

Bewertung von Methoden zur Herstellbarkeitsabsicherung von Serienfahrzeugen

Miriam Hesse¹, Christian Weber² und Holger Diestelkamp¹

¹ *BMW Group*

² *Fachgebiet Konstruktionstechnik, Technische Universität Ilmenau*

Validation of manufacturability is an important task during automobile development in order to reduce the risk of expensive rework and disturbances in the subsequent serial production processes. Due to the advancements in visualization, simulation and Rapid Prototyping technology, the field of application of Virtual and Rapid Prototyping techniques for validation has expanded and many different validation methods have been developed and applied. These methods use virtual and/or physical models to represent product/process properties related to manufacturability. This paper introduces a procedure to assess quality of validation methods by analyzing manufacturability problems detected by these methods and in (pre-)series production processes.

1 Einleitung

Die Absicherung als Teil des Produktentwicklungsprozesses liefert einerseits eine Aussage über den Entwicklungsstand eines Produktes, andererseits dienen die gewonnenen Erkenntnisse als Basis für weitere Entwicklungsschritte. Speziell bei der Entwicklung von komplexen Produkten wie Kraftfahrzeugen ist die Sicherstellung von Produktfunktionen und -eigenschaften unverzichtbar. In der automobilen Serienentwicklung spielt zudem die Absicherung der Herstellbarkeit eine wichtige Rolle, da hier meist große Stückzahlen in einem komplexen Produktionssystem gefertigt werden. Störungen und Verzögerungen im Produktionsanlauf sind kostenintensiv, weshalb die Herstellbarkeit

aufwändig abgesichert wird. Auch soll so das Risiko späterer Produkt-, Prozess- oder Werkzeugänderungen verringert und eine steile Produktionshochlaufkurve ohne teure Nacharbeitslösungen ermöglicht werden. Da der Fertigungsprozess – besonders bei komplexen Produkten – stark durch die Produktgestaltung beeinflusst wird, ist dieser bereits während der Produktentwicklung zu berücksichtigen (s. unter anderem die Ansätze des Design for Manufacturing [1], Design for Assembly [2]) und abzusichern.

Durch die Entwicklung der Darstellungs- und Simulationsmöglichkeiten der virtuellen Welt werden die Einsatzmöglichkeiten und die Qualität der Virtual Engineering-Methoden in den Unternehmen immer weiter verbessert. Eine in der Automobilindustrie verbreitete Vorgehensweise zur Prüfung der Herstellbarkeit, der Prototypen-Fahrzeugaufbau, wird zunehmend durch den Einsatz von Virtual und Rapid Prototyping-Methoden ergänzt oder abgelöst. Mithilfe dieser Technologien sind Unternehmen in der Lage, kostengünstiger und schneller als bisher Produkt- und Prozess-Modelle für Absicherungszwecke zu erstellen [3]. Die Literatur beschäftigt sich umfassend mit diesem Wandel und diskutiert den Einsatz dieser alternativen Prototypen. Dieser Beitrag stellt nun ein Vorgehen vor, die Aussagequalität von Absicherungsmethoden in Bezug auf Herstellbarkeit einzuschätzen, um Hinweise auf eine effiziente Anwendung der Methoden geben zu können.

2 Herstellbarkeitsabsicherung

Ziel einer (Herstellbarkeits-) Absicherungsmaßnahme ist die Bestätigung der Umsetzbarkeit einer Konstruktion bzw. der Identifikation von Problemen hinsichtlich effizienter Herstellbarkeit. Ein Problem kann als Abweichung zwischen dem Ist- und einem Sollzustand definiert werden [4]. In diesem Beitrag soll ein Problem im Kontext der automobilen Serienfertigung als Folge einer Unstimmigkeit zwischen Produkt und Produktionssystem verstanden werden, die den Soll-Zustand, also die störungsfreie Fertigung eines fehlerlosen Produktes, verhindert oder erschwert.

Die Absicherung der Herstellbarkeit eines Produktes umfasst zahlreiche Methoden, die auf verschiedenen Technologien basieren und unterschiedliche Umfänge bzw. Objekte (z.B. das gesamte Produkt, einzelne Module oder Bauteile oder den Prozess) bewerten. Das Absicherungsobjekt wird bei Durchführung der Absicherungsmaßnahme durch ein virtuelles oder physisches Modell dargestellt, anhand dessen verschiedene Produkt- und/oder Prozesseigenschaften abgesichert werden. So werden unter anderem die Zugänglichkeit von Montagepositionen durch den Produktionsmitarbeiter, die Fehlerfreiheit der Montagereihenfolge und die Fehlhandlungssicherheit geprüft. Abbildung 1

zeigt eine schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Modell des Absicherungsobjektes und den dadurch dargestellten Eigenschaften. Durch die Bestimmung der Design-Parameter des Absicherungsmodells werden indirekt auch dessen Eigenschaften definiert.

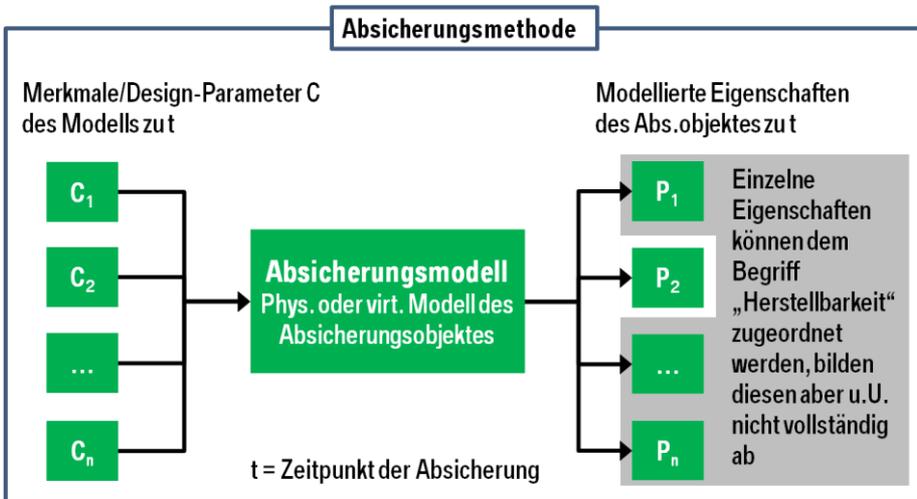


Abbildung 1: Das Modell des Absicherungsobjektes ist Träger von Eigenschaften, die bewertet werden können (eigene Darstellung in Anlehnung an [5])

Eine Auswahl an Eigenschaften des Produktes/Prozesses, die unter dem Begriff „Herstellbarkeit“ zusammengefasst werden können, ist:

- Geometrische Stimmigkeit: Geometrische Unstimmigkeiten im Produkt können dessen Herstellbarkeit in Frage stellen. In diese Kategorie fallen unter anderem Bauteilkollisionen oder -fehlstellungen in Konstruktionslage.
- Montagereihenfolge: Bei der Bewertung der Montagereihenfolge sind sowohl Produkt als auch der Montageprozess Absicherungsobjekt.
- Verbaubarkeit: Diese Eigenschaft beschreibt sowohl die kollisionsfreie Montage der Bauteile als auch das problemlose Einbringen von Werkzeugen und Hilfsmitteln. Außerdem werden Fragestellungen wie z.B. die Bewertung von Fügekräften betrachtet.

-
- Fehlhandlungssicherheit: Eine weitere Eigenschaft bei der Bewertung der Herstellbarkeit ist die Einschätzung der Fehlhandlungssicherheit. Dabei ist die Zusatzinformation des Produktions-/Montageumfelds unverzichtbar. Dies gilt vor allem in Fertigungssituationen, in denen verschiedene Varianten auf einer Produktionslinie/an einem Bandabschnitt montiert werden. Es muss sichergestellt sein, dass der Montagemitarbeiter
 - die richtigen Bauteile (eventuell sind verschiedene Varianten eines Bauteils zum Verbau bereitgestellt)
 - in der vorgegebenen Reihenfolge, Position und Lage
 - mit den richtigen Werkzeugen

verbauen kann und dabei das Risiko einer Fehlhandlung bzw. Verwechslung möglichst gering ist.

- Ergonomie: Bei der Bewertung der Ergonomie während der Montage ist die Verbausituation zu analysieren (Körperhaltung des Montagemitarbeiters etc.). Auch die zu verbauenden Teile sind zu betrachten (Scharfkantigkeit, Gewicht etc.).
- Erscheinungsbild und Anmutung: (Optische) Unstimmigkeiten, die zwar nicht die Herstellbarkeit des Produktes beeinflussen, aber den Kundennutzen senken und auf die Abstimmung zwischen Produkt und Produktionsprozess zurückzuführen sind, werden dieser Kategorie zugeordnet.

Für die Herstellbarkeitsabsicherung sind Modelle zu wählen, die die abzusi- chernden Eigenschaften möglichst gut darstellen.

2.1 Klassifizierung von Methoden der Herstellbarkeitsabsicherung

In der Automobilindustrie werden verschiedene Methoden zu Herstellbarkeitsabsicherung eingesetzt. Diese können unter anderem nach Modell des Absicherungsobjektes unterschieden werden, welches physisch oder virtuell vorliegen kann und – so gut es zum jeweiligen Zeitpunkt möglich ist – möglichst alle Eigenschaften des Serienfahrzeugs zum Produktionsstart widerspiegeln soll. Einige Absicherungsmethoden bedienen sich auch einer Kombination von physischen und virtuellen Modellen.

Eine weitere Unterscheidung der Absicherungsmethoden kann über den Kreis der durchführenden Personen und die Absicherungsziele getroffen wer-

den: Für die Bewertung mancher Fragestellungen ist (Erfahrungs-) Wissen aus unterschiedlichen Bereichen des Unternehmens notwendig. Die Bewertung des Absicherungsobjektes wird hier nicht durch einen Einzelnen, sondern durch eine Gruppe von Experten durchgeführt. Die Absicherungsziele der einzelnen Methoden sind vielfältig und lassen sich einerseits durch den geforderten Detaillierungsgrad (Anzahl der betrachteten Produkt-/Prozesseigenschaften) und andererseits durch die Art der zu bewertenden Eigenschaften beschreiben.

Im Folgenden sollen einigen Methoden mit virtuellen und physischen Modellen von Absicherungsobjekten vorgestellt werden.

2.2 Absicherungsmethoden mit virtuellen Modellen

Zu den Absicherungsmethoden mit virtuellen Modellen werden alle Methoden gezählt, deren Absicherungsobjekt während der Bewertung nicht durch ein Modell in physischer Form repräsentiert ist. Diese Methoden werden in der Literatur auch unter dem Begriff Virtual Prototyping diskutiert [6]. Dazu zählen demnach sowohl die Bewertung der CAD¹-Daten des Produktes als auch die Bewertung von immersiven Visualisierungen des Produktes.

Tabelle 1: Beispiele von Absicherungsmethoden

Absicherungsmethode	Durchführende Personen	Absicherungsziele und Nebenziele
Bewertung des CAD-Modells	Einzelperson	Sicherstellung d. Tauglichkeit Konzeptes; Prüfung der Geometrie (in der Regel in Einbaulage)
Engineering Design Review	Gruppe	Konzeptüberprüfung, Projektsynchronisation/Abstimmthemen
Montagesimulation	Einzelperson	u.a. Sicherstellung Ergonomie, Reihenfolge, Austattung, Zugänglichkeit, Einbaupfadberechnung
Toleranzanalyse	Einzelperson	Berechnung von Toleranzketten
FEM-Simulation	Einzelperson	Berechnung von Kräften, Verformungen, Spannungen

¹ Computer-aided Design (CAD).

Tabelle 1 zeigt Beispiele verschiedener Typen von Absicherungsmethoden. Die erste Methode ist die Bewertung des CAD-Modells, im Wesentlichen also der Soll-Geometrie des Produktes (in Einbaulage). Geometrische Unstimmigkeiten können so detektiert werden. Sind weitere Parameter wie Werkstoffdaten bekannt, so kann der Bewertende u.U. aufgrund seiner Erfahrung auch weitere Aussagen, z.B. über das Verformungsverhalten bei Krafteinwirkung treffen.

Engineering Design Review ist eine Methode, die die Kommunikation zwischen den verschiedenen Anspruchsgruppen und Schnittstellenpartnern fördert. Durch die Bewertung in einer Gruppe von Experten aus verschiedenen Bereichen ist nicht nur eine umfassende Sicht auf das Absicherungsobjekt und damit die ausgewogene Beurteilung mehrerer verschiedener Eigenschaften möglich, es bietet sich auch die Möglichkeit des Austauschs und der Synchronisation von Information zwischen den Beteiligten [7].

Eine Ergänzung der Bewertung des CAD-Modells bieten Simulationen von Material- bzw. Bauteileigenschaften und des Prozesses. Hierzu zählen unter anderem Montagesimulationen, Einbaupfadberechnungen und FEM-Simulationen (Finite Elemente Methode).

2.3 Absicherungsmethoden mit physischen Modellen

Der Bau physischer Prototypen ist nach wie vor eine wichtige Quelle von Erkenntnissen. Die Übereinstimmung der dabei dargestellten Produkt- und Prozesseigenschaften mit den Eigenschaften des Serienfahrzeugbaus kann sehr hoch sein. Daher wird in diesem Beitrag der Fahrzeugbau mit seriennahen Bauteilen u. Prozessen als Vergleich herangezogen; andere Absicherungsmethoden werden im Folgenden als „alternativ“ bezeichnet. Zu den alternativen Absicherungsmethoden zählen hier neben den Methoden mit virtuellen Objekten auch die Aufbauten von physischen Prototypen mit Ersatzmaterialien und/oder mit Prozessen, die nicht denen der Serie entsprechen.

Durch die Entwicklung der werkzeuglosen Fertigungsverfahren ist es möglich, verschiedene Werkstoffe in wenigen Stunden und ohne die Notwendigkeit eines kostspieligen, spezifischen Werkzeugs zu fertigen. Diese Verfahren können nach Art der Formgebung unterschieden werden [6]: Materialabtrag, Materialauftrag (Rapid Prototyping) und hybride Verfahren. Da die Werkstoffe der so erzeugten Bauteile in der Regel nicht den Serienmaterialien entsprechen, sind bei ihrem Einsatz für die Absicherung gewisse Einschränkungen zu

beachten. Beispielsweise entsprechen Verformungs- und Oberflächeneigenschaften unter Umständen nicht den Eigenschaften des Serienproduktes.

3 Bewertung von Absicherungsmethoden

Die Bewertung der Absicherungsmethoden soll Aufschluss über die Aussagequalität, Potentiale und Schwächen der Absicherungsmethoden liefern. Diese können im Anschluss den Kosten und der Absicherungsdauer gegenüber gestellt werden, um durch die so geschaffene Transparenz einen noch effizienteren Einsatz der Methoden zu ermöglichen.

Das übergeordnete Ziel der Entwicklungs- und Absicherungsprozesse ist die Sicherstellung des problemfreien Zusammenwirkens des Produktes mit dem (Serien-)Produktionssystem. Je besser eine Absicherungsmethode bzw. ein Absicherungsmodell die Eigenschaften des Produktes und des Produktionssystems zu Produktionsstart (Start of Production, SOP) darstellt, desto aussagefähiger ist das Absicherungsergebnis. Es ist daher wichtig, die richtige Methode/das richtige Absicherungsmodell für eine Absicherungsmaßnahme auszuwählen. In Abbildung 2 ist dieser Zusammenhang skizziert.

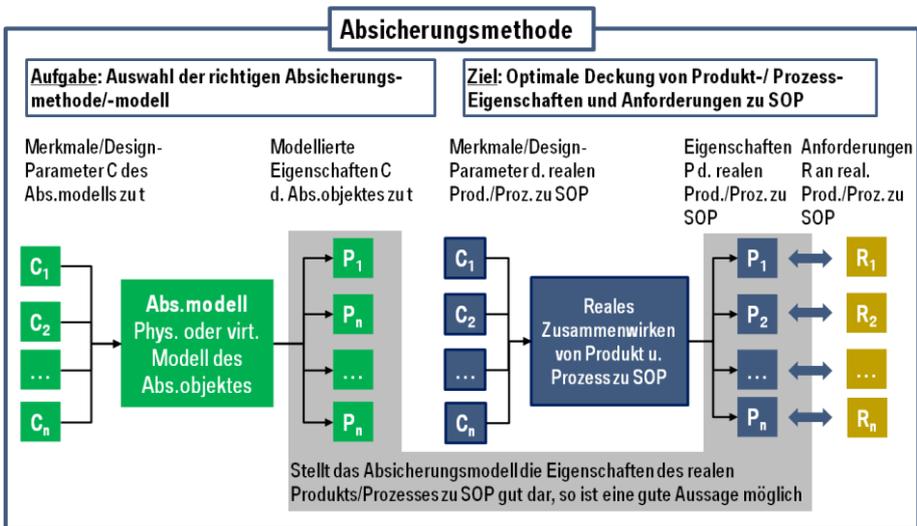


Abbildung 2: Die Aussagequalität der Absicherungsmethoden steigt mit der Darstellungsqualität der Eigenschaften des realen Produktes/Prozesses zu SOP (eigene Darstellung in Anlehnung an [5])

Die Aussagequalität (Menge dargestellter Eigenschaften und Aussagegüte) hängt von dem gewählten Absicherungsmodell ab, das das Absicherungsobjekt repräsentiert. Beispielsweise liefert der Bau eines seriennahen Prototypen mit Bauteilen aus Serienwerkzeugen in der Regel präzisere und verlässlichere Aussagen über das Verhalten des Produktes während des Fertigungsprozesses als ein System-Prototyp aus Ersatzmaterialien. In der Literatur werden verschiedenen Arten von Mock-ups bzw. Produktaufbauten zu Absicherungszwecken vorgestellt [u.a. 3]. Werden Prototypen in seriennahen Prozessen und in größerer Anzahl aufgebaut, können Probleme relativ einfach und mit hoher Sicherheit erkannt und ihre Ursache untersucht werden.

Auch der Absicherungszeitpunkt spielt eine wichtige Rolle bei der Auswahl der geeigneten Methode. In den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses sind oftmals noch nicht alle Merkmale (Designparameter) des Produktes/Prozesses definiert bzw. es besteht noch eine sehr hohe Änderungswahrscheinlichkeit. Daher werden in diesen Phasen Konzepte bewertet, die nicht notwendigerweise einen hohen Detaillierungsgrad besitzen. Diese könnten anhand von Modellen bewertet werden, die nur einige ausgewählte Eigenschaften darstellen. Im Laufe des Entwicklungsprozesses gewinnen sowohl das Absicherungsobjekt als auch die zu prüfenden Eigenschaften an Detaillierungstiefe.

Im Kern spiegelt dies die bereits in [5] theoretisch dargestellten Verhältnisse zu Fragen des Reifegrades wider. Der Autor stellt im Kontext der Produktreifegradbestimmung einen zu einer Bewertungsmethode gehörenden Konfidenzfaktor vor (ϵ_j , confidence factor of determining property j ($0 \leq \epsilon_j \leq 1$)), der die Gewissheit des Ergebnisses einer (Absicherungs-)Methode beschreibt und im Grunde dem hier beschriebenen Methodenattribut „Aussagequalität“ gleichkommt. Mithilfe des hier vorgestellten Vorgehens kann dieser Konfidenzfaktor empirisch bestimmt werden.

3.1 Vorgehen zur Methodenbewertung

Eine Methode wird als ein planmäßiges Vorgehen zur Erreichung eines bestimmten Ziels bzw. ein Vorgehensprinzip zur Lösung von Aufgaben verstanden [8]. Die Bewertung einer Methode kann damit über das Erreichen des Methodenziels und über die eingesetzten Ressourcen erfolgen. Eine Absicherungsmethode hat im Kontext dieses Beitrags das Ziel, eine bestimmte Funktion oder Eigenschaft des Produktes bzw. des Produktionsprozesses zu prüfen und Probleme zu identifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit geht es um solche Eigenschaften, die in ihrer Gesamtheit die zusammengesetzte Eigenschaft „Herstellbarkeit“ beschreiben. Das Ziel einer Absicherungsmethode ist somit

ideal erreicht, wenn durch diese alle im Zusammenhang mit der Herstellbarkeit stehenden Probleme detektiert werden. Für den Realfall lässt sich daraus ableiten: Je höher die Zahl der entdeckten im Vergleich zu den unentdeckten Problemen liegt, desto aussagefähiger sind die Ergebnisse der Methode.

Die Schwierigkeit liegt nun in der Bestimmung dieses Prozentsatzes. Hierfür wird folgender Ansatz gewählt: Die durch die vorgelagerten (alternativen) Absicherungsmethoden unentdeckten Probleme werden in der Regel spätestens während des Baus der ersten Fahrzeuge unter seriennahen Bedingungen detektiert und bis SOP gelöst. Die Zahl der zum Zeitpunkt des ersten Fahrzeugbaus entdeckten Probleme kann daher zur Bewertung der Methoden herangezogen werden.

Das bedeutet: Durch eine

- Untersuchung der durch die eingesetzten Absicherungsmethoden detektierten Probleme in Kombination mit einer
- Analyse der Probleme, die erst bei den ersten unter Serienbedingungen hergestellten Produkten am Ende der Produktentwicklungsphase erkannt werden,

ist es möglich, Rückschlüsse auf die Aussagequalität der einzelnen Absicherungsmethoden zu ziehen. Für die Analyse dieser Probleme sind verschiedene Dimensionen relevant:

- **Zeit** (Entstehungszeitpunkt des Problems):
Manche Probleme können aufgrund ihres Entstehungszeitpunkts von keiner vorgelagerten Absicherungsmaßnahme detektiert werden und müssen aus der Betrachtung ausgeschlossen werden.
- **Ursprung** (Entstehungsgrund):
Die Unstimmigkeit zwischen Produkt und Prozess und das daraus resultierende Problem kann verschiedene Ursachen haben. Beispielsweise werden in den Bauphasen vor SOP sehr geringe Stückzahlen von Fahrzeugen aufgebaut; so können Prozesse, die eine gewisse Stückzahl zum Hochlauf erfordern, in gewissen Bereichen den Serienstand noch nicht erreichen. Probleme dieses und ähnlichen Ursprungs werden nicht in die Untersuchung eingeschlossen.

-
- **Problemtyp** (betroffene Eigenschaft):
Der Problemtyp beschreibt die Produkt-/Prozesseigenschaft, die beeinträchtigt wird. Über diese ist eine Zuordnung zu den Absicherungsmethoden möglich.
 - **Wirkung** (Auswirkung auf Produkt oder Prozess):
Die Lösung des Problems kann Änderungen von Produkt und/oder Prozess erfordern. Zudem kann die Schwere/Tragweite der notwendigen Änderung für die Analyse des Problems herangezogen werden.

Nach erfolgter Analyse können die einzelnen Probleme den Absicherungsmethoden zugeordnet werden und es kann daraufhin eine Einschätzung der jeweiligen Aussagequalität getroffen werden. Es ist zu berücksichtigen, dass das vorgestellte Vorgehen nur Probleme berücksichtigt, die zur ersten Bauphase detektiert werden. Die Unstimmigkeiten, die zwar durch die (alternativen) Absicherungsmethoden unentdeckt bleiben, aber bereits vor dem ersten Fahrzeugbau innerhalb des Entwicklungsprozesses behoben werden, fließen nicht in die Untersuchung ein. Trotzdem lässt das Ergebnis der Untersuchung auf Verbesserungspotentiale des Methodenportfolios und die Aussagequalität der einzelnen Methoden schließen.

3.2 Anwendung des Bewertungsvorgehens

Das in diesem Beitrag vorgestellte Vorgehen zur Bewertung von Absicherungsmethoden wird auf ein reales Fahrzeugentwicklungsprojekt angewendet. Zur Absicherung der Herstellbarkeit wurden hier verschiedene alternative Absicherungsmethoden angewendet, die auf Virtual Reality- und Mixed Reality-Ansätzen oder Prototypen-Bauteilen aus Ersatzmaterialien basieren. Diese ersetzen in diesem Fall den Aufbau physischer Prototypen für die Herstellbarkeitsabsicherung. Für die Bewertung der Absicherungsmethoden werden zunächst die Eigenschaften herausgearbeitet, die durch die betrachteten Methoden abgedeckt werden. Dies ermöglicht die spätere Zuordnung von Problemen in die Wirkungsbereiche der Methoden.

In dem hier betrachteten Fall werden die ersten physischen Produkte in seriennahen Prozessen erst kurz vor Beginn der Vorserie aufgebaut. Die während dieses Fahrzeugbaus auftretenden Probleme werden dokumentiert und analysiert und schließlich den Eigenschaften zugeordnet, die durch die zuvor eingesetzten alternativen Absicherungsmethoden bewertet wurden. Durch eine Analyse der einzelnen Probleme ist zudem festzustellen, ob eine Entdeckung des Problems durch die Absicherungsmaßnahmen überhaupt möglich gewesen wäre (Entstehungszeitpunkt des Problems etc.). Basierend auf die-

ser Analyse und der Zuordnung der Probleme in die Methodenwirkbereiche (abzusichernde Eigenschaften) kann die Zahl der durch die einzelnen Methoden unentdeckten Probleme bestimmt werden. Ist diese Zahl für eine Methode gering und die Anzahl der durch die Methode selbst detektierten Probleme hoch, dann kann eine hohe Aussagekraft der Methode angenommen werden. Andernfalls geben die unentdeckten Probleme Aufschluss auf Verbesserungspotentiale der Methode.

Das Ergebnis der Bewertung ist nun zum Einen eine Aussage über die Aussagequalität der betrachteten Absicherungsmethoden und zum Anderen ein Hinweis auf deren Stärken und mögliche Verbesserungspotentiale. Die Bewertung ist sehr zeitaufwändig, da die zu untersuchende Problem- und Ergebnisdokumentation unter Umständen sehr umfangreich ist. Trotzdem ist eine Bewertung der Absicherungsmethoden sinnvoll, da sie Ergebnisse liefert, die eine Basis für die Weiterentwicklung des Methodenportfolios bilden. Stellt man die Bewertungsergebnisse den zur Absicherung verwendeten Ressourcen gegenüber, können Aussagen über die Methodeneffizienz abgeleitet werden, die als Grundlage für die Planung der Herstellbarkeitsabsicherung zukünftiger Fahrzeugprojekte dienen können.

4 Zusammenfassung

Es wurde ein mögliches Vorgehen vorgestellt, um alternative Absicherungsmethoden hinsichtlich ihrer Aussagequalität bezüglich der Eigenschaft „Herstellbarkeit“ eines Produktes zu bewerten. Dabei werden Absicherungsmethoden über die den Methoden zugrunde liegenden Modelle mit den im nachgelagerten, seriennahen Fahrzeugbau detektierten Problemen verknüpft. In Kombination mit den durch die einzelnen Absicherungsmethoden selbst detektierten Problemen wird als Ergebnis des vorgestellten Untersuchungsvorgehens eine Einordnung der Absicherungsmethoden entsprechend ihrer jeweiligen Aussagefähigkeit ermöglicht.

Eine Untersuchung wie die hier vorgestellte kann nur in der Industriepraxis durchgeführt werden, weil es nur hier nach der Entwicklungsphase einen Serienbau gibt, in dem die vorgeschlagenen Messparameter (Anzahl der unter seriennahen Bedingungen auftretenden Probleme) bestimmt werden können. Die Ergebnisse dieser Untersuchung haben aber auch eine wissenschaftliche Relevanz, indem sie helfen können, die Aussagefähigkeit eines bestimmten Methodenportfolios vorherzubestimmen.

Literatur

- [1] Stoll, H. W.: "Design for manufacture: An Overview", *Appl. Mech. Rev.*, 1986, 39, pp. 1356-1364.
- [2] Andreasen, M. M. et al.: "Design for assembly", Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- [3] Müller, M.: "Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen am Beispiel der produktionsbezogenen Produktabsicherung in der Automobilindustrie", Universität d. Saarlandes, Schriftenreihe Produktionstechnik, Saarbrücken, 2008.
- [4] Haberfellner, R.; Nagel, P.; Becker, M.; Büchel, A.; von Massow, H.: "Systems engineering", 8., verb. Aufl.; Verl. Industrielle Organisation, Zürich, 1994.
- [5] Weber, C.: "Looking at "DFX" and "Product Maturity" from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes". In: Krause, F.-L. (ed.), *Proceedings of the 17th CIRP Design Conference, The Future of Product Development*, pp. 85-104. Springer, Berlin-Heidelberg, 2007.
- [6] Zorriassatine, F.; Wykes, C.; Parkin, R.; Gindy, N.: "A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development". In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2003, 217(4), pp. 513-530.
- [7] Huet, G.; Culley, S. J.; McMahon, C.; Fortin, C.: "Making sense of engineering design review activities", *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, June 2007, 21(3), pp. 243-266.
- [8] Ehrlenspiel, K.: "Integrierte Produktentwicklung - Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion", Hanser-Verlag, München, 1995.