



BFSV e.V. in Kooperation mit ERPA Systeme GmbH und Scheuren
Simulation & Consulting GmbH

Verbesserung des ökologischen Fußabdrucks von Wellpappverpackungen durch virtuelle Produktentwicklung

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Aktenzeichen AZ
37803/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

Tim Köhler – BFSV e.V. – Ulmenliet 20 – 21033 Hamburg

Markus Plannerer - ERPA Systeme GmbH – Willi-Eichler-Str. 24 – 37079 Göttingen

Fabian Scheuren - Scheuren Simulation & Consulting GmbH – Beringweg 5 – 59457 Werl

Hamburg den 29.04.2025

Inhaltsverzeichnis

1	Projektzusammenfassung	1
2	Einleitung	2
2.1	Umweltrelevanz	2
2.2	Ziel.....	3
2.2.1	Gesamtziel.....	3
2.2.2	Wissenschaftliche Ziele und Technische Arbeitsziele	3
2.2.3	Bezug zu den Zielen des Programms zur Innovationsförderung	4
2.3	Beschreibung des Forschungs- und Technikstandes	4
2.3.1	Ausgangssituation Wellpappe	4
2.3.2	Ausgangssituation Simulation	5
3	Hauptteil	6
3.1	Beschreibung der eigenen Vorarbeiten	6
3.2	Vergleichende Darstellung voraussichtlicher Vorteile gegenüber bisher gängigen Verfahren.....	7
3.3	Arbeitspakete.....	7
3.3.1	AP 1 „Benchmark Materialkennwerte“	7
3.3.2	AP 2 „Entwicklung und Verifizierung Simulation“.....	8
3.3.2.1	Durchführung von Messreihen an Wellpappenrohpaieren.....	9
3.3.2.2	Messreihen an Wellpappensorten.....	12
3.3.2.3	Messreihen an Wellpappverpackungen	14
3.3.2.4	Untersuchung des Einflusses von Accessoires	16
3.3.2.5	Optimierung des Materialmodells.....	16
3.3.2.6	Weiteres zu diesem AP.....	24
3.3.2.7	Berechnung von Designvarianten	25
3.3.3	AP 3 „Validierung des Tools an realen Verpackungen“	27
3.3.3.1	Herstellung der Testverpackungen	27
3.3.3.2	Durchführung praktischer Laborprüfungen.....	28
3.3.3.3	Validierung der Verpackungskonstruktionen	29
3.3.4	AP 4 „Entwicklung eines COMSOL-Plugins“	30
3.3.4.1	Erstellung der grafischen Benutzeroberfläche (GUI)	30
3.3.4.2	Definition von Parametern und Eingabedaten.....	32
3.3.4.3	Implementierung der automatisierten Berechnung und Auswertung	33
3.3.4.4	Software-seitige Integration	37
3.3.5	AP „5“ – Praxistest des Tools mit Marktteilnehmern /	38
3.3.5.1	Teilpublikation der vorliegenden Forschungsergebnisse.....	38
3.3.5.2	Ergebnis Befragung von Marktteilnehmern	39
3.3.6	AP 6 „Dokumentation“.....	42
3.4	Zeitplan und Meilensteine	42

3.5	Verwertung	43
4	Fazit	44
5	Literaturverzeichnis	45

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ERRECHNETE EINSPARUNG VON WELLPAPPE [1].....	2
ABB. 1: PRODUKTENTWICKLUNG OHNE SIMULATION – EIGENE DARSTELLUNG	4
ABB. 2: PRODUKTENTWICKLUNG MIT GEPLANTER FEM-SIMULATION – EIGENE DARSTELLUNG	5
ABB. 3: TECHNISCHE ZEICHNUNG FALTSCHACHTEL FLACHLIEGEND - EXEMPLARISCH	8
ABB. 4: DARSTELLUNG EINES KLEINEN STÜCKS WELLPAPPE MIT 3D-VOLUMEN-NETZ (LINKS, >100.000 ELEMENTE), 3D-SCHALEN-NETZ (MITTIG, CA. 8.000 ELEMENTE) UND FLACHEM 1-LAGIGEM SCHALEN-NETZ (RECHTS, CA. 2.000 ELEMENTE)	8
ABB. 5: WELLPAPPENROHPAPIER NACH TRENNUNG WÄHREND TROCKENPROZESS - EXEMPLARISCH.....	10
ABB. 6: WELLPAPPENROHPAPIER NACH TRENNUNG - EXEMPLARISCH.....	10
ABB. 7: PRÜFVORBEREITUNG ZUGPRÜFUNG - EXEMPLARISCH.....	11
ABB. 8: ZUGPRÜFUNG AN WELLPAPPENROHPAPIER - EXEMPLARISCH.....	11
ABB. 9: PRÜFAUFBAU DURCHSTOßARBEIT ÜBERSICHT	12
ABB. 10: PRÜFAUFBAU DURCHSTOßARBEIT DETAIL – FOKUS AUF WELLPAPPE.....	13
ABB. 11: PRÜFAUFBAU BERSTFESTIGKEITSPRÜFUNG	13
ABB. 12: MUSTER NACH BERSTFESTIGKEITSPRÜFUNG - EXEMPLARISCH	14
ABB. 13: FALTSCHACHTEL VOR PRÜFUNG - EXEMPLARISCH	15
ABB. 14: PRÜFAUFBAU BOX COMPRESSION TEST - EXEMPLARISCH.....	15
ABB. 15: FALTSCHACHTEL AM ENDE DER PRÜFUNG BOX COMPRESSION TEST (BCT) - EXEMPLARISCH.....	16
ABB. 16: ZU IMPLEMENTIERENDE GLEICHUNGEN FÜR DAS IPE-MODELL, $Y =$ STRECKGRENZE DIE ZU BESTIMMENDE PARAMETER SIND: A, B, C, D, E_0 , E_0 , E_{EQ}^P , N, DETAILS SIEHE [4]	17
ABB. 17: LEAST-SQUARES ZIELFUNKTION, MINIMALES ABSTANDSQUADRAT ZWISCHEN <i>MESSWERTEN</i> UND SIMULATIONSWERTEN	17
ABB. 18: DARSTELLUNG DER ZWEI GETESTETEN STREIFEN IM SIMULATIONSMODELL, DIE KOORDINATENSYSTEME SIND ZWISCHEN MD (LINKS) UND CD (RECHTS) UM 90° GEDREHT.....	18
ABB. 19: AUSSCHNITT DER GLEICHUNGEN IM COMSOL MODELL	18
ABB. 20: ERGEBNIS DER ZWEISTUFIGEN OPTIMIERUNG MIT LEVENBERG-MARQUARDT LÖSER. DIE PUNKTE STELLEN DIE MESSWERTE DAR, DIE LINIEN SIND DIE SIMULATIONSERGEBNISSE. AUF DER X-ACHSE IST DIE DEFORMATION IN M AUFGEFÜHRT, AUF DER Y-ACHSE DIE KRAFT IN N, BENÖTIGTE ZEIT: 1 MINUTE	19
ABB. 21: ERGEBNIS DER ZWEISTUFIGEN OPTIMIERUNG MIT SNOPT LÖSER. DIE PUNKTE STELLEN DIE MESSWERTE DAR, DIE LINIEN SIND DIE SIMULATIONSERGEBNISSE. AUF DER X-ACHSE IST DIE DEFORMATION IN M AUFGEFÜHRT, AUF DER Y-ACHSE DIE KRAFT IN N, BENÖTIGTE ZEIT: 24 MINUTEN ..	19
ABB. 23: KOORDINATENSYSTEME IN AUFGELÖSTEM VOLUMEN-MODELL (LINKS) UND HOMOGENISIERTES SCHALENMODELL (RECHTS)	21
ABB. 24: SKIZZE ZUM HOMOGENISIERUNGSMODELL [5], RECHTS DARGESTELLT IST JEWEILS DIE ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE H UND DEM WINKEL θ VON X.	21
ABB. 25: VISUALISIERUNG DER ANALYTISCHEN FUNKTIONEN FÜR DIE WELLENFORM. DIE GEOMETRIE, AUF DER DAS MESH DEFINIERT IST, STELLT EIN FLACHES QUADRAT DAR (GRAU)	22
ABB. 26: GLEICHUNGEN FÜR DAS H-MODELL [5].....	22
ABB. 27: STEIFIGKEITSMATRIX AUS H-MODELL [5]	22
ABB. 28: LINKS: INTEGRATION DER KOMPONENTEN [5] ÜBER EINE PERIODE. RECHTS: IMPLEMENTIERUNG DER INTEGRATION ÜBER EINE PERIODE IN COMSOL, DIES GESCHIEHT ÜBER EIN 2D-EINHEITZELLEN-MODELL.	23
ABB. 29: ZWISCHENZEITLICHES ERGEBNIS FÜR DIE BERECHNUNG DES BCT EINES SYMMETRIEMODELLS (EIN VIERTEL DER VERPACKUNG).....	23
ABB. 30: ZWISCHENZEITLICHES ERGEBNIS BEIM BCT FÜR EIN SYMMETRIEMODELL (VIERTEL-AUSSCHNITT). DIE DARSTELLUNG ZEIGT DIE VERFORMUNG BEI 1 CM STAUCHUNG.	24

ABB. 31: ERGEBNISSE DER KNICKANALYSE FÜR EIN SEHR GROBES NETZ (LINKS) UND EIN FEINERES NETZ (RECHTS). DARGESTELLT IST EIN SYMMETRIEAUSSCHNITT (VIERTEL).....	25
ABB. 32: AKTUELLES NETZ BEI MESH FAKTOR 1, EIN FAKTOR 4 GRÖßERES NETZ HÄTTE 4.3% ABWEICHUNG ZUM AKTUELLEN ERGEBNIS	25
ABB. 33: BERECHNUNGSERGEBNIS FÜR VERPACKUNG MIT AUSSCHNITT (5% DER FLÄCHE)	26
ABB. 34: ERGEBNIS MIT 10% HÖHERER SCHACHTEL (320 MM STATT 290 MM INNENMAß).....	27
ABB. 35: TESTVERPACKUNG AUFGERICHTET EXEMPLARISCH - EXEMPLARISCH.....	28
TABELLE 2: TECHNISCHE DURCHSCHNITTSWERTE WELLPAPPENSORT "B51011" VON THIMM - HERSTELLERANGABEN.....	28
TABELLE 3: GEMESSENE MATERIALEIGENSCHAFTEN WELLPAPPENSORT " B51011" VON THIMM.....	29
ABB. 36: WELLPAPPKARTON B51011, BCT-MESSREIHEN, FMAX MITTELWERT MESSUNG UND SIMULATIONSWERT FÜR FMAX.....	29
TABELLE 4: VERGLEICH STAPELSTAUCHDRUCK (BCT) ZWISCHEN MESSUNG UND SIMULATION FÜR VERSCHIEDENE WELLPAPPKARTONS.....	30
ABB. 37: ENTWICKLUNGSUMGEBUNG IM "COMSOL APPLICATION BUILDER"	31
ABB. 38: COMSOL BENUTZEROBERFLÄCHE.....	31
ABB. 39: COMSOL INTERAKTIVE USER INTERFACE ELEMENTE	32
ABB. 40: SCREENSHOT DER APPLIKATION, NACHDEM DER KNOPF "NETZ ERSTELLEN UND ANZEIGEN" GEDRÜCKT WURDE	33
ABB. 41: LINKS: XML DATEI VON VPACK-MODELL, RECHTS: EINLESEN IM COMSOL APPLICATION BUILDER UND SUCHE NACH TAGS	34
ABB. 42: EXPORT AUS VPACK ALS .DWG, DIE ZAHLENWERTE KÖNNTE MAN ALS LISTE ODER TEXTDATEI ÜBERGEBEN.....	35
ABB. 43: IMPORT DER .DXF-DATEI IN COMSOL MULTIPHYSICS	35
ABB. 44: ANPASSUNG DER GEOMETRIE DURCH FALTEN AN DEN KANTEN	36
ABB. 45: VERWENDETE GEOMETRIESEQUENZ IN COMSOL (LINKS), AUSGANGSFORM NACH IMPORT (MITTIG), FERTIGES SEKTORSYMMETRIEMODELL NACH DER SEQUENZ, MIT DEM BERECHNET WURDE (RECHTS)....	36
ABB. 46: VISUALISIERUNG FALTSCHACHTEL IN VPACK – EXEMPLARISCH.....	37
ABB. 47: VISUALISIERUNG FALTSCHACHTEL IN COMSOL - EXEMPLARISCH	38
ABB. 48: SCHADEN-VERHÜTUNGSTAGUNG MÄRZ 2025 – VORSTELLUNG DER ERGEBNISSE DES FORSCHUNGSPROJEKTES	39
TABELLE 5: TECHNISCHE DURCHSCHNITTSWERTE WELLPAPPENSORT "B1.3 BB01" VON MARKTTEILNEHMER - HERSTELLERANGABEN.....	40
TABELLE 6: GEMESSENE MATERIALEIGENSCHAFTEN WELLPAPPENSORT "B1.3 BB01" VON MARKTTEILNEHMER	40
ABB. 49: EXEMPLARISCH BERECHNUNG DER VERPACKUNG EINES MARKTTEILNEHMER (MARKTTEILNEHMER)	41
ABB. 50: MESSWERTE DER BERECHNUNG EINER VERPACKUNG EINES MARKTTEILNEHMER	41
ABB. 51: ZEITPLAN ENTSPRECHEND PROJEKTANTRAG	42
TABELLE 7: MEILENSTEINE	42
TABELLE 8: VERWERTUNGSMÖGLICHKEITEN DER FORSCHUNGSERGEBNISSE.....	43

Abkürzungsverzeichnis

AD	Außendecke
ASTM	Engl.: American Society for Testing and Materials
BCT	Engl.: Box compression test
CAD	Engl.: Computer-aided design
CD	Engl.: cross direction – De.: entgegen Maschinenlaufrichtung
ECT	Edge crush test
FEM	Finite Elemente Methode
FG	Flächengewicht
GUI	Engl.: graphic user interface – De.: grafische Benutzeroberfläche
ID	Innendecke
MD	Engl.: Machine direction – De.: Maschinenlaufrichtung
TRL	Engl.: Technology Readiness Level, De: Technologiereifegrad
UI	Engl.: User Interface – Benutzeroberfläche (De)
VDW	Verband der Wellpappen-Industrie e. V.

1 Projektzusammenfassung

Ziel dieses Forschungsprojektes war es, die Umweltauswirkungen im Herstellungsprozess von Faltschachteln aus Wellpappe zu reduzieren. Dies sollte durch die Digitalisierung des Entwicklungsprozesses erreicht werden. Hierdurch sollen auch die Kosten reduziert werden, in dem die Herstellung von Beanspruchungsgerechten Verpackungen beschleunigt und erleichtert wird. Durch eine errechnete Materialersparnis von 0,5 % könnte jährlich eine potenzielle Einsparung von 23.000 Tonnen Wellpappe-Rohpapier erzielt werden, wenn ein Drittel der deutschen Wellpappenhersteller diese Methode anwenden würde

Zunächst wurde ein Benchmark für Materialkennwerte von Papier und Wellpappe erstellt. Die Benchmark-Analyse umfasst die Materialeigenschaften von verschiedenen Wellpappenrohpaapiersorten sowie Wellpappensorten. Dabei wurden Werte wie Flächengewicht, Biegesteifigkeit und Kantenstauchwiderstand ermittelt. Ein FEM-Simulationstool wurde entwickelt und auf Basis der Benchmark-Werte verifiziert sowie anhand realer Verpackungen validiert. Aus diesem Simulationstool wurde ein standalone COMSOL-Plugin entwickelt, welches grundlegende Wellpappen-Verpackungskonstruktionen (Fefco 0201) berechnen kann. Die Applikation kann so in etablierte 3D-CAD-Software integriert werden. Das Tool wurde mit Marktteilnehmern einem Praxistest unterzogen und erfolgreich überprüft. Die Integration in die CAD-Software ist noch nicht abgeschlossen.

Dadurch konnte der Technologiereifegrad der Softwarelösung von Level 3 (Nachweis der Funktionstüchtigkeit) auf Level 6 (Prototyp in Einsatzumgebung) erhöht werden.

Im weiteren Verlauf ist es geplant, unabhängig von einer Förderung die Integration in die CAD-Software umzusetzen. Die Praxistests sollen auf zusätzliche Marktteilnehmer ausgeweitet werden und Dienstleistungen basierend auf den Forschungsergebnissen sollen entwickelt werden. Dies umfasst beispielsweise die Messung von Papiereigenschaften, das Einpflegen der Messdaten in eine Datenbank zur Anwendung, so wie die Weiterentwicklung von 3D-CAD-Software durch Zugriff auf Materialkennwerte und deren FEM-Berechnung.

Der Antragsteller ist der BFSV e.V. in Hamburg, ein gemeinnütziger Verein und Forschungsinstitut. Die Projektpartner bestehen aus den kleinen und mittelständischen Unternehmen ERPA Systeme GmbH (Workflow-Lösungen, Digital Prototyping, CAD/CAM), Scheuren Simulation und Consulting GmbH (Simulationsdienstleistungen, virtuelle Produktentwicklung, Schulung) sowie Thimm Verpackung GmbH + Co. KG (Verpackungen, Verpackungssysteme, insbesondere für Konsumgüter, Verpackungsentwicklung, Beratung, Lagerhaltung und ergänzende Dienstleistungen).

Das Projekt wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert unter Aktenzeichen AZ 37803/01.

Der Bericht wird auf der Website des BFSV unter „<https://bfsv.de/verpackungsforschung/>“ zu finden sein.

2 Einleitung

2.1 Umweltrelevanz

Durch belastungsgerechte Auslegung der Verpackung lassen sich stabilere und materialreduzierte Verpackungen herstellen. Im Bereich der Verwendung von Wellpappe kann man so rechnerisch enorme Einsparpotenziale erzielen, allein bei dem Projektpartner Thimm 2.100 t Wellpappe pro Jahr (Vergl. Tab. 1) [1]

Voraussetzung für die Entwicklung möglichst optimaler Verpackungsdesigns unter diesen Aspekten ist die virtuelle Produktentwicklung, die eine zeit- und kosten- sowie materialsparende Entwicklung ermöglicht. Ein Tool, das diese Entwicklungsumgebung schafft, wurde im vorliegenden Projekt erstellt.

Bei einer konservativen Annahme einer Senkung von Wellpappen- und Papierverbrauch durch erfolgreiche Anwendung der erstellten Software aus diesem Antrag, in einer Größenordnung von 0,5%, kann allein bei Thimm eine Einsparung erzielt werden, die sich grob wie in Tabelle 1 aufgliedern lässt. Dort ist auch eine Extrapolation auf 1/3 der im VDW (Der Verband der Wellpappen-Industrie e. V.) organisierten Industrieunternehmen, die Wellpappe herstellen, zu sehen. Der VDW vereinigt mit 32 Mitgliedern, bei 100 Produktionswerken ca. 80% der deutschen Hersteller und ist der führende Verband in der deutschen Wellpappenbranche, mit dem größten Gewicht und Einfluss. Die Berechnung in der Tabelle basiert aus Daten von 2019.

Tabelle 1: Errechnete Einsparung von Wellpappe [1]

Jährlich mögliche Einsparung	Thimm (2019)	Extrapolation auf 1/3 VDW-Mitglieder
Wellpappenrohpapier	2.100 t	22.800 t
Wellpappenbögen Zukauf	375.000 m ²	4.100.000 m ²
Leimverbrauch	47 t	515 t
Wasserverbrauch	320 m ³	3520 m ³
Abfallaufkommen	200 t	2200 t

In der Logistik ergeben sich ebenfalls ökologische und ökonomische Vorteile. Allein im Bereich „Wellpappenbögen Zukauf“, kann eine Senkung der Verkehrsbelastung und damit auch Einsparung von Diesel, Reparaturen und Verschleißmaterialien durch die geringere Anzahl notwendiger Transporte abgeleitet werden:

Senkung Anzahl Sattelzüge, Basis Thimm-Zahlen: 35 p.a.

Senkung Anzahl Sattelzüge, Extrapolation auf VDW-Zahlen: 387 p.a.

Durch belastungsgerechte Verpackungen lassen sich Warenschäden reduzieren. Jährlich kommen von 4,4 Mrd. t versendeter Waren in Deutschland nur 3,4 Mrd. t, also ca. 77,2% der Waren unbeeinträchtigt beim Kunden an [2]. Mit einem Anteil von 65% des gesamten Verpackungsaufkommens hat die Wellpappe hier enormen Einfluss [3]. Durch belastungsgerechte Verpackungen lassen sich somit enorme Einsparungen erzielen.

2.2 Ziel

2.2.1 Gesamtziel

Projektziel ist es, Umweltauswirkungen und Kosten im Prozess der Entwicklung von Wellpappenverpackungen und nachgelagerten Produktionsprozessen zu reduzieren. Im Prozess der Entwicklung einer Musterverpackung kann dabei eine Zeitersparung von je ca. 1/4 bis 1 Stunde (ca. 3%) und somit eine Reduzierung von ca. 15-20% im Gesamtprozess inklusive Musterbau und Mustertest erreicht werden [1]. Darüber hinaus ist im Materialbereich der Verpackungsproduktion eine Reduzierung um 0,5% möglich und damit eine Einsparung von ca. 24.500 t CO₂eq [1]. Betrachtet wurde die Reduzierung der Wellpappenmenge durch die Papiermengensenkung von ca. 23.000 t.

Allgemein beschrieben sollen bei geringerem Ressourcenverbrauch, schneller und qualitativ hochwertiger als bisher, Verpackungsdesigns und Materialreduzierung durch digitales Prototyping ermöglicht werden.

2.2.2 Wissenschaftliche Ziele und Technische Arbeitsziele

Wissenschaftlich gesehen, soll das Software-Werkzeug im Bereich der industriellen Forschung vom Technologiereifegrad (TRL) 3 „Funktionstüchtigkeit einer Technologie“, bis zum Reifegrad der „Demonstration in einer relevanten Einsatzumgebung“, TRL 6 entwickelt werden. Hierdurch sollen mindestens 0,5% Ressourcen im Bereich der Wellpappenverpackungen gespart werden, der Entwicklungsprozess beschleunigt und die Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig verbessert werden.

Das technische Ziel ist es, ein Software-Werkzeug zu entwickeln welches auf Basis der Finite Elemente Methode (FEM) in der Lage ist, mechanisch-technologische Eigenschaften von Wellpappenverpackungssystemen zu berechnen. Der Prozess des analogen iterativen Entwickelns von Wellpappenverpackungen soll durch einen digitalen Prozess abgelöst werden.

Ein wesentlicher Vorteil des Virtual Prototyping ist die Geschwindigkeit, mit der man neue Designs entwerfen und in der virtuellen Testumgebung prüfen kann. Der Zeitaufwand für die Erstellung und Prüfung eines virtuellen Designs soll mindestens um den Faktor 10 schneller sein, als es momentan mit dem entsprechenden physischen Prototyp der Fall ist. [1]

2.2.3 Bezug zu den Zielen des Programms zur Innovationsförderung

Den angesprochenen Zielen entsprechend dem Stiftungsauftrag und Leitbild der DBU, insbesondere der Themengebundenen Förderung „Thema 3 - Entwicklung, Gestaltung und Akzeptanz umweltschonender Konsumgüter“. Der innovative Ansatz dieses Antrages als neues Produktentwicklungskonzept, welches den Umweltschutz vorantreibt, entspricht dem voll. Als lösungsorientierte Entwicklung aus dem Mittelstand ist sie auch für Unternehmen außerhalb der Projektpartner relevant. Sie treibt die Entwicklung von Verpackungen mit geringerer Inanspruchnahme von Ressourcen von der Entwicklungsphase, über die Herstellung, bis zur Nutzung voran und optimiert die Langlebigkeit der Verpackungen. Hierbei werden Entwicklungsprozesse digitalisiert, verkürzt und die resultierenden Verpackungen belastungsgerechter bei gleicher oder geringerer Umweltbelastung.

2.3 Beschreibung des Forschungs- und Technikstandes

2.3.1 Ausgangssituation Wellpappe

Die Wellpappe ist in mehreren Lagen aufgebaut. Bei einwelliger Wellpappe sind dies Außendecke, Wellenbahn und Innendecke. Zum Erreichen der für den jeweiligen Einsatz erforderlichen Festigkeitswerte können verschiedene Papiersorten für Decken- und Wellenbahn verwendet werden. Diese Papiere unterscheiden sich durch ihren Anteil an Frisch- und Recyclingfasern sowie ihrer flächenbezogenen Masse, dem sogenannten Flächengewicht (FG). Eine bessere Festigkeit kann durch den Einsatz von Papieren mit hohem Frischfaseranteil, aber auch durch höhere Flächengewichte erzielt werden. Im Bereich der Wellpappe gibt es unausgeschöpfte Einsparpotenziale, die durch das angestrebte Projekt realisiert werden sollen.

Im Konstruktionsprozess für Wellpappenverpackungen werden normalerweise Standardkombinationen vorausgewählt, mittels branchenüblicher Konstruktionsprogrammen wie ARTIOS oder VPack geplant und anschließend Prototypen erstellt und getestet (z.B. im Stapel-Stauchdruck-Test), um die beste Variante einzugrenzen. Dieser Prozess verbraucht wertvolle Entwicklungszeit, Kapazität, Mustermaterial und bedarf oft mehrfacher Validierung gemeinsam mit dem Bedarfsträger. Dies ist in Abb. 1 Produktentwicklung ohne Simulation und Abb. 2: Produktentwicklung mit geplanter FEM-Simulation visualisiert.

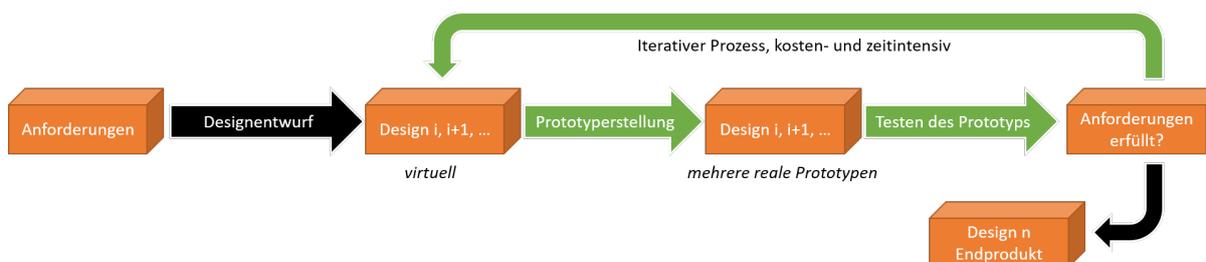


Abb. 1 Produktentwicklung ohne Simulation – eigene Darstellung

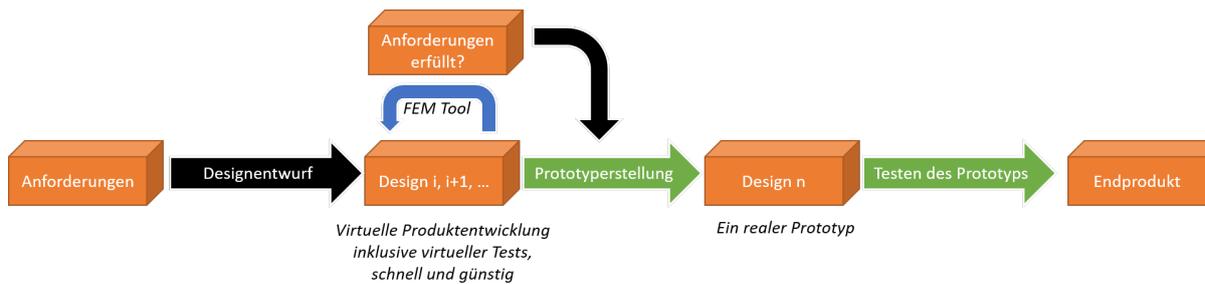


Abb. 2: Produktentwicklung mit geplanter FEM-Simulation – eigene Darstellung

Neben dem konstruktiven Aufbau lassen sich durch die Materialwahl und die Form der Wellpappe Einsparpotenziale erzielen, vergl. Abschnitt 2.1.

2.3.2 Ausgangssituation Simulation

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein allgemeines, bei unterschiedlichen physikalischen Aufgabenstellungen angewendetes numerisches Verfahren, das in der virtuellen Produktentwicklung eingesetzt wird. Die einhergehenden Vorteile durch den Einsatz der Methode sind aus Sparten wie z.B. der Automobilindustrie hinlänglich bekannt und äußern sich in kürzeren Entwicklungszeiträumen, Materialeinsparungen und Qualitätsgewinn.

Aufgrund der Materialeigenschaften ist FEM bei Wellpappe sehr aufwändig und eine entsprechende Software auf dem Markt bisher nicht verfügbar oder in Gebrauch. Problematisch ist insbesondere die erforderliche Rechenkapazität bei einem voll aufgelösten Volumenansatz mit FEM: Jede einzelne Lage muss dann mit Volumenelementen so fein aufgelöst werden, dass viele Freiheitsgrade - und somit zu lösende Gleichungen - entstehen. Die daraus resultierende benötigte Rechenzeit verhindert aktuell jeglichen Einsatz in der Produktentwicklung. Dementsprechend ist die Entwicklung im Rahmen dieses Projektes notwendig. Schalenansätze, welche die Dimension des Problems reduzieren, können hier Abhilfe schaffen, sind aufgrund der komplexen Geometrie jedoch nicht trivial. In der Grundlagenforschung wurden in wissenschaftlichen Veröffentlichungen ([4], [5], [6], [7]) schon Gleichungen zur akkuraten Beschreibung vom Verhalten verschiedener Wellpapp-Typen unter mechanischer Belastung validiert. In diesem Projekt sollen diese Erkenntnisse in einem Tool zusammengefasst und in möglichst allgemeiner Form implementiert werden. Dadurch kann perspektivisch die Produktentwicklung im gesamten Bereich der Konstruktion mit Wellpappe virtuell gestützt erfolgen. Somit können die wissenschaftlichen Fortschritte im Bereich der Simulationsmethodik direkt in die Praxis überführt werden. Durch die Erstellung von einer möglichst einfachen Programmoberfläche soll die Möglichkeit zum virtuellen Testen einem möglichst breiten Publikum zugänglich gemacht werden. Auf Basis dieser Grundlagenforschung auf kann ein eigenes Entwicklungswerkzeug in der COMSOL-Simulationsumgebung programmiert werden.

3 Hauptteil

3.1 Beschreibung der eigenen Vorarbeiten

Im Rahmen eines Forschungsprojektes der AIF hat der BFSV das Verhalten von Wellpappe untersucht. Dabei wurde eine kontinuumsmechanisch begründete Methode entwickelt, mit der sich das klimabedingte Kriechverhalten von Wellpappe- Verpackungen berechnen lässt. Der BFSV ist Partner des HPE (Bundesverband Holzpackmittel, Paletten, Exportverpackung e.V.) für die Berechnung von Paletten (Programm Pallet Express) und aktiv in der Berechnung von Schwergutverpackungen. Im Bereich der Wellpappe bietet der BFSV neben aktueller Forschung auch Prüfung von Wellpappe und Seminare.

Thimm stellt aus Wellpappenrohpapieren auf seinen Anlagen Wellpappe her und führt sie dem Weiterverarbeitungsprozess zu. Zur Qualitätssicherung und -einhaltung werden alle vereinnahmten Rohpapiere entsprechend den Normvorschriften im Labor geprüft. Die erhobenen 11 Werte beinhalten z.B. Längs- und Querreifestigkeit, Streifenstauchwiderstand, Feuchtigkeitsbeständigkeit, Rauigkeit, Berstfestigkeit (Außendecke AD – Innendecke ID) und andere. Alle Daten von verschiedenen Lieferantenprodukten liegen über Jahre zur Auswertung vor.

Wellpappen, aus den qualifizierten Papieren hergestellt, weisen in der Praxis die errechneten Werte nach. Durch diverse Zusammensetzungsmöglichkeiten der Wellpappe aus unterschiedlichsten Papieren werden eine Vielzahl von Wellpappensorten produziert. Zu einer großen Auswahl sind auch hier Datenerhebungen vorhanden, die der der Qualitätssicherung der Eigenschaften der Wellpappe und daraus hergestellter Verpackungen garantieren.

Die Labore von Thimm sind mit der notwendigen Technik ausgestattet, alle Prüfungen der Branche durchzuführen und darüber hinaus besondere klimatische Einflüsse auf die Produkte vor der Prüfung einwirken zu lassen. Genannt sei hier z.B. das "Überseeklima", das durch hohe Luftfeuchtigkeit oder auch Tiefkühlverhältnisse gekennzeichnet ist. Klimatische Einflüsse bestimmen wesentlich die Leistungsfähigkeit der Verpackung aus Wellpappe. Im Projekt werden die normierten Klimate von 23°C und 50% relativer Luftfeuchte für alle Prüfungen von Papier und Wellpappe angesetzt.

Scheuren Simulation & Consulting GmbH bringt Erfahrung in der Implementierung neuer strukturmechanischer Materialmodelle in die Gleichungssysteme des kommerziellen Tools COMSOL Multiphysics mit. Die Entwicklung von Simulation-Apps aus bestehenden COMSOL Modellen und dessen webbasierte Distribution wurde ebenfalls in der Vergangenheit schon erfolgreich umgesetzt.

Die Firma ERPA Systeme GmbH hat bereits selbst ein eingeschränktes FEM-Tool realisiert, um einfache Verpackungen in der Verformung durch Stapelstauchdruck zu visualisieren. Darüber hinaus ist mit dem Hauseigenem CAD/CAM-System VPack die ideale Voraussetzung gegeben, um ein Plugin direkt mit den Geometrien der Verpackungen zu versorgen.

3.2 Vergleichende Darstellung voraussichtlicher Vorteile gegenüber bisher gängigen Verfahren

Durch die Anwendung von Simulation im Entwicklungsprozess fallen eine Vielzahl der im Abschnitt 2.3.1 - Ausgangssituation Wellpappe beschriebenen iterativen Schritte weg. Statt diverser Prototypen werden nur die besten Varianten gefertigt und validiert, wodurch Materialbedarf, Entwicklungszeit und Kosten minimiert werden. Der optimierte Arbeitsablauf ist in in Abb. 2 visualisiert. Vergleiche außerdem Abschnitt 2.1 sowie Abschnitt 2.3.

3.3 Arbeitspakete

3.3.1 AP 1 „Benchmark Materialkennwerte“

Ziel des Arbeitspaketes war die Ermittlung und Festlegung geeigneter Materialsorten und Verpackungskonstruktionen durch die Analyse und Zusammenstellung von Ausgangswerten aus der Thimm-Datenbank sowie durch ein Material Benchmark aus bisherigen BFSV-Projekten. Dies stellt sicher, dass die geeignetsten Materialien und Konstruktionen für das Projekt ausgewählt werden, basierend auf fundierten Daten und bisherigen Prüfungen.

Als Materialsorte, welche in diesem Forschungsprojekt untersucht werden soll, wurde einwellige Wellpappe ausgewählt. Dies entspricht sowohl den Ergebnissen der Benchmarkanalyse des BFSV als auch den mengenmäßig größten Anteilen der Wellpappen, welchen durch Thimm vertrieben werden. [1]

Die Bauart, welche hauptsächlich untersucht werden soll, ist eine sogenannte Fefco 0201 (vergl. [8], Seite 18). Der Vorteil dieser Konstruktion ist, dass das genormte Format (FEFCO) in 3D CAD-Softwares vorliegt. Über die Maße und die Fefco Bauart ist die Faltschachtel definiert. Dies erleichtert die Kommunikation Schnittstelle wie Kunden, Lieferanten, Software usw. (Vergl. Abschnitt 3.2.2 und [9] Seite 198)

Als Maß für die zu prüfenden Faltschachteln werden Außenmaße von 300 x 300 x 300 mm. (Länge x Breite x Höhe - LxBxH) (Vergleiche DIN 6730:2017-09 Papier, Pappe und Faserstoff – Begriffe [10]) gewählt. Dies hat den Vorteil, dass einerseits eine Prüfbarkeit auf den Anlagen des BFSV gegeben ist. Außerdem kann bei der Berechnung der Faltschachtel durch die Symmetrie der simulierten Verpackung die Berechnung vereinfacht werden Es wird nur ein Viertel der Verpackung simuliert und dann Entlang der X und Y-Achse gespiegelt berechnet. Abb. 3 zeigt exemplarisch eine technische Zeichnung einer Faltschachtel entsprechend Fefco 0201 mit den oben genannten Außenmaßen. Durch die Dicke der Wellpappe entsprechen die Maße in der Zeichnung nicht den Außenmaßen, sondern den Außenmaßen abzüglich der Wellpappenstärke.

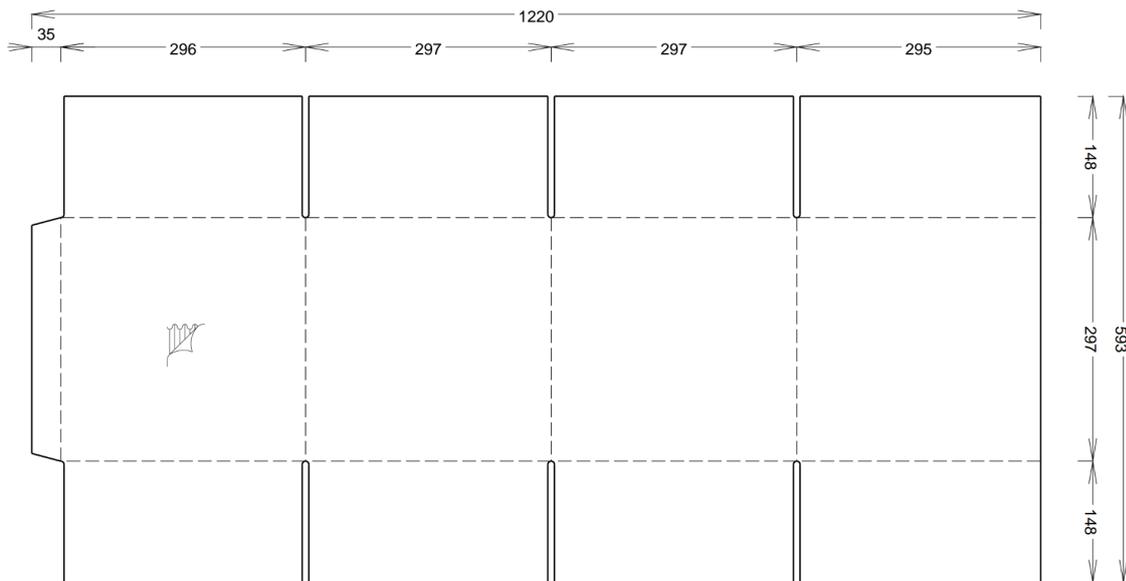


Abb. 3: Technische Zeichnung Faltschachtel flachliegend - exemplarisch

3.3.2 AP 2 „Entwicklung und Verifizierung Simulation“

Wie in Abschnitt 2.3.2 – Ausgangssituation Simulation erwähnt, ist die Berechnung von Wellpappmaterial mit Hilfe von FEM-Simulation nicht trivial. Dadurch, dass das Material ein Faserwerkstoff ist, sind die Materialeigenschaften anisotrop. Zusätzlich ist eine detaillierte Auflösung des Lagenaufbaus der Wellpappe aus numerischer Sicht sehr ressourcenintensiv, da viele Netzelemente benötigt werden, um den Aufbau darzustellen. Dadurch wird das zu lösende Gleichungssystem sehr groß und die Berechnung benötigt viel Rechenspeicher und Zeit. Daher ist es notwendig, einen Homogenisierungsansatz zu implementieren. Dieser soll dafür sorgen, dass die Designs in akzeptabler Zeit und mit möglichst geringem Speicheraufwand bei ausreichender Genauigkeit berechnet werden können. In Abb. 4 ist der Unterschied zwischen der 3D-Volumenformulierung und einem Schalenansatz skizziert.

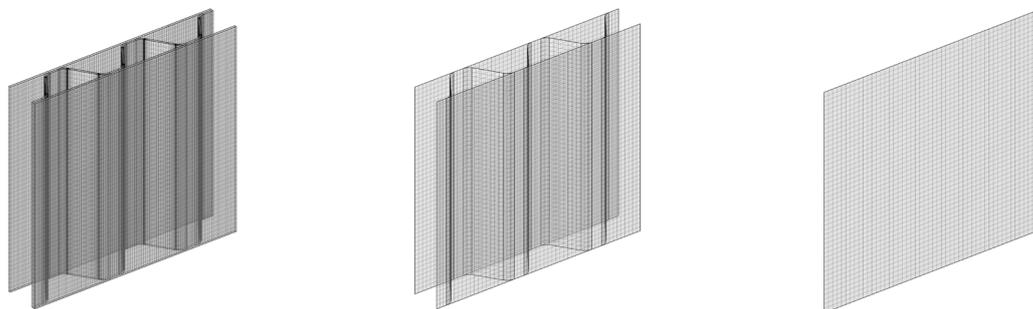


Abb. 4: Darstellung eines kleinen Stückes Wellpappe mit 3D-Volumen-Netz (links, >100.000 Elemente), 3D-Schalen-Netz (mittig, ca. 8.000 Elemente) und flachem 1-lagigem Schalen-Netz (rechts, ca. 2.000 Elemente)

Ziel dieses Arbeitspaketes war daher die Implementierung eines mathematischen Modells zur Darstellung der Anisotropie des Werkstoffs sowie der Homogenisierung zur Vereinfachung der Berechnung geometrischer Formen in COMSOL Multiphysics. Dies wird durch die folgenden Schritte erreicht:

1. Durchführung von Messreihen an Wellpappenrohpapieren
2. Messreihen an Wellpappensorten
3. Messreihen an Wellpappverpackungen
4. Untersuchung des Einflusses von Accessoires
5. Optimierung der Parameter für das mathematische Modell
6. Berechnung von Designvarianten

Durch diese umfassenden Untersuchungen und Optimierungen soll eine fundierte Basis für die Entwicklung und Verbesserung von Wellpappverpackungen geschaffen werden, die sowohl den Anforderungen an Stabilität und Belastbarkeit als auch an praktische Handhabung gerecht werden.

3.3.2.1 Durchführung von Messreihen an Wellpappenrohpapieren

Alle Prüfungen, sowohl an Wellpappenrohpapieren als auch an Faltschachteln, wurden unter Normklima ($23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ und 50 % rel. Lf. $\pm 5\%$ rel. Lf) durchgeführt, um wiederholbare Prüfergebnisse zu erzielen (Vergl. DIN EN ISO 187:2023-02 Papier, Pappe und Faserstoffe - Normklima für die Vorbehandlung und Prüfung und Verfahren zur Überwachung des Klimas und der Probenvorbehandlung) [11]

Die nachfolgenden Prüfungen wurden an den Wellpappenrohpapieren durchgeführt:

- Bestimmung der flächenbezogenen Masse entsprechend DIN ISO 3039:2011-06 Wellpappe - Bestimmung der flächenbezogenen Masse der Lagen nach Trennung [12] – Siehe Abb. 5 und Abb. 6
- Zugprüfung entsprechend DIN EN ISO 1924-2:2009-05 Papier und Pappe - Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung - Teil 2: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit [13] – Siehe Abb. 7 und Abb. 8

Die nachfolgenden Prüfungen sind üblich, für die Qualifizierung von Wellpappen, wurden jedoch nicht durchgeführt, da diese keinen Mehrwert für die Berechnung von Wellpappen mittels FEM-Methode haben.

- DIN EN ISO 3035:2012-02 Wellpappe - Bestimmung des Flachstauchwiderstandes (ISO 3035:2011); Deutsche Fassung EN ISO 3035:2011 [14]

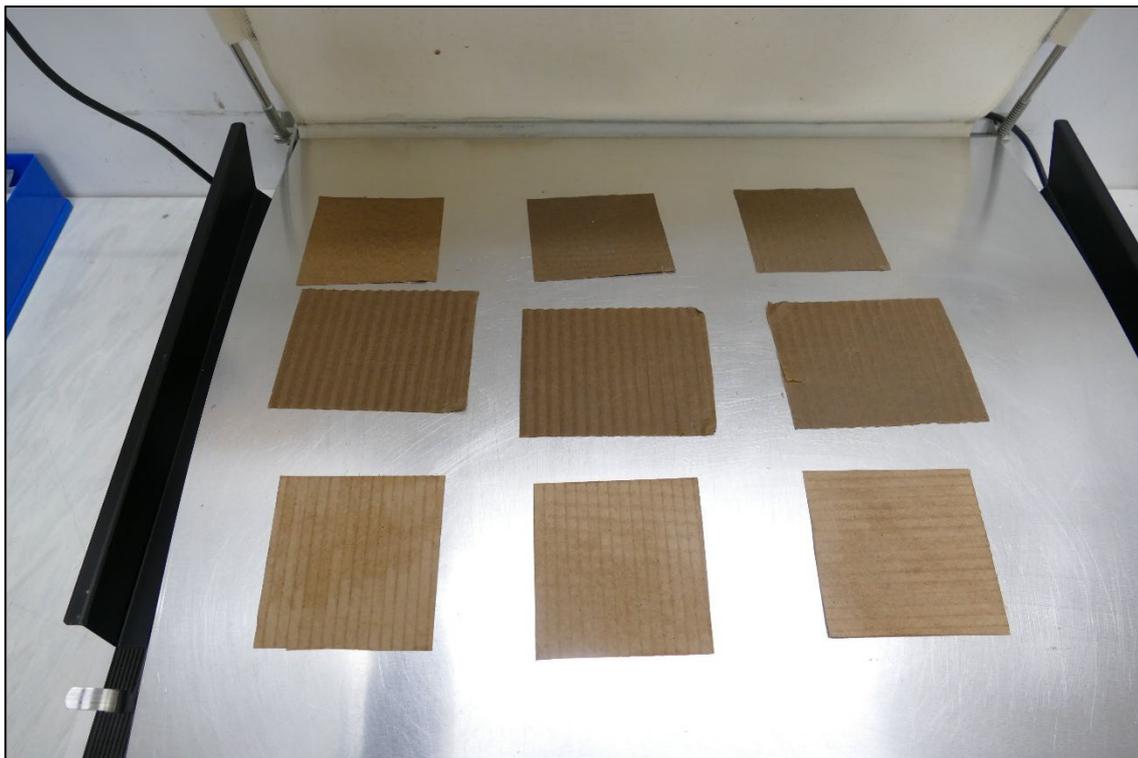


Abb. 5: Wellpappenrohpaper nach Trennung während Trockenprozess - exemplarisch

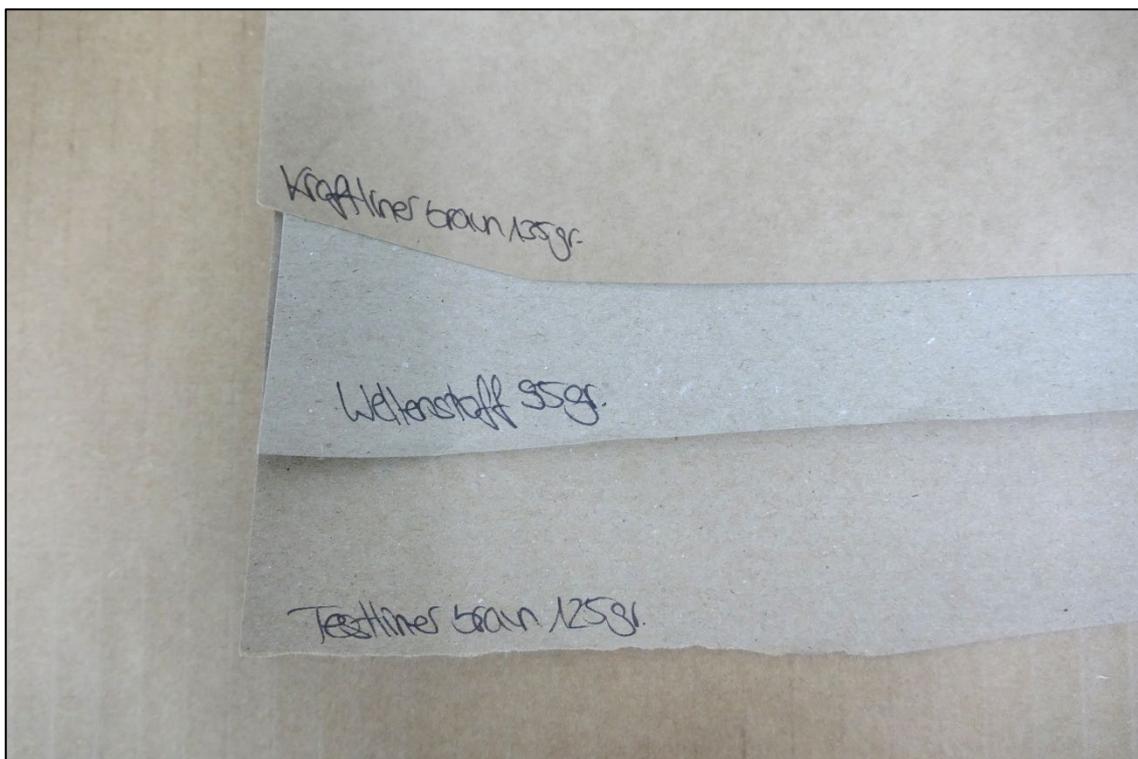


Abb. 6: Wellpappenrohpaper nach Trennung - exemplarisch



Abb. 7: Prüfvorbereitung Zugprüfung - exemplarisch

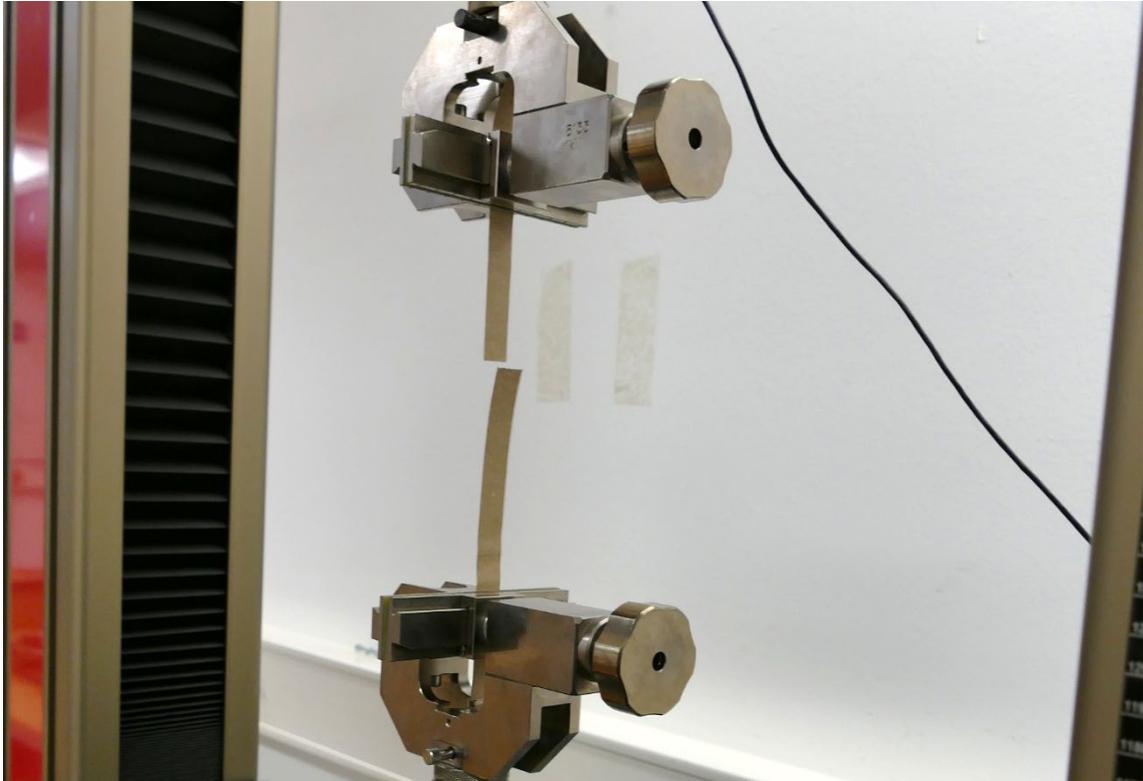


Abb. 8: Zugprüfung an Wellpappenrohrpapier - exemplarisch

3.3.2.2 Messreihen an Wellpappensorten

Für die Qualifizierung von Wellpappen wurden hauptsächlich die Prüfungen ausgewählt, welche in Abschnitt 5 der Norm DIN 55468-1:2021-01 - Packstoffe - Wellpappe - Teil 1: Anforderungen, Prüfung [15] – beschrieben werden. Zusätzlich wurden die Biegesteifigkeit und die Wasseraufnahme (COBB Test) durchgeführt um die Wellpappe zu untersuchen. Nachfolgend die vollständige Liste der angewendeten Verfahren inklusive exemplarischen Bildern der Versuchsdurchführung:

- DIN 53121:2014-08 Prüfung von Papier, Karton und Pappe - Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode [16]
- DIN EN ISO 3037:2023-03 Wellpappe - Bestimmung des Kantenstauchwiderstands [17]
- DIN EN ISO 535:2023-06 Papier und Pappe - Bestimmung des Wasserabsorptionsvermögens - Cobb-Verfahren [18]
- DIN EN ISO 2759:2014-10 Pappe - Bestimmung der Berstfestigkeit [19] – Siehe Abb. 11 und Abb. 12
- DIN 53142-1:2014-12 Prüfung von Pappe - Durchstoßprüfung - Teil 1: Prüfung mit dem Pendelschlagwerk [20] – Siehe Abb. 9 und Abb. 10



Abb. 9: Prüfaufbau Durchstoßarbeit Übersicht



Abb. 10: Prüfaufbau Durchstoßarbeit Detail – Fokus auf Wellpappe



Abb. 11: Prüfaufbau Berstfestigkeitsprüfung

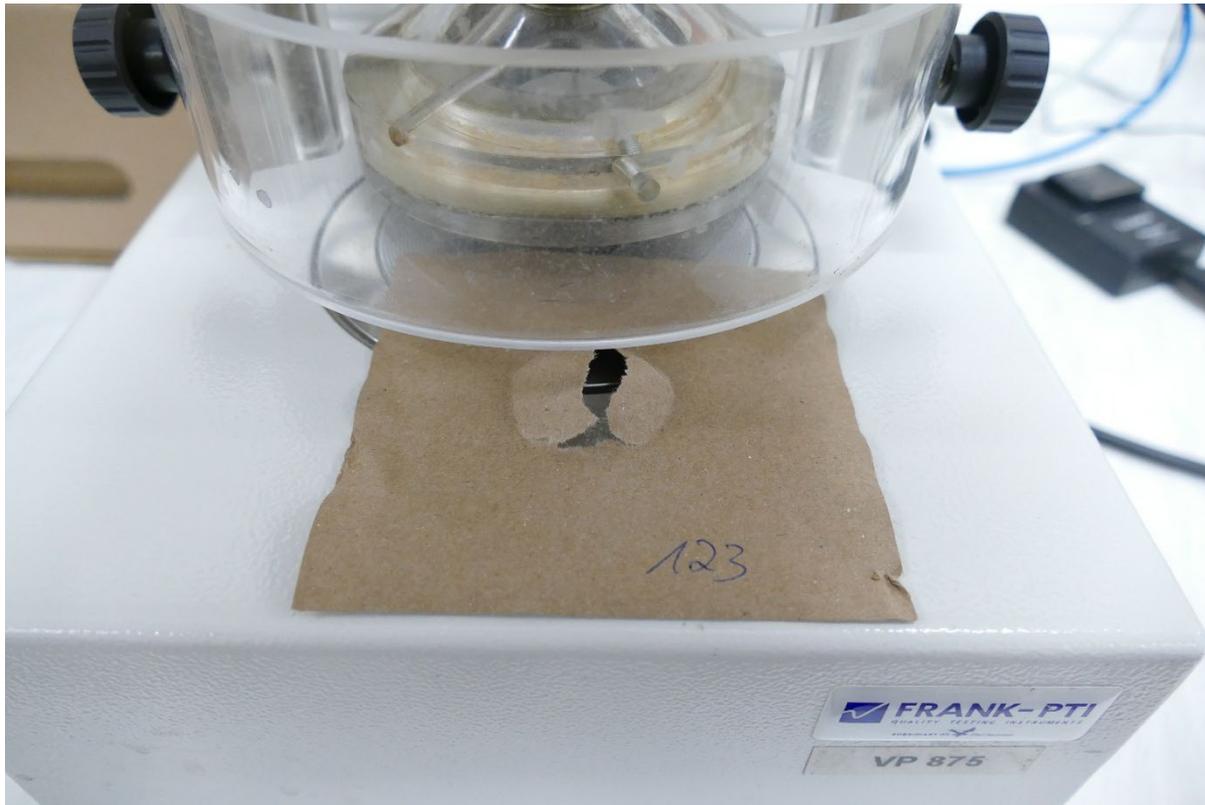


Abb. 12: Muster nach Berstfestigkeitsprüfung - exemplarisch

3.3.2.3 Messreihen an Wellpappverpackungen

Die Prüfung entsprechend DIN EN ISO 12048:2001-04 Verpackung - Versandfertige Packstücke - Kompressions- und Stapelprüfung unter Verwendung einer Kompressionsprüfmaschine [21] – wurde an den Faltschachteln durchgeführt. Der ermittelte BCT Wert ist zentral für die Leistungsfähigkeit einer Wellpappen-Faltschachtel. In Abb. 13 bis Abb. 15 sind ein exemplarisches Muster, der Prüfaufbau sowie die Deformation des Packstückes während der Prüfung exemplarisch dargestellt.

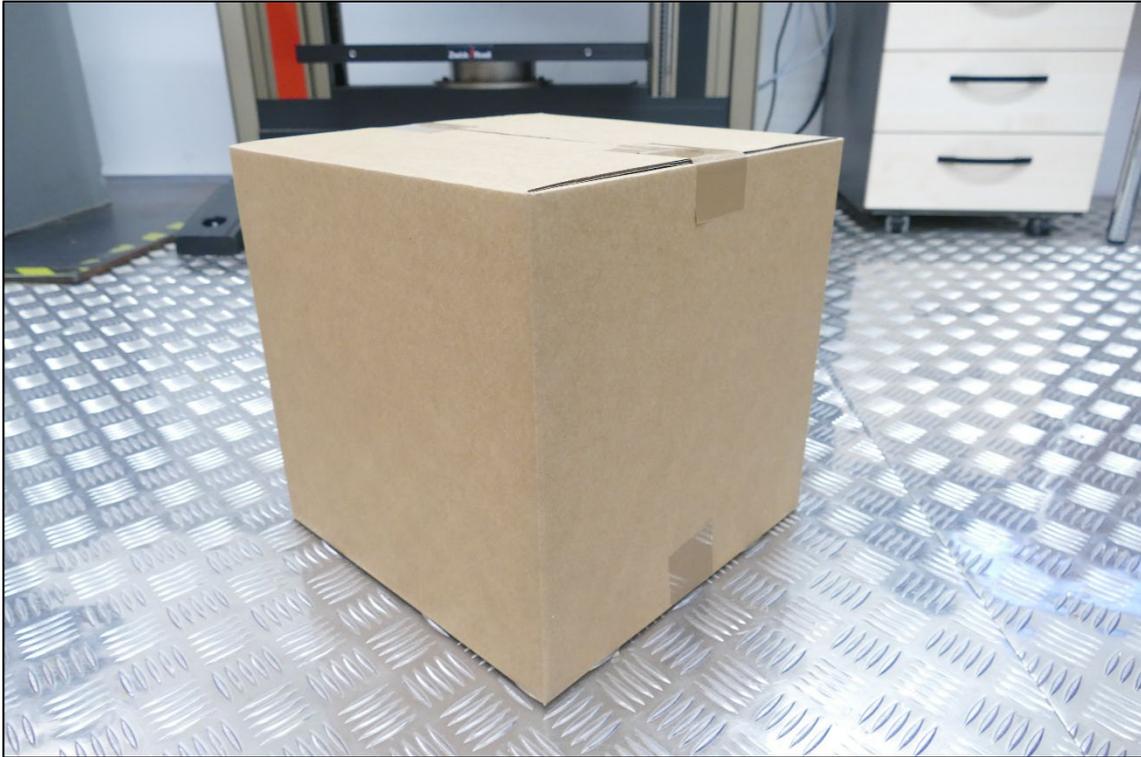


Abb. 13: Faltschachtel vor Prüfung - exemplarisch



Abb. 14: Prüfaufbau Box compression test - exemplarisch



Abb. 15: Faltschachtel am Ende der Prüfung Box compression test (BCT) - exemplarisch

3.3.2.4 Untersuchung des Einflusses von Accessoires

Der Einfluss von Accessoires, wie etwa Eingrifflöchern oder Perforationen wird in 3.3.2.7 erläutert.

3.3.2.5 Optimierung des Materialmodells

Für die Erstellung des Simulationsmodells sind Veröffentlichungen als Grundlage genommen worden (Stand der Wissenschaft). Zu Beginn des Projekts stand dabei insbesondere das IPE-Modell (Isotropic plasticity equivalent model) im Mittelpunkt ([4], [5]) da dieses als vielversprechender Startpunkt gewertet wurde.

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = [H] \{\varepsilon^e\} = \frac{1}{(1-\nu_{xy}\nu_{yx})} \begin{bmatrix} E_x & \nu_{yx}E_x & 0 \\ \nu_{xy}E_y & E_y & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy}(1-\nu_{xy}\nu_{yx}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^e \\ \varepsilon_y^e \\ \gamma_{xy}^e \end{Bmatrix}$$

$$\{s\} = \begin{Bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \\ s_{xy} \end{Bmatrix} = [L] \{\sigma\} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2A & C-A-B & 0 \\ C-A-B & 2B & 0 \\ B-C-A & A-B-C & 0 \\ 0 & 0 & 3D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$f = \sigma_{\text{eq}} - Y = \left(\frac{3}{2} \langle s \rangle \{s\} \right)^{1/2} - E_0 (\varepsilon_0 + \varepsilon_{\text{eq}}^p)^{1/n} = 0$$

Abb. 16: zu implementierende Gleichungen für das IPE-Modell, Y = Streckgrenze die zu bestimmende Parameter sind: $A, B, C, D, E_0, \varepsilon_0, \varepsilon_{\text{eq}}^p, n$, Details siehe [4]

Grundlegend muss zunächst für jede Lage (Liner innen, Welle, Liner außen) der Satz aus Materialparametern für dieses Modell bestimmt werden. Dazu werden die Messwerte für das Material als Kurve hinterlegt und die Parameter über eine Optimierung (Least-Squares) gefittet. Dafür sind in dem Optimization Module von COMSOL Multiphysics verschiedene Gradienten basierte Algorithmen hinterlegt, die eingesetzt wurden, siehe Abb. 17. Das COMSOL Multiphysics Modell für die Optimierung muss dabei die verschiedenen Richtungen (Machine Direction – MD - und Cross Direction - CD) fitten, siehe Abb. 18.

$$F_{\text{obj}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_{\text{num}}(t_i) - F_{\text{exp}}(t_i))^2$$

Abb. 17: Least-Squares Zielfunktion, minimales Abstandsquadrat zwischen *Messwerten* und *Simulationswerten*

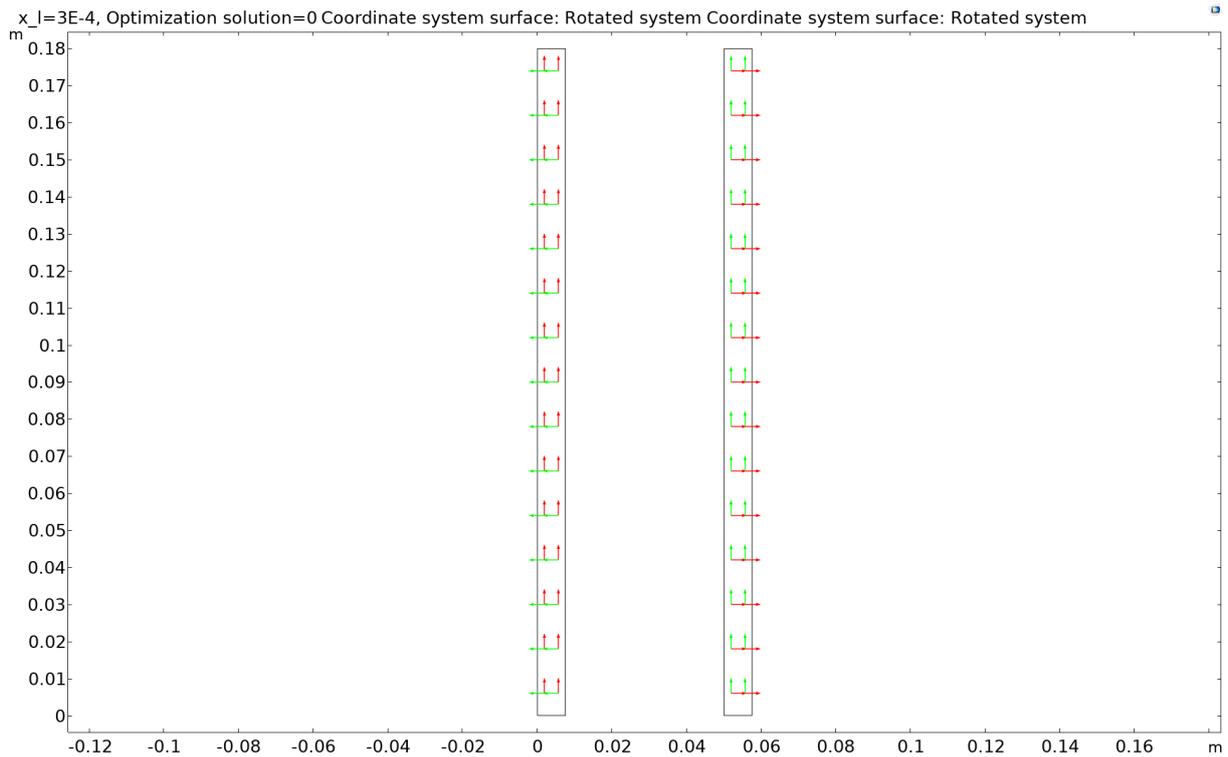


Abb. 18: Darstellung der zwei getesteten Streifen im Simulationsmodell, die Koordinatensysteme sind zwischen MD (links) und CD (rechts) um 90° gedreht

Das Material ist elastoplastisch mit den in [4] angegebenen Parametern definiert. Ein Ausschnitt der implementierten Gleichungen ist in Abb. 19 zu sehen.

Override and Contribution

Equation

Show equation assuming:

Study 1 (std1), Stationary (stat)

$$F_{\text{total}}^i \rightarrow F_{\text{el}}^i + F_{\text{pl}}^i, \quad F_{\text{pl}} = 1 + \epsilon_{\text{pl}}$$

$$F = \sigma_{xx} - \sigma_{yy}, \quad \epsilon_{\text{pl}} = \lambda \frac{\partial Q_p}{\partial S}$$

$$\lambda \geq 0, \quad F(\sigma, \sigma_{ys}) \leq 0, \quad \lambda F = 0$$

Model Input

Plasticity Model

Formulation:

Small strains

Equivalent stress:

σ_e User defined

f_s N/m²

Initial yield stress:

σ_{ys0} User defined

E0 Pa

Plastic potential:

Q_p von Mises

Isotropic hardening model

Linear

$$\sigma_{ys} = \sigma_{ys0} + E_{iso} \epsilon_{pe}, \quad \frac{1}{E_{iso}} = \frac{1}{E_{T150}} \cdot \frac{1}{E}$$

Isotropic tangent modulus:

E_{T150} User defined

ET Pa

Kinematic hardening model

No kinematic hardening

Name	Expression
force_md	intop1(solid2.syy)*dz*2
force_cd	intop2(solid2.syy)*dz*2
s_x	1/3*(2*A*sigmax+(C-A-B)*sigmay)
s_y	1/3*((C-A-B)*sigmax+2*B*sigmay)
s_z	1/3*((B-C-A)*sigmax+(A-B-C)*sigmay)
s_xy	D*Gxy*gammaxy
factor	1/(1-vxy*vxy)
sigmax	factor*(Ex*solid2.eeXX+vxy*Ey*solid2.eeXX)
sigmay	factor*(vxy*Ex*solid2.eeYY+Ey*solid2.eeYY)
sigmaxy	Gxy*(1-vxy*vxy)*gammaxy
f_s	sqrt(3/2*(s_x^2+s_y^2+s_z^2+s_xy^2*0))

Abb. 19: Ausschnitt der Gleichungen im COMSOL Modell

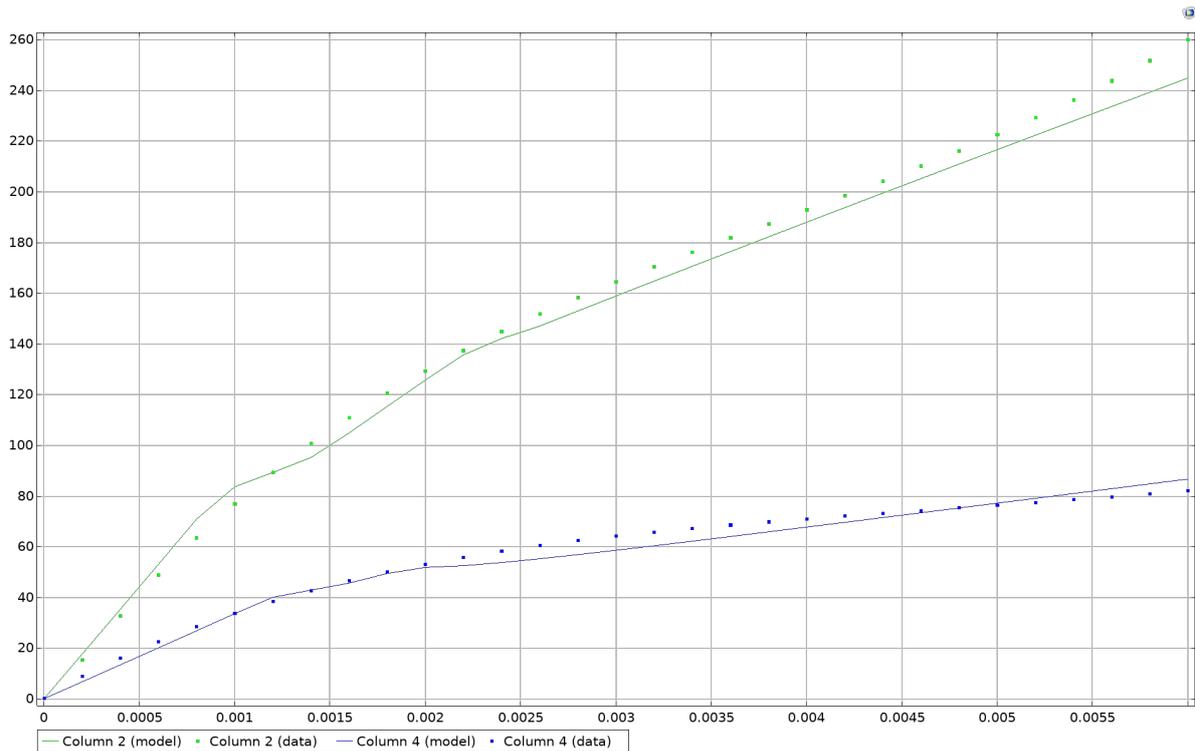


Abb. 20: Ergebnis der zweistufigen Optimierung mit Levenberg-Marquardt Löser. Die Punkte stellen die Messwerte dar, die Linien sind die Simulationsergebnisse. Auf der x-Achse ist die Deformation in m aufgeführt, auf der y-Achse die Kraft in N, benötigte Zeit: 1 Minute

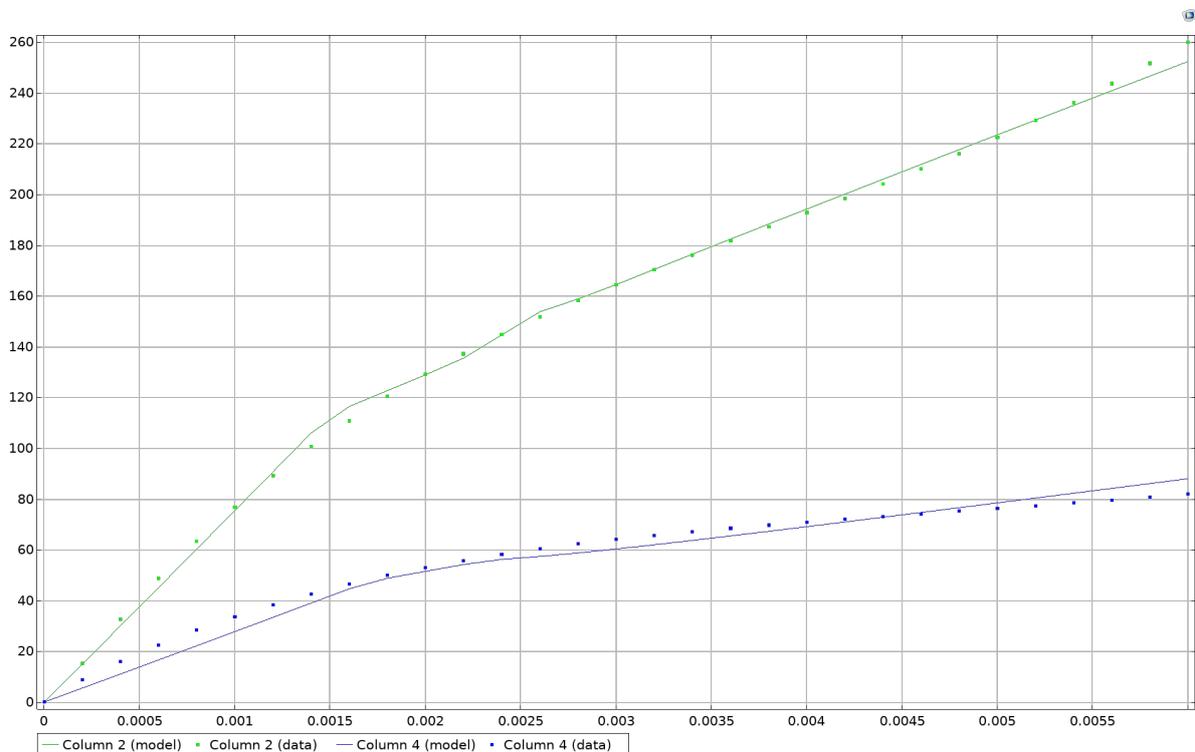


Abb. 21: Ergebnis der zweistufigen Optimierung mit SNOPT Löser. Die Punkte stellen die Messwerte dar, die Linien sind die Simulationsergebnisse. Auf der x-Achse ist die Deformation in m aufgeführt, auf der y-Achse die Kraft in N, benötigte Zeit: 24 Minuten

Da sich die Optimierung des stark nicht-linearen Materialmodells als sehr schwierig erwies, wurde ein mehrstufiger Ansatz gewählt, in dem zunächst der lineare Teil der Kurve für die Ermittlung von E_x und E_y (E-Modul in x- und y- Richtung) und im zweiten Teil die Parameter für die Beschreibung Plastizität (A , B , C , D , E_0). Die schnellsten Ergebnisse lieferte der Levenberg-Marquardt Solver für die Optimierung, der SNOPT-Algorithmus war sehr viel langsamer, lieferte aber noch deutlich bessere Ergebnisse. Da die Materialdaten nur jeweils einmal für den entsprechenden Werkstoff gefittet werden müssen, ist der SNOPT-Algorithmus dadurch besser und wurde im Folgenden verwendet. Neben dem IPE-Modell wurde ein weiteres Modell zur Beschreibung der Plastizität verwendet (Hill-Modell), mit dem jedoch nur deutlich schlechteren Ergebnissen im Fitting erzielt wurden, siehe Abb. 20 und Abb. 21. Daher ist es nicht weiterverwendet worden.

Der nächste Schritt ist die Übertragung des Modells in ein 3D Schalenmodell. Dafür sind in COMSOL Multiphysics verschiedene Koordinatensysteme definiert worden (Euler-Rotation).

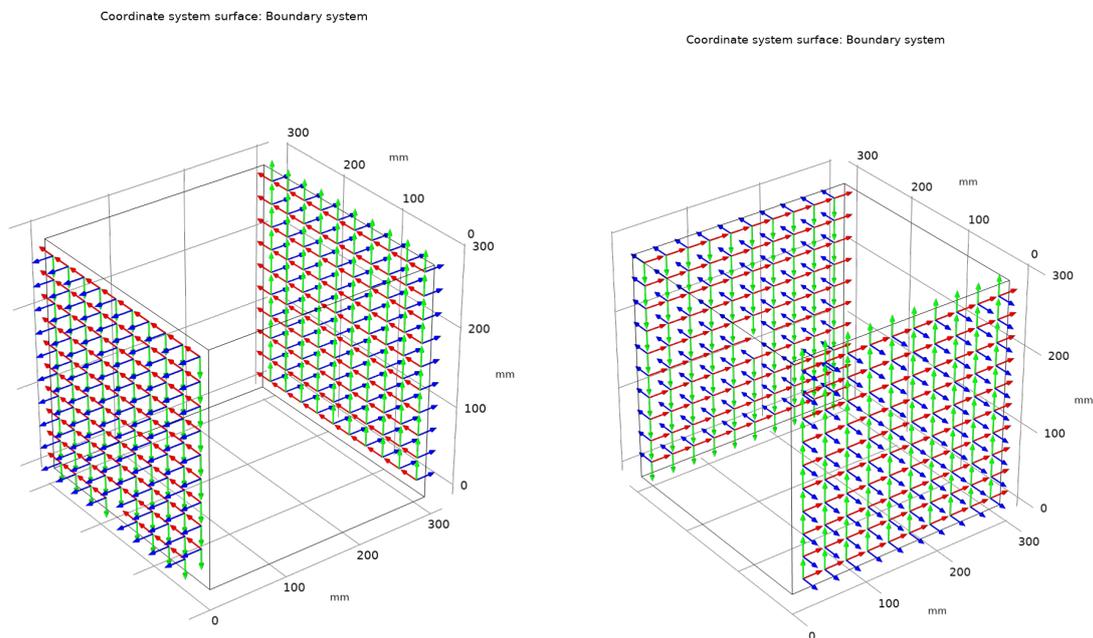


Abb. 22: gedrehte Koordinatensysteme in COMSOL Modell zur Definition von MD und CD

Die in Abb. 22 dargestellten Koordinatensysteme zeigen die Ausrichtung der Wellpappe mit MD und CD durch Falten. In dem nächsten Schritt muss die Welle und der Schichtaufbau modelliert werden. Wir wollen von der Darstellung links in Abb. 23 auf die homogenisierte Schale, die dort rechts abgebildet ist, kommen.

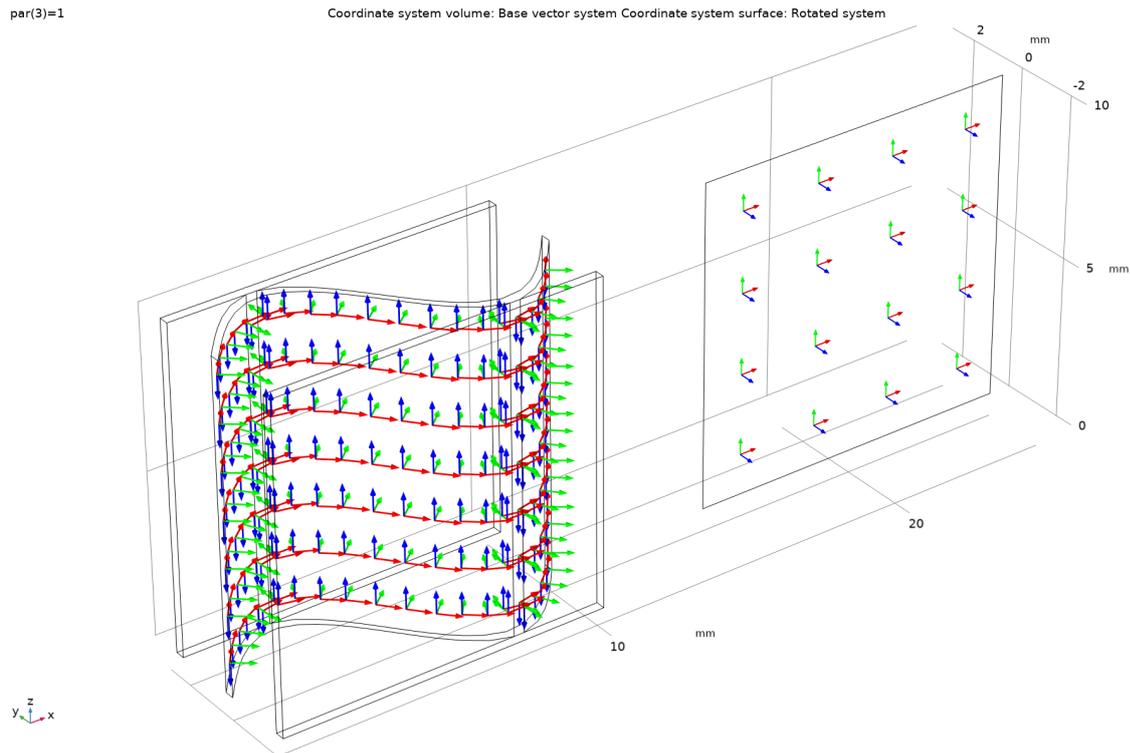


Abb. 23: Koordinatensysteme in aufgelöstem Volumen-Modell (links) und homogenisiertes Schalenmodell (rechts)

Dazu werden Funktionen für den Winkel zu den Linern $\theta(x)$ und für die Position der Welle in Bezug auf den Mittelpunkt $h(x)$ als analytische Gleichungen im Bezug auf das globale Koordinatensystem (x -Koordinate) implementiert (siehe Abb. 24).

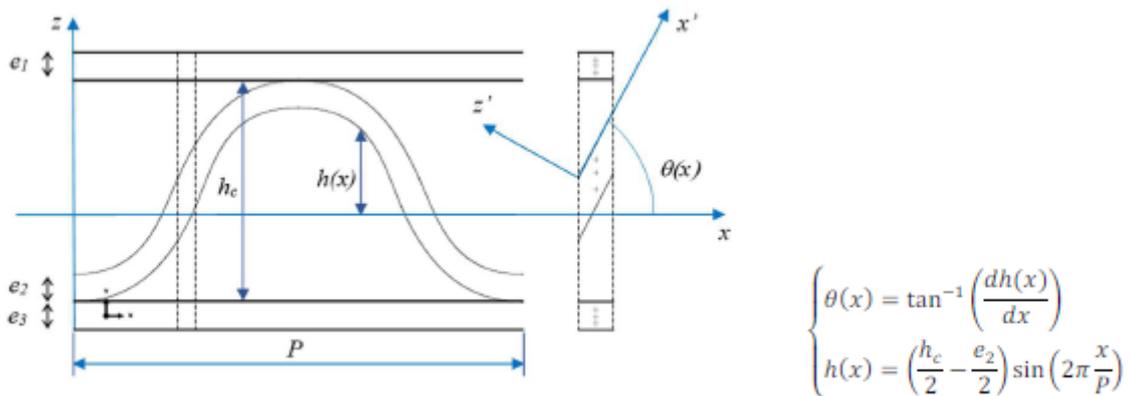


Abb. 24: Skizze zum Homogenisierungsmodell [5], rechts dargestellt ist jeweils die Abhängigkeit von der Höhe h und dem Winkel θ von x .

In Abb. 25 ist die implementierte Gleichung dargestellt. Diese wird für das Homogenisierungsmodell (H-Modell) verwendet, um die Steifigkeitsmatrix zu erhalten (Abb. 27). Die Gleichungen dafür sind in Abb. 26 gezeigt.

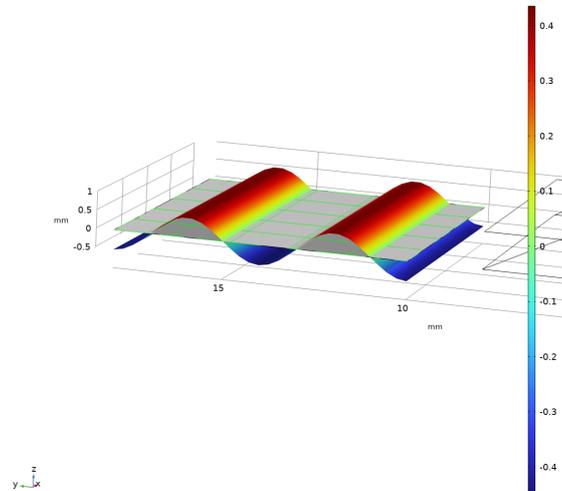


Abb. 25: Visualisierung der analytischen Funktionen für die Wellenform. Die Geometrie, auf der das Mesh definiert ist, stellt ein flaches Quadrat dar (grau)

$$\begin{cases} A_{ij}(x) = Q_{ij}^{(1)} e_1 + Q_{ij}^{(2)}(\theta(x)) \frac{e_2}{\cos \theta(x)} + Q_{ij}^{(3)} e_3 \\ B_{ij}(x) = Q_{ij}^{(1)} z_1 e_1 + Q_{ij}^{(2)}(\theta(x)) z_2 \frac{e_2}{\cos \theta(x)} + Q_{ij}^{(3)} z_3 e_3 \\ D_{ij}(x) = Q_{ij}^{(1)} \left(z_1^2 e_1 + \frac{e_1^2}{12} \right) + Q_{ij}^{(2)}(\theta(x)) \left(z_2^2 \frac{e_2}{\cos \theta(x)} + \frac{e_2^2}{12 \cos^2 \theta(x)} \right) \\ \quad + Q_{ij}^{(3)} \left(z_3^2 e_3 + \frac{e_3^2}{12} \right) \\ F_{ij}(x) = \frac{5}{6} \left(C_{ij}^{(1)} e_1 + C_{ij}^{(2)}(\theta(x)) \frac{e_2}{\cos \theta(x)} + C_{ij}^{(3)} e_3 \right) \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ T_x \\ T_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 & B_{33} & 0 & 0 \\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{11} & 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix}$$

Abb. 26: Gleichungen für das H-Modell [5]

Abb. 27: Steifigkeitsmatrix aus H-Modell [5]

Die Komponenten A_{ij} , B_{ij} , D_{ij} , F_{ij} der Steifigkeitsmatrix müssen für die Implementierung des vollständigen H-Modells nun noch über eine Periode (Einheitszelle) integriert werden. Das geschieht in COMSOL über ein 2D-Einheitszellen-Modell. Bei Änderung der Welle werden die Parameter Höhe und Wellenlänge geändert und das Modell passt sich automatisch an.

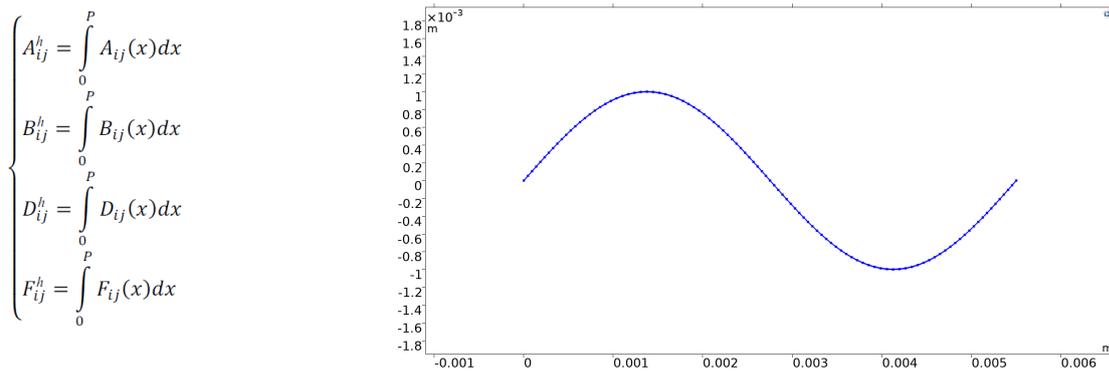


Abb. 28: links: Integration der Komponenten [5] über eine Periode. rechts: Implementierung der Integration über eine Periode in COMSOL, dies geschieht über ein 2D-Einheitszellen-Modell.

Die Implementierung der Plastizität in das H-Modell erwies sich aus Konvergenzgründen als sehr schwierig. Insbesondere die zeitabhängige Abbildung der Kraft-Weg-Kurve bei dem BCT ist neben längeren Rechendauern auch in der Stabilität der Lösung problematisch. Ein Zwischenergebnis ist dennoch in Abb. 29 und Abb. 30 gezeigt.

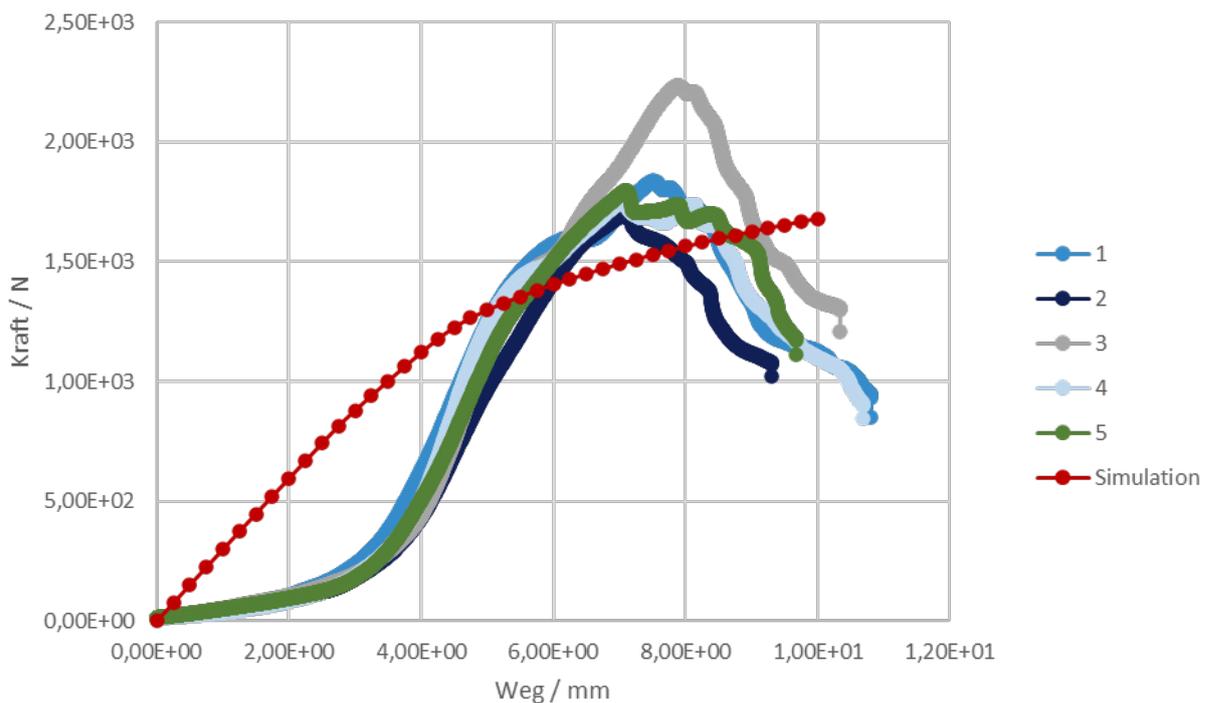


Abb. 29: Zwischenzeitliches Ergebnis für die Berechnung des BCT eines Symmetriemodells (ein Viertel der Verpackung).

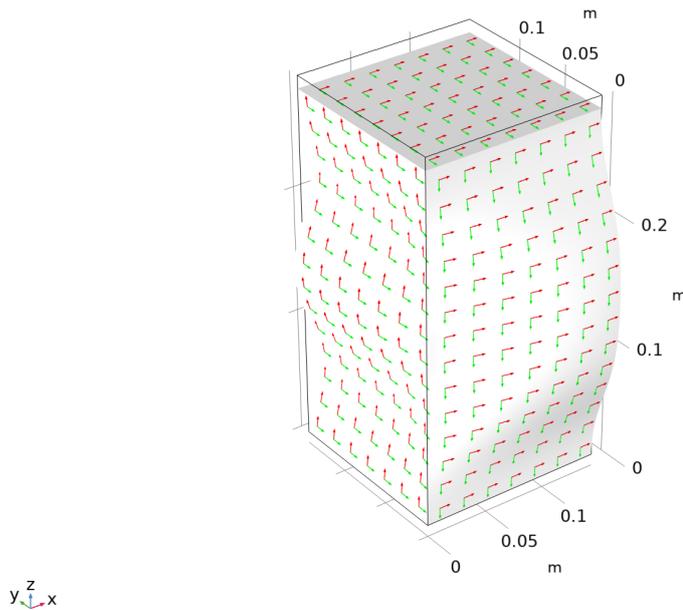


Abb. 30: Zwischenzeitliches Ergebnis beim BCT für ein Symmetriemodell (Viertel-Ausschnitt). Die Darstellung zeigt die Verformung bei 1 cm Stauchung.

Daher wurde in weiteren Veröffentlichungen nach alternativen Ansätzen gesucht. Es gibt einige unterschiedliche Ansätze in der Homogenisierung [6], der gewählte Ansatz wurde jedoch beibehalten. In einigen Veröffentlichungen werden nur mit Hilfe von elastischen Materialmodellen und einer Knickanalyse gute Ergebnisse in der Genauigkeit bei geringem Rechenaufwand erzielt.

Daher wurde das Plastizitätsmodell vernachlässigt und eine Knickanalyse mit dem linearen H-Modell durchgeführt. Das hat zur Folge, dass die Modelle sehr viel schneller und stabiler laufen. Beim Fitten der Materialdaten muss in der Folge auch nur der lineare Teil betrachtet werden. Die Genauigkeit wird in Kapitel 3.3.3.3 diskutiert.

3.3.2.6 Weiteres zu diesem AP

Für ein Symmetriemodell wird die Abhängigkeit des Ergebnisses von der Netzauflösung betrachtet. Wie in Abb. 31 und Abb. 32 zu sehen ist, ändern sich selbst bei deutlich größerem Netz (Faktor 4) die Ergebnisse nur um wenige Prozent (< 5%). Da die Formulierung nur noch geometrisch nicht-linear ist und ausschließlich elastisches Verhalten modelliert wird, ist die Berechnung sehr schnell und stabil.

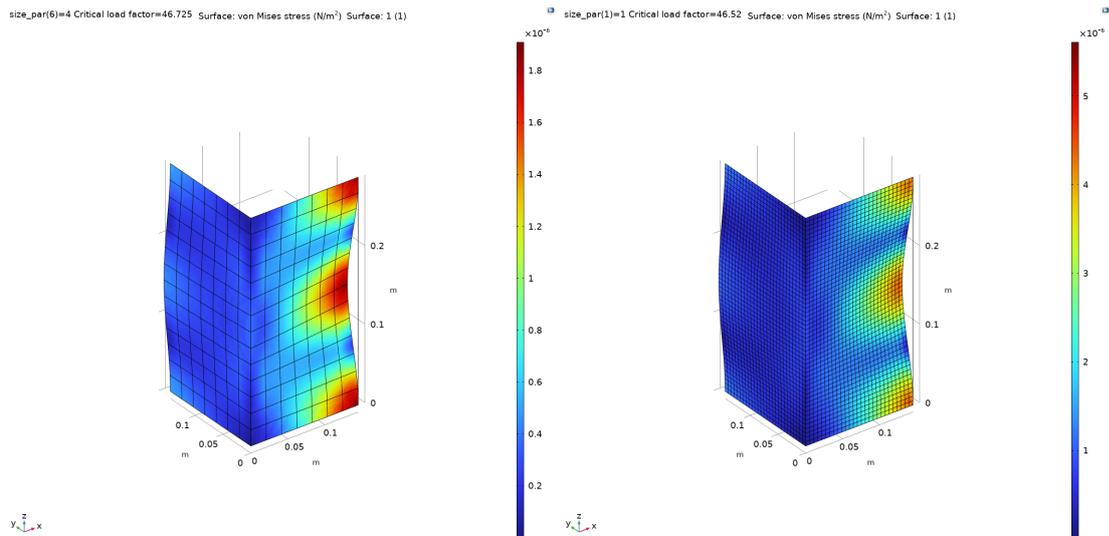


Abb. 31: Ergebnisse der Knickanalyse für ein sehr grobes Netz (links) und ein feineres Netz (rechts). Dargestellt ist ein Symmetriausschnitt (Viertel)

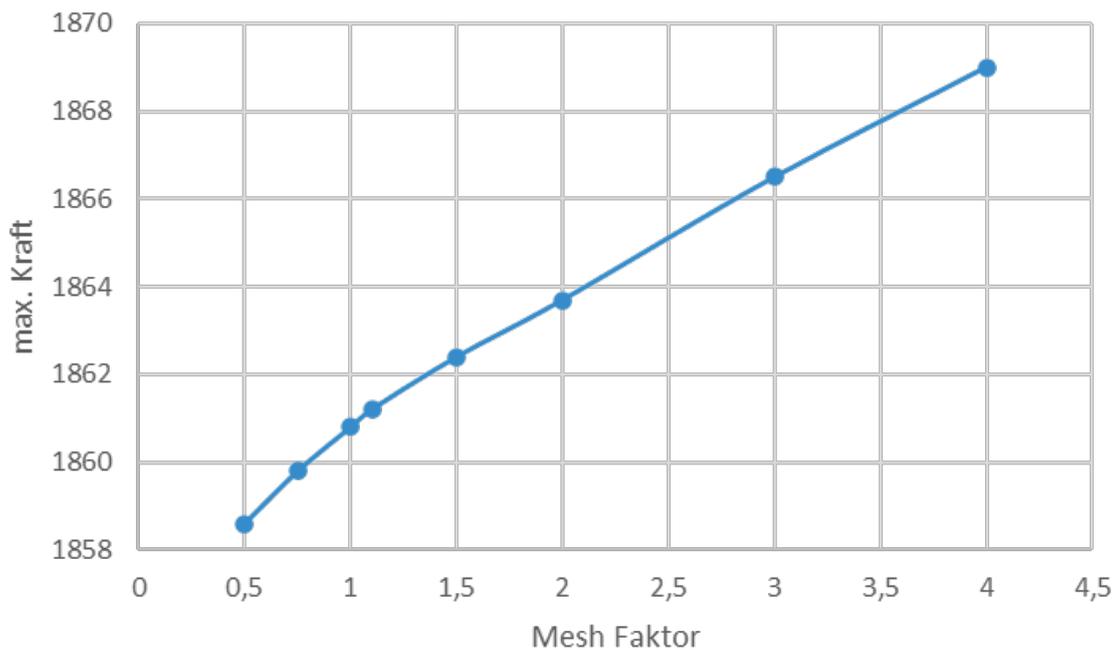


Abb. 32: Aktuelles Netz bei Mesh Faktor 1, ein Faktor 4 größeres Netz hätte 4.3% Abweichung zum aktuellen Ergebnis

3.3.2.7 Berechnung von Designvarianten

Zur Prüfung der Plausibilität wurden einige Designvarianten gerechnet. Da es keine zugehörigen gemessenen Muster gibt, sind die Ergebnisse nur qualitativ betrachtet. Abb. 33 zeigt das Ergebnis für eine Verpackung mit Ausschnitten in der Mitte der Seitenflächen.

Die Verminderung der Fläche um 5% durch die Ausschnitte hat eine Reduktion von ca. 8% in dem Stapelstauchdruck zur Folge (F_{\max} von 1668N auf 1533N). Dieses Verhältnis erscheint im Vergleich mit den Ergebnissen in Studie [22] plausibel.

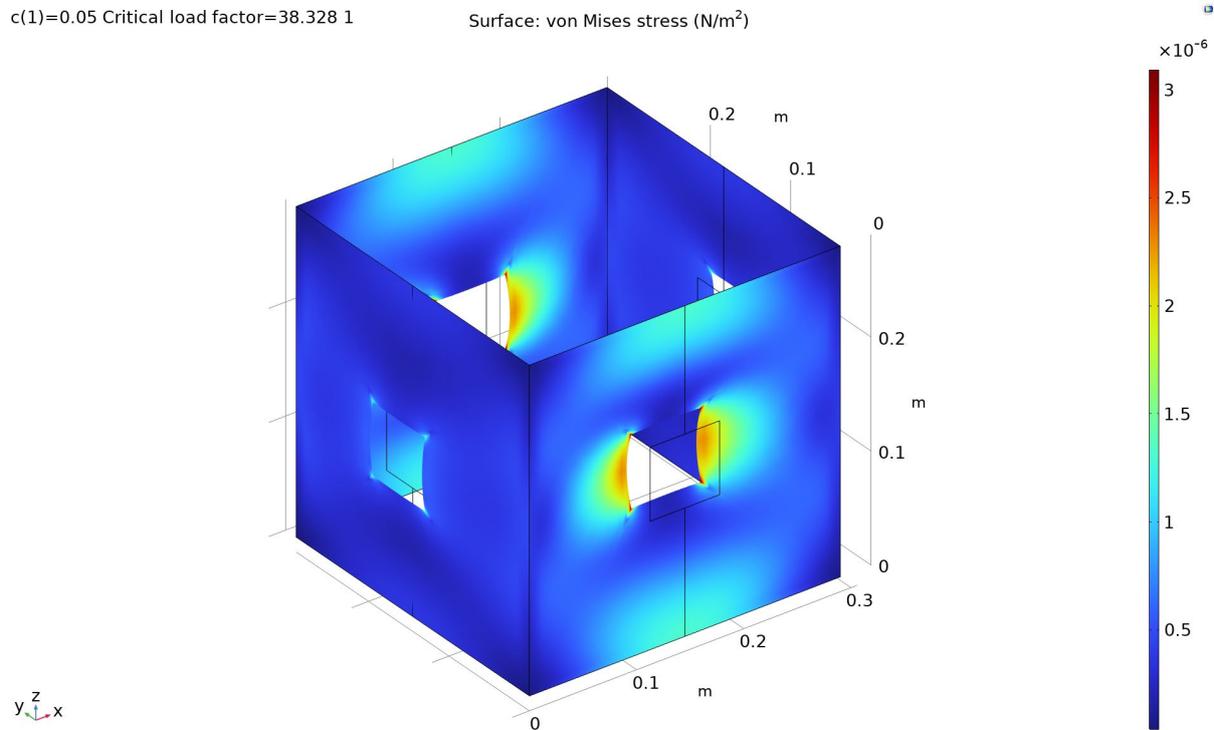


Abb. 33: Berechnungsergebnis für Verpackung mit Ausschnitt (5% der Fläche)

Eine weitere Betrachtung ist die Vergrößerung der Faltschachtel in der Höhe dar. Es wurde eine Reduktion des Stapelstauchdrucks erwartet. Diese Erwartung wurde erfüllt, der Stapelstauchdruck reduziert sich bei ca. 10% mehr Höhe (+ 30 mm) um ca. 8.3%. Das Ergebnis ist in Abb. 34 dargestellt.

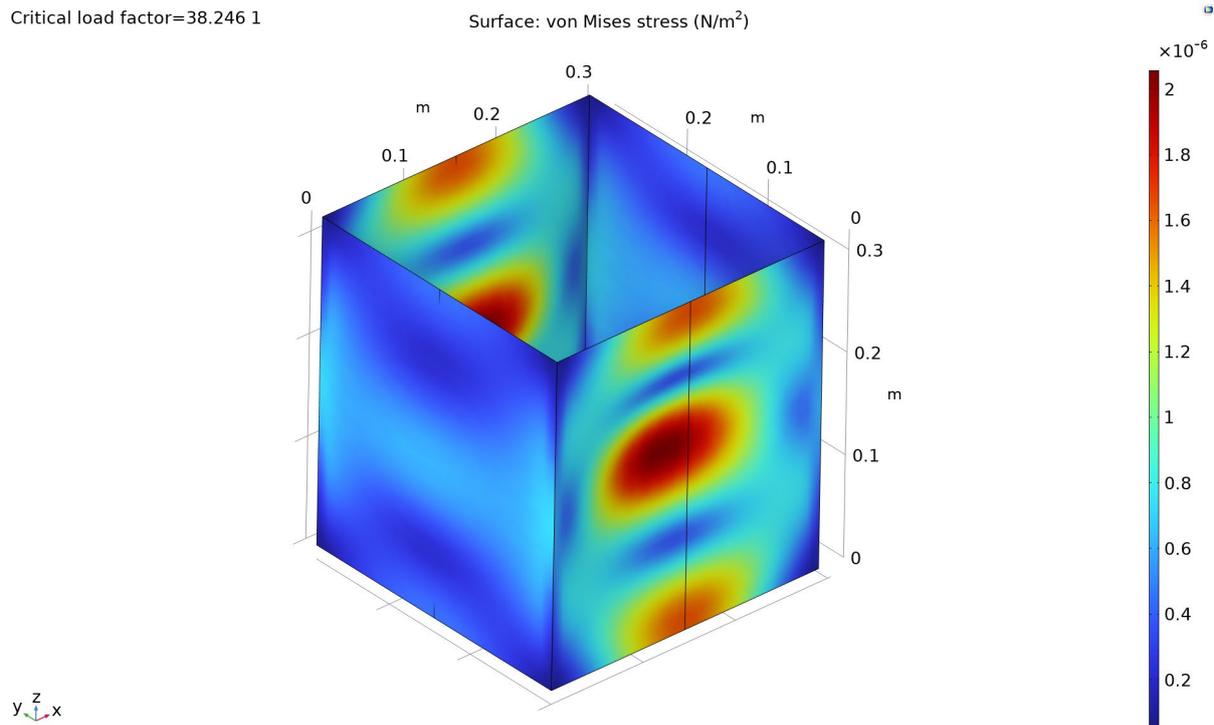


Abb. 34: Ergebnis mit 10% höherer Schachtel (320 mm statt 290 mm Innenmaß)

3.3.3 AP 3 „Validierung des Tools an realen Verpackungen“

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die umfassende Validierung und Optimierung von Verpackungskonstruktionen durch die Herstellung und Prüfung von Testverpackungen. Dies umfasst die folgenden Schritte:

1. Herstellung der Testverpackungen
2. Durchführung praktischer Laborprüfungen
3. Validierung der Verpackungskonstruktionen

Durch diese systematische Herangehensweise soll sichergestellt werden, dass die entwickelten Verpackungskonstruktionen sowohl in den theoretischen Berechnungen als auch den Ergebnissen der Prüfungen übereinstimmen.

3.3.3.1 Herstellung der Testverpackungen

Die vom Projektpartner Thimm hergestellten Wellpappen und Faltschachteln wurden beim BFSV angeliefert und vorbereitet. Die Verpackungen wurden durch je einen Klebestreifen auf der Ober- und Unterseite verklebt. Die Faltschachteln werden entsprechend Norm leer geprüft. Abb. 35 zeigt eine Wellpappenfaltschachtel exemplarisch vor der Prüfung.



Abb. 35: Testverpackung aufgerichtet exemplarisch - exemplarisch

3.3.3.2 Durchführung praktischer Laborprüfungen

Die beispielhaften Materialeigenschaften einer Wellpappe, die für die Prüfung zur Verfügung gestellt wurde ist exemplarisch für Material „B51011“ in Tabelle 2 zu finden. Die vom BFSV gemessenen Werte zum gleichen Material sind in Tabelle 3 zu sehen.

Tabelle 2: Technische Durchschnittswerte Wellpappensorte "B51011" von Thimm - Herstellerangaben

Sorte	Kaliber	Gewicht	ECT	Berstfestigkeit		Durchstoßarbeit	
				AD	ID	AD	ID
B51011	-	384,3 g/m ²	4,1 kN/m	-	-	-	-
	FG außen	FG Welle	FG innen	Material Außenlage	Material Innenlage	Material Innenlage	Recycling-anteil
B51011	130 g/m ²	90 g/m ²	130 g/m ²	Testliner	Wellenstoff	Testliner	-

Tabelle 3: Gemessene Materialeigenschaften Wellpappensorte " B51011" von Thimm

Sorte	Kaliber	Gewicht	ECT	Berstfestigkeit		Durchstoßarbeit	
				AD	ID	AD	ID
B51011	3,7 mm	384,3 g/m ²		636 kPa	600 kPa	2,7 J	2,7 J
	FG außen	FG Welle	FG innen	Material Außenlage	Material Innenlage	Material Innenlage	Recycling-anteil
B51011	124,3 g/m ²	91,66 g/m ²	128,66 g/m ²	Testliner	Wellenstoff	Testliner	-

3.3.3.3 Validierung der Verpackungskonstruktionen

Da die Messreihen untereinander deutlich Abweichen wird als Vergleichswert zwischen Simulation und Messergebnissen der Mittelwert aus den Messwerten verwendet. Ein Beispiel für den Wellpappkarton B51011 (hergestellt von Thimm) ist in Abb. 36 zu sehen.

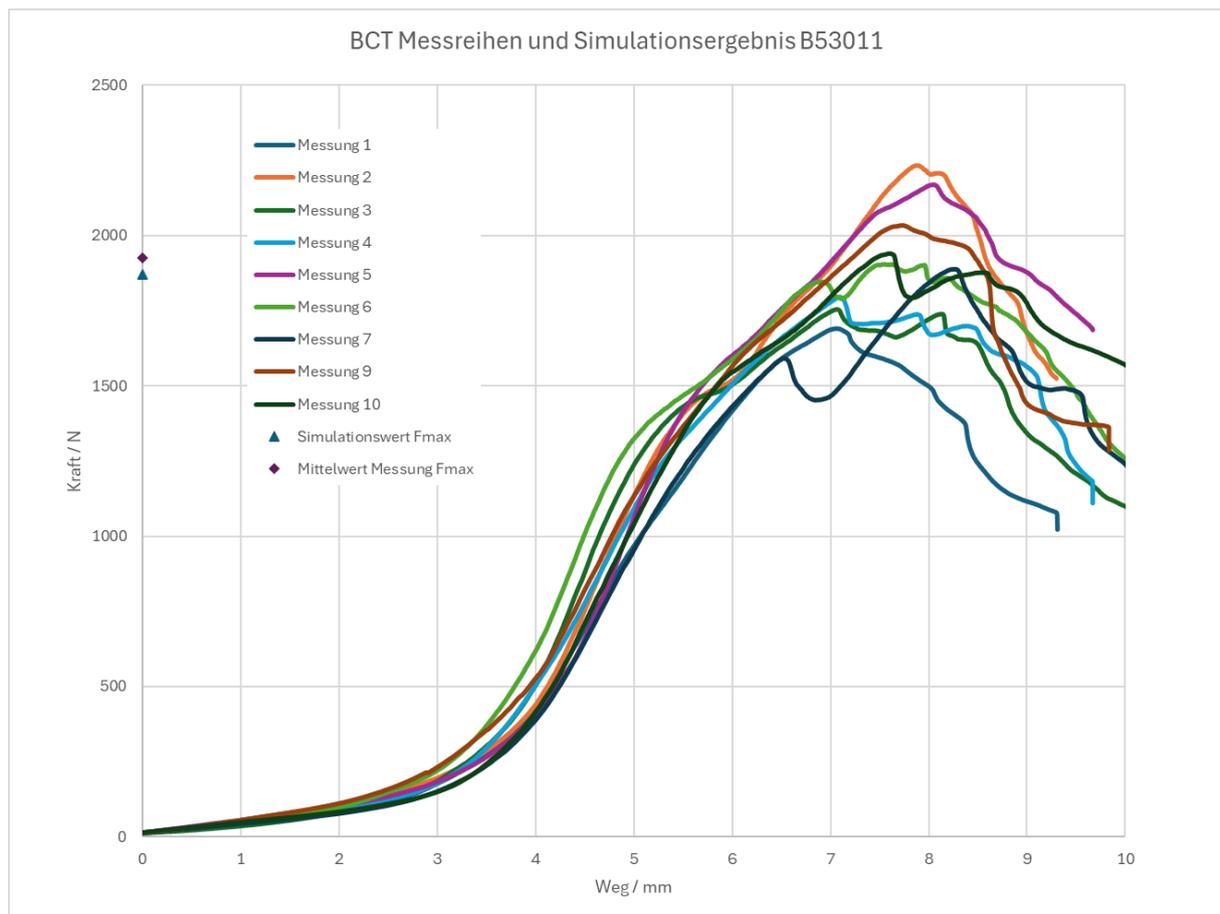


Abb. 36: Wellpappkarton B51011, BCT-Messreihen, Fmax Mittelwert Messung und Simulationsergebnis für Fmax

In Tabelle 4 ist eine Zusammenfassung des Vergleichs aufgeführt. Es ist zu sehen, dass die Abweichung der Simulationsergebnisse, die mit Hilfe des erstellten Werkzeugs ermittelt wurden, im

unteren Prozentbereich liegt (<5%), was bei den getroffenen Annahmen einen sehr guten Wert darstellt. Die Rechenzeit liegt im unteren Minutenbereich (in der Regel weniger als 5 Minuten, Abhängig von Eingangsparametern, der Größe und Hardware, auf der berechnet wird). Hier wurde also das Ziel erreicht, ein Werkzeug mit geringer Antwortzeit für die Entwicklung unterschiedlicher Designs zu entwickeln.

Tabelle 4: Vergleich Stapelstauchdruck (BCT) zwischen Messung und Simulation für verschiedene Wellpappkartons

Typ	Wellentyp	Messung Fmax / N	Simulation Fmax / N	Fehler %
B51011	B	1924,6	1869,4	-2,9%
B73041	B	2352,1	2372,4	0,9%
C64054	C	3274,4	3312,9	1,2%
B1.30 (Marktteilnehmer)	B	1722,7	1667,9	-3,2%

3.3.4 AP 4 „Entwicklung eines COMSOL-Plugins“

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Entwicklung und Integration einer benutzerfreundlichen grafischen Benutzeroberfläche (GUI) für das Simulationsmodell. Dies umfasst die folgenden Schritte:

1. Erstellung der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) für das Simulationsmodell
2. Definition von Parametern und Eingabedaten in der GUI
3. Implementierung der automatisierten Berechnung und Auswertung über die Applikation
4. Software-seitige Integration

Durch diese Maßnahmen soll eine intuitive und effiziente Benutzeroberfläche geschaffen werden, die eine einfache Eingabe und Auswertung von Simulationsdaten ermöglicht und nahtlos in bestehende CAD-Software integriert werden kann.

3.3.4.1 Erstellung der grafischen Benutzeroberfläche (GUI)

Die GUI für das Simulationstool wurde mit Hilfe der Entwicklungsumgebung von COMSOL Multiphysics erstellt. Diese nennt sich „Application Builder“ (siehe Abb. 37) und erlaubt sowohl die Nutzung von Bausteinen wie „Buttons“ und vordefinierten grafischen Elementen, als auch die Programmierung von eigenen Methoden in Java. Da die Nutzung somit schnell und äußerst flexibel ist und bereits Erfahrung im Umgang mit dem Application Builder vorlag, wurde dieser genutzt.

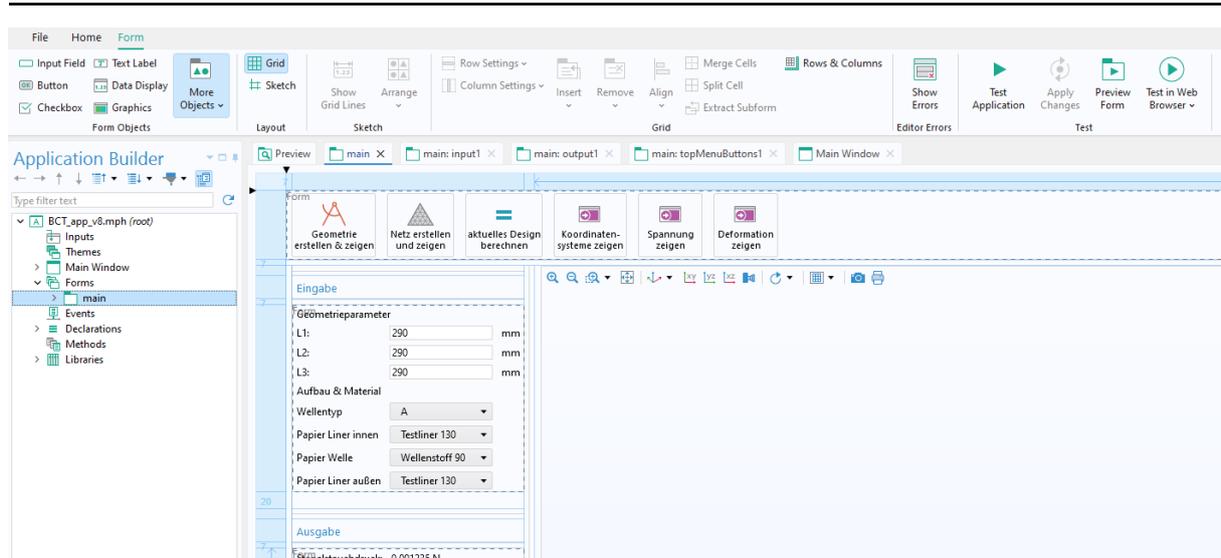


Abb. 37: Entwicklungsumgebung im "COMSOL Application Builder"

Für die GUI sollte eine möglichst einfache Bedienoberfläche herauskommen, da das Ziel war, Nutzer ohne (oder mit wenig) Simulationsexpertise die Nutzung zu ermöglichen. Daher wurden nur sehr wenig Funktionen für den Nutzer sichtbar gemacht und zur Auswahl gestellt. Die Abb. 38 zeigt die Applikation in ihrem Stand zum Projektende.

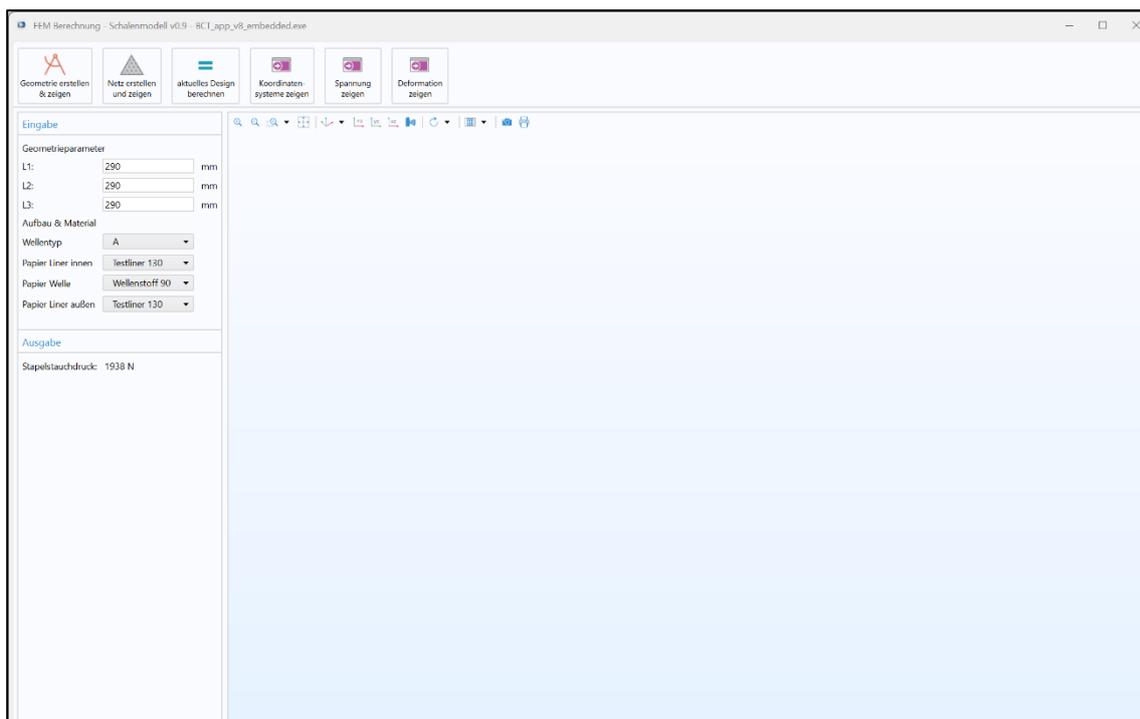


Abb. 38: COMSOL Benutzeroberfläche

3.3.4.2 Definition von Parametern und Eingabedaten

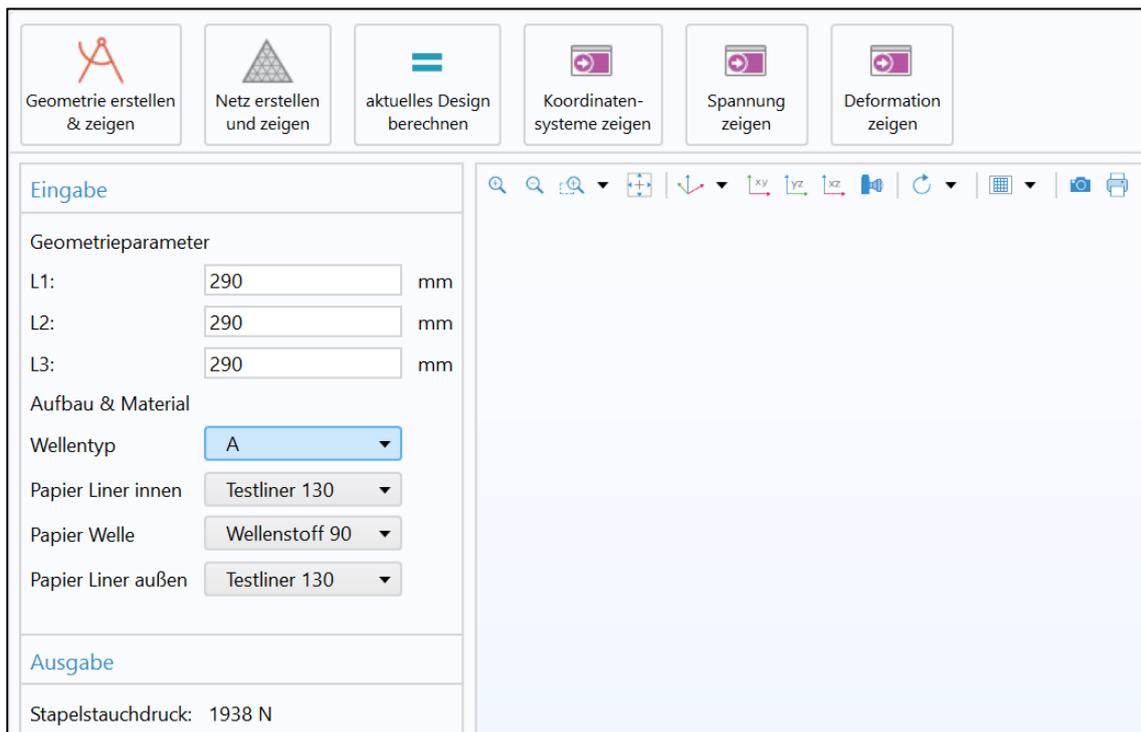


Abb. 39: COMSOL interaktive User interface Elemente

In der Kopfzeile sind einige Funktionen, die die Geometrie zeigen, das Netz zeigen und die Berechnung per Knopfdruck ermöglichen (siehe Abb. 39). Daneben sind 3 Plots zur Auswertung gezeigt (Koordinatensysteme, Spannung und Deformation). Die entsprechende Darstellung wird dann im Grafikfenster (großer Bereich rechts) angezeigt (Bsp. Für Netz anzeigen siehe Abb. 40)

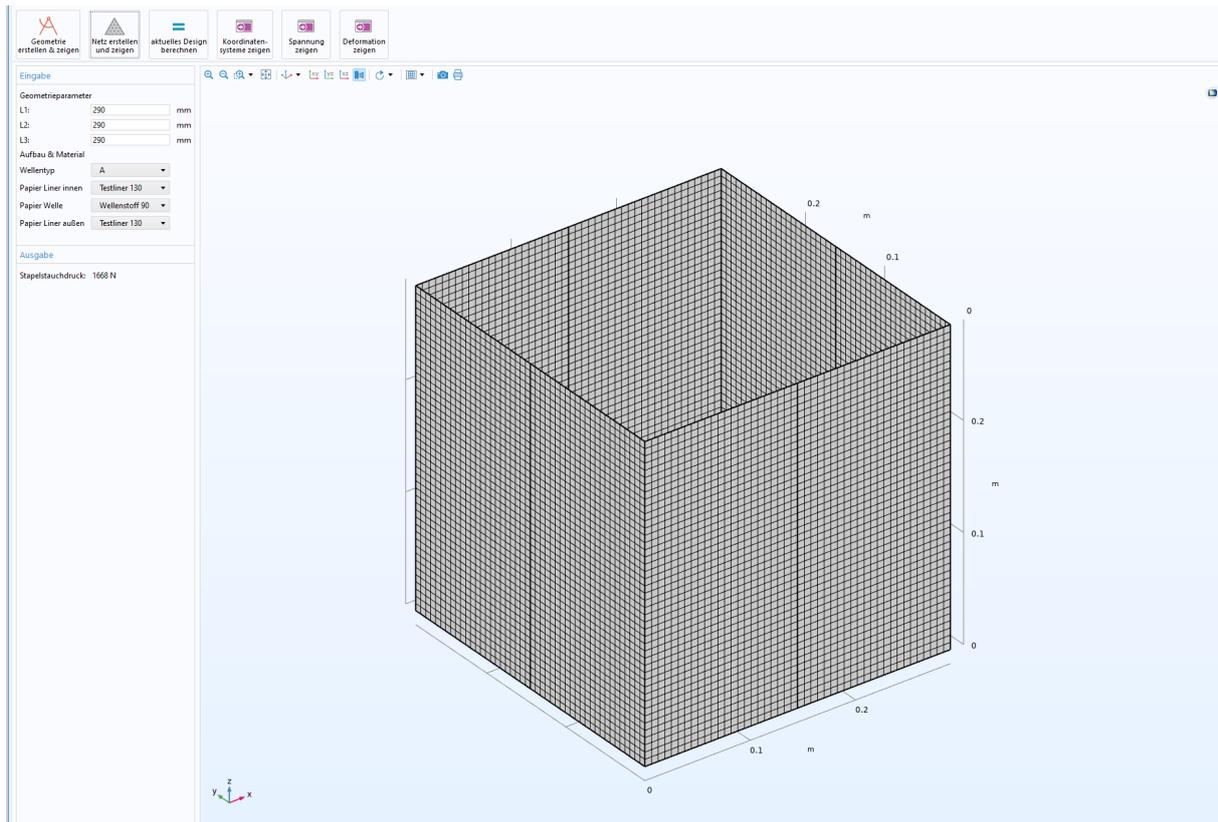


Abb. 40: Screenshot der Applikation, nachdem der Knopf "Netz erstellen und anzeigen" gedrückt wurde

Unter dem Punkt „Eingabe“ gibt es die Möglichkeit, Kantenlängen der Verpackung anzupassen.

Die Materialausgabe ist per Dropdown-Menu implementiert. Hier kann zum einen der Wellentyp (A, B, C, ...) und zum anderen das Material für jede Lage (Liner innen, Welle, Liner außen) ausgewählt werden.

Unter „Ausgabe“ wird der Stapelstauchdruck nach der Berechnung automatisch als Zahlenwert angezeigt.

3.3.4.3 Implementierung der automatisierten Berechnung und Auswertung

Für die perspektivische Einbindung der Simulations-Applikation in das etablierte Konstruktionsprogramm VPack muss die Kommunikation bzw. die Schnittstelle zwischen den Werkzeugen vorbereitet werden. Dafür wurden in diesem Arbeitspaket Voruntersuchungen und Tests durchgeführt. Die in VPack erstellte Geometrie muss von der Simulations-App eingelesen werden und die Faltrichtungen müssen definiert sein (Koordinatensysteme MD, CD). Für die folgenden Tests sind direkt aus VPack exportierte Daten verwendet worden.

Es wurden drei Möglichkeiten für die Übergabe der Daten in Erwägung gezogen:

- Dateien auslesen und im Code finden
- Parametrische Erstellung in COMSOL und nur Übergabe der Parameter
- Direktes Austauschformat

Dateien auslesen und im Code finden (a)

Man könnte ein .xml-Format der aktuellen Datei in VPack nutzen und dieses im Hintergrund der Application über Java Code automatisch einlesen lassen. Dort müsste dann nach Tags gesucht werden und diese automatisch im COMSOL Modell mit den korrekten Zahlenwerten überschrieben werden (Abb. 41). Diese Form wurde verworfen, da sie sehr unflexibel ist. So wären keine Änderungen in der Geometrie, die neue Unterteilungen zur Schachtel zufügen (z.B. Cut-outs) ohne eine Änderung der Skripte möglich.

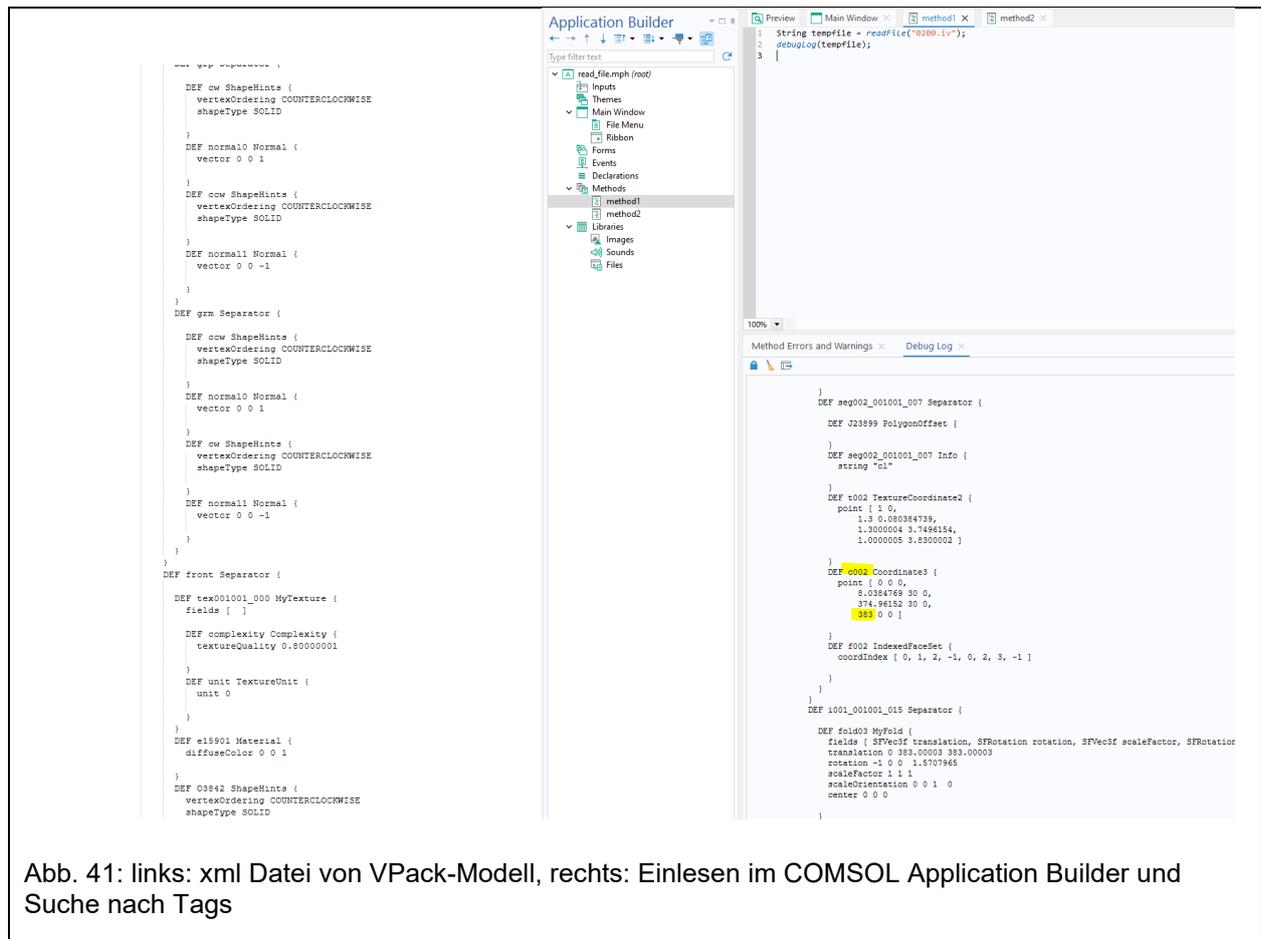


Abb. 41: links: xml Datei von VPack-Modell, rechts: Einlesen im COMSOL Application Builder und Suche nach Tags

Parametrische Erstellung in COMSOL und nur Übergabe der Parameter (b)

Diese Möglichkeit ist sicherlich die schnellste Option, da innerhalb von VPack nur eine Textdatei geschrieben werden müsste, die die Kantenlängen ausgibt (siehe Abb. 42). Diese kann dann unproblematisch in der COMSOL Application aufgerufen bzw. aktualisiert werden und das Modell wird angepasst. Da die Application sowieso schon über die Parameter für die Kantenlängen verfügt und diese dynamisch anpassbar waren, wäre der Aufwand minimal. Allerdings gelten die gleichen Beschränkungen wie bei Punkt (a), da keine neuen „Ausschnitte“ oder Außenkonturen möglich sind. Insgesamt wäre diese Möglichkeit also ebenfalls unflexibel, dafür aber sehr robust.

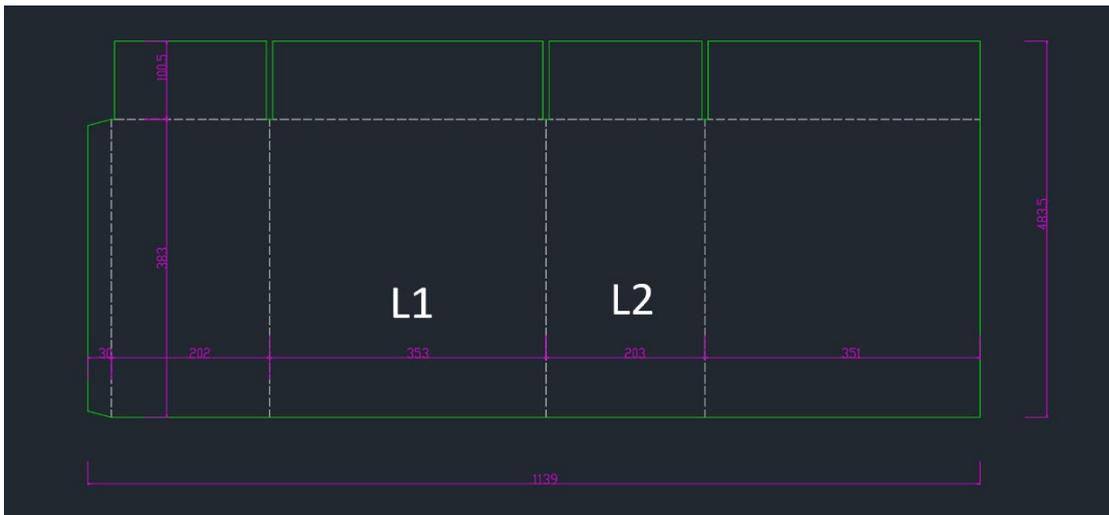


Abb. 42: Export aus VPack als .dwg, die Zahlenwerte könnte man als Liste oder Textdatei übergeben

Direktes Austauschformat (c)

Am flexibelsten wäre die Möglichkeit, die Geometrie direkt in COMSOL zu importieren. Dazu kann man die fertige 3D Form über ein CAD-Format (z.B. .stp) importieren oder die flache Form importieren (z.B. als .dxf) und falten. Die zweite Option wurde einmal Schritt für Schritt (ohne Automatisierung) durchgeführt, siehe exemplarisch Abb. 43.

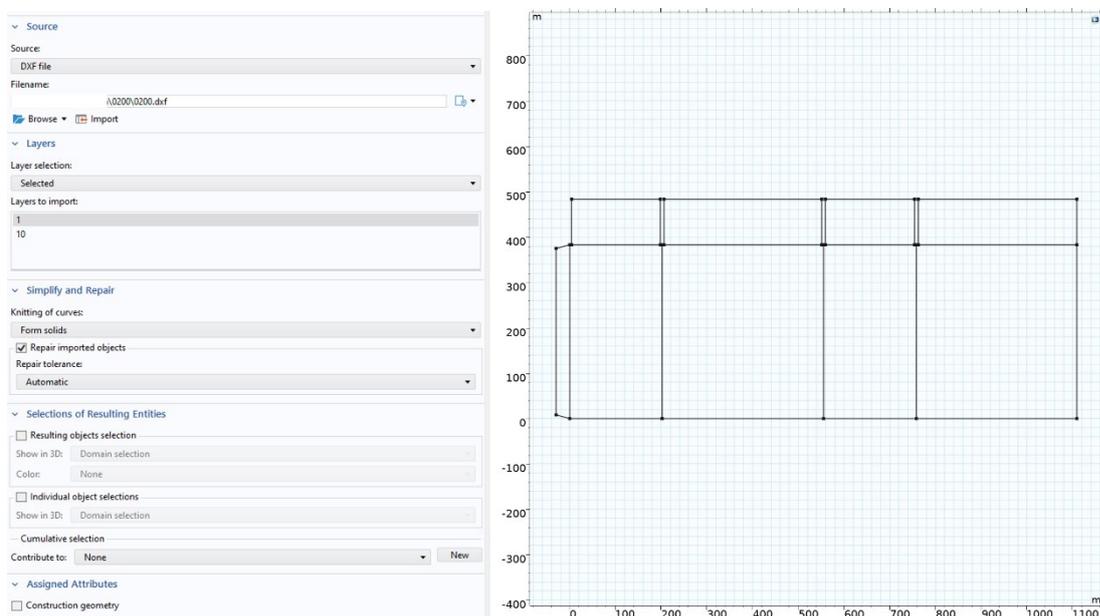


Abb. 43: Import der .dxf-Datei in COMSOL Multiphysics

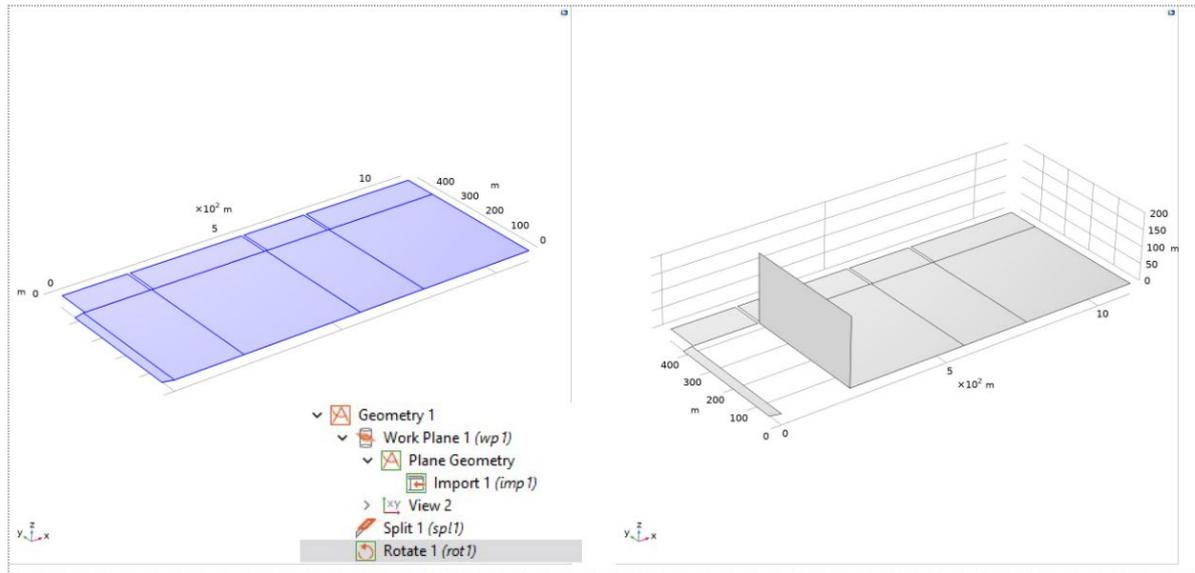


Abb. 44: Anpassung der Geometrie durch Falten an den Kanten

Die Abb. 43 zeigt den Import der Geometriedatei. Für das Falten wurde als Test für eine spätere Automatisierung die Stelle ausgelesen, an der das Falten stattfinden würde. Das hat bereits in den Tests funktioniert. Insgesamt sind aber noch ein paar Schritte für eine volle Automatisierung nicht ganz klar. So ist die Definition der Faltrichtung und z.B. eine Nutzung von Symmetrieebenen noch nicht geklärt. Ein möglicher Ansatz wäre die Definition von Layer Names in der .dxf-Datei, die von COMSOL ausgelesen und interpretiert werden können. So könnte dann automatisch die Faltung und die Definition der Koordinatensysteme stattfinden (siehe Abb. 44). Dieser Ansatz ist komplett flexibel (Ausschnitte, Trennungen, Konturen, etc.) und ist nach aktuellem Stand robust implementierbar. Die Sequenz und ein Ergebnis der Operationen ist in Abb. 45 gezeigt.

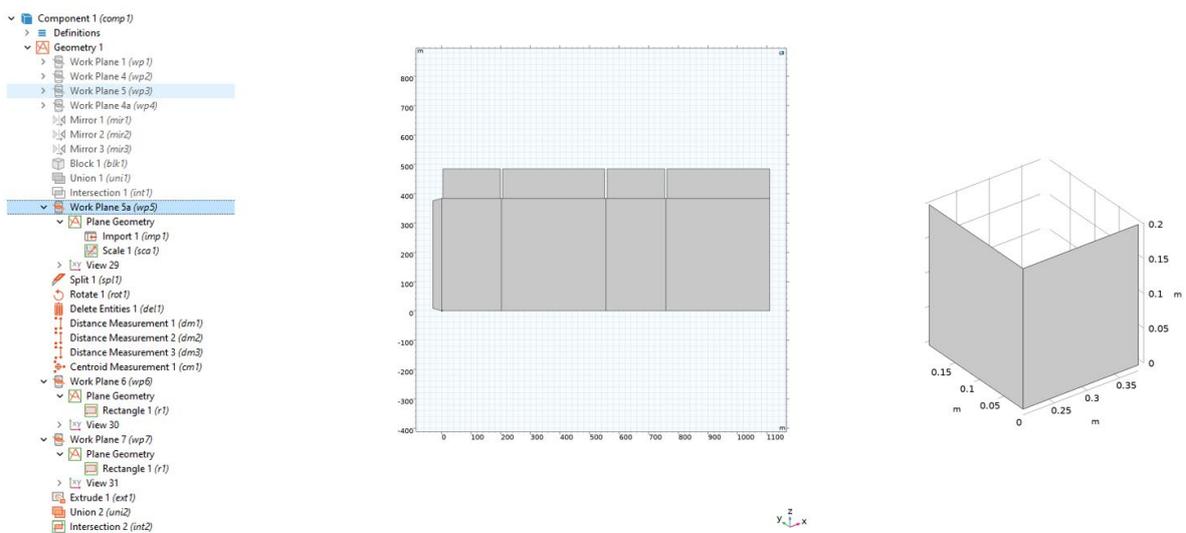


Abb. 45: verwendete Geometriesequenz in COMSOL (links), Ausgangsform nach Import (mittig), fertiges Sektorsymmetriemodell nach der Sequenz, mit dem berechnet wurde (rechts)

Ein direkter Import der 3D Geometrie wurde nur kurz betrachtet. Problematisch an diesem Ansatz ist die Entstehung von Überlappungen und kleinen Bereichen, die u.a. zu Fehlern im Erstellen vom strukturierten Netz führen können.

3.3.4.4 Software-seitige Integration

Im vorherigen Abschnitt wurden drei mögliche Wege des Datenaustausches zwischen CAD und COMSOL behandelt. Für den CAD-Anwender ist natürlich die flexibelste Anbindung erstrebenswert, um alle möglichen Konstruktionen durch das Plugin auf Festigkeit prüfen zu lassen. Zum Austesten der verschiedenen Möglichkeiten wurden die verschiedensten Austauschformate bezüglich 2D und 3D zur Verfügung gestellt. Aufgrund der maximalen Flexibilität ist die direkte Verwendung der aktuellen in VPack erstellten 3D Geometrie bevorzugt. Die Übergabe an das Simulationstool könnte z.B. per STEP-Format geschehen.

Das CAD VPack wurde bereits vorbereitet um einen weiteren Tab „FEM“, in dem dann das COMSOL-Plugin laufen könnte, siehe Abb. 46 und Abb. 47. Die CAD-Daten werden beim Aktivieren des neuen Tabs übertragen und der Anwender kann dann alles Weitere im Plugin einstellen und die Berechnung starten. Die Erkenntnisse aus der Festigkeitsberechnung muss der CAD-Anwender von Hand in die Konstruktion einfließen lassen und so auf einem iterativen Weg die optimale Verpackung zu ermitteln.

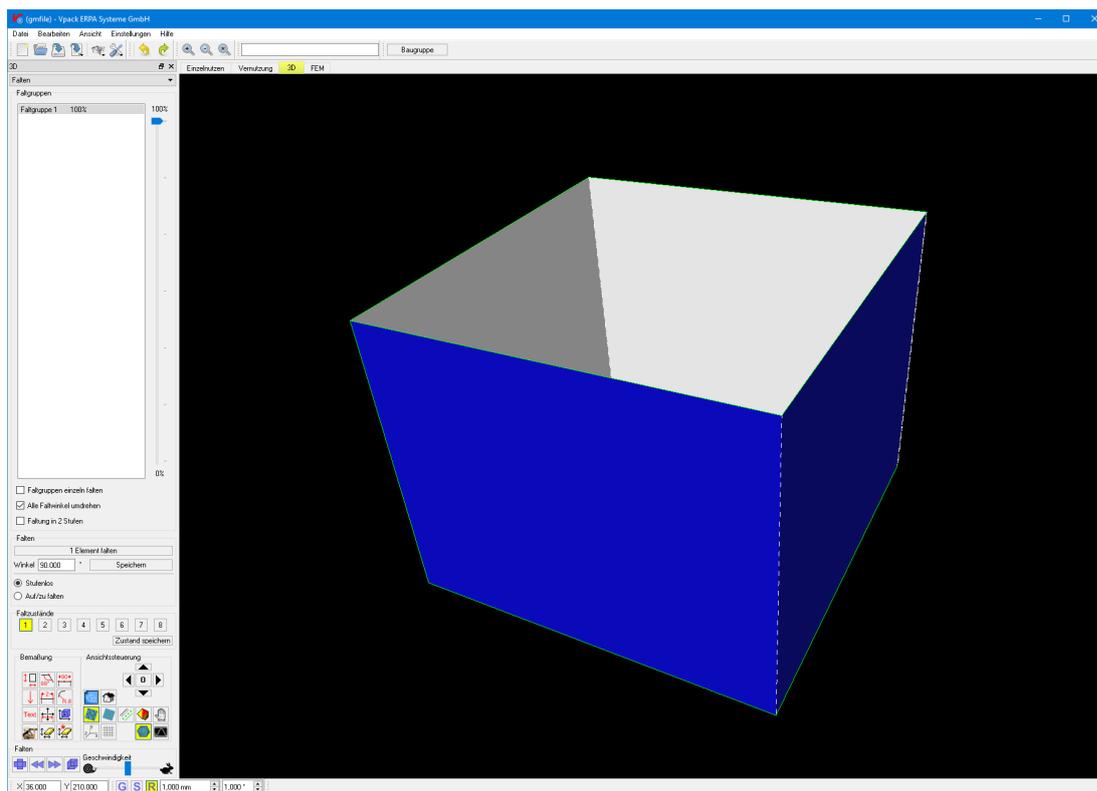


Abb. 46: Visualisierung Faltschachtel in VPack – exemplarisch

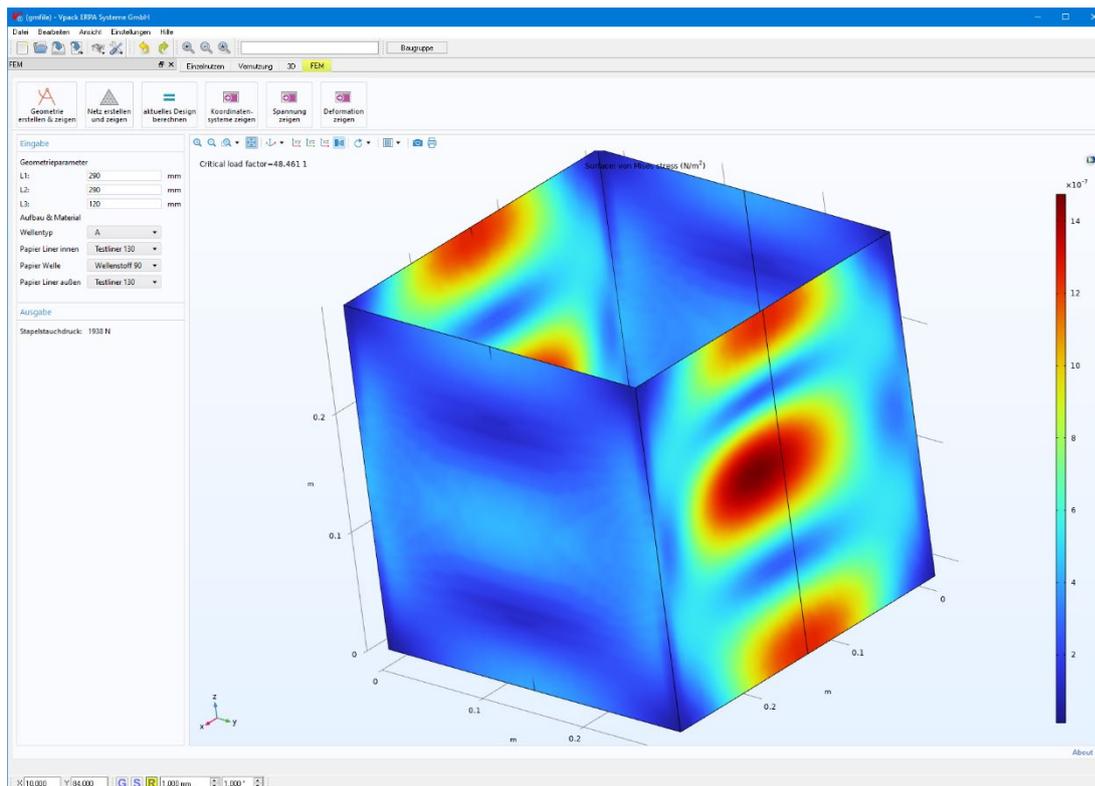


Abb. 47: Visualisierung Faltschachtel in COMSOL - exemplarisch

3.3.5 AP „5“ – Praxistest des Tools mit Marktteilnehmern /

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Verbreitung und Weiterentwicklung der Forschungsergebnisse durch gezielte Publikation und Marktanalyse. Dies umfasst die folgenden Schritte:

1. Teilpublikation der vorliegenden Forschungsergebnisse
2. Befragung von Marktteilnehmern

Durch diese Maßnahmen soll sichergestellt werden, dass die Forschungsergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden und potenzielle neue Anwendungsbereiche sowie Verbesserungsmöglichkeiten des Tools identifiziert werden können.

3.3.5.1 Teilpublikation der vorliegenden Forschungsergebnisse

Der BFSV hat auf seiner Website die ersten Ergebnisse des Forschungsprojektes bereits veröffentlicht. Im Rahmen eines Blogbeitrages wurden am 14.01.2025 erste Einblicke in die Ergebnisse gewährt. (Vergl. [23])

Auf der Transport-Schadenverhütungstagung des Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. wurde das Tool interessierten Besuchern aus dem Bereich der Versicherungswirtschaft unter dem Motto „Die Verpackung von A – Z“ vorgestellt. (Assekuradeure, Underwriter, Versicherungskaufmänner und -frauen, usw., vergl. Abb. 47).

Ein wichtiger Aspekt der Forschung ist die Beanspruchungsgerechtigkeit der Verpackung. Die Tagung findet im September 2025 erneut statt. Die Ergebnisse werden dort erneut vorgestellt.

Bei den Seminaren des BFSV zu den Themen „Verpackungen aus Wellpappe“ und „Grundlagen Verpackung“ wurden die Forschungsergebnisse im März 2025 vorgestellt. Dies soll auch bei zukünftigen Seminaren stattfinden.



Abb. 48: Schaden-Verhütungstagung März 2025 – Vorstellung der Ergebnisse des Forschungsprojektes

3.3.5.2 Ergebnis Befragung von Marktteilnehmern

Eine Rückmeldung von potenziellen Marktteilnehmern war, dass die Integration von neuen Materialkennwerten von Benutzern selbst eingepflegt werden können soll. Dies ist nicht möglich, da der Benutzer in der Regel nicht über ausreichend Informationen verfügt, um ein zielführendes Materialkennwertfitting durchzuführen. Hierfür ist einerseits die Kenntnis der Materialkennwerte notwendig. Dies ist eine Information, die bei Herstellern von Wellpappenverpackungen durchaus vorliegen kann, da Hersteller oft auch über Prüfgeräte für Wellpappen und Wellpappenverpackungen verfügen. Andererseits ist die Kenntnis im Umgang mit COMSOL notwendig, die in der Regel nicht bei den Anwendern vorliegt.

Bei mehreren Wellpappen- und Verpackungsherstellern war Interesse am fertiggestellten Tool inkl. Integration von Materialkennwerten des jeweiligen Herstellers vorhanden. Auch die Integration in eine 3D-CAD-Software war im Interesse der Hersteller. Vergl. Abschnitt 3.3.4.4.

Zusammen mit einem Wellpappen Hersteller aus Niedersachsen wurden Tests an Wellpappenrohpaieren, Wellpappen und Faltschachtel durchgeführt. Hier wurden die gleichen Materialeigenschaften wie für die vorherigen Tests verwendet (einwellige Wellpappe,

300 x 300 x 300 mm Außenmaß). Hierdurch soll einerseits am Beispiel eines Marktteilnehmers gezeigt werden, dass das Tool herstellerunabhängig angewendet werden kann.

Tabelle 5: Technische Durchschnittswerte Wellpappensorte "B1.3 BB01" von Marktteilnehmer - Herstellerangaben

Sorte	Kaliber	Gewicht	ECT	Berstfestigkeit		Durchstoßarbeit	
				AD	ID	AD	ID
B 1.3 bb01	2,81 mm	393,4 g/m ²	3,82 kN/m	892,0 kPa	1086,4 kPa	2,7 J	2,8 J
	FG außen	FG Welle	FG innen	Material Außenlage	Material Innenlage	Material Innenlage	Recycling- anteil
B 1.3 bb01	135 g/m ²	095 g/m ²	125 g/m ²	Kraftliner	Wellenstoff	Testliner	65%

Tabelle 6: Gemessene Materialeigenschaften Wellpappensorte "B1.3 BB01" von Marktteilnehmer

Sorte	Kaliber	Gewicht	ECT	Berstfestigkeit		Durchstoßarbeit	
				AD	ID	AD	ID
B 1.3 bb01	2,85 mm	395 g/m ²	5,48 kN/m	841 kPa	908 kPa	2,99 J	2,97 J
	FG außen	FG Welle	FG innen	Material Außenlage	Material Innenlage	Material Innenlage	Recycling- anteil
B 1.3 bb01	138 g/m ²	99 g/m ²	122 g/m ²	Kraftliner	Wellenstoff	Testliner	-

Die Materialdaten wurden in die Applikation geladen und eine Berechnung der Verpackung durchgeführt. Nach einer Rechenzeit von ca. 60 Sekunden auf einem regulären Arbeits-PC konnte die Stauchkraft der Faltschachtel berechnet werden, siehe Abb. 49. Für die Stauchkraft ein Wert von 1667,9 N errechnet. Die gemessenen Stauchkräfte an den Kundenmustern sind im Bereich von 1644 N – 1914 N (Mittelwert = 1722,7 N). Die Abweichung liegt damit bei ca. 3.2 % (siehe Abb. 50).

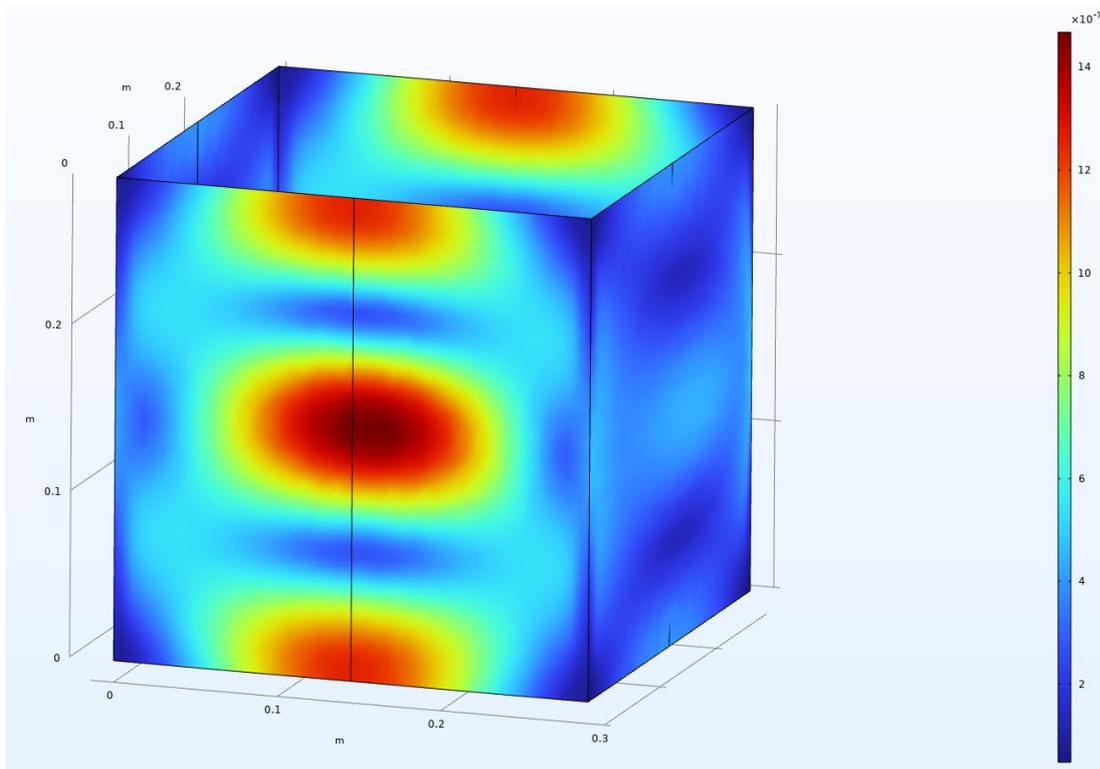


Abb. 49: Exemplarisch Berechnung der Verpackung eines Marktteilnehmer (Marktteilnehmer)

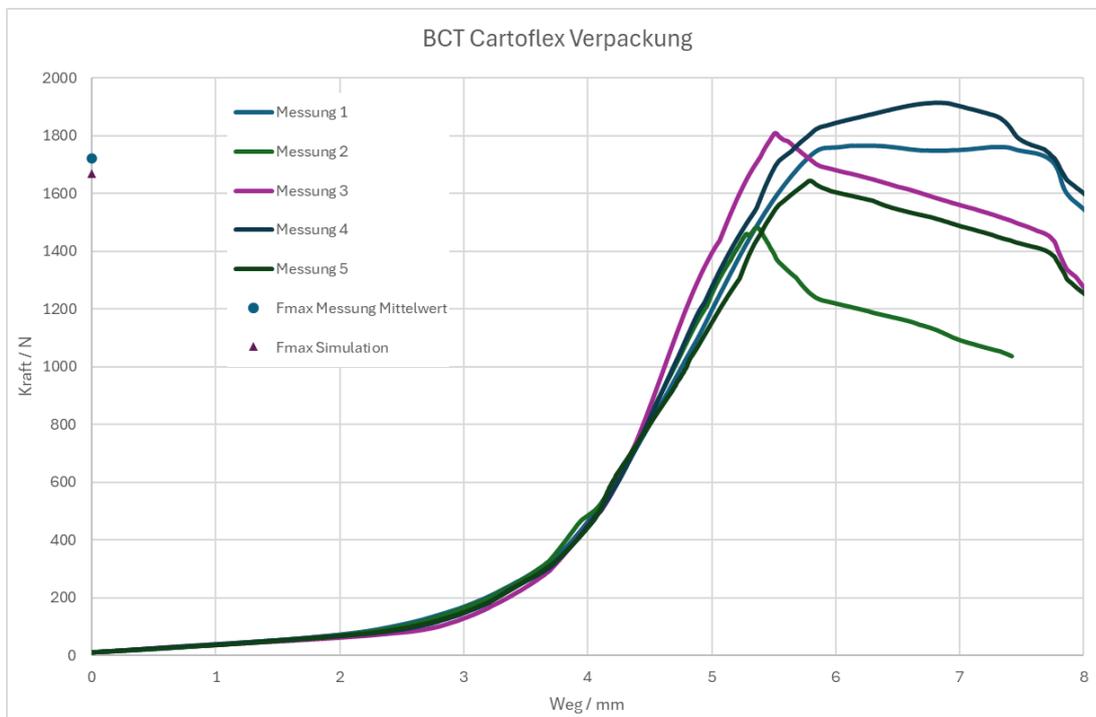


Abb. 50: Messwerte der Berechnung einer Verpackung eines Marktteilnehmer

3.3.6 AP 6 „Dokumentation“

Das Arbeitspaket „Dokumentation“ wird durch den vorliegenden Bericht abgeschlossen.

3.4 Zeitplan und Meilensteine

Im Rahmen des Projekts sind Verzögerungen aufgetreten. Dem entsprechend wurde das Arbeitspaket drei (AP 3) abweichend von ursprünglichen Zeitplan, siehe Abb. 51, später fertiggestellt. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde eine Verlängerung des Projektzeitraumes um drei Monate beantragt und bewilligt. Grund für die Verzögerung sind Herausforderungen bei der Beschaffung von Spezifikationen zu geprüften Wellpappen.

Dem Entsprechend konnte der Meilenstein 2 Validierung nur mit Verzögerung fertiggestellt werden, vergl. Tabelle 1. Der Meilenstein 3 (COMSOL Plugin) ist zum Projektende nicht abgeschlossen, siehe AP 4 (Abschnitt 3.3.4.1 - 3.3.4.4)

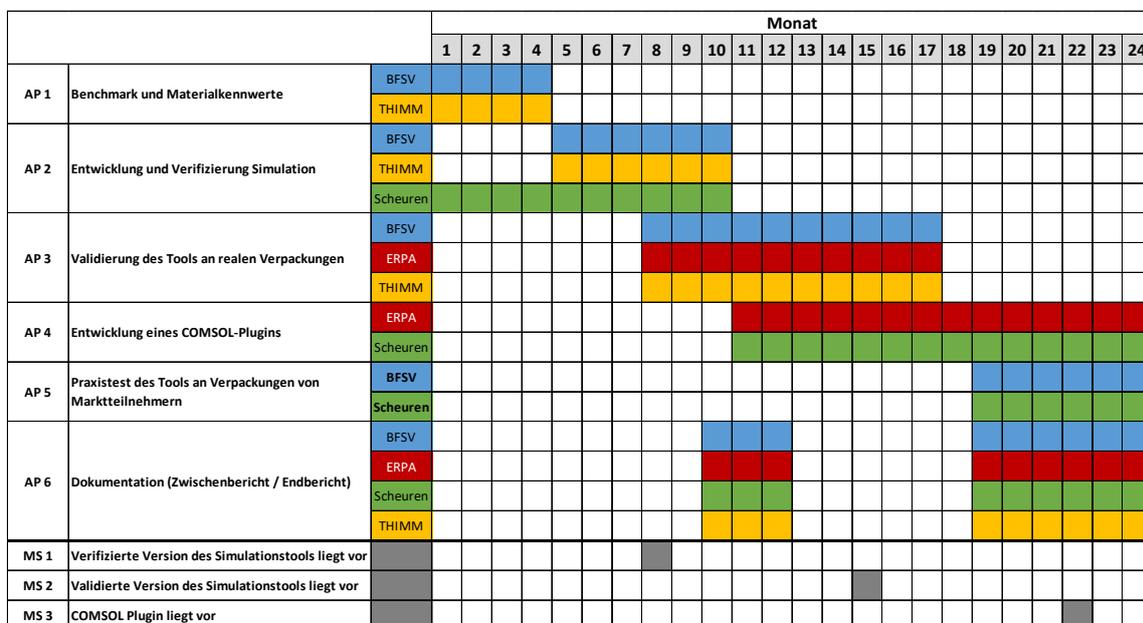


Abb. 51: Zeitplan entsprechend Projektantrag

Tabelle 7: Meilensteine

Meilenstein	Inhalt	Plan	Erreichung
M1: Tool	Erste verifizierte Version Simulationstool liegt vor	Monat 8	Planmäßig (Monat 8)
M2: Validierung	Erste Ergebnisse für die Validierung des Tools liegen vor	Monat 15	Planmäßig (Monat 15)
M3: COMSOL Plugin	Ein funktionstüchtiges COMSOL-Plugin liegt in einer ersten Version vor	Monat 22	Ausstehend – Siehe AP 4 (Abschnitt 3.3.4.1 - 3.3.4.4)

3.5 Verwertung

Die Verwertung der Forschungsergebnisse ist, unabhängig von weiterer Förderung, geplant. Die kurz-, mittel- und langfristige Verwertungsplanung bei den Projektpartnern sowie bei Dritten ist wie in Tabelle 8 aufgelistet geplant.

Tabelle 8: Verwertungsmöglichkeiten der Forschungsergebnisse

Verwertung	Kurzfristig	Mittelfristig	Langfristig
BFSV	Entwicklung von Dienstleistungen zur Analyse und Implementierung von Wellpappen sowie Fortbildungen, Öffentlichkeitsarbeit und Lehre		
Scheuren	Abschließen der Implementierung des standalone Applikation in die Software VPack	Erweiterung des grundlegenden Tools, Dienstleistung zur Implementierung neuer Materialien und Funktionalitäten (Optimierungsalgorithmen, Designfreiheiten, Erweiterung des Funktionsumfangs beispielsweise um Graspapiere und Faserverbundstoffe) sowie Lizenzierung Evtl. Veröffentlichung der standalone Software als dezentrale, Browserbasierte Software.	
ERPA	Erweiterung der bestehenden CAD-Software um die Funktionalität der Festigkeitsanalyse, um während des Entwickelns der Verpackung schon einen materialoptimierten Prototyp zu erstellen.		
Thimm		Erweiterung des Dienstleistungsumfanges in der Verpackungsberatung; Prototypenverringern und Verpackungsoptimierung schon in der Entwicklung, mit einhergehender Reduzierung von Aufwand in Material und Manpower Vermarktung verbesserter Verpackungen, mit Blick auf Stabilität und Wiederverwendbarkeit (sowie eine schnellere und zielgenauere Konstruktion) mit reduziertem Materialaufwand und Umwelteinfluss	
Dritte (Verpackungs-hersteller und Anwender von Verpackungen)		Durch die Implementierung neuer Technologien und effizienter Prozesse können Verpackungshersteller die Zeiten und Kosten für das Prototyping mittel- bis langfristig erheblich reduzieren. Dies führt nicht nur zu einer schnelleren Markteinführung neuer Produkte, sondern auch zu einer signifikanten Kosteneinsparung und einer verbesserten Wettbewerbsfähigkeit.	

4 Fazit

Ziel dieses Forschungsprojektes war es bei geringerem Ressourcenverbrauch, schneller und qualitativ hochwertiger als bisher, Verpackungsdesigns und Materialreduzierung durch digitales Prototyping zu ermöglichen. Im Forschungsantrag wurde bei einer Materialersparnis von 0,5 % eine Einsparung von 23.000 Tonnen Wellpappe-Rohpapier für ein Drittel der deutschen Wellpappenhersteller in Deutschland pro Jahr errechnet.

Zunächst wurde ein Benchmark für Materialkennwerte von Papier und Wellpappe erstellt. Die Benchmark-Analyse umfasst die Materialeigenschaften von verschiedenen Wellpappenrohpapersorten sowie Wellpappensorten. Dabei wurden Werte wie Flächengewicht (FG), Biegesteifigkeit und Kantenstauchwiderstand ermittelt. Ein FEM-Simulationstool wurde entwickelt und auf Basis der Benchmark-Werte verifiziert sowie anhand realer Verpackungen validiert. Aus diesem Simulationstool wurde ein standalone COMSOL-Plugin entwickelt, welches in etablierte 3D-CAD-Software integriert werden kann. Dieses Tool wurde mit Marktteilnehmern einem Praxistest unterzogen und erfolgreich überprüft

Dadurch konnte der Technologiereifegrad der Softwarelösung von Level 3 (Nachweis der Funktionstüchtigkeit) auf Level 6 (Prototyp in Einsatzumgebung) erhöht werden.

Im weiteren Verlauf ist es geplant, die Praxistests auf zusätzliche Marktteilnehmer auszuweiten und eine Dienstleistung basierend auf den Forschungsergebnissen zu entwickeln. Dies umfasst beispielsweise die Messung von Papiereigenschaften, das Einpflegen der Messdaten in eine Datenbank zur Anwendung, so wie die Weiterentwicklung von 3D-CAD-Software durch Zugriff auf Materialkennwerte und deren FEM-Berechnung.

Trotz der positiven Ergebnisse und der vielversprechenden Einsparungspotenziale gibt es einige kritische Aspekte zu berücksichtigen. Erstens wurden die Praxistests bisher nur mit einer begrenzten Anzahl von Marktteilnehmern durchgeführt. Um die allgemeine Anwendbarkeit und Effizienz des Simulationstools zu bestätigen, sind umfangreichere Tests mit einer größeren Anzahl von Unternehmen notwendig.

Zweitens kann die Integration des COMSOL-Plugins in bestehende 3D-CAD-Software könnte für einige Unternehmen technische und organisatorische Herausforderungen darstellen. Die Anpassung bestehender Systeme und Schulung der Mitarbeiter erfordert Zeit und Ressourcen, die nicht alle Unternehmen bereitstellen können.

Drittens basiert die errechnete Materialersparnis von 0,5 % auf theoretischen Annahmen und muss in der Praxis noch bestätigt werden. Es bleibt abzuwarten, ob diese Einsparungen tatsächlich realisiert werden können und ob sie sich langfristig stabilisieren.

Schließlich ist die Nachhaltigkeit der erzielten Einsparungen zu hinterfragen. Während die Reduktion von Materialkosten kurzfristig attraktiv ist, müssen auch die langfristigen Auswirkungen auf die Qualität und Haltbarkeit der Verpackungen berücksichtigt werden. Eine zu starke Reduktion der Materialstärke könnte möglicherweise die Stabilität und Schutzfunktion der Verpackungen beeinträchtigen. Dies kann nur durch ausgiebige Anwendung in der Praxis nachgewiesen werden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] THIMM Packaging Systems GmbH + Co. KG, *Angaben entsprechend Projektpartner*, Northeim, 2021.
- [2] Statista, „Beförderte und tatsächlich angekommene Güter im Straßenverkehr in Deutschland im Jahr 2013,“ Statista Research Department, 23 04 2014. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/315368/umfrage/lkw-transportvolumen-schwund-deutschland/>. [Zugriff am 13 07 2021].
- [3] Statista, „Anteile verschiedener Materialien am Markt für Transportverpackungen in Deutschland im Zeitraum von 2013 bis 2019,“ Statista Research Department, 12 08 2024. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/240922/umfrage/struktur-des-marktes-fuer-transportverpackungen-in-deutschland/>. [Zugriff am 13 07 2021].
- [4] V. D. L. e. al., „Experimental Characterisation and Finite Element Modelling of Paperboard for the Design of Paperboard Packaging,“ *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Bd. 540, Nr. 2019.
- [5] V. D. L. e. al., „Finite Element Simulation of the Strength of Corrugated Board Boxes Under Impact Dynamics,“ *Proceedings of the International Conference on Advances in Computational Mechanics 2017*, 2018.
- [6] A. M. e. al., „Homogenization of sandwich panels,“ *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*, Nr. 22, 2015.
- [7] A. D. H. e. al., „Finite-element simulation with a homogenization mode and experimental study of free drop tests of corrugated cardboard packaging,“ *Mechanics and Industry*, Nr. 13, 2012.
- [8] The Federation of Corrugated Board Manufacturers, *FEFCO CODE 12th Edition*, Brussels: Fefco, 2022.
- [9] H. P.-. u. K. e. (HPV), *Handbuch für Packmitteltechnologien*, Heidelberg: Dr. Kurt Häfner-Verlag GmbH, 2017.
- [10] DIN e.V., *DIN 6730:2017-09 Papier, Pappe und Faserstoff - Begriffe*, Berlin: DIN Media GmbH, 2017.
- [11] DIN e.V., *DIN EN ISO 187:2023-02 Papier, Pappe und Faserstoffe - Normalklima für die Vorbehandlung und Prüfung und Verfahren zur Überwachung des Klimas und der Probenvorbehandlung*, Berlin: DIN Media GmbH, 2023.

-
- [12] DIN e. V., *DIN ISO 3039:2011-06 Wellpappe - Bestimmung der flächenbezogenen Masse der Lagen nach Trennung (ISO 3039:2010)*, Berlin: DIN Media GmbH, 2011.
- [13] DIN e.V., *DIN EN ISO 1924-2:2009-05 Papier und Pappe - Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung - Teil 2: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit (20 mm/min) (ISO 1924-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 1924-2:2008*, Berlin: DIN Media GmbH, 2009.
- [14] DIN e.V., *DIN EN ISO 3035:2012-02 Wellpappe - Bestimmung des Flachstauchwiderstandes (ISO 3035:2011); Deutsche Fassung EN ISO 3035:2011*, Berlin: DIN Media GmbH, 2012.
- [15] DIN e.V., *DIN 55468-1:2021-01 Packstoffe - Wellpappe - Teil 1: Anforderungen, Prüfung*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021.
- [16] DIN e.V., *DIN 53121:2014-08 Prüfung von Papier, Karton und Pappe - Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode*, Berlin: DIN Media GmbH, 2014.
- [17] DIN e.V., *DIN EN ISO 3037:2023-03 Wellpappe - Bestimmung des Kantenstauchwiderstandes (Verfahren für ungewachste Kanten) (ISO 3037:2022); Deutsche Fassung EN ISO 3037:2022*, Berlin: DIN Media GmbH, 2023.
- [18] DIN e.V., *DIN EN ISO 535:2023-06 Papier und Pappe - Bestimmung des Wasserabsorptionsvermögens - Cobb-Verfahren*, Berlin: DIN Media GmbH, 2023.
- [19] DIN e.V., *DIN EN ISO 2759:2014-10 Pappe - Bestimmung der Berstfestigkeit (ISO 2759:2014); Deutsche Fassung EN ISO 2759:2014*, Berlin: DIN Media GmbH, 2014.
- [20] DIN e.V., *DIN 53142-1:2014-12 Prüfung von Pappe - Durchstoßprüfung - Teil 1: Prüfung mit dem Pendelschlagwerk*, Berlin: DIN Media GmbH, 2014.
- [21] DIN e.V., *DIN EN ISO 12048:2001-04 Verpackung - Versandfertige Packstücke - Kompressions- und Stapelprüfung unter Verwendung einer Kompressionsprüfmaschine (ISO 12048:1994); Deutsche Fassung EN ISO 12048:2000*, Berlin: DIN Media GmbH, 2001.
- [22] L. F. e. al., „Compressive Strength of Corrugated Paperboard Packages with Low and High Cutout Rates: Numerical Modelling and Experimental Validation,“ *Materials*, Nr. 23, 2023.
- [23] BFSV, „BFSV stellt Tool zur FEM-Berechnung von Faltschachteln vor,“ BFSV, 14 01 2025. [Online]. Available: <https://bfsv.de/blog/tool-zur-fem-berechnung-von-faltschachteln/>. [Zugriff am 2025 07 21].

-
- [24] J. C. a. C. Coetzee, „Experimental and Numerical Investigation of the In-Plane Compression of Corrugated Paperboard Panels,“ *Mathematical and Computational Applications*, Nr. 27, 2022.
- [25] B. S. e. al., „Application of homogenization approaches to the numerical analysis of seating made of multi-wall corrugated cardboard,“ *Composite Structures*, Nr. 262, 2021.
- [26] J. P. e. al., „Finite Element-Based Simulation for Edgewise Compression Behavior of Corrugated Paperboard for Packaging of Agricultural Products,“ *applied sciences*, Nr. 10, 2020.
- [27] V. D. L. e. al., „Finite Element and Experimental Investigation on the Effect of Repetitive Shock in Corrugated Cardboard Packaging,“ *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Nr. 7, 2021.
- [28] R. N. A. e. al., „Numerical Modelling of Corrugated Paperboard Boxes,“ *Mathematical and Computational Applications*, Nr. 29, 2024.
- [29] R. N. A. e. al., „An Analysis of Numerical Homogenisation Methods Applied on Corrugated Paperboard,“ *Mathematical and Computational Applications*, Nr. 28, 2023.
- [30] D. M. e. al., „Estimation of the Compressive Strength of Corrugated Board Boxes with Shifted Creases on the Flaps,“ *Materials*, Nr. 14, 2021.
- [31] F. e. al., „Evaluation of wave configurations in corrugated boards by experimental analysis (EA) and finite element modeling (FEM): the role of the micro-wave in packaging design,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nr. 126, 2023.
- [32] D. P. T. Minh, „Modeling and Numerical Simulation for the Double Corrugated Cardboard under Transverse Loading by Homogenization Method,“ *The International Journal of Engineering and Science*, Nr. 6, 2017.

