Institut für Technische Produktentwicklung

Design for X

Beiträge zum 26. DfX-Symposium Oktober 2015

Dieter Krause
Kristin Paetzold
Sandro Wartzack
(Hrsg.)

The Design Society is a charitable body,
registered in Scotland, number SC 031694

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://www.dnb.de/kataloge abrufbar.

Impressum

TuTech Verlag
TuTech Innovation GmbH
Harburger Schloßstr. 6-12
21079 Hamburg
Tel.: +49 40 76629-0
E-Mail: verlag@tutech.de
www.tutechverlag.de

Nachdruck, Vervielfältigung, Speicherung oder Übertragung in elektronische, optische, chemische oder mechanische Datenhaltungs- oder -verwertungssysteme sind -auch auszugsweise- ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung von TuTech Innovation GmbH verboten.

Die Verwertung von Informationen aus *Design for X | Beiträge zum 26. DfX-Symposium* zum Zweck der gewerblichen Informationsvermittlung ist nicht zulässig.

Alle Rechte vorbehalten.
© TuTech Innovation GmbH, Hamburg, 2015

ISBN 978-3-941492-93-6

Validierung von prozessgerecht strukturoptimierten Bauteilentwürfen mittels integrierter FEM-Realgeometrieanalyse

Stefan Hautsch[1], Sebastian Katona[2], Tobias Sprügel[3], Michael Koch[2], Frank Rieg[1], Sandro Wartzack[3]
[1]*Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD;*
Universität Bayreuth
[2]*3D-Visualisierungszentrum;*
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
[3]*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;*
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Abstract: Structural optimization as a tool of the virtual product development process (PDP) provides broad possibilities to scoop lightweight design and improvement potentialities when developing new products. To promote the further dissemination of structural optimization, the focus of the developments lies on a process-ready structural optimization, which does not only aim at design, safeguarding and later alteration through process restrictions , but at a straightforward generation of process- and production-ready parts by using computer-aided optimization tools. This efficient approach in product development helps to reduce iterations in the PDP, but also brings along the need for a validation of the newly created procedure, because manufacturing processes like forming often cause deviations in the physical part which were not regarded in the dimensioning of the desired part. Hence the established simulation of the desired component design (based on 3D CAD data) should be supplemented with a simulation of the physical part's geometry (based on the 3D scan of a prototype). The overvalue of the current development is a efficiency increase of the product development process through reduction of unneccessary iteration loops and effective generation of process-, production- and utilization-ready part designs with the aid of structural optimization tools and a knowledge database, illustrated exemplarily by the forming process. The finite element (FE) analysis of the desired geometry is joined by

a validation of the adapted product development process by geometry analysis and FE-simulation of the physical geometry provided by a 3D scanner. Consequently, the deviations made by the manufacturing process can be analyzed for their relevance to the part's performance and the design can be safeguarded.

Keywords: validation, finite element analysis, structural optimization, 3D scan

1 Motivation

Die Strukturoptimierung als Werkzeug des virtuellen Produktentwicklungsprozesses (PEP) bietet umfassende Möglichkeiten, Leichtbau- und Verbesserungspotentiale bei der Entwicklung von neuen Produkten auszuschöpfen. Um die weitere Verbreitung der Strukturoptimierung zu fördern, liegt der Fokus der Entwicklungen auf einer prozessgerechten Strukturoptimierung, welche nicht wie bisher Konstruktion, Absicherung und nachträgliche Anpassung aufgrund von Fertigungsprozessrestriktionen umfasst, sondern eine direkte Generierung eines fertigungs- und prozessgerechten Bauteils mittels computergestützter Optimierungswerkzeuge zum Ziel hat. Dieses effiziente Vorgehen bei der Produktentwicklung reduziert die Iterationsschleifen im PEP, schafft aber den Bedarf nach einer Validierung der neu geschaffenen Methode, da bei den Fertigungsverfahren, z. B. Umformen, häufig Abweichungen im Realbauteil entstehen, welche bei der vorherigen Auslegung des Soll-Bauteils keine Berücksichtigung finden. Daher soll neben der bewährten Simulation des Ideal-Bauteils (auf Basis der 3D-CAD-Daten) auch eine Simulation der Realbauteilgeometrie (auf Basis des 3D-Scans eines Musterbauteils) erfolgen.

2 Methode einer FEM-Realgeometrieanalyse von strukturoptimierten Bauteilentwürfen

Die Validierung von prozessgerecht stukturoptimierten Bauteilentwürfen ruht auf drei Säulen (vgl. Abb. 1). Zuerst wird ausgehend von einer vorgegebenen Geometrie (je nach Fertigungsverfahren ein Bauraum oder ein erster Designentwurf des Konstrukteurs) und den vorherrschenden Lasten und Randbedingungen eine Geometrieoptimierung auf FEM-Basis durchgeführt und anschließend das optimale Bauteil neu konstruiert. Die dazu verwendeten Optimierungsverfahren sind abhängig vom Fertigungsverfahren und können auf Basis einer Wissensdatenbank ausgewählt und konfiguriert werden. Darauf folgt eine strukturmechanische FE-Analyse zur Absicherung des Soll-Bauteils. Anschließend wird ein gefertigtes Musterbauteil mit Hilfe eines 3D-Scanners digitalisiert und mittels integrierter FEM einer Realgeometrieanalyse unterzogen. Diese lässt durch einen Vergleich mit der Geometrie und den Ergebnissen der FE-Analyse des Soll-Bauteils Rückschlüsse darauf zu, ob die

Fertigungsabweichungen negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften oder die Betriebsfestigkeit des Bauteils haben.

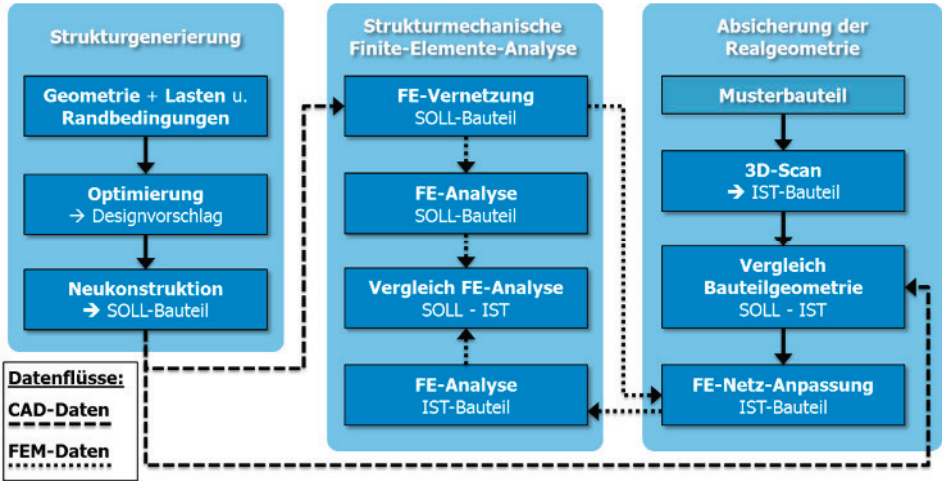

Abb. 1: Ablaufschema der Produktsimulation und –validierung

Im Rahmen dieser Veröffentlichung soll exemplarisch das Umformen als Fertigungsverfahren Anwendung finden. Dies beeinflusst die Wahl der Optimierungsart und der anfänglichen Konstruktion sowie die Art der Modellbildung in der Finiten-Elemente-Methode.

2.1 Strukturgenerierung unter Prozessrestriktionen

Die Strukturoptimierung bietet grundsätzlich drei Verfahren an: eine Dimensionierung z. B. der Blechstärke oder Wanddicke, eine Formoptimierung der Außenkonturen oder eine Topologieoptimierung zur Findung der optimalen Materialverteilung in einem gegebenen Designraum. Ein Sonderverfahren der Formoptimierung wäre die Sickenoptimierung zur Steifigkeitserhöhung von Blechbauteilen. Für Produkte, welche durch Umformen hergestellt werden, soll eine Dimensionierung der Materialstärke und – sofern nötig – eine Formoptimierung zur Reduktion der Spannungsspitzen stattfinden. Die Anwendung einer Sickenoptimierung wird im vorliegenden Fall nicht betrachtet, ebenso ist eine Topologieoptimierung zur Generierung von Blechbauteilen laut [1] als nicht zielführend einzustufen.

Nach einem ersten Bauteilentwurf durch den Produktentwickler, welcher dabei durch ein Wissensframework selektiv mit Prozesswissen (z. B. zur Aus-

gestaltung von Werkzeugrundungen) unterstützt wird, kommen die genannten Optimierungsschritte zum Zug, um danach mit der Prüfung auf Fertigbarkeit, z. B. durch einen One-Step-Solver, abgerundet zu werden. Hierbei werden dem Entwickler sofort kritische Bereiche angezeigt und dieser kann sein Bauteil entsprechend anpassen, um ein fertigungs- und prozessgerechtes Design zu erhalten. Im Verlauf des Projekts soll eine weitere Analysemöglichkeit geschaffen werden – der Patch-Analyzer. Dieser soll durch eine Betrachtung von Abwicklungslänge und –gradient Aussagen über die Faltenbildung zulassen und damit Prozessprobleme aufzeigen. Das neu geschaffene Verfahren steigert die Effizienz der Produktentwicklung durch die Vermeidung von Iterationsschleifen und den Einsatz einer Wissensdatenbank, wie in Abbildung 2 ersichtlich ist.

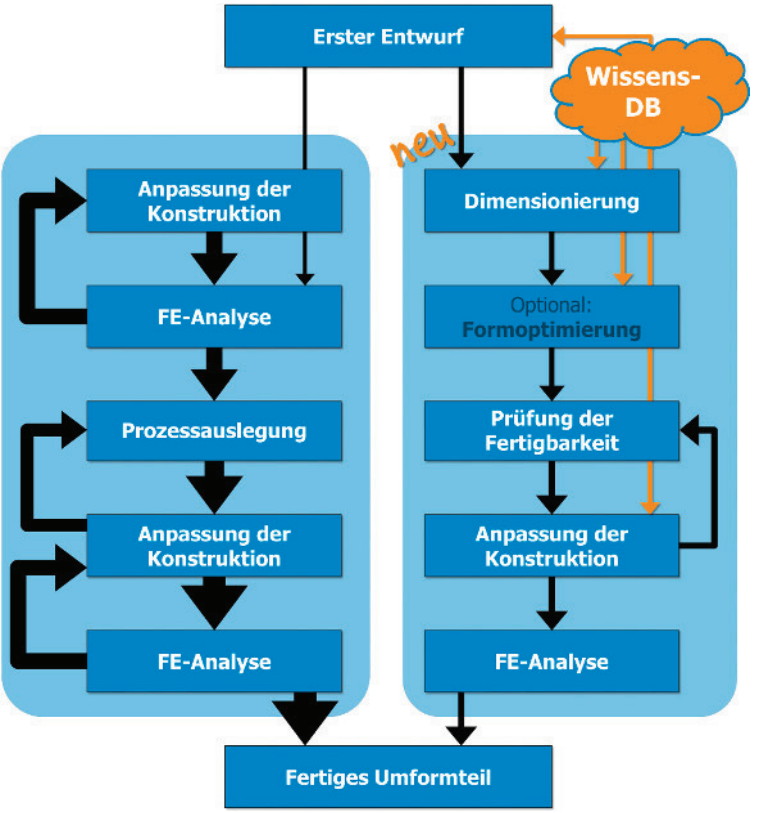

Abb. 2: Vergleich des Entwicklungsprozesses vor (links) und nach der Effizienzsteigerung durch den Einsatz von Strukturoptimierung und Wissensdatenbank (rechts)

Eine Implementierung von Prozessrestriktionen in die Optimierungsalgorithmen ist nicht praktikabel, da die Eigenschaften des Prozesses sehr stark von der Bauteil- sowie Werkzeuggeometrie, den verwendeten Maschinen und dadurch möglichen Kräften abhängen. Zudem besteht eine Abhängigkeit von Material und tribologischen Verhältnissen sowie von den zu verwendenden Strukturoptimierungsarten Dimensionierung und Formoptimierung, welche die Bauteilgeometrie nicht derart stark beeinflussen können, dass aus jedem beliebigen Entwurf eine prozessgerechte Gestalt erzeugt würde. Aus diesem Grund wird die Wissensdatenbank, welche Unterstützung bei der Anwendung der Simulationswerkzeuge bietet, um Wissensbausteine zum Prozess „Umformen" ergänzt. Diese Wissensbausteine – z. B. Ausgestaltung von Rundungen oder Hilfe bei der Materialauswahl – kann der Konstrukteur bei der Generierung des ersten Bauteilentwurfs situationsgerecht abrufen und berücksichtigen. Ebenso ist eine Ergänzung der Wissensdatenbank von Benutzerseite aus möglich, um das darin vorhandene Wissen der Simulations- und Prozessspezialisten um z. B. bekannte Problemstellungen oder Lösungsansätze zu erweitern.

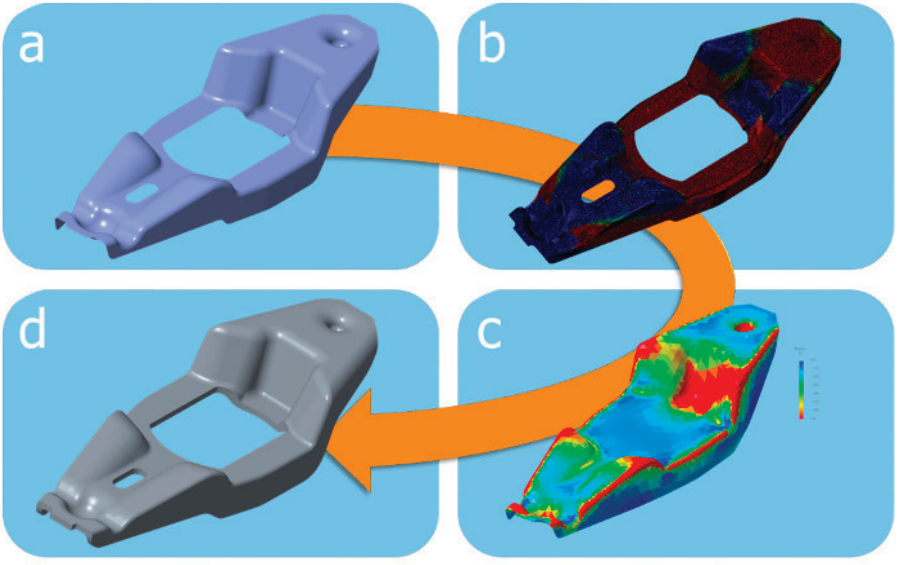

Abb. 3: Schritte bei der Strukturgenerierung: a) erster Designentwurf, b) Dimensionierung, c) OneStep-Fertigbarkeitsbewertung, d) optimales Bauteil

Wurde der erste Bauteilentwurf des Konstrukteurs mit Hilfe der Optimierungswerkzeuge und dem Einsatz des Wissensframeworks zu einem optima-

len Designvorschlag entwickelt (vgl. Abbildung 3), folgt nach einer parametrischen Neu- oder Anpassungskonstruktion des Soll-Umformteils eine strukturmechanische Simulation dieses Idealmodells.

2.2 Strukturmechanische FE-Simulation am Idealmodell

Das neu konstruierte CAD-Modell dient als Ausgangspunkt für eine FE-Analyse zur Absicherung der geforderten Produkteigenschaften. Im Rahmen des Forschungsverbundes FORPRO² wird ein FEA-Assistenzsystem entwickelt, welches sowohl beim Aufbau als auch bei der Durchführung und Interpretation / Bewertung von strukturmechanischen FE Simulationen unterstützt. Hierbei teilt sich das Assistenzsystem in die Bereiche Synthese und Analyse auf, im Rahmen dieser Veröffentlichung soll der Analyseteil mit den Werkzeugen Plausibilitätsprüfung, wissensbasiertem Fehlerassistent und Ergebnisvisualisierung/Designbewertung näher beleuchtet werden. Alle Werkzeuge greifen hierbei auf eine zentrale Wissensbasis zu, in der u. a. Regeln hinterlegt sind.

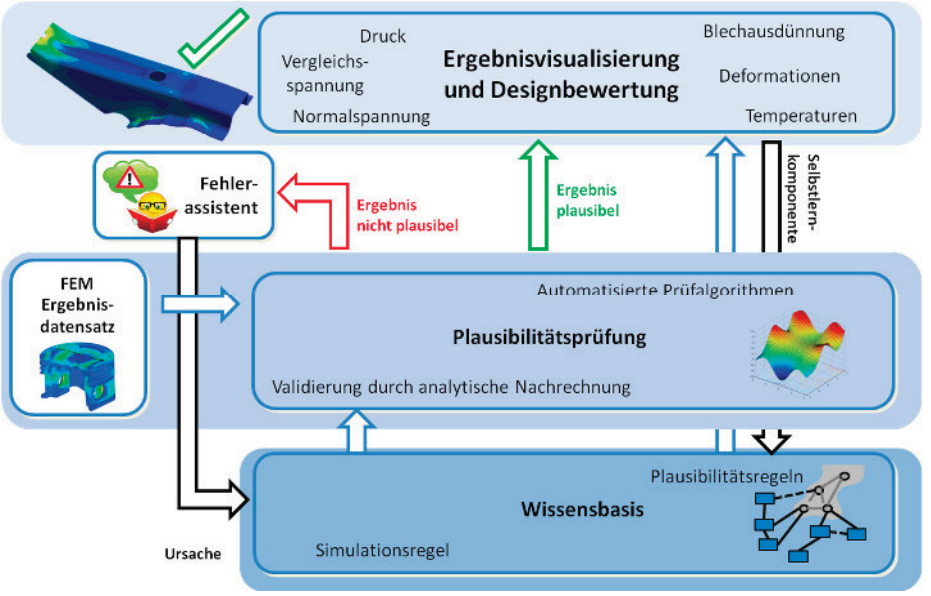

Abb. 4: Analyseteil des FEA-Assistenzsystems

Durch den Fokus des Forschungsverbunds, weniger erfahrene Simulationsanwender bei der Durchführung von numerischen Simulationen zu unterstützen, wird der Ergebnisdatensatz der FE-Simulation, wie in Abbildung 4 zu erkennen, einer Plausibilitätsprüfung unterzogen um eventuell auftretende

Fehler bei der Simulationserstellung frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Als Abgleich der Simulationsergebnisse bietet sich neben mathematischen Regressionsmodellen [2] (Response Surface Methodology, Künstliche Neuronale Netze) der Abgleich mit analytischen Gleichungen an. Biegelinien nach [3] können bei den zu betrachtenden Bauteilen (z. B. Halterung eines PKW Ausrücklagers) nicht ohne weiteres zur Anwendung gebracht werden und werden daher durch ein gemitteltes Flächenträgheitsmoment für das zu betrachtende Bauteil ergänzt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 5 für ein Blechbauteil dargestellt. Aus der vorliegenden CAD-Geometrie werden Flächenträgheitsmomente an 200 äquidistanten Querschnitten ausgelesen und in ein gemitteltes Flächenträgheitsmoment überführt, welches insbesondere Querschnitte mit niedrigem Flächenträgheitsmoment stärker gewichtet als Querschnitte mit einem sehr großen Trägheitsmoment. Dies ist notwendig um das Verhalten des betrachteten Bauteils korrekt abzubilden und über Biegelinien-gleichungen eine Aussage über die zu erwartende Durchbiegung des Bauteils unter Last zu erhalten. Die so ermittelte Durchbiegung kann anschließend für einen Abgleich mit dem numerischen Ergebnis im Rahmen der erwähnten Plausibilitätsprüfung herangezogen werden. Als plausibel wird nach [4] ein Ergebnis bewertet wenn es wahrscheinlich zutreffend ist.

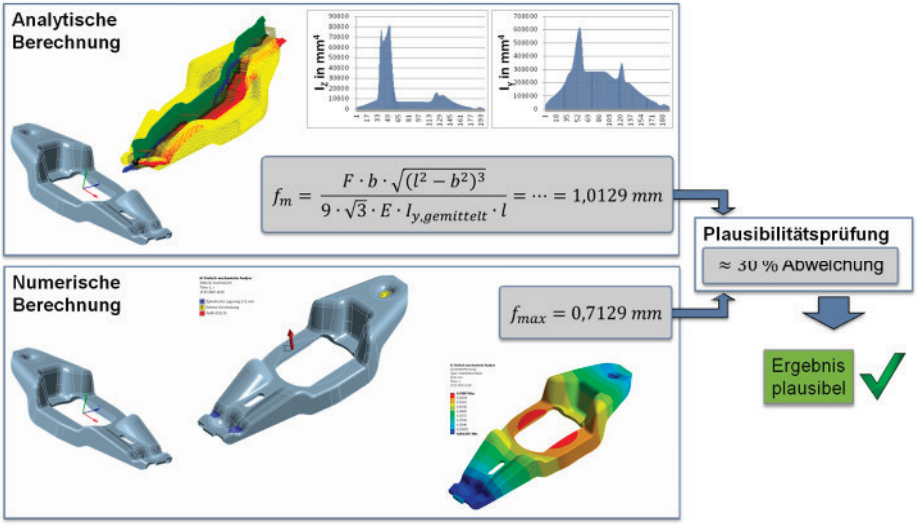

Abb. 5: Plausibilitätsprüfung mittels gemittelten Flächenträgheitsmomenten

Sollte ein Ergebnis als nicht plausibel eingestuft werden, wird automatisiert ein wissensbasierter Fehlerassistent aktiviert, welcher bei der Suche nach möglichen Fehlern in der vorliegenden FE-Berechnung sucht und diese

weitestgehend selbstständig behebt. Im Anschluss an die erneute Berechnung wird wiederum die Plausibilitätsprüfung ausgeführt und die ermittelte Fehlerursache an die zentrale Wissensbasis übertragen. Hierdurch wird es dem System ermöglicht, Fehler die von bestimmten Nutzern gemacht werden, schneller zu erkennen und entsprechende Lösungen vorzuhalten.

Eine plausible FE-Simulation wird dem Werkzeug der Designbewertung übergeben. So kann im nächsten Schritt eine Überprüfung erfolgen, ob aufgrund von Fertigungsabweichungen eine Berücksichtigung der realen Geometrie in der vorliegenden FE-Simulation notwendig ist. Zur Absicherung mittels Realgeometrievergleich, werden die Knoten-Koordinaten des erzeugten FE-Netzes weitergegeben.

2.3 Absicherung der Simulationsergebnisse anhand eines Realgeometrievergleichs

Für den Vergleich des virtuellen mit dem realen Bauteil wird die Oberfläche eines Musterbauteils mittels hochauflösender optischer Scannersysteme in Form einer Punktwolke oder eines Polygonnetzes erfasst. Die verwendete FARO Laser-Line-Probe ist auf einem Platinum Arm zum mechanischen Tracking montiert und digitalisiert die Punkte der Bauteiloberfläche mit einer volumetrischen Genauigkeit von +/- 0,043 mm. Nach einer geeigneten Registrierung, also der Ausrichtung der CAD- und Scan-Datensätze zueinander (z. B. mittels Best-fit-Algorithmus [5]) erfolgt ein Soll-Ist-Vergleich zur Identifikation real vorhandener Abweichungen am Bauteil. Die Abweichungen können dem Produktenwickler in Form einer Falschfarbendarstellung visualisiert werden, um ihn dadurch bei der Entscheidung über kritische Bereiche zu unterstützen. Zudem steht dem Produktentwickler eine Wissensbasis zur Verfügung, mit welcher die vorliegenden geometrischen Abweichungen bewertet werden können, ob diese eine kritische Lage und/oder Größe aufweisen. Dabei werden bspw. der Kraftfluss auf Basis einer FE-Rechnung mit Auswertung der Hauptspannungen zwischen Krafteinleitung und Einspannung ermittelt und berücksichtigt, sowie mögliche Simulations- und Versuchsergebnisse von Vorgängerversionen oder bauähnlichen Komponenten bereitgestellt.

Entscheidet sich der Produktentwickler bspw. auf Basis der Abweichungen des Ist-Bauteils, des Kraftflusses und/oder kritischer Vorgängervarianten dazu eine Simulation mit Realgeometrie durchzuführen, erfolgt die Anpassung des FE-Netzes an die aufgenommenen Scan-Daten. Basis der FE-Netzadaption sind zum einen der digitalisierte Prototyp (in Form einer Punktwolke oder eines Polygonnetzes) und zum anderen die Daten des Preprocessings der ursprünglichen FE-Berechnung, also die Vernetzung des CAD-Modells. Ausge-

hend von den Oberflächenknoten des Initialnetzes werden die numerischen Abweichungen hin zum Scan-Modell ermittelt. Hierzu wird ein Vektor orthogonal zur Oberfläche erzeugt. Liegen die Scan-Daten als Polygonmodell vor, ergibt sich der neue Netzpunkt an der Stelle, an der dieser Vektor durch eine Dreiecksfläche stößt. Bei einer Punktwolke wird um den Vektor mit einem vordefinierten Radius nach Scan-Punkten gesucht und der Mittelwert der Abstände der gefundenen Punkte auf dem Vektor gibt in diesem Fall die neuen Koordinaten (siehe Abbildung 6) [6].

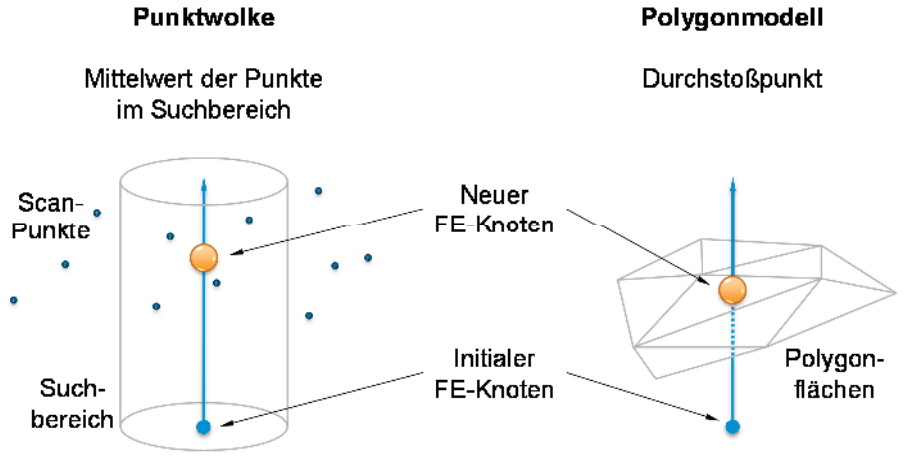

Abb. 6: Ermittlung der Abweichungen am einzelnen Knoten

Um zu verhindern, dass nach der Adaption der Oberflächenknoten die Elementqualität zu stark beeinträchtig wird oder gar Topologiefehler auftreten, erfolgt ein Vorlastschritt zur eigentlichen, neuen FE-Simulation. Bei diesem Vorlastschritt werden die ermittelten Abweichungen als Verschiebung aufgebracht (siehe Abbildung 7) [7].

Das Ergebnisnetz aus diesem Vorgang beinhaltet die Abweichungen und wird wiederum als Ausgangsnetz für die eigentliche FEA mit Realgeometrie herangezogen. Dafür werden die Daten des Vorlastschrittes und der initialen FE-Berechnung kombiniert. Es ergibt also eine Eingabedatei für eine FE-Simulation, welche ein angepasstes Netz an die Realgeometrie, aber gleichzeitig auch die ursprünglich definierten Randbedingen (z.B. Materialdefinition, Lager und Kräfte) enthält.

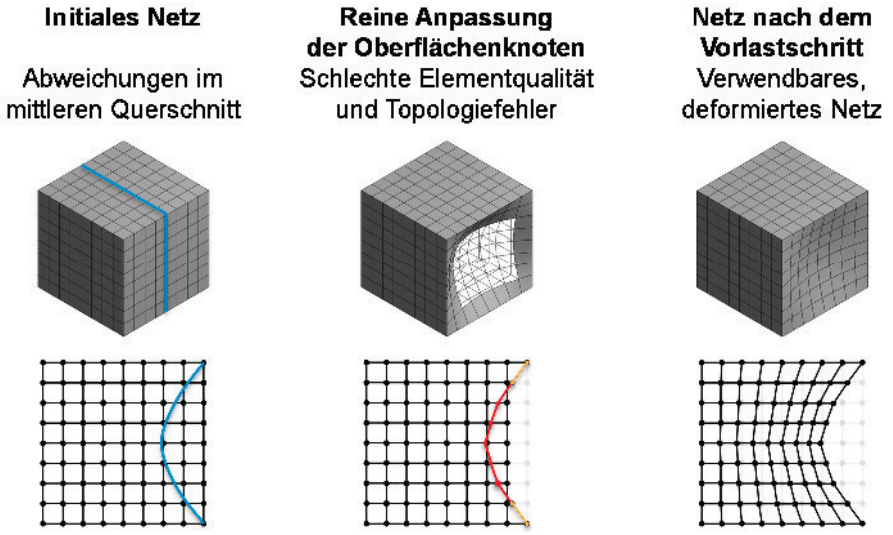

Abb. 7: Vorlastschritt zur Erzeugung des deformierten FE-Netzes

Nach diesem Prozess der FE-Netzadaption – Verschiebung der Oberflächenknoten, Ausführen des Vorlastschrittes, Aufbau der neuen Berechnungsdatei – erfolgt die FE-Simulation mit Realgeometrie.

3 Umsetzung anhand eines Demonstratorbauteils

Das beschriebene Vorgehen in der Produktentwicklung wird anhand des Ausrückhebels einer PKW-Kupplung nachvollzogen, um den neu entworfenen Prozess an einer realen Geometrie zu validieren (vgl. Abbildung 8).

Zu Beginn wird ein erster Bauteilentwurf durch Dimensionierung und ggf. Formoptimierung sowie anschließender Fertigbarkeitsbewertung zu einem optimalen Design hin entwickelt. Das daraus resultierende Idealmodell wird durch eine strukturmechanische FE-Analyse simuliert und nach einer Musterfertigung mit Hilfe eines 3D-Scanners digitalisiert. Somit entsteht ein 3D-Istbauteil, welches sowohl mit dem 3D-Idealmodell verglichen wird als auch zur Anpassung des FE-Netzes des Idealbauteils dient. Das angepasste FE-Netz wird anschließend zu einer erneuten strukturmechanischen FE-Analyse verwendet und deren Ergebnisse mit der ersten Analyse verglichen. So können Einflüsse der Fertigungsabweichungen auf Produkteigenschaften und Produktlebensdauer quantifiziert und mögliche Fehlerquellen vor einer Serienfertigung durch Anpassung von Prozess oder Produkt vermieden werden.

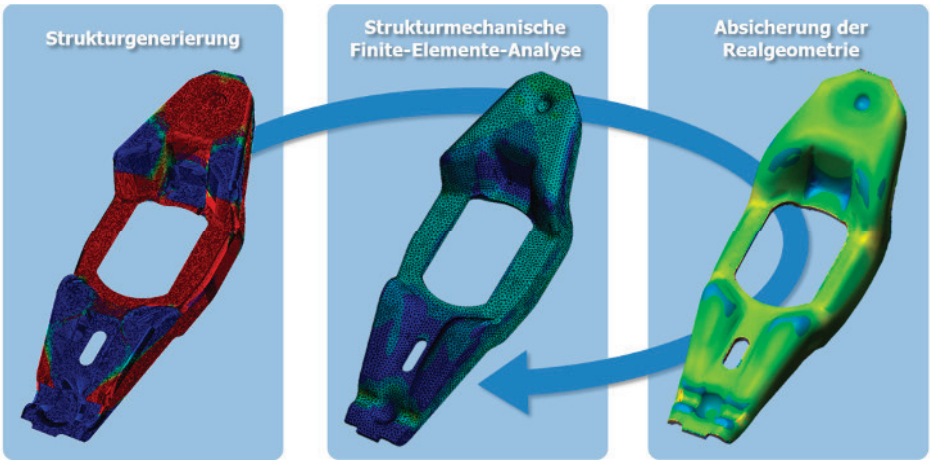

Abb. 8: Umsetzung anhand eines Kupplungs-Ausrückhebels

4 Zusammenfassung

Der Mehrwert der vorliegenden Entwicklung ist eine Effizienzsteigerung des Produktentwicklungsprozesses, exemplarisch dargestellt am Umformprozess, durch Reduktion von Iterationsschleifen und effektive Generierung von prozess- und fertigungs- und gebrauchsoptimalen Designs mit Hilfe von Strukturoptimierungswerkzeugen und einer Wissensdatenbank. Zur FE-Analyse der Idealgeometrie kommt eine Validierung des angepassten Produktentwicklungsprozesses durch die Geometrieanalyse und FE-Simulation der Realgeometrie, welche mit Hilfe eines 3D-Scanners erzeugt wird. Somit können bei der Fertigung entstandene Abweichungen auf ihre Relevanz für das Bauteilverhalten untersucht und die Konstruktion abgesichert werden.

Danksagung

Wir danken der Bayerischen Forschungsstiftung für die Förderung unserer Forschung im Rahmen des Forschungsverbunds „FORPRO² – Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation".

Bayerische Forschungsstiftung

Literatur

[1] Hautsch, S.; Frisch, M.; Alber-Laukant, B.; Rieg, F.: „Prozessgerechte Strukturoptimierung von Tiefziehbauteilen". In: Fraunhofer IAO Stuttgart (Hrsg.): Tagungsband zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015, 2015

[2] Spruegel, T. C.; Hallmann, M.; Wartzack, S.: "A concept for FE-plausibility checks in structural mechanics": Proceedings of the NAFEMS World Congress 2015, 21. - 24. June 2015, San Diego, USA, NWC2015.

[3] Grote, K.-H. ; Feldhusen, J.: "Dubbel". Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[4] Spruegel, T. C.; Wartzack, S.: "Concept and application of automatic part-recognition with Artificial Neural Networks": Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design 2015 (ICED15), 27. – 30. July 2015, Milan, Italy, 2015.

[5] Chen, L. M.: "Digital Functions and Data Reconstruction – Digital Discrete Methods", Springer, New York, Heidelberg, 2012.

[6] Katona, S., Kestel, P., Koch, M., Wartzack, S.: „Vom Ideal- zum Realmodell: Bauteile mit Fertigungsabweichungen durch automatische FE-Netzadaption simulieren". In: Stelzer, R. (Hrsg.): „Entwerfen Entwickeln Erleben – Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik", TUDpress, Dresden, 2014.

[7] Katona, S., Sprügel, T. C., Koch, M., Wartzack, S.: „Adapting FE-Meshes to Real, 3D Surface Detected Geometry Data to Improve FE-Simulation Results". In: NAFEMS Ltd. (Ed.): "NAFEMS World Congress – A world of engineering simulation – Summary of Proceedings", San Diego, 2015.