere Elemente nicht mehr die gewünschte Detaillierungstiefe zu erreichen. Unter Berücksichtigung dieses Zielkonflikts wird für die Sphärozyylinder in diesem Halmstrukturmodell jeweils eine Länge von 10 mm gewählt, sodass sich ein Halm bei einer Länge von 2.500 mm aus 250 Ringstrukturen zusammensetzt. Dabei sind im Wechsel 15 hohle Ringstrukturen zur Nachbildung eines Internodiums und eine gefüllte Ringstruktur zur Nachbildung eines Knotens angeordnet.

Die Durchmesser der Sphärozyylinder ergeben sich aus den Vorgaben, dass der Gesamtdurchmesser der Internodien 7,5 mm und der Gesamtdurchmesser eines Knotens 7,7 mm beträgt (Tabelle 2). Die Dichte der Elemente resultiert aus der Erkenntnis, dass Proben ohne Knoten eine mittlere Dichte von 254 kg m^{-3} und Proben mit Knoten eine mittlere Dichte von 289 kg m^{-3} aufweisen. Aufgrund der Hohlstruktur der Stängel folgen daraus die in Tabelle 2 angegebenen Werte.

Tabelle 2: Eigenschaften der verwendeten Sphärozyylinder zur Modellierung von Miscanthus

Größe	Notation	Sphärozyylinder zur Modellierung der Internodien	Sphärozyylinder zur Modellierung des Knotenrings	Sphärozyylinder zur Modellierung der Knotenmitte
Länge in mm	l	10,00	10,00	10,00
Durchmesser in mm	d	1,54	1,58	4,53
Dichte in kg m^{-3}	ρ	527,87	785,51	785,51

Parametrierung des Halmstrukturmodells

Die Verwendung des Halmstrukturmodells in der DEM-Simulation setzt die Festlegung mehrerer Parameter aus unterschiedlichen Kategorien voraus. Erstens sind die Materialeigenschaften der Internodien und der Knoten, die durch die Poisson-Zahl und den E-Modul charakterisiert werden, zu definieren. Zweitens sind die Stoßzahl sowie die Koeffizienten der Haft- und Gleitreibung zur Modellierung der Wechselwirkungen zwischen den Materialien (Internodien, Knoten, Stahl) festzulegen. Dabei gilt es sowohl die Interaktion zwischen identischen Materialien (z. B. Internodien-Internodien) als auch zwischen unterschiedlichen Materialpaarungen (z. B. Internodien-Knoten, Internodien-Stahl) zu berücksichtigen. Drittens umfasst das Modell Parameter zur Beschreibung des Bonding-V2-Modells. Bei diesen Parametern handelt es sich um die Normal- und Schersteifigkeit, die kritische Belastung in Normal- und Scherrichtung und den Bonded-Disk-Radius. Diese Parameter sind jeweils für Verbindungen von Internodien-Elementen untereinander, von Knoten-Elementen untereinander und von Internodien-Elementen mit Knoten-Elementen anzugeben.

Die Parametrierung des Halmstrukturmodells erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeversuche und deren Nachbildung in der Simulation. Da es sich bei den in den Versuchen analysierten *Miscanthus*-Proben nicht um ganze Halme, sondern nur um Segmente handelt, stellt die Nachbildung der Proben in der Simulation einen je 110 mm langen Ausschnitt des beschriebenen Halmstrukturmodells dar. Während sich das Modell einer *Miscanthus*-Probe ohne Knoten (Abbildung 4) ausschließlich aus den Elementen zur Abbildung eines Internodiums zusammensetzt, enthält die Nachbildung einer *Miscanthus*-Probe mit Knoten (Abbildung 5) an mittlerer Position die für den Knoten charakteristische gefüllte Ringstruktur.

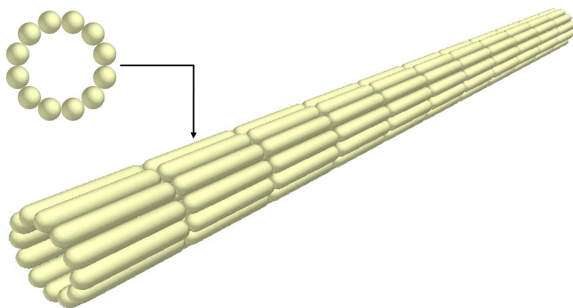


Abbildung 4: Modell einer Probe ohne Knoten

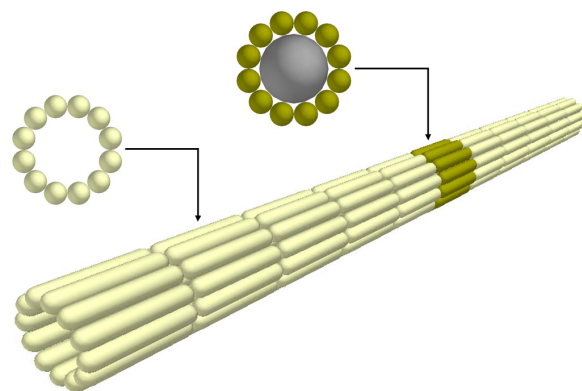


Abbildung 5: Modell einer Probe mit Knoten

Im ersten Schritt wird das Biegeverhalten von Proben ohne Knoten ausgewertet, sodass zunächst nur die Parameter zur Beschreibung des Materials der Internodien und dessen Wechselwirkungen mit Stahl und sich selbst berücksichtigt werden müssen. Nach Festlegung dieser Parameter werden auch die Versuche mit den Proben mit Knoten herangezogen, um auch das Material der Knoten und dessen Wechselwirkungen zu parametrieren.

Trotz dieses zweistufigen Vorgehens bei der Parametrierung, sind in beiden Stufen jeweils eine Vielzahl an Parametern zu evaluieren. Um dabei die Parameter mit dem größten Einfluss auf das Simulationsergebnis zu identifizieren, bietet sich die Verwendung von Plackett-Burman-Versuchsplä-

nen an. Diese Versuchspläne beruhen darauf, dass für die zu untersuchenden Parameter jeweils ein niedriges Niveau (Low Level) und ein hohes Niveau (High Level) festgelegt werden und nach einem vorgegebenen Schema zwischen diesen Werten gewechselt wird. Die Zahl -1 steht in den Plänen für Low Level, die Zahl 1 für High Level. Auf diese Weise ist es möglich, mit n Simulationsdurchläufen eine Anzahl von $n - 1$ Parameter zu untersuchen und mithilfe einer Varianzanalyse die signifikanten Parameter zu entdecken. Plackett-Burman-Pläne gibt es für 8 bis 96 Versuchsläufe, wobei die Anzahl der Versuche ein Vielfaches von 4 betragen muss (SIEBERTZ et al. 2017).

In Tabelle 3 sind die Parameter und die zugehörigen Low-Level- und High-Level-Werte aufgelistet, die zur Nachbildung der Miscanthus-Proben ohne Knoten relevant sind. Tabelle 4 stellt das Äquivalent für Miscanthus-Proben mit Knoten dar. Hinsichtlich der Modellierung von Proben ohne Knoten wird der Einfluss von 13 Parametern analysiert. Die identifizierte Parametereinstellung zur Beschreibung der Internodien wird für die Modellierung der Proben mit Knoten übernommen und darauf aufbauend werden 12 weitere Parameter untersucht. In beiden Fällen sind unter Verwendung der Plackett-Burman-Pläne 16 Simulationsdurchläufe erforderlich. Da sich diese Pläne mit bis zu 15 Faktoren belegen lassen, werden die zwei beziehungsweise drei freibleibenden Spalten durch Dummy-Variablen besetzt.

Tabelle 3: Relevante Parameter mit Low und High Level für die Modellierung von Miscanthus-Proben ohne Knoten

Parameter	Material	Notation	Low Level (-1)	High Level (+1)
Poisson-Zahl	Internodien	ν_I	0,15	0,45
Elastizitätsmodul in Pa	Internodien	E_I	$2 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^9$
Stoßzahl	Internodien-Stahl	e_{I-St}	0,2	0,6
Haftreibungskoeffizient	Internodien-Stahl	$\mu_{S,I-St}$	0,2	0,6
Gleitreibungskoeffizient	Internodien-Stahl	$\mu_{R,I-St}$	0,1	0,3
Stoßzahl	Internodien-Internodien	e_{I-I}	0,2	0,6
Haftreibungskoeffizient	Internodien-Internodien	$\mu_{S,I-I}$	0,2	0,6
Gleitreibungskoeffizient	Internodien-Internodien	$\mu_{R,I-I}$	0,1	0,3
Normalsteifigkeit in Nm^{-3}	Internodien-Internodien	$S_{N,I-I}$	$5 \cdot 10^{10}$	$25 \cdot 10^{10}$
Schersteifigkeit in Nm^{-3}	Internodien-Internodien	$S_{T,I-I}$	$2 \cdot 10^{10}$	$10 \cdot 10^{10}$
Max. Normalspannung in Pa	Internodien-Internodien	$\sigma_{max,I-I}$	$5 \cdot 10^7$	$25 \cdot 10^7$
Max. Scherspannung in Pa	Internodien-Internodien	$\tau_{max,I-I}$	$2 \cdot 10^7$	$10 \cdot 10^7$
Bonded Disk Scale	Internodien-Internodien	BDS_{I-I}	0,9	1,8
Dummy-Variablen	-	A, B	-	-

Tabelle 4: Relevante Parameter mit Low und High Level für die Modellierung von Miscanthus-Proben mit Knoten

Parameter	Material	Notation	Low Level (-1)	High Level (+1)
Poisson-Zahl	Knoten	ν_N	0,15	0,45
Elastizitätsmodul in Pa	Knoten	E_N	$3 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$
Normalsteifigkeit in Nm^{-3}	Internodien-Knoten	$S_{N,I-N}$	$5 \cdot 10^{10}$	$20 \cdot 10^{10}$
Schersteifigkeit in Nm^{-3}	Internodien-Knoten	$S_{T,I-N}$	$2 \cdot 10^{10}$	$10 \cdot 10^{10}$
Max. Normalspannung in Pa	Internodien-Knoten	$\sigma_{\max,I-N}$	$2 \cdot 10^7$	$10 \cdot 10^7$
Max. Scherspannung in Pa	Internodien-Knoten	$\tau_{\max,I-N}$	$1 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$
Bonded Disk Scale	Internodien-Knoten	BDS_{I-N}	0,9	1,8
Normalsteifigkeit in Nm^{-3}	Knoten-Knoten	$S_{N,N-N}$	$10 \cdot 10^{10}$	$50 \cdot 10^{10}$
Schersteifigkeit in Nm^{-3}	Knoten-Knoten	$S_{T,N-N}$	$4 \cdot 10^{10}$	$20 \cdot 10^{10}$
Max. Normalspannung in Pa	Knoten-Knoten	$\sigma_{\max,N-N}$	$10 \cdot 10^7$	$50 \cdot 10^7$
Max. Scherspannung in Pa	Knoten-Knoten	$\tau_{\max,N-N}$	$4 \cdot 10^7$	$20 \cdot 10^7$
Bonded Disk Scale	Knoten-Knoten	BDS_{N-N}	0,9	1,8
Dummy-Variablen	-	C, D, E	-	-

Die Festlegung der Low-Level- und High-Level-Werte basiert auf diversen Forschungsarbeiten zu Miscanthus und anderen halmgutartigen Materialien. Zur Poisson-Zahl (MIAO et al. 2015) und dem E-Modul (KAACK und SCHWARZ 2001, LIU und KOC 2017, LIU et al. 2012) liegen bereits konkrete Forschungen für Miscanthus vor. Hinsichtlich der Beschreibung der Materialwechselwirkungen von Miscanthus fehlt es derzeit an einer fundierten Datenbasis, sodass Studien zu anderen Halmgütern, insbesondere Mais, als Orientierung herangezogen werden (HAN et al. 2024, Kovács et al. 2015, LI et al. 2024, LIU et al. 2023, ZHANG et al. 2020).

Die Auswertung der Simulationsdurchläufe gemäß dem Plackett-Burman-Plan erfolgt in Form einer Varianzanalyse, orientiert an SIEBERTZ et al. (2017). Diese baut darauf auf, dass eine Zielgröße (y) festgelegt wird, die charakteristisch für das zu untersuchende Phänomen ist.

Zur Ermittlung der Gesamtvarianz der Simulationsreihe V_{Ges} (Gleichung 10) wird zunächst der Mittelwert $\bar{y}$ der n Versuche bestimmt und anschließend die durchschnittliche Abweichung der Werte der einzelnen Versuche y_i zum Mittelwert $\bar{y}$ betrachtet.

$$V_{\text{Ges}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Gl. 10})$$

Neben der Gesamtvarianz der Versuchsreihe wird jedem Parameter eine Teilvarianz V_j zugeordnet (Gleichung 12). Diese ergibt sich aus dem Effekt eines Parameters E_j , der wiederum durch die Mittelwerte aller Simulationsdurchläufe mit dem niedrigen Wert $\bar{y}_{j,-}$ und dem Mittelwert aller Simulationsdurchläufe mit dem hohen Wert $\bar{y}_{j,+}$ berechnet wird (Gleichung 11).

$$E_j = \frac{\bar{y}_{j,+} - \bar{y}_{j,-}}{2} \quad (\text{Gl. 11})$$

$$V_j = E_j^2 \quad (\text{Gl. 12})$$

Zur Beschreibung der Unsicherheit bei der Bestimmung der Effekte, wird nach Gleichung 13 der Standardfehler S aus den Effekten der Dummy-Variablen $E_{\text{DV},i}$ berechnet, wobei n_{DV} die Anzahl der Dummy-Variablen angibt.

$$S = \frac{1}{n_{\text{DV}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{DV}}} E_{\text{DV},i} \quad (\text{Gl. 13})$$

Durch die Division der Effekte durch den Standardfehler wird abschließend die t-Statistik abgeleitet (Gleichung 14). Allgemein deutet ein höherer Betrag des t-Werts t_j auf eine größere Signifikanz des Parameters hin. Als Schwellenwert dient dabei der kritische t-Wert t_{krit} , der abhängig von der Anzahl an Freiheitsgraden und der festgelegten Irrtumswahrscheinlichkeit ist. Bei 15 Freiheitsgraden und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % beläuft sich der kritische t-Wert auf 2,13 (KLEIN 2021). In dieser Studie werden Parameter, deren Betrag des t-Werts größer ist als der kritische t-Wert, als signifikant eingestuft und für die weitere Parametrisierung des Simulationsmodells herangezogen.

$$t_j = \frac{E_j}{S} \quad (\text{Gl. 14})$$

Die weitere Parametrierung erfolgt unter Verwendung der Methode des steilsten Anstiegs. In einem iterativen Vorgehen werden die Parameter mit dem größten Effekt systematisch variiert, wobei die Richtung durch das Vorzeichen des Effekts bestimmt wird. Die Schrittweite wird zunächst derart ausgewählt, dass in fünf Schritten der gesamte Parameterraum zwischen dem Low-Level- und dem High-Level-Wert betrachtet wird. Anschließend wird der Simulationsplan ausgehend von der Simulation, bei der die Zielgröße den nächstkleineren Wert zu dem in den Versuchen gemessenen Zielwert aufweist, mit einer feineren Schrittweite fortgeführt. Die Schrittweite der Parameter wird dafür auf ein Zehntel der zuvor verwendeten Schrittweite festgelegt. Zudem werden die Simulationen fortan zweimal durchgeführt und ein Mittelwert der Zielgröße gebildet, um den Einfluss kleiner Streuungen in der Simulation zu reduzieren. Die Parameter werden so lange variiert bis der Zielwert erstmals überschritten wird. Der Simulationsdurchlauf, bei dem der Zielwert am besten angenähert wurde, wird zu Verifikation noch ein drittes Mal durchgeführt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse umfassen zum einen die Auswertung der experimentellen 4-Punkt-Biegeversuche und zum anderen die Parametrierung des Halmstrukturmodells. Letzteres gliedert sich in die Parametrierung der Internodien und die Parametrierung der Knoten.

Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeversuche

Die durchgeführten Materialversuche beinhalten unter anderem 40 4-Punkt-Biegeversuche. Diese 4-Punkt-Biegeversuche werden für die Parametrierung des Halmstrukturmodells herangezogen. Bei den 4-Punkt-Biegeversuchen wurden je 20 Proben ohne und mit Knoten untersucht. Es konnte beobachtet werden, dass Proben ohne Knoten primär eine plastische Verformung in Form von leichten Knickstellen aufweisen, ohne sichtbare Anzeichen von Bruch. Im Gegensatz dazu zeigten Proben mit Knoten ein ausgeprägtes Versagensverhalten, das sich durch den Bruch einzelner Fasern auf der konvexen Seite des Knicks manifestierte. Die Fasern auf der konkaven Seite rissen nicht auseinander und verhinderten so eine vollständige Separation des Stängels. Diese Unterschiede im Deformations- und Versagensverhalten lassen darauf schließen, dass Internodien und Knoten unterschiedliche mechanische Eigenschaften und Wechselwirkungen zueinander haben.

Die beschriebenen charakteristischen Unterschiede der beiden Probentypen unter Biegebelastung lassen sich auch anhand des Verlaufs der Biegekraft über der Durchbiegung nachvollziehen. Abbildung 6 und Abbildung 7 stellen exemplarisch den Verlauf der Biegekraft für drei Proben ohne Knoten und drei Proben mit Knoten dar. Der sprunghafte Kraftabfall, der nur bei den Verläufen der Proben mit Knoten auftritt, weist auf einen Bruch einzelner beziehungsweise mehrerer Fasern hin.

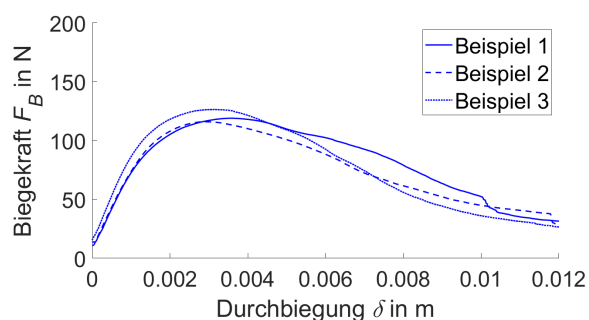


Abbildung 6: Biegekraft-Durchbiegungsverlauf für drei exemplarische Proben ohne Knoten

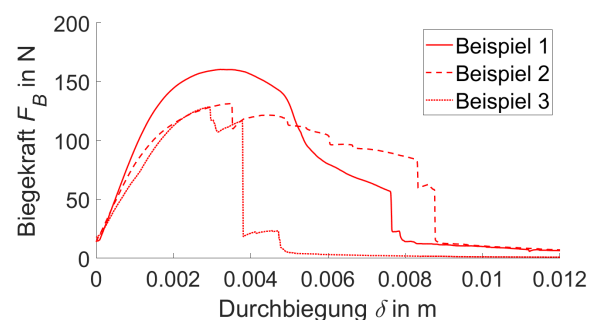


Abbildung 7: Biegekraft-Durchbiegungsverlauf für drei exemplarische Proben mit Knoten

Als quantitativer Wert zur Beschreibung der 4-Punkt-Biegeversuche wird die maximal auftretende Biegekraft F_B herangezogen. Tabelle 5 zeigt den Mittelwert der maximalen Biegekraft für alle Versuche sowie die Mittelwerte getrennt für die Versuchsdurchführungen unter Verwendung von Proben ohne Knoten und Proben mit Knoten. Die Standardabweichung, die ebenfalls in Tabelle 5 angegeben ist, weist auf eine große Streubreite der gemessenen Werte hin. Diese ist auf die inhomogenen Materialeigenschaften von *Miscanthus* zurückzuführen, die im Rahmen der vorliegenden Studie jedoch nicht näher untersucht wurden.

Tabelle 5: Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeversuche

Proben	Anzahl der Proben	Mittelwert der max. Biegekraft F_B in N	Standardabweichung in N
Alle Proben	40	142,55	78,32
Proben ohne Knoten	20	134,45	69,54
Proben mit Knoten	20	150,64	85,46

Parametrierung der Internodien

Die Parametrierung der Internodien basiert auf der Modellierung der 4-Punkt-Biegeversuche der Miscanthus-Proben ohne Knoten. Gemäß dem Plackett-Burman-Plan werden 16 Simulationen durchgeführt. Dabei werden 13 Parameter berücksichtigt, die jeweils die Ausprägungen Low Level (–1) und High Level (1) annehmen können. Die Ergebnisse der Simulationen werden in Form der maximalen Biegekraft F_B dokumentiert und sind zusammen mit dem Simulationsplan in Tabelle A1 (siehe Anhang) dargestellt.

Der Einfluss der untersuchten Parameter wird anhand der Varianzanalyse deutlich, deren detaillierte Ergebnisse in Tabelle 6 aufgelistet sind. Die Gesamtvarianz des Systems beträgt 5.960 N^2 . Die größte Teilvarianz entfällt mit 1.915 N^2 auf den Bonded Disk Scale (BDS_{I-I}) und führt zu einem t-Wert von 4,28. Damit stellt der Bonded Disk Scale den Parameter mit der größten Signifikanz dar. Mit betragsmäßigen t-Werten von größer 2,13 werden zudem die Normalsteifigkeit ($S_{N,I-I}$), der Gleitreibungskoeffizient zwischen den Internodien ($\mu_{R,I-I}$) und die Stoßzahl zwischen Internodien und Stahl (e_{I-St}) als signifikant eingestuft.

Tabelle 6: Varianzanalyse der Plackett-Burman-Simulationsergebnisse der Miscanthus-Proben ohne Knoten

Parameter	Mittelwert (–1) in N	Mittelwert (+1) in N	Effekt in N	Teilvarianz in N^2	t-Statistik
v_I	89,44	68,05	–10,70	114,44	–1,05
E_I	66,82	90,67	11,93	142,23	1,17
e_{I-St}	54,25	103,24	24,49	599,95	2,39
$\mu_{S,I-St}$	69,79	87,70	8,95	80,19	0,88
$\mu_{R,I-St}$	83,82	73,68	–5,07	25,71	–0,50
e_{I-I}	69,24	88,25	9,50	90,31	0,93
$\mu_{S,I-I}$	73,67	83,82	5,08	25,78	0,50
$\mu_{R,I-I}$	106,49	51,00	–27,75	769,79	–2,71
$S_{N,I-I}$	41,68	115,81	37,06	1.373,80	3,62
$S_{T,I-I}$	97,66	59,83	–18,92	357,81	–1,85
$\sigma_{\max,I-I}$	86,23	71,26	–7,48	56,01	–0,73
$\tau_{\max,I-I}$	64,62	92,87	14,12	199,47	1,38
BDS_{I-I}	34,98	122,51	43,76	1.915,22	4,28

Allen Parametern, die laut der Varianzanalyse nicht signifikant sind, wird für die weitere Betrachtung der Mittelwert zwischen ihrem Low-Level- und High-Level-Wert zugewiesen. Die vier als signifikant eingestuften Parameter werden nach der Methode des steilsten Anstiegs gemäß Tabelle 7 variiert. Die Erwartung, dass die maximale Biegekraft in aufsteigender Richtung der Parameter zunimmt, wird bestätigt. Unter Verwendung der Wertzuweisungen nach Nummer 8 des Simulationsplans werden die realen Versuchsergebnisse am besten abgebildet. Drei Simulationsdurchläufe mit diesen Einstellungen liefern einen Mittelwert der maximalen Biegekraft von 133,20 N. Im Vergleich zum gemittelten Wert des 4-Punkt-Biegeversuche von 134,45 N entspricht das einer prozentualen Abweichung von 0,93 %.

Tabelle 7: Simulationsplan und -ergebnisse nach der Methode des steilsten Anstiegs für Proben ohne Knoten

Nr.	Stoßzahl e_{I-St}	Gleitreibungskoef. $\mu_{R,I-I}$	Normalsteifigkeit $S_{N,I-I}$ in Nm^{-3}	Bonded Disk Scale BDS_{I-I}	Biegekraft F_B in N
1	0,2	0,30	$5 \cdot 10^{10}$	0,900	13,99
2	0,3	0,25	$10 \cdot 10^{10}$	1,125	41,11
3	0,4	0,20	$15 \cdot 10^{10}$	1,350	105,13
4	0,5	0,15	$20 \cdot 10^{10}$	1,575	217,06
5	0,6	0,10	$25 \cdot 10^{10}$	1,800	398,03
6	0,41	0,195	$15,5 \cdot 10^{10}$	1,3725	92,58 ¹⁾
7	0,42	0,190	$16,0 \cdot 10^{10}$	1,3950	120,55 ¹⁾
8	0,43	0,185	$16,5 \cdot 10^{10}$	1,4175	133,20²⁾
9	0,44	0,180	$17,0 \cdot 10^{10}$	1,4400	159,66 ¹⁾

¹⁾ Mittelwert aus 2 Simulationsdurchläufen.

²⁾ Mittelwert aus 3 Simulationsdurchläufen.

Parametrierung der Knoten

Zur Parametrierung der Knoten werden die 4-Punkt-Biegeversuche der Miscanthus-Proben mit Knoten herangezogen. Die Parameter zur Beschreibung des Materials der Internodien sind aus vorherigem Schritt bekannt und werden in dieser Form übernommen. Zudem wird die Annahme getroffen, dass zum einen die ermittelte Stoßzahl und die ermittelten Reibkoeffizienten zwischen Internodien und Stahl auch bei der Materialpaarung Knoten und Stahl gelten (Gleichungen 15–17). Zum anderen werden die Parameter zur Beschreibung des Stoß- und Reibverhaltens zwischen Internodien untereinander auch für die Wechselwirkungen zwischen Internodien und Knoten sowie zwischen Knoten untereinander übernommen (Gleichungen 18–20).

$$e_{I-St} = e_{N-St} \quad (\text{Gl. 15})$$

$$\mu_{S,I-St} = \mu_{S,N-St} \quad (\text{Gl. 16})$$

$$\mu_{R,I-St} = \mu_{R,N-St} \quad (\text{Gl. 17})$$

$$e_{I-I} = e_{I-N} = e_{N-N} \quad (\text{Gl. 18})$$

$$\mu_{S,I-I} = \mu_{S,I-N} = \mu_{S,N-N} \quad (\text{Gl. 19})$$

$$\mu_{R,I-I} = \mu_{R,I-N} = \mu_{R,N-N} \quad (\text{Gl. 20})$$

Somit verbleiben zwölf Parameter, die unter Verwendung des Plackett-Burman-Plans analysiert werden. Der Simulationsplan und die zugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle A2 (siehe Anhang) aufgelistet.

Aus der Varianzanalyse (Tabelle 8) ergibt sich eine Gesamtvarianz von $2.803,38 N^2$. Den kritischen t-Wert von 2,13 überschreiten nur der Bonded Disk Scale (BDS_{I-N}) und die Normalsteifigkeit ($S_{N,I-I}$), welche die Verbindung zwischen Internodien und Knoten charakterisieren. Die anderen Parameter gelten als nicht signifikant und werden wiederum als Mittelwert zwischen ihrem Low-Level- und High-Level-Wert definiert. Abweichend hiervon gilt für die maximale Biegespannung zwischen Internodien

und Knoten ($\sigma_{\max, I-N}$), dass dieser ihr High-Level-Wert zugewiesen wird. Dies ist auf die Beobachtung zurückzuführen, dass es bei allen acht Simulationsdurchläufen mit Zuweisung des Low-Level-Werts zum vollständigen Bruch der Probe kommt, während bei den acht Simulationen unter Verwendung des High-Level-Werts nur einzelne Fasern brechen. Letzteres bildet das in den Versuchen beobachtete Materialverhalten qualitativ wesentlich genauer ab.

Tabelle 8: Varianzanalyse der Plackett-Burman-Simulationsergebnisse der Miscanthus-Proben mit Knoten

Parameter	Mittelwert (−1) in N	Mittelwert (+1) in N	Effekt in N	Teilvarianz in N ²	t-Statistik
ν_N	87,61	91,83	2,11	4,46	0,42
E_N	93,55	85,88	-3,83	14,68	-0,77
$S_{N,I-N}$	59,61	119,83	30,11	906,63	6,06
$S_{T,I-N}$	91,77	87,66	-2,06	4,23	-0,41
$\sigma_{\max, I-N}$	86,55	92,88	3,16	10,00	0,64
$\tau_{\max, I-N}$	84,35	95,08	5,36	28,76	1,08
BDS_{I-N}	50,26	129,17	39,46	1.556,91	7,94
$S_{N,N-N}$	85,38	94,05	4,34	18,81	0,87
$S_{T,N-N}$	91,69	87,74	-1,97	3,90	-0,40
$\sigma_{\max, N-N}$	94,88	84,55	-5,16	26,65	-1,04
$\tau_{\max, N-N}$	93,58	85,85	-3,87	14,96	-0,78
BDS_{N-N}	85,66	93,77	4,05	16,43	0,82

Die Methode des steilsten Anstiegs basiert in diesem Fall nur auf der Veränderung von zwei Parametern. Wieder bestätigt sich die Erwartung, dass die maximale Biegekraft in aufsteigender Richtung zunimmt. Die beste Annäherung der Versuchsergebnisse wird durch die Parametereinstellungen der Simulationsnummer 10 erreicht (Tabelle 9). Der Mittelwert der maximalen Biegekraft von drei Simulationsdurchläufen mit diesen Einstellungen beträgt 147,80 N und weicht somit um 1,89 % von dem korrespondierenden Wert der Versuche ab (150,64 N).

Tabelle 9: Simulationsplan und -ergebnisse nach der Methode des steilsten Anstiegs für Proben mit Knoten

Nr.	Normalsteifigkeit $S_{N,I-N}$ in Nm ⁻³	Bonded Disk Scale BDS_{I-N}	Biegekraft F_B in N
1	$5,00 \cdot 10^{10}$	0,900	22,45
2	$8,75 \cdot 10^{10}$	1,125	58,77
3	$12,50 \cdot 10^{10}$	1,350	118,74
4	$16,25 \cdot 10^{10}$	1,575	169,08
5	$20,00 \cdot 10^{10}$	1,800	174,32
6	$12,875 \cdot 10^{10}$	1,3725	128,46 ¹⁾
7	$13,250 \cdot 10^{10}$	1,3950	134,47 ¹⁾
8	$13,625 \cdot 10^{10}$	1,4175	139,94 ¹⁾
9	$14,000 \cdot 10^{10}$	1,4400	142,30 ¹⁾
10	$14,375 \cdot 10^{10}$	1,4628	147,80²⁾
11	$14,750 \cdot 10^{10}$	1,4850	155,67 ¹⁾

¹⁾ Mittelwert aus 2 Simulationsdurchläufen.

²⁾ Mittelwert aus 3 Simulationsdurchläufen.

Tabelle A3 (siehe Anhang) stellt eine Übersicht aller in dieser Studie identifizierten Werte zur Parametrierung des Halmstrukturmodells von *Miscanthus* dar.

Diskussion

Die bei den experimentellen Untersuchungen beobachteten Unterschiede im Verformungsverhalten von Proben ohne Knoten und Proben mit Knoten treten auch in der Simulation auf. Abbildung 8 stellt die Simulationsergebnisse einer Probe ohne Knoten den Simulationsergebnissen einer Probe mit Knoten gegenüber. Im Fall ohne Knoten werden die Fasern zusammengedrückt und die Verbindungen zwischen den Einzelementen bleiben größtenteils bestehen. Bei den Proben mit Knoten brechen unter Belastung hingegen die Partikelverbindungen auf der konvexen Seite zwischen Knoten und Internodien auseinander. Auf der konkaven Seite bleiben die Verbindungen erhalten und verhindern einen vollständigen Bruch der Probe.

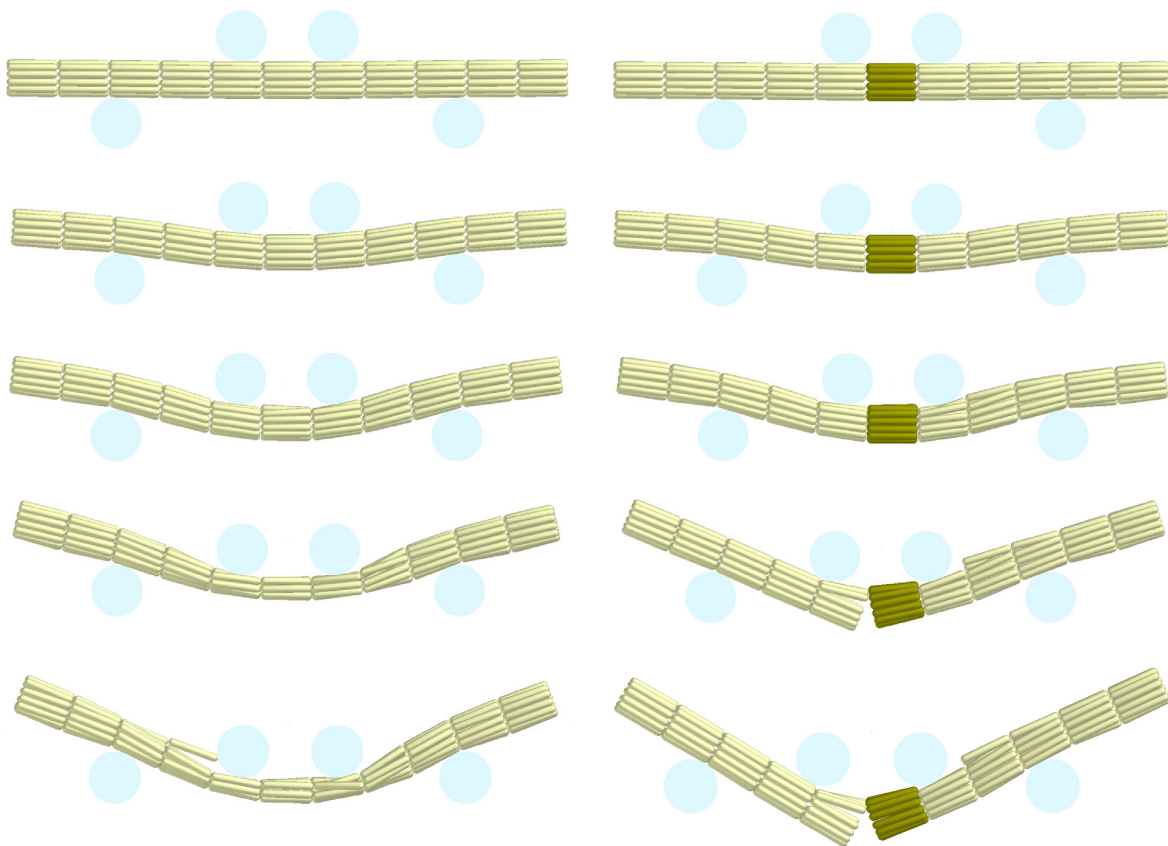


Abbildung 8: Vergleich der Simulationen von Proben ohne Knoten (links) und Proben mit Knoten (rechts) bei Durchbiegungen von 0 mm, 3 mm, 6 mm, 9 mm und 12 mm (von oben nach unten)

In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind die Ergebnisse von je drei Simulationsdurchläufen und drei exemplarischen Messungen dargestellt. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse für Proben ohne Knoten, während Abbildung 10 die Ergebnisse für Proben mit Knoten darstellt. Sowohl bei den Messungen als auch bei den Simulationen zeigen sich bei den Proben mit Knoten sprunghafte Kraftabfälle, die kennzeichnend für das in Abbildung 8 erkennbare Brechen einzelner Fasern sind. Demgegenüber sind bei den Verläufen für die Proben ohne Knoten keine großen Sprünge erkennbar. Somit kann eine wesentliche Charakteristik im Verformungsverhalten von *Miscanthus* in der Simulation abgebildet werden.

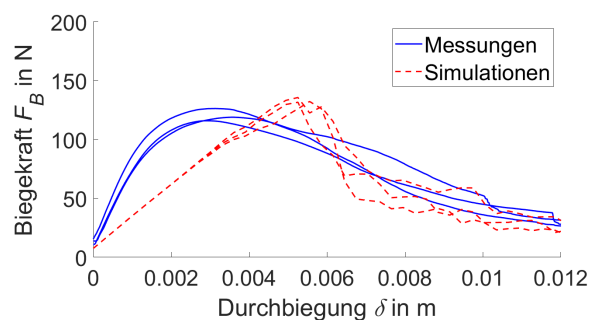


Abbildung 9: Biegekraft-Durchbiegungsverlauf für je drei Messungen und Simulationen von Proben ohne Knoten

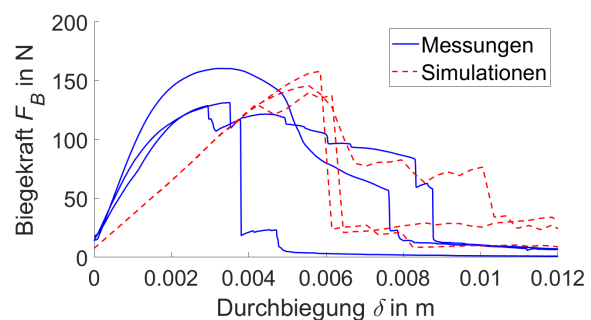


Abbildung 10: Biegekraft-Durchbiegungsverlauf für je drei Messungen und Simulationen von Proben mit Knoten

Die Diagramme zeigen aber auch, dass in beiden Fällen die Biegekraft in der Simulation zunächst langsamer ansteigt als bei den Versuchen. Demzufolge wird die maximale Biegekraft erst bei einer größeren Durchbiegung erreicht. Diese Diskrepanz zwischen Simulation und Realität ist darauf zurückzuführen, dass die Parametrierung des Halmstrukturmodells nur auf der Auswertung der maximalen Biegekraft beruht und nicht auf dem Verlauf der Biegekraft.

Das in der vorliegenden Studie verwendete Halmstrukturmodell von *Miscanthus* berücksichtigt nicht die inhomogenen Materialeigenschaften innerhalb eines *Miscanthus*-Stängels. Stattdessen wird für alle Internodien und Knoten eines Halms das Materialverhalten angenommen, das dem Durchschnitt eines Stängels entspricht. Aus diesem Grund wurde bei den Proben der 4-Punkt-Biegeversuche keine Unterscheidung hinsichtlich ihrer Position am Halm vorgenommen. Eine differenziertere Versuchsauswertung, bei der die Position der Proben berücksichtigt wird, eröffnet die Möglichkeit, jedem Segment individuelle Materialeigenschaften zuzuweisen und darauf aufbauend ein präziseres Halmstrukturmodell von *Miscanthus* zu erstellen.

Ein weiterer Aspekt, der die Genauigkeit des Halmstrukturmodells beeinflusst, ist die Diskretisierung eines Stängels in Einzelelemente. Eine feinere Diskretisierung, bei der ein Stängel in mehr Einzelelemente unterteilt wird, kann die Genauigkeit der Simulation erhöhen. Allerdings steht der erhöhte Detaillierungsgrad in direktem Zusammenhang mit den benötigten Rechenressourcen. Die richtige Balance zwischen Modellgenauigkeit und Rechenaufwand ist daher ein kritischer Faktor, der bei der Erstellung eines Halmstrukturmodells berücksichtigt werden muss. Zur Abbildung der wesentlichen Phänomene des 4-Punkt-Biegeversuchs hat sich die in dieser Studie vorgenommene Diskretisierung als geeignet erwiesen. Zur Analyse anderer Anwendungsfälle ist eine individuelle Beurteilung des Zielkonflikts zwischen Detaillierungsgrad und Rechenaufwand vorzunehmen.

Schlussfolgerungen

Als Grundlage für die Entwicklung und Parametrierung eines Halmstrukturmodells für *Miscanthus* wurden 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt und ausgewertet. Dabei wurden wesentliche Unterschiede im Materialverhalten von Internodien und Knoten augenscheinlich. Insbesondere wurde festgestellt, dass *Miscanthus* bei Belastung dazu neigt, an der Übergangsstelle zwischen Knoten und Internodien zu brechen. Die maximale Biegekraft betrug bei 4-Punkt-Biegeversuchen von *Miscan-*

thus-Proben ohne Knoten im Mittel 134,45 N. Demgegenüber wurde für Miscanthus-Proben mit Knoten ein Wert von 150,64 N ermittelt.

Um der Diskrepanz zwischen Internodien und Knoten Rechnung zu tragen, wurden Internodien und Knoten im Halmstrukturmodell durch unterschiedliche Materialien und Strukturen nachgebildet. Die Internodien setzen sich aus sphärozyklindrischen Elementen zusammen, die eine Länge von 10 mm sowie einen Durchmesser von 1,54 mm haben. Ein Internodium umfasst 15 aneinandergereihte Hohlstrukturen, die jeweils aus zwölf kreisförmig angeordneten Elementen gebildet werden. Ein Knoten besteht aus insgesamt 13 sphärozyklindrischen Elementen, die jeweils eine Länge von 10 mm haben. Dabei wird ein größeres Element mit einem Durchmesser von 4,54 mm von zwölf kleineren Elementen mit einem Durchmesser von 1,58 mm kreisförmig umhüllt.

Zur Parametrierung des Modells wurde zunächst nur das Material der Internodien betrachtet. Dafür wurde das Halmstrukturmodell von Miscanthus auf einen Ausschnitt begrenzt, der einer Miscanthus-Probe ohne Knoten entspricht. Aufbauend auf 16 Simulationsdurchläufen nach dem Schema des entsprechenden Plackett-Burman-Versuchsplans wurden durch die Varianzanalyse der Bonded Disk Scale (BDS_{I-I}), die Normalsteifigkeit (S_{NI-I}), der Gleitreibungskoeffizient zwischen den Internodien (μ_{RI-I}) und die Stoßzahl zwischen Internodien und Stahl (e_{I-St}) als signifikante Parameter identifiziert. Mittels der Methode des steilsten Anstiegs wurden geeignete Werte für diese Parameter bestimmt, sodass die Abweichung zwischen Simulation und Versuchen gemessen an der maximal auftretenden Biegekraft 0,93 % beträgt.

Zur Beschreibung des Materialverhaltens der Knoten und deren Wechselwirkungen mit den Internodien wurden anschließend Miscanthus-Proben mit Knoten betrachtet. Die Parametrierung erfolgte in Analogie zu dem bei den Internodien angewandten Vorgang. Als signifikante Parameter stellten sich der Bonded Disk Scale (BDS_{I-I}) und die Normalsteifigkeit (S_{NI-I}), jeweils bezogen auf die Verbindung zwischen Knoten und Internodien, heraus. Unter Verwendung der finalen Parametrierung weicht die in der Simulation maximal auftretende Biegekraft um 1,89 % von dem in den Versuchen ermittelten Wert ab.

Das in diesem Artikel vorgestellte Halmstrukturmodell und die identifizierten Modellparameter dienen als Grundlage für die Simulation von Miscanthus. In weiterführender Forschung ist zu überprüfen, inwieweit das Halmstrukturmodell und die auf Basis der 4-Punkt-Biegeversuche erfolgte Parametrierung geeignet sind, das Materialverhalten von Miscanthus auch bei abweichenden Belastungsarten widerzuspiegeln.

Literatur

- Bargen-Herzog, N.; Knapp, J.; Geimer, M. (2024): Empirical determination of the compression behaviour of miscanthus round bales. In: AgEng2024, Agricultural Engineering challenges in existing and new agroecosystems, EurAgEng, 1–4 July 2024 in Athens, Greece, pp. 1065–1072, <https://doi.org/10.5445/IR/1000173525>
- Becker, A. (2020): Herausforderungen an die moderne Diskrete Elemente Methode (DEM) für die Simulation landwirtschaftlicher Güter. In: SIMULAND 2020: Simulation landtechnischer Prozesse, Hg. Jahr, A.; Batos, A., Hochschule Düsseldorf, S. 65–92
- Cundall, P.A.; Strack, O.D.L. (1979): A discrete numerical model for granular assemblies. Géotechnique 29, pp. 47–65, <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>

- Fritz, M.; Formowitz, B.; Eppel-Hotz, A.; Jodl, S.; Kuhn, W. (2009): *Miscanthus: Anbau und Nutzung* (No. 19), Berichte aus dem TFZ. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing. https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/bericht_19_gesch_tzt.pdf, Zugriff am 28.08.2025
- Greef, J.M.; Deuter, M. (1993): Syntaxonomy of *Miscanthus x giganteus* Greef et Deu. *Angewandte Botanik* 67, S. 87–90
- Han, D.; Li, W.; Cui, T.; Wang, Q.; Tang, C.; Chen, L.; Qu, Z.; Xu, L. (2024): Biomechanical features and parametric calibration of a bilayer bonded particle model for the cornstalk during harvest. *Sci. Rep.* 14, 20198, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71005-1>
- Hertz, H. (1881): Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92, S. 156–171
- Jünemann, D.; Kemper, S.; Frerichs, L. (2013): Prozesssimulation von Halmgut – Einsatzmöglichkeiten der Diskrete-Elemente-Methode. *Landtechnik* 68(3), S. 164–167, <https://doi.org/10.1515/lt.2013.221>
- Kaack, K.; Schwarz, K.-U. (2001): Morphological and mechanical properties of *Miscanthus* in relation to harvesting, lodging, and growth conditions. *Ind. Crops Prod.* 14, pp. 145–154, [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(01\)00078-4](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(01)00078-4)
- Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2009): *Energie aus Biomasse*. Springer Berlin, Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85095-3>
- Kattenstroth, R.; Harms, H.; Lang, Thorsten (2011): Alignment of straw to optimise the cutting process in a combine's straw chopper. *Landtechnik* 66(5), pp. 354–357, <https://doi.org/10.1515/lt.2011.891>
- Klein, B. (2021): *Versuchsplanung – Design of Experiments: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik*. Berlin, de Gruyter, <https://doi.org/10.1515/9783110724516>
- Kovács, Á.; Kotroc, K.; Kerényi, Gy. (2015): The adaptability of discrete element method (DEM) in agricultural machine design. *Hung. Agric. Eng.* pp. 14–19, <https://doi.org/10.17676/HAE.2015.27.14>
- Kovacs, A.; Radics, J.P.; Kerenyi, G. (2017): A Discrete Element Model For Agricultural Decision Support. In: *ECMS 2017 – 31st Conference on Modelling and Simulation*, Ed. Paprika, Z.Z.; Horák, P.; Váradi, K.; Zwierczyk, P.T.; Vidovics-Dancs, A.; Rádics, J.P., pp. 488–494, <https://doi.org/10.7148/2017-0488>
- Lenaerts, B.; Aertsen, T.; Tijssens, E.; De Ketelaere, B.; Ramon, H.; De Baerdemaeker, J.; Saeys, W. (2014): Simulation of grain–straw separation by Discrete Element Modeling with bendable straw particles. *Comput. Electron. Agric.* 101, pp. 24–33, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.12.002>
- Li, S.; Huan, X.; Wang, T.; Hui, Y.; You, Y.; Wang, D. (2024): Biomechanical properties and discrete element modeling of PSR stalks during silage harvest. *Comput. Electron. Agric.* 217, 108644, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108644>
- Liu, B.; Koc, A.B. (2017): Mechanical Properties of Switchgrass and *Miscanthus*. *Trans. ASABE* 60, pp. 581–590, <https://doi.org/10.13031/trans.11925>
- Liu, Q.; Mathanker, S.K.; Zhang, Q.; Hansen, A.C. (2012): Biomechanical Properties of *Miscanthus* Stems. *Trans. ASABE* 55, pp. 1125–1131, <https://doi.org/10.13031/2013.42231>
- Liu, W.; Su, Q.; Fang, M.; Zhang, J.; Zhang, W.; Yu, Z. (2023): Parameters Calibration of Discrete Element Model for Corn Straw Cutting Based on Hertz-Mindlin with Bonding. *Appl. Sci.* 13, 1156, <https://doi.org/10.3390/app13021156>
- Meehan, P.G.; McDonnell, K.P.; Finnan, J.M. (2013): An assessment of the effect of harvest time and harvest method on biomass loss for *Miscanthus x giganteus*. *GCB Bioenergy* 5, pp. 400–407
- Miao, Z.; Phillips, J.W.; Grift, T.E.; Mathanker, S.K. (2015): Measurement of Mechanical Compressive Properties and Densification Energy Requirement of *Miscanthus x giganteus* and Switchgrass. *BioEnergy Res.* 8, pp. 152–164, <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9495-8>
- Mindlin, R.D. (1949): Compliance of Elastic Bodies in Contact. *J. Appl. Mech.* 16, pp. 259–268, <https://doi.org/10.1115/1.4009973>
- Mindlin, R.D.; Deresiewicz, H. (1953): Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces. *J. Appl. Mech.* 20, pp. 327–344, <https://doi.org/10.1115/1.4010702>

- Potyondy, D.O.; Cundall, P.A. (2004): A bonded-particle model for rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, pp. 1329–1364, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011>
- Sakaguchi, H.; Ozaki, E.; Igarashi, T. (1993): Plugging of the Flow of Granular Materials during the Discharge from a Silo. *Int. J. Mod. Phys. B* 07, pp. 1949–1963, <https://doi.org/10.1142/S0217979293002705>
- Siebertz, K.; Van Bebber, D.; Hochkirchen, T. (2017): *Statistische Versuchsplanung*. Springer Berlin, Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55743-3>
- Tsuji, Y.; Tanaka, T.; Ishida, T. (1992): Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. *Powder Technol.* 71, pp. 239–250, [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)88030-L](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)88030-L)
- Umweltbundesamt (2025): Erneuerbare Energien in Zahlen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>, Zugriff am 16.04.2025
- Wang, X.; Tian, H.; Xiao, Z.; Zhao, K.; Li, D.; Wang, D. (2024): Numerical Simulation and Experimental Study of Corn Straw Grinding Process Based on Computational Fluid Dynamics–Discrete Element Method. *Agriculture* 14, 325, <https://doi.org/10.3390/agriculture14020325>
- Zeng, Z.; Chen, Y. (2019): Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction. *Biosyst. Eng.* 180, pp. 25–35, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.01.009>
- Zhang, T.; Zhao, M.; Liu, F.; Tian, H.; Wulan, T.; Yue, Y.; Li, D. (2020): A discrete element method model of corn stalk and its mechanical characteristic parameters. *BioResources* 15, pp. 9337–9350, <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.9337-9350>

Autoren

Niklas Barga-Herzog, M.Sc., Johannes Knapp, M.Sc., und Benjamin Kazenwadel, M.Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer** ist Institutsleiter des Institutsteils Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe. E-Mail: niklas.barga-herzog@kit.edu

Hinweise und Danksagungen

Diese Forschung wurde im Verlauf des Forschungsprojekts „Entwicklung von Ernte- und Logistiktechnik zur Verwertung ungenutzter Biomasse“ (Cuboid4Log) durchgeführt. Das Projekt wurde vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg im Rahmen des Programmes Invest BW (VwV Invest BW – Innovation II) unter dem Förderkennzeichen BW1-1075/04 gefördert.



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND TOURISMUS