

Strategische Planung des Entwicklungsrisikos gekoppelter CAE-Methoden

A. Albers, P. Haberkern, J. Holoch, A. Joerger, S. Knecht, R. Renz, S. Revfi, M. Schulz, M. Spadinger

INHALT Die steigende Komplexität von technischen Systemen ist bei der Entwicklung neuer Produkte eine große Herausforderung. Zur Unterstützung des Produktentwicklers bei der Bewältigung dieser Herausforderung werden computergestützte Methoden eingesetzt, um frühzeitig das Produktverhalten abschätzen zu können. Dabei ist der Einsatz von CAE-Methoden einzelner Domänen nicht ausreichend, um Wechselwirkungen zwischen bspw. der Elektrotechnik und dem Maschinenbau abzubilden. Daher bedarf es einer Kopplung von Simulationsmethoden, die die verschiedenen Domänen miteinander verknüpft. Mit dem dadurch bedingten erhöhten Modellierungsaufwand gehen jedoch Entwicklungsrisiken einher, die bewertet werden müssen. Mithilfe des vorgestellten Modellierungsansatzes wird diese Bewertung des Entwicklungsrisikos gekoppelter CAE-Methoden beherrschbar gemacht, wodurch eine strategische Planung der Entwicklungsaktivitäten ermöglicht wird.

1 Einleitung

Ingenieure sehen sich stets mit der Herausforderung konfrontiert, immer komplexere Produkte in sich verkürzenden Zeiträumen zu entwickeln. Dabei wird auf Basis eines dem Produktentwickler bekannten Referenzsystems, das beispielsweise unternehmensinterne Vorgängerprodukte oder Wettbewerberprodukte umfasst, vorgegangen. Durch eine systematische Kombination von aus dem Vorgängerprodukt übernommenen Teilsystemen sowie neu entwickelten Lösungen wird ein neues Produkt geschaffen [3]. Dieses Vorgehen kann mit dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung beschrieben werden [1]. Am Beispiel der Entwicklung eines Elektrofahrzeugs zeigt sich, dass sowohl Komponenten und Teilsysteme aus Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren als auch Teilsysteme, wie z. B. der Akku, aus einem Laptop genutzt werden.

Durch diese neue Zusammenstellung von beteiligten Teilsystemen ergeben sich sowohl angepasste als auch neue Wechselwirkungen, die im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden müssen. Um diese Wechselwirkungen bereits in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses berücksichtigen zu können, werden häufig CAE-Methoden, wie die Finite-Elemente-Methode

Strategic planning of the development risk of coupled CAE-methods

ABSTRACT The increasing complexity of technical systems is a major challenge in the development of new products. To support the product developer in addressing this challenge, simulation methods are used to estimate the product behavior at an early stage. However, the use of single CAE-methods is not sufficient to represent interactions between e.g. electrical and mechanical engineering. Therefore, a coupling of simulation methods is required, which links the different domains with each other. The increased modeling effort caused by the coupling is accompanied by development risks that have to be evaluated. With the help of the presented modeling approach, the evaluation of the development risk of coupled CAE-methods is made manageable, which enables a strategic planning of the development activities.

(FEM), die Mehrkörpersimulation (MKS) oder die Strömungssimulation, eingesetzt. Deren Ergebnisse werden im Expertenkreis diskutiert, mögliche Risiken bewertet und damit das weitere Entwicklungsvorgehen geplant. Der Einsatz von CAE-Methoden findet dabei jedoch oftmals isoliert voneinander (z. B. Strömungsbewertung unabhängig von der Strukturbewertung) Anwendung und wird gerade nicht, im Vergleich zum zuvor beschriebenen Entwicklungsvorgehen der PGE, systematisch kombiniert. Weitere Erkenntnisse über das Systemverhalten können jedoch aus der Kopplung unterschiedlicher Methoden gewonnen werden [2]. Dadurch kann bspw. bei der Entwicklung eines Elektrofahrzeugs die Abwärme des Akkus berechnet und in das Thermomanagement des Gesamtfahrzeugs integriert werden.

2 Kopplung von Simulationsmethoden

Es existieren diverse Forschungsarbeiten, welche eine Kopplung von Simulationsmethoden beinhalten. *Lange et al.* [7] zeigen, dass für eine Optimierung eines elektrischen Antriebsstrangs die Nutzung einer multiphysikalischen Simulation eine wichtige Rolle spielt. Um die Wechselwirkungen zwischen Strömungen, Wärmeübertragung und der strukturellen Deformation im Umfeld

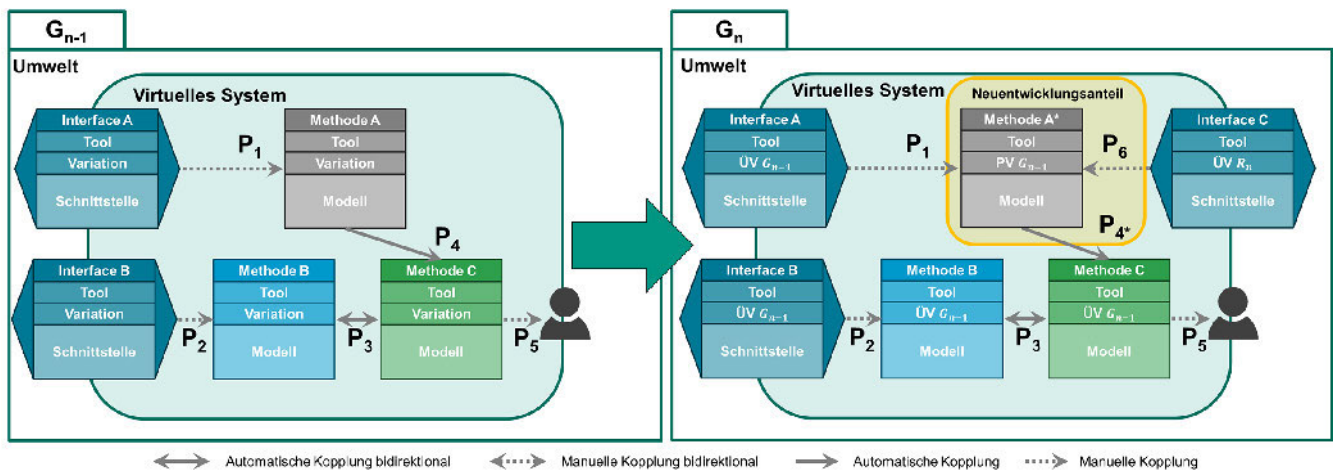


Bild 1. Links: Vorgängergeneration einer generischen Simulationsmethode (G_{n-1}). Rechts: Aktuelle Generation der Simulationsmethode (G_n). Grafik: IPEK / KIT

der Vorderkante eines Flugzeugflügels abzubilden, entwickelten Zhao et al. [10] eine gekoppelte Simulation. Kärger et al. [6] konnten eine effizientere und fertigungsprozessspezifische Auslegung eines Verbundwerkstoffs erreichen, indem unterschiedliche Simulationsmethoden zu einer CAE-Kette gekoppelt wurden.

In den aufgeführten Arbeiten wird gezeigt, dass durch die Kopplung mehrerer Simulationsmethoden ein Mehrwert gegenüber der separaten Betrachtung der physikalischen Phänomene erzeugt werden kann. Dieser Mehrwert besteht z. B. aus der Generierung von zusätzlichem Wissen über die vorliegenden Wechselwirkungen. Diese gekoppelten CAE-Methoden werden jedoch immer anwendungsfallspezifisch entwickelt und stellen somit Nischenlösungen dar, die nur mithilfe von Spezialwissen des Anwenders verwendet werden können.

Kaiser et al. [5] präsentieren ein methodisches Vorgehen zur Visualisierung von Kopplungen innerhalb eines komplexen Softwaresystems. Dabei wird auch ein Ansatz zur Risikoabschätzung von Änderungen innerhalb einer Software vorgeschlagen. Allerdings sind diese auf die Anwendung in der Softwareentwicklung spezialisiert und eignen sich nicht zur Übertragung auf gekoppelte Simulationsmethoden.

Einen systemunabhängigen Ansatz zur Kopplung von CAE-Methoden und Werkzeuge entwickelten Albers et al. [2]. Das sogenannte Kopplungsmodell bietet eine Möglichkeit zur Beschreibung der Kopplung beliebiger CAE-Methoden, wie FEM oder MKS. Mit dem Schwerpunkt auf kommerziellen Methoden stellt der Ansatz eine Unterstützung des Produktentwicklers im Produktentwicklungsprozess dar. Durch einen einheitlichen Beschreibungsformalismus erleichtert das Kopplungsmodell zusätzlich die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Fachexperten.

Simulationsmodelle werden in Produktentwicklungsprozessen oftmals von neuem erstellt, ohne Vorgängermodelle in Betracht zu ziehen. Dies ist zeit- und kostenintensiv, da Arbeitsabläufe, Datenformate und Schnittstellen neu definiert werden. Das Ziel dieses Beitrags ist es daher, den vorgestellten Kopplungsansatz um die aus der konstruktiven Entwicklungspraxis beobachteten Elemente (im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung beschriebenen) der systematischen und strategischen Kombination von aus Vorgängerprodukten übernommenen und neu entwickelten Teilsystemlösungen zu erweitern. Dadurch wird es mög-

lich, effizient neue Generationen von Simulationsmodellen zu planen sowie eine Abschätzung des zugrunde liegenden Entwicklungsrisikos vorzunehmen.

3 Ansatz zur strategischen Planung des Entwicklungsrisikos gekoppelter Simulationsmethoden

Die in durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsprojekten gesammelten Erfahrungen zeigen, dass großes Potenzial darin besteht, CAE-Methoden zu Teilen aus vorangegangenen Generationen zu übernehmen, systematisch mit neu entwickelten Methoden zu kombinieren und damit komplexe Problemstellungen zu untersuchen. Die Anpassungen und Neuentwicklungen in Bezug auf die Simulationsmethoden und deren Kopplungen stellen jedoch ein Entwicklungsrisiko dar, da sie je nach Komplexität der Kopplung weitreichende Änderungen der bereits bestehenden Modelle nach sich ziehen.

Im Rahmen der Modellbildung werden Annahmen zu den Funktionen und Schnittstellen der beteiligten Methoden getroffen. Im Laufe des Aufbaus und der Anwendung gekoppelter Simulationsmethoden kann sich jedoch herausstellen, dass eine Methode nicht wie geplant integriert werden kann, mehr Zeitaufwand für die Integration notwendig ist oder erforderliche Daten zu spät geliefert werden. Die Summe der Störgrößen, die möglicherweise zu einem erhöhten Aufwand führen, wird im vorliegenden Beitrag als Entwicklungsrisiko bezeichnet. Die Herausforderung besteht darin, die notwendigen Änderungen und das daraus resultierende Risiko im Vorhinein abschätzen zu können und es dadurch beherrschbar zu machen.

Bild 1 zeigt eine generische Darstellung einer gekoppelten Simulationsmethode mit dem Kopplungsmodell unter Berücksichtigung der Grundsätze des Modells der PGE [2]. Dies kann beispielsweise eine Finite-Elemente-Festigkeitsberechnung gekoppelt mit einer Strukturoptimierung im Entwicklungsprozess sein. Dabei werden bspw. die Randbedingungen und die Eingangsgrößen aus einer Simulation der vorherigen Generation übernommen. Dies ist in Bild 1 als Übernahmevariation (ÜV) gekennzeichnet. Eine andere Art der Variation ist z. B. die Änderung des Materialmodells von einem isotropen Eisenwerkstoff zu einem anisotropen, faserverstärkten Kunststoff. Dies

wird als Ausprägungsvariation (AV) bezeichnet. Ändert sich beispielsweise die Berechnungs- oder Optimierungsmethode von Parameter- zu Topologieoptimierung entspricht dies einer Prinzipvariation (PV). Die drei Variationsarten (ÜV, AV und PV) werden dabei gemäß der PGE als Variationsoperatoren bezeichnet. Der Detaillierungsgrad der berücksichtigten Methoden und Kopplungen wird durch analysierendes und synthetisierendes Vorgehen des Produktentwicklers anhand des Reifegrads festgelegt (siehe hierzu auch [2]).

3.1 Risikoabschätzung

Mithilfe der Variationsoperatoren kann eine Generation der Simulationsmethode hinsichtlich ihres Entwicklungsrisikos bewertet werden. Das Risiko bezieht sich hierbei auf Unsicherheiten, die durch fehlendes Wissen entstehen, und unvorhersehbare Ereignisse, wie z. B. auf einen erhöhten Zeitbedarf zur Implementierung der neuen Simulationsmethode. Eine Erweiterung einer Methode durch eine Übernahme bestehender Methoden aus der Vorgängergeneration (ÜV) ist in der Regel mit einem geringen Risiko behaftet, da diese bereits validiert wurden. Enthält die neue Generation der Simulationsmethode einen signifikanten Anteil an Ausprägungs- und Prinzipvariationen (AV und PV), so ist von einem höheren Risiko auszugehen (vgl. [4]), da bspw. Datenformate angepasst werden müssen.

In der in Bild 1 vorgestellten, generischen Simulationsmethode wurde im Vergleich zur Vorgängergeneration die Methode A verändert und Interface C hinzugefügt. Die weiteren fünf Methoden wurden übernommen. Zwei der sechs Kopplungen mussten aufgrund der Neuentwicklung von Methode A* angepasst werden. Parametersatz P_6 wurde ergänzt und Parametersatz $P4^*$ hat einen neuen Output. Somit lässt sich der erste Beitrag zum Entwicklungsrisiko gekoppelter Simulationsmethoden durch folgenden Quotienten berechnen:

$$R_1 = \frac{\text{Anzahl angepasster Kopplungen}}{\text{Anzahl aller Kopplungen}} = \frac{n^*}{n_{\text{alle}}} = \frac{2}{6} = 33\% \quad (1)$$

Der zweite Beitrag zum Risiko, welcher sich aus dem Anteil variierteter Methoden errechnet, lässt sich durch folgende Gleichung berechnen:

$$R_2 = \frac{n_{\text{PV+AV}}}{n_{\text{PV+AV+ÜV}}} = \frac{1}{6} = 16\% \quad (2)$$

Mithilfe dieser Berechnungsvorschriften kann das Risiko, wie in **Bild 2** dargestellt, quantifiziert werden. Die Bewertung muss anschließend durch den Produktentwickler erfolgen. Für das in Bild 1 gezeigte Beispiel liegt das Risiko im grünen Bereich und die Änderungen in der Simulationsmethode können somit als risikoarm eingestuft werden.

Der Vorteil der präsentierten Risikobewertung ergibt sich dadurch, dass bei der Entwicklung einer neuen Produktgeneration die Simulationsmethoden aus der Vorgängergeneration wiederverwendet werden können. Etwaige Änderungen an den Simulationsmethoden können bewertet und klassifiziert werden. Auf Basis dieser Bewertung und Klassifikation können konkrete Maßnahmen, wie z. B. die Anpassung der Projekt- und Zeitplanung abgeleitet werden.

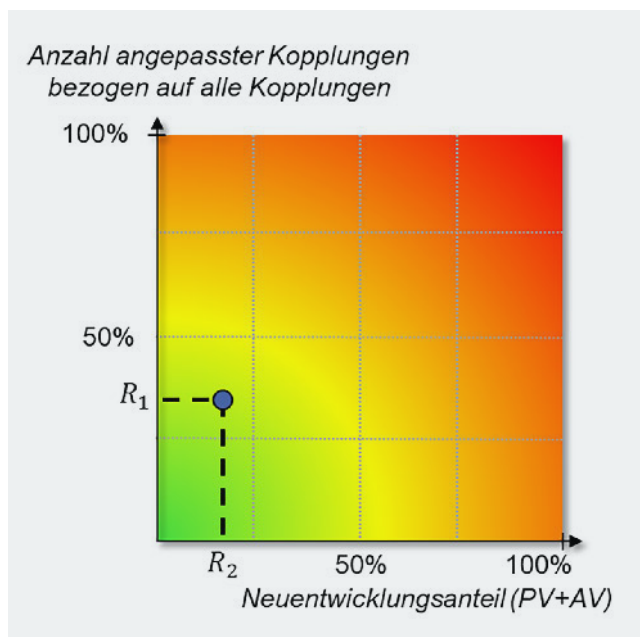


Bild 2. Risikobewertung der in Bild 1 vorgestellten generischen Simulationsmethode der aktuellen Generation. Grafik: IPEK / KIT

4 Beispiel zur strategischen Planung von Entwicklungsaktivitäten über mehrere Produktgenerationen sowie der damit einhergehenden Bewertung des Entwicklungsrisikos

Im Folgenden wird der Mehrwert des erweiterten Kopplungsmodells zur Planung, Steuerung und Risikoabschätzung am Beispiel eines Forschungsvorhabens aufgezeigt. Ausgangspunkt ist die Optimierung eines versickten Faserverbundbauteils mithilfe gekoppelter CAE-Methoden für die spätere Anwendung in der industriellen Produktentwicklung. Mithilfe des vorgestellten Kopplungsansatzes wurde strategisch ein weiteres Forschungsvorhaben abgeleitet, das den Grundgedanken der Kopplung von Herstellungssimulation und Strukturoptimierung auf in additiven Fertigungsverfahren hergestellte Strukturen überträgt. Die Vorgehensweise mit dem vorgestellten Kopplungsansatz wird nachfolgend erläutert.

4.1 Ausgangssituation

Das Kopplungsmodell in **Bild 3** zeigt eine Methode zur Sickenoptimierung von dünnwandigen Strukturen aus langfaserverstärkten Faserverbundkunststoffen (FVK), welche durch das Formpressen von Sheet Moulding Compound (SMC) hergestellt werden. Diese Optimierung ist notwendig, da die Konstruktion mittels konventioneller Designmethoden die materialspezifischen Eigenschaften wie z. B. Faserorientierung und die sich daraus einstellende Anisotropie nicht berücksichtigen. Diese materialspezifischen Eigenschaften resultieren aus dem Fertigungsprozess, bei dem die Faserorientierung maßgeblich durch das Fließen des Halbzeugs beeinflusst wird. Folglich besteht eine direkte Wechselwirkung zwischen Materialeigenschaften und Bauteilgeometrie. Dies sorgt für Probleme in frühen Phasen der Produktentwicklung in denen die Presswerkzeuge ausgelegt werden müssen, dem Produktentwickler jedoch Erfahrungswerte fehlen. Dadurch können Designs nur durch aufwendige und kosten-

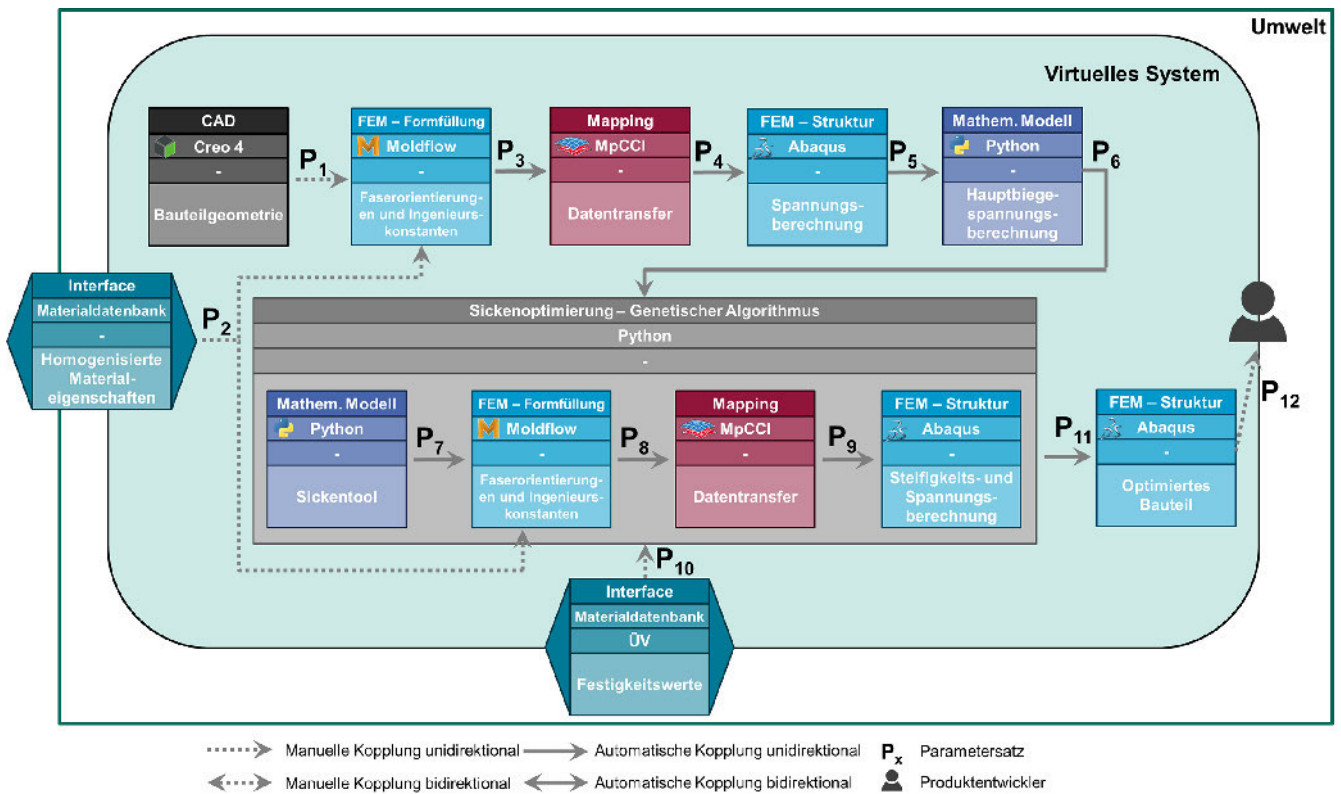


Bild 3. Kopplungsmodell einer FVK-Sickenoptimierung in Anlehnung an [9]. Grafik: IPEK / KIT

intensive Nachbearbeitung der Presswerkzeuge optimiert werden. Eine Möglichkeit zur Reduzierung dieser Nachbearbeitung bietet die frühzeitige Einbindung von Simulationen in den Produktentwicklungsprozess. Im Falle der Sickenoptimierung wurden hierzu, wie in Bild 3 zu sehen, Fertigungssimulationen in einem iterativen Prozess mit Struktursimulationen gekoppelt. Die Methoden und deren Kopplungen werden im Folgenden beschrieben.

Aufbauend auf einer Geometriebeschreibung im CAD-Programm wird eine Formfüllsimulation zur Berechnung der Faserorientierung sowie der Ingenieurkonstanten E-Modul, Schubmodul und Querkontraktionszahl durchgeführt. Hierzu werden auch homogenisierte Materialeigenschaften aus experimentellen Versuchen übergeben. Anschließend erfolgt die Übertragung der Ergebnisse (Faserorientierung und Ingenieurkonstanten) mithilfe eines Mapping-Algorithmus in eine Struktursimulation zur Berechnung der Spannungsverteilung. Daraus werden die Hauptbiegespannungen und -spannungsrichtungen berechnet, entlang derer die Sickenquerschnitte vom Optimierungsalgorithmus iterativ erzeugt werden. Dabei werden pro Iteration geometrische Sickenparameter verändert. Zur Berechnung der Steifigkeit wird für jede Variation der Sickenparameter eine Formfüllsimulation samt Mapping durchgeführt. Dieses Kopplungsverfahren zeigt großes Potenzial bei der Unterstützung des Produktentwicklers in der Gestaltung von versickten FVK-Bauteilen [8].

4.2 Strategische Planung von Entwicklungsaktivitäten und deren Risiko mithilfe des neu entwickelten Ansatzes

Ein weiteres Fertigungsverfahren, welches prozessabhängige, anisotrope Materialeigenschaften hervorruft, stellt das Selektive

Laserschmelzen (SLM) dar. Das SLM ist ein additives Fertigungsverfahren, mit dem sich komplexe Geometrien fertigen lassen. Beim SLM entstehen die anisotropen Materialeigenschaften allerdings aufgrund von variabel einstellbaren Fertigungsparametern wie beispielsweise Druckrichtung und -strategie.

Zur Untersuchung der Auswirkung des SLM auf das steifigkeitsoptimierte Bauteildesign wurde auf der Managementebene entschieden, die Optimierungsmethode für die faserverstärkten Sicken systematisch zu variieren. Diese Entscheidung wurde getroffen, da in beiden Problemstellungen die Anisotropie die zentrale Einflussgröße darstellt. Basierend auf der in Bild 3 vorgestellten Simulationsmethode wird deshalb eine neue Methode zur Berechnung und Topologieoptimierung von SLM-gefertigten Bauteilen abgeleitet.

Aufgrund der Abhängigkeit der Materialeigenschaften von Fertigungsparametern ähnlich zu der vorgestellten Sickenoptimierung, wurde diese durch gezielte Variationen zu einer Topologieoptimierung weiterentwickelt. Diese Topologieoptimierung stellt nun die nächste Generation der Simulationsmethode dar (Bild 4).

Wie bereits in der Sickenoptimierung ist auch bei der Topologieoptimierung der Startpunkt eine Geometriebeschreibung im CAD-Programm. Sowohl die Methode als auch der Output sind daher unverändert, was einer ÜV entspricht. Anschließend werden die Materialeigenschaften auf Basis einer Materialdatenbank bereitgestellt. Da es sich allerdings um andere Materialdaten handelt, lässt sich dies durch eine AV beschreiben. Während bei der Sickenoptimierung die Faserorientierung mittels einer Formfüllsimulation berechnet wird, wird die Aufbaurichtung in der Topologieoptimierung mittels mathematischen Geometrieoperationen

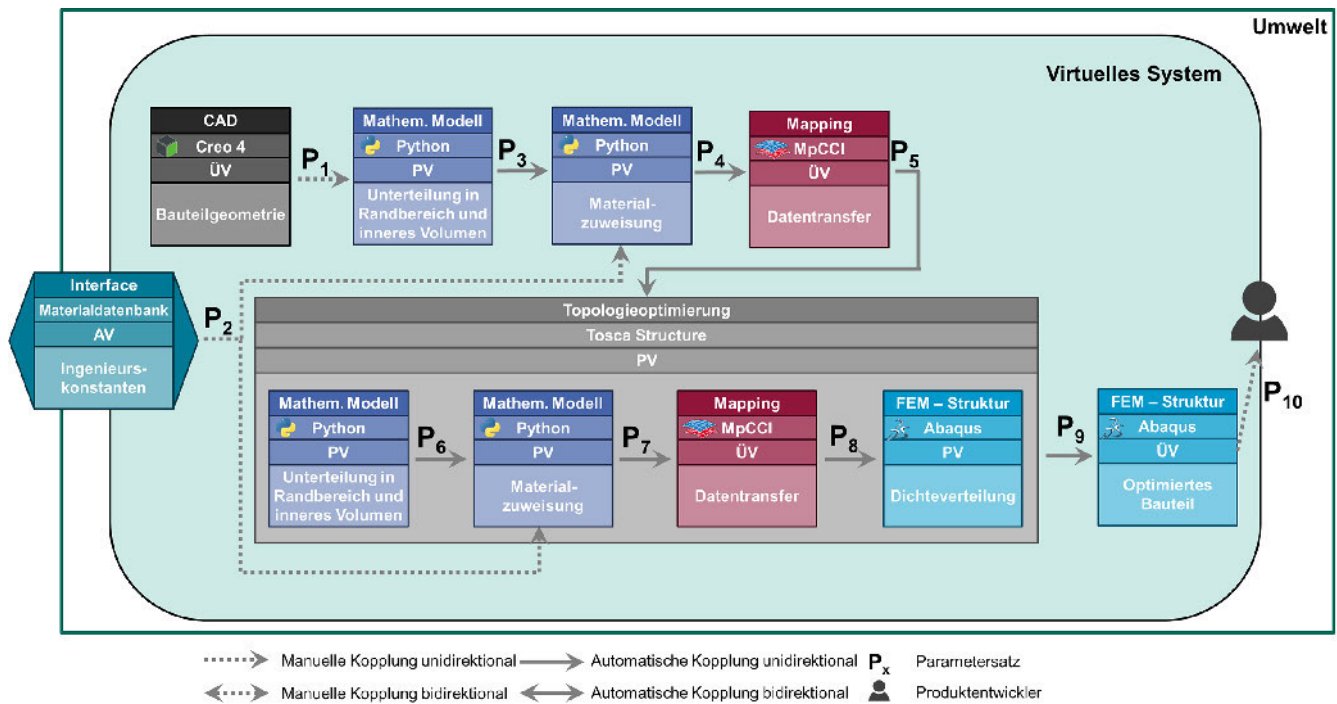


Bild 4. Kopplungsmodell einer SLM-basierten Topologieoptimierung. Grafik: IPEK / KIT

berücksichtigt. Daher entspricht diese Änderung einer PV. Die anschließende Übertragung der Materialdaten durch das Mapping kann mit gleichen Input- und Outputdaten durchgeführt werden, wodurch es sich um eine ÜV handelt. Die größte Änderung erfolgt durch die Variation der Sickenoptimierung hin zur Topologieoptimierung. Dadurch wird neben anderen Input- und Outputdaten ein grundlegend anderer Optimierungsalgorithmus benötigt, weshalb dies durch eine PV beschrieben wird. Das Optimierungsergebnis steht in digitaler Form dem Produktentwickler zur Verfügung und ist somit als ÜV gekennzeichnet.

4.3 Risikobewertung der SLM-basierten Topologieoptimierungsmethode

Auf Basis dieser methodengestützten Vorgehensweise lässt sich für diese neue Simulationsmethode ein Entwicklungsrisiko bestimmen. Im vorliegenden Beispielfall der SLM-basierten Topologieoptimierung werden sieben der insgesamt elf gekoppelten Methoden angepasst, was einem Neuentwicklungsanteil von ca. 64 % entspricht. Um dies umzusetzen wurden sechs der zehn Kopplungen angepasst (= 60 %), womit sich ein hohes Risiko ergibt (siehe Bild 5). Im hier vorliegenden Fall handelt es sich um ein Forschungsvorhaben, weshalb das hohe Risiko gerechtfertigt ist, da diese ein gewisses Risiko sowie einen ausreichenden Neuheitsgrad benötigen. Für industrielle Projekte, bei denen die Entwicklungsaktivitäten identisch methodisch gesteuert werden können, wäre ein geringeres Entwicklungsrisiko erstrebenswert.

5 Fazit, Diskussion und Ausblick

Durch die Anwendung der Variationsoperatoren der PGE auf gekoppelte Simulationsmethoden kann das Entwicklungsrisiko quantifiziert und Maßnahmen zur Reduktion abgeleitet werden.

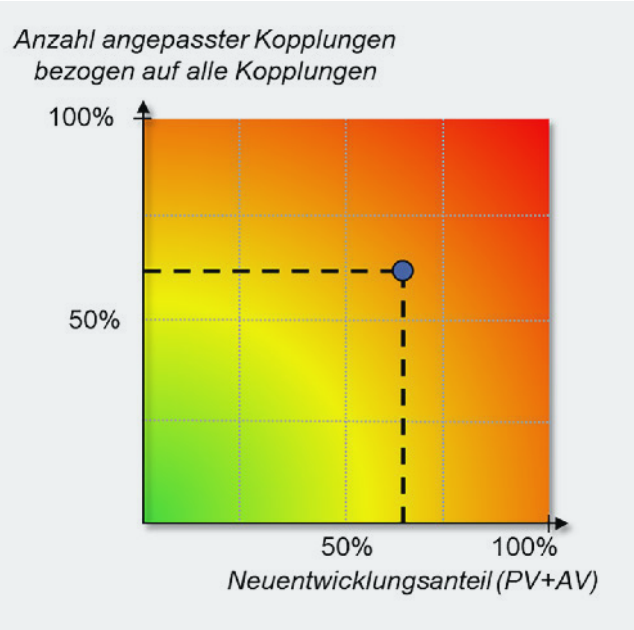


Bild 5. Risikobewertung der SLM-basierten Topologieoptimierungsmethode. Grafik: IPEK / KIT

Dies ermöglicht eine aktive Steuerung der Entwicklungsaktivitäten. Die Möglichkeit, komplexe Simulationsumfänge grafisch zu beschreiben und aufzuzeigen, welche Methoden neu entwickelt wurden, hilft bei deren Verständnis.

Der entwickelte Modellierungsansatz für die Kopplung von Simulationsmethoden zur strategischen Planung des Entwicklungsrisikos wird seit vier Jahren erfolgreich am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) für die Planung von Forschungsvorhaben und die Mittel-

akquise eingesetzt. Weiterhin wird so eine strategische Planung der Forschungsthemen möglich, die sich durch mehrere langjährige Forschungsprojekte inkl. Folgeprojekten erfolgreich ausgezeichnet. Darüber hinaus wird die Methode zur Abschätzung von Projektanfragen aus Unternehmen eingesetzt. Auf Basis der Risikobewertung – und damit der Komplexität der Anfrage – werden die entstehenden Kosten abgeschätzt.

Ziel künftiger Arbeiten ist es, weitere Simulationsmethoden auf Basis von bestehenden zu entwickeln, um neue Produktfunktionen computergestützt im Entwicklungsprozess einzubinden. Somit können neue Anwendungsfälle erschlossen und untersucht werden. ■

Literatur

- [1] Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015.
- [2] Albers, A.; Reichert, S.; Serf, M.; Thorén, S.; Bursac, N.: Kopplung von CAE-Methoden zur Unterstützung des Produktentwicklers. In: Konstruktion (9/2017), S. 76–82.
- [3] Albers, A.; Rapp, S.; Spadinger, M.; Richter, T.; Birk, C.; Marthaler, F. et al.: The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. In: Proc. Int. Conf. Eng. Des. 1 (2019) 1, S. 1693–1702.
- [4] Gladysz, B.; Waldeier, L.; Jahn, H.; Albers, A.: Priorisierung von Funktionsumfängen zur Risikobeurteilung. In: ZWF 113 (2018) 1–2, S. 42–45. DOI: 10.3139/104.111827.
- [5] Kaiser, A.; Usmanov, G.; Kölle, H.: Visuelle Darstellung der Kopplung zwischen Software-Komponenten in komplexen Systemen. In: Fakultät Informatik Hochschule Furtwangen (Hg.): informatikJournal. Furtwangen, (2013), S. 131–146.
- [6] Kärger, L.; Bernath, A.; Fritz, F.; Galkin, S.; Magagnato, D.; Oeckerath, A. et al.: Development and validation of a CAE chain for unidirectional fibre reinforced composite components. In: Composite Structures 132 (2015), S. 350–358. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.05.047.
- [7] Lange, E.; van der Giet, M.; Herold, T.; Hameyer, K.: Multi-physical simulation of drive trains. In: 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). Brasov, Romania, 20.05.2010 – 22.05.2010: IEEE, S. 10–18.
- [8] Revfi, S.; Mikus, M.; Behdinin, K.; Albers, A.: Bead optimization in long fiber reinforced polymer structures: Consideration of anisotropic material properties resulting from the manufacturing process. In: Advances in Engineering Software 149 (2020), S. 102891. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2020.102891.
- [9] Revfi, S.; Fünkner, M.; Albers, A.; Behdinin, K.: Prozessbasierte Sickenoptimierung langfaserverstärkter Kunststoffbauteile. In: NAFEMS Online-Magazin (2021), [accepted].
- [10] Zhao, X.; Sun, Z.; Tang, L.; Zheng, G.: Coupled Flow-Thermal-Structural Analysis of Hypersonic Aerodynamically Heated Cylindrical Leading Edge. In: Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 5 (2011) 2, S. 170–179. DOI: 10.1080/19942060.2011.11015361.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. **Albert Albers**
 Institutsleitung

Foto: Autor

Patrick Haberkern, M. Sc.
 wissenschaftlicher Mitarbeiter

Jan Holoch, M. Sc.
 wissenschaftlicher Mitarbeiter

Arn Joerger, M. Sc.
 wissenschaftlicher Mitarbeiter

Simon Knecht, M. Sc.
 wissenschaftlicher Mitarbeiter

Robert Renz, M. Sc.
 wissenschaftlicher Mitarbeiter

Sven Revfi, M. Sc.
 wissenschaftlicher Mitarbeiter

Micha Schulz, M. Sc.
 wissenschaftlicher Mitarbeiter

Dipl.-Ing. **Markus Spadinger**
 Oberingenieur

alle:
 IPEK – Institut für Produktentwicklung
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Campus Süd
 Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe
 Tel.: 0721 / 608-4 23 71
 sekretariat@ipek.kit.edu
 www.ipek.kit.edu