

Ganzheitliche Produktentwicklung eines carbonfaserverstärkten Fahrradrahmens

Steter Tropfen höhlt den Rahmen

Die Plastic Innovation GmbH geht neue Wege, um Fahrradrahmen wirtschaftlich und nachhaltig mit carbonfaserverstärkten Kunststoffen zu entwickeln. Bei der Konzeption funktionsintegrierter und spritzgießgerechter Designs unterstützt SimpaTec das Unternehmen mit aktuellem Simulations-Know-How. Der Rahmen des ersten voll funktionsfähigen Demonstrators, ein E-Bike im anspruchsvollen Tiefensteiger-Design, wird im WIT-Verfahren mit einer Zykluszeit von 90 s vollautomatisch hergestellt.



Mit Wasser geflutet: Die neue Generation der E-Bike-Rahmen wird im WIT-Verfahren hergestellt.

© Engel Austria

Über 200 Jahre ist die Entwicklung des ersten Fahrrads alt. Auch wenn dieses Gefährt mit dem heutigen nicht mehr viel gemein hat, so hat das Fahrrad in den letzten Jahren dank des E-Bike-Booms eine Erfolgsgeschichte sondergleichen geschrieben. Allein in Deutschland wurden 2021 etwa 4,7 Millionen Fahrräder verkauft – davon zwei Millionen E-Bikes. Diese Entwicklung hat die Branche verändert: Durch die Integration von Akku und Motor, kombiniert mit einer schönen Formensprache, werden E-Bike-Rahmen immer komplexer und dementsprechend auch kostenintensiver in der Herstellung.

Generell ist der Markt stark im Wandel. Fahrradrahmen für den Massenmarkt

werden gewöhnlich aus Aluminium hergestellt. Das zunehmende gesellschaftliche Bewusstsein für nachhaltige Produkte mit reduziertem Energieverbrauch in Herstellung, Logistik und Betrieb hat jedoch zu Versuchen geführt, Produkte der Zukunft neu zu bewerten, um ihre Effizienz zu verbessern [1]. Die Wahl des Produktionsstandorts, Herstellungsverfahrens und Materials sind Schlüsselfaktoren, um diese Ziele zu erreichen. So ermöglicht das Spritzgießen von kurzfaserverstärkten Thermoplasten die Herstellung von Strukturbauteilen in einer Vielzahl von Branchen, darunter auch Anwendungen der sogenannten Mikromobilität, wie E-Bikes, E-Scooter und Ähnliches. Dabei spielen

Simulationswerkzeuge eine wichtige Rolle – mit ihnen lassen sich beispielsweise Fahrradrahmen spritzgießgerecht auslegen. Durch digitale Produktentwicklungsmethoden können auch komplexe Prozesse berechnet und dargestellt werden, um die Entwickler zu unterstützen. Und das alles zu einem Zeitpunkt an dem noch kein einziger Span gefallen ist.

WIT-Hohlraum bereits in der Entwicklungsphase definieren

Während leistungsfähige E-Motoren die technischen Anforderungen an Fahrradrahmen mehr und mehr erhöhen, erweisen sich Kunststoffe als bestens geeignet, um die Antriebstechnik in ein ansprechendes Design zu integrieren. Mit dem Modell Ecobike1 stellt V Frames den ersten voll funktionsfähigen Demonstrator als E-Bike im anspruchsvollen Tiefensteiger-Design vor. Dessen Rahmen wird aus einem mit 40 % Carbonfasern verstärkten Polyamid 6 (Typ: Akroloy PA CF VFrame; Hersteller: Akro-Plastic) hergestellt.

Um die übliche Rohrstruktur – Voraussetzung für die nötige Torsionssteifigkeit des Rahmens – umsetzen zu können, wird das WIT-Verfahren (Wasserinjektionstechnik) angewendet. Hierbei handelt es sich um einen zweiphasigen Prozess. Das bedeutet am Beispiel des Fahrradrahmens, dass zuerst die Formteilkavität wie im herkömmlichen Spritzgießprozess vollständig gefüllt wird. Während dieser Füllung bleiben die Überlaufkavitäten und Wasserinjektoren geschlossen. Nach der Füllung werden die Überlaufkavitäten und die Wasserinjektoren geöffnet. Das einströmende Wasser drückt den noch flüssigen Schmelzekern in dieser zweiten Phase in die nun offenen Überlaufkavitäten. Der

so im Formteil erzeugte Hohlraum wird abschließend trocken geblasen.

Ziel ist es, diesen Hohlraum bereits in der Entwicklungsphase möglichst exakt zu definieren. Zusätzlich zur Füllung der Kavität mit Kunststoff und Wasser muss sowohl die Orientierung als auch die Verteilung der Fasern im Polymer berücksichtigt werden. Die Rahmensteifigkeit und die Fahrdynamik hängen stark von der Restwanddicke, der Faserorientierung, den Bindenähten sowie deren Verteilung entlang der Struktur ab. An dieser Stelle wird bereits klar, dass die Ergebnisse der Füllsimulation in der Produktentwicklung berücksichtigt werden müssen.

Vergleich der Restwanddicken aus Simulation und Messung

Für die Simulation des WIT-Prozesses hat die Plastic Innovation GmbH, Ottensheim/Österreich, Moldex3D eingesetzt [2]. Um das strukturviskose Verhalten des Kunststoffs und den komplexen WIT-Prozess sauber simulieren zu können, ist eine gute Auflösung an der Randschicht notwendig. Nur so kann der Einfluss der Schergeschwindigkeit auf den Druckverlauf und die Temperaturverteilung während des Füllvorgangs genau vorhergesagt werden. Gleichzeitig muss die Vernetzung im Kern für den Wasserkanal noch ausreichend genau sein. Für diesen Zweck wurde die BLM-Technologie

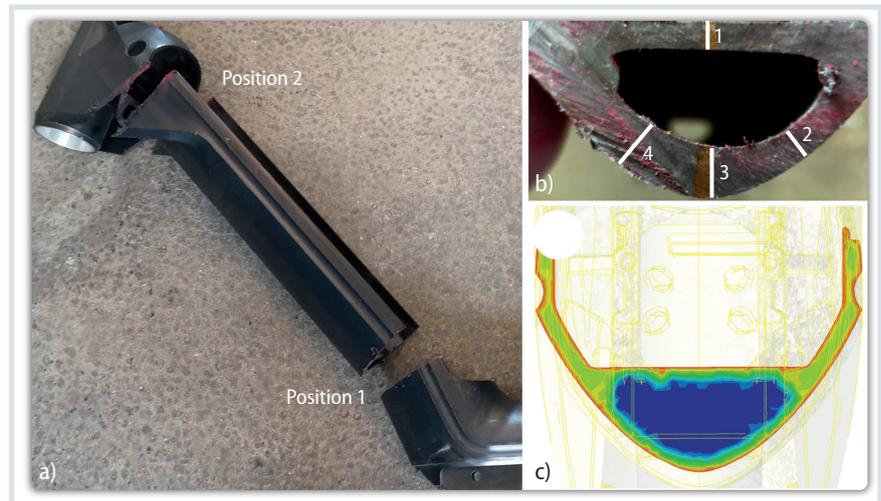


Bild 1. a) Schnittpositionen des Unterrohrs für die Wanddickenmessung; b) Markierung der vier Messpositionen über den Querschnitt des Unterrohrs; c) einer der berechneten Hohlkörperquerschnitte. © Habilitationsschrift U. Cakmak; Bearbeitung: Hanser

(Boundary Layer Mesh) entwickelt. Qualitativ hochwertige Berechnungsnetze lassen sich einfach und zuverlässig generieren. Der Formaufbau und die Kühlkanäle wurden mit dem Assistenten von Moldex3D generiert. Auf diese Weise lässt sich das Werkzeug bereits in einer frühen Entwicklungsphase mit in die Simulation aufnehmen und kann später in die Konstruktion übernommen werden.

Ein wichtiges Beurteilungskriterium ist, ob die Simulation in der Lage ist, die Wanddickenverteilung präzise vorherzusagen. Aus diesem Grund wurde im Nachgang eine Vergleichsstudie durch-

geführt. An zwei Positionen des Unterrohrs wurde der Querschnitt an jeweils vier Stellen gemessen und mit der Simulation verglichen (Bild 1). Bei Betrachtung der Mittelwerte und ihrer Standardabweichungen im Vergleich zur Simulation ist ein ähnlicher Trend der Daten von den Messpositionen 1 bis 4 zu erkennen (Bild 2). Die berechneten Wanddicken in der Simulation entsprechen hinreichend genau der Realität. Wichtig ist, dass in der Realität größere Wanddicken entstehen, als in der Simulation vorhergesagt. Für weitere Entwicklungen bedeutet diese Erkenntnis, dass keine weitere- »

DER ZEPPELIN MOMENT

WENN DIE MISCHUNG UNSEREN SCHICHTLEITER STRAHLEN LÄSST.

OMTI
the mixing company
zeppelin-systems.com

19-26 Oktober 2022
Halle 10, Stand C14

Zeppelin Heiz-Kühlmischer:
Bleibt cool – für Top-Produkte.



Je höher die Durchmischung desto besser: Zeppelin Heiz-Kühlmischer erzeugen eine intensive, dreidimensionale Mischwirkung – Basis für hochwertige Produkte. Und sie sorgen durch wirkungsvolle Aspiration für eine perfekte Entfeuchtung des Mischguts zur optimalen Weiterverarbeitung.

Alles für eine exzellente Produktqualität.

WE KNOW HOW.

ZEPPELIN
WE CREATE SOLUTIONS

ren Sicherheitsfaktoren für die Schwankungsbreite berücksichtigt werden müssen.

Integrative Simulation: Unnötig große Sicherheitsfaktoren vermeiden

Durch die Prozesssimulation mit Moldex3D konnten mögliche Verarbeitungsinstabilitäten sowie Defekte (zum Beispiel Bindenähte, Wasserfingerbildung,

Info

Text

DI Dr. Umut Cakmak ist Geschäftsführer der Plastic Innovation GmbH, Ottensheim/Österreich, und Senior Scientist am Institute of Polymer Product Engineering der Johannes Kepler Universität Linz; umut.cakmak@plasticinnovation.at

Cristoph Hinse ist Geschäftsführer der SimpaTec Simulation & Technology Consulting GmbH, Aachen; sales@simpatec.com

Tobias Schäfer M.Sc. ist R&D Engineer bei SimpaTec; t.schaefer@simpatec.com

Ing. Florian Aichberger (M.Sc.) ist Vertriebsingenieur bei der SimpaTec GmbH in Österreich; f.aichberger@simpatec.com

Dank

Die Autoren danken den beteiligten Unternehmen für die Unterstützung:

- V Frames GmbH: Spritzgießwerkzeug, Automatisierung und Produktion
- Coleo Design GmbH: Konzeptionierung und Design
- Johannes Kepler Universität Linz – Institute of Polymer Product Engineering: Simulation und Testing
- Engel Austria GmbH: Maschinenhersteller und anwendungstechnische Unterstützung
- Akro-Plastic GmbH: Materialhersteller und anwendungstechnische Unterstützung
- Plastic Innovation GmbH: Produktentwicklung & Simulation

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter

www.kunststoffe.de/onlinearchiv

English Version

Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

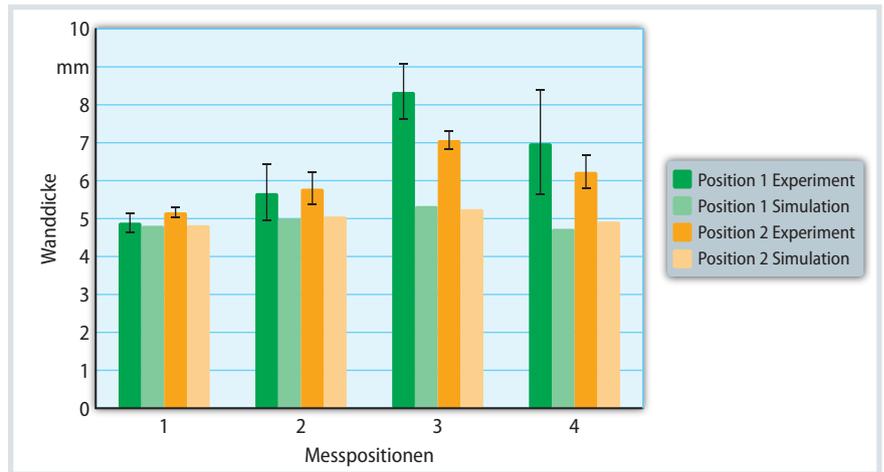


Bild 2. Vergleich der experimentellen und berechneten Wanddicken an den vier Messpositionen des Rahmenunterrohrs. Quelle: Habilitationsschrift U. Cakmak; Grafik: © Hanser

ungleichmäßige Wanddickenverteilung und Faserorientierung) erkannt und behoben werden. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde eine Finite-Elemente-Analyse (FEA) durchgeführt. Der simulierte Wasserkanal wurde hierfür als STL-Datei exportiert und in die FEA importiert. Auch bei anderen Produkten ist es empfehlenswert, diese Informationen in die FEA mitzunehmen, um nicht unnötig große Sicherheitsfaktoren einbauen zu müssen.

Sicherheitsfaktoren bedeuten immer, dass ein Produkt dickwandiger ausgelegt werden muss, als es für den Einsatzzweck notwendig gewesen wäre. Damit

wird nicht nur mehr Material benötigt, sondern auch gleichzeitig prozessbedingt die Zykluszeit unnötig verlängert. Werden die Ergebnisse aus der Prozesssimulation in die Strukturmechanik mitgenommen, spricht man auch von einer integrativen Simulation.

Bei der Entwicklung des Fahrradrahmens ging Plastic Innovation sogar noch einen Schritt weiter. Das Unternehmen entschied sich für einen ganzheitlichen Produktentwicklungsansatz und berücksichtigte neben der integrativen Simulation zusätzlich die Werkzeugkonstruktion und die Automatisierung. Das Automatisierungsziel des Kunden lag in einer konstanten, effizienten Taktzeit der folgenden Arbeitsschritte: den aus dem Spritzgießwerkzeug entformten Rahmen auf dem Transportband abzulegen sowie das für die Montage des Lenkers notwendige Steuerrohr-Insert aus Aluminium aufzunehmen und für den nächsten Zyklus in das Werkzeug einzusetzen. Diese Schritte erfolgen beim Produzenten V Frames GmbH.

Die Lücke zwischen Herstellprozess und Strukturmechanik schließen

Für die FEA wurde die Prüfung in Anlehnung an DIN EN 15194:2018–11 (Fahrräder – Elektromotorisch unterstützte Räder – EPAC; Electrically Power Assisted Cycles) nachgestellt. Diese Prüfung wurde nach der abgeschlossenen Entwicklung auch am fertigen Fahrradrahmen durchgeführt. Um die Prüfung zu bestehen, darf der Fahrradrahmen nach mehreren zyklischen Belastungen nicht



Bild 3. Unterschiedliche Belastungen, die auf den Fahrradrahmen wirken, ergänzen sich zum Lastfall. © Habilitationsschrift U. Cakmak



Bild 4. Messaufbau bei der Belastungsprüfung. © Habilitationsschrift U. Cakmak; Bearbeitung: Hanser

brechen. Der Lastfall setzt sich zusammen aus einem Tretmoment von 213 Nm, einer Sitzbelastung von 1250 N sowie vertikalen und horizontalen Belastungen von 300 N bzw. 205 N auf beiden Seiten des Dummy-Lenkens (Bild 3). Der Rahmen ist an zwei Positionen fixiert, zum einen an der hinteren Achse, zum anderen

wurde die Dummy-Gabel sowohl in vertikaler als auch in seitlicher Richtung befestigt, wodurch die Drehung sowie auch die axiale Verschiebung uneingeschränkt bleiben (Bild 4).

Für die FEA wurde die Software Marc eingesetzt [3]. Gerade wenn es um nicht-lineare Systeme geht, wie bei diesem

Fahrradrahmen, aber auch bei allen anderen Kunststoffprodukten, ist Marc die ideale Lösung. Um die Lücke zwischen Herstellprozess und Strukturmechanik zu schließen, kommt die multi-skalare Materialmodellierung inklusive Schnittstelle zur FEA mit Digimat zum Einsatz [3]. Mit dieser Material-Modellierungstechnologie kann das komplexe anisotrope Materialverhalten samt Versagen sowie Schädigung berechnet werden.

Damit Digimat das realitätsnahe Materialverhalten berechnen kann, reichen einfache, standardisierte Materialmessungen aus, um diese auf das komplexe Bauteil zu übertragen. Digimat und der FE-Solver kommunizieren miteinander und tauschen Daten sowohl zum Materialverhalten als auch zu Belastungssituationen miteinander aus. So ist es möglich, die prozessbedingten Eigenschaften, wie Faserorientierung, Bindenähte und Eigenspannungen, in der Berechnung zu berücksichtigen.

Um die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern, »

Die Wandstärke stets im Griff

Zumbach
SWISS PRIME MEASURING SINCE 1957

RAYEX S

- Einfache und schnelle Einrichtung für neue Produkte
- Präzise Vermessung von Exzentrizität und Durchmesser
- Hochwertige Röntgenquellen mit höchster Lebensdauer



Zumbach befindet sich seit 1957 in Familienbesitz und ist ein weltweit führendes Unternehmen in seiner Branche. Angetrieben von Innovation und Erfahrung, sind für Sie da und bereit, die Zukunft gemeinsam zu gestalten.

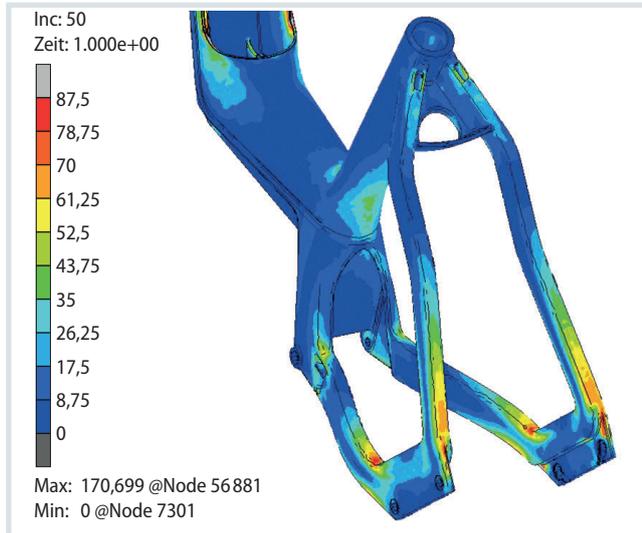


Bild 5. Die Spannungsverteilung mittels Mises-Vergleichsspannungen ist aufgrund der Anisotropie nur bedingt anwendbar. © SimpaTec

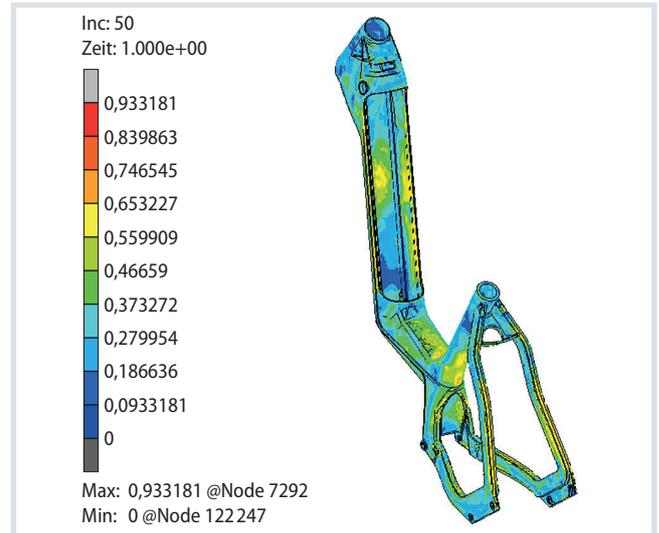


Bild 6. Der Auslastungsgrad der maximalen Steifigkeit offenbart die kritischen Bereiche. © SimpaTec

bietet Digimat weitere Ergebnisplots an. Damit kann das anisotrope Materialverhalten in Form von Indikationen und Auslastungsgraden dargestellt werden. Somit konnte die Simulation richtig vorhersagen, dass der Fahrradrahmen die Prüfung nach DIN EN 15194:2018–11 bestehen wird. Zusätzlich konnte auch das Bauteilverhalten in Bezug auf das komplexe Materialverhalten im Detail betrachtet werden.

Auslegungssache: belastbar, aber leicht

Die Betrachtung von Mises-Vergleichsspannungen (**Bild 5**) ist eine gängige Methode zur Beurteilung der Spannungsverteilung. Diese Methode ist aufgrund der Anisotropie jedoch nur bedingt anwendbar. In Bezug auf den Fahrradrahmen ist zu sehen, dass die Spannungen im nicht kritischen Bereich liegen. Vergleicht man dieses Ergebnis mit weiteren Ergebnisplots, die Digimat bietet, erhält man eine noch umfangreichere und bessere Beurteilung über den Fahrradrahmen und kann damit realitätsgetreuere Aussagen treffen.

Anhand des Auslastungsgrads der maximalen Steifigkeit (**Bild 6**) können die kritischen Bereiche schnell und einfach ersichtlich ermittelt werden. Bei einem Auslastungsgrad über 1 tritt ein Versagen auf. Alle Bereiche unter 1 weisen eine entsprechende Sicherheit auf.

Auch der Auslastungsgrad der Fasern in Bezug auf deren Orientierung stellt

eine wesentliche Hilfe dar, um besser einschätzen zu können, ob es in gewissen Bereichen notwendig ist, die Faserorientierung zu verbessern. Um den Einfluss der Bindenähte zu beurteilen, werden Knockdown-Faktoren in der Simulation berücksichtigt. Je nachdem, welche Eigenschaften die Bindenahat, verringert diese die lokal zulässige Belastung. Für die Fragestellung, wie sich der Belastungsfall auf die lokale Materialbeanspruchung auswirkt, hilft das Ergebnis der Triaxialität weiter, sodass direkt zwischen Zug-, Druck-, Scher- sowie biaxialen Belastungszuständen unterschieden werden kann. All diese Ergebnisse erleichtern es, das Bauteil so auszulegen, dass es den Belastungen standhält, aber dennoch so leicht wie möglich sein kann.

Positive Ökobilanz mit recycelten Carbonfasern

Die Materialsubstitution von Metallen durch Thermoplaste eröffnet auch neue Recyclingstrategien. Die beste Strategie besteht darin, rezyklierte Materialien für Strukturkomponenten statt für Nichtstrukturkomponenten oder andere Zwecke (thermisches Recycling, Deponie) einzusetzen. Für den Fahrradrahmen wurde ebenfalls eine Umweltbilanz (LCA) durchgeführt. Dabei wurde verglichen, inwieweit sich der Wechsel von Aluminium 6061 T6 zu einem mit rezyklierten Carbon-Kurzfasern verstärkten Polyamid auswirkt.

Die erstellte Bilanz basiert auf der CML-Methode, einem mehrdimensionalen Ansatz der Ökobilanzierung, der am Centrum voor Milieukunde in Leiden/Niederlande (CML) entwickelt wurde. Die Charakterisierung und Normalisierung der Wirkkategorien wurden mit der Software GaBits 10.6. am Energieinstitut der Johannes Kepler Universität Linz durchgeführt. Für den Vergleich wurde eine Funktionseinheit (vergleichende Menge, 36 Fahrradrahmen) definiert. Bewertet wurden die Rohstoffbeschaffung und die Produktion bis zum Transport (Cradle-to-gate-Systemgrenze). Voraussetzung dabei war, dass die Fahrradrahmen mit äquivalenten Struktureigenschaften aus beiden Materialien hergestellt werden können. Bei dieser Analyse ergab das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP, bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren), dass die CO₂-Äquivalente (pro Funktionseinheit) von Aluminiumrahmen 1604,64 kg CO₂-eq betragen und die von Polyamid 444,4 kg CO₂-eq. Dies bedeutet, dass mit dem Fahrradrahmen aus Polyamid mit recycelten Carbon-Kurzfasern eine CO₂-Reduktion von ungefähr 70% möglich ist.

Inzwischen hat sich dieses neuartige Fertigungsverfahren bewährt. Kunststoffrahmen, die in ihrer Steifigkeit und Masse mit Aluminiumrahmen vergleichbar sind, wurden strukturell so optimiert, dass sie massentauglich und gleichzeitig energieeffizient und nachhaltig hergestellt werden können. ■