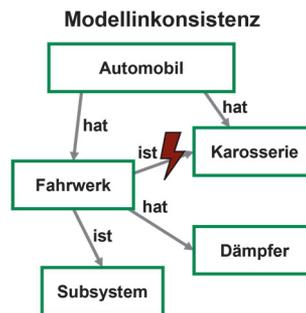


Formulierung und Anwendung von Konsistenzregeln im Model-based Systems Engineering

Schumacher, T.; Inkermann, D.

Eine zentrale Herausforderung bei der Umsetzung von Model-based Systems Engineering ist die Sicherstellung der Modellkonsistenz. Um dieser Herausforderung zu begegnen, schlägt dieser Beitrag die Anwendung von Konsistenzregeln vor. Hierzu werden einerseits notwendige Grundlagen, wie die Bewertung der Modellkonsistenz und andererseits die konkrete Formulierung von Konsistenzregeln betrachtet. Um eine strukturierte Formulierung zu ermöglichen, wurde eine Satzschablone entwickelt, welche insbesondere die Bewertung von Architekturmustern beinhaltet. Außerdem wurden entsprechend der Satzschablone konkrete Konsistenzregeln an einem heterogenen Modell beispielhaft angewendet.



A crucial challenge by implementing Model-based Systems Engineering is to ensure model consistency. To address this challenge, this paper proposes the application of consistency rules. For this purpose, necessary fundamentals such as the evaluation of model consistency and the concrete formulation of consistency rules are considered. In order to enable a structured formulation, a formulation mask was developed, which particularly includes the evaluation of architectural patterns. In addition, specific consistency rules were applied to a heterogeneous model in accordance with the formulation mask.

Einleitung und Problemstellung

Heutige mechatronischer Systeme sind charakterisiert durch eine zunehmende Komplexität und Heterogenität sowie einer intensiven Vernetzung der Systeme untereinander und zum Internet der Dinge und Dienste /1/. Diese Systemeigenschaften führen auch zu Herausforderungen in der Produktentwicklung, wie die Etablierung einer interdisziplinären Kommunikation, Erarbeitung eines ganzheitlichen Systemverständnis und der Betrachtung aller Produktlebenszyklusphasen. Ein Ansatz, um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist die digitale Präsentation des Systems durch Modelle /1/. Modelle sind zweckmäßige Abstraktionen bzw. Reduktionen des betrachteten Systems, um dieses besser zu beherrschen und transparenter abzubilden. Dabei unterscheiden sich Modelle beispielsweise im Modellierungszweck und im Formalisierungs- und Detaillierungsgrad entsprechend der betrachteten Entwicklungsaufgabe und -disziplin /2/. Gleichzeitig dienen Modelle als Informationsträger und

Wissenspeicher über das betrachtete System /3/. Daher sollten Produktentwicklungen das Wissen aus vorhandenen Modellen früherer Produktgenerationen berücksichtigen. Die resultierende Modellheterogenität erhöht jedoch die Auftretenswahrscheinlichkeit von Modellinkonsistenzen, welche zu einem extraordinären Anstieg von Entwicklungszeit- und Kosten /4/ und ersthaften technischen Problemen führen kann /5/. Model-based Systems Engineering (MBSE) ist ein Ansatz, um die vielfältigen Modelle zu einem Systemmodell zu verknüpfen. MBSE zielt dabei auf die Einführung eines kohärenten, vollständigen Systemmodells ab, welches als zentrale Informations- und Datenspeicher dient /6/.

Für eine effizientere interdisziplinäre Entwicklung ist innerhalb des MBSE die Systemmodellierung anhand der Systems Modeling Language (SysML) etabliert. Diese grafische Modellierungssprache stellt u. a. abstrakte Modellelemente zur Beschreibung von Systemanforderungen, Systemverhalten und -struktur sowie Verifikations- und Validierungsfällen bereit. Abhängig von der konkreten Entwicklungsaufgabe werden jedoch oft zusätzlich detailliertere Modelle benötigt, wie bspw. CAD-Modelle, um den konkreten geometrischen Aufbau zu definieren und mögliche Auswirkungen aufgrund von externen Störgrößen, z. B. Temperatureinflüsse, zu analysieren. Somit ergibt sich in der aktuellen Produktentwicklungspraxis eine große Heterogenität der eingesetzten produktbeschreibenden Modelle.

Zur Sicherstellung der Konsistenz zwischen unterschiedlichen Modellen analysiert dieser Beitrag den Begriff der Modellkonsistenz im Kontext Model-based Systems Engineering und schlägt den Einsatz von Konsistenzregeln zur Sicherstellung der Modellkonsistenz vor.

Zielstellung und Forschungsfragen

Dieser Beitrag zielt auf die Anwendung von Konsistenzregeln im Model-based Systems Engineering ab. Dabei liegt der Schwerpunkt neben einem grundsätzlichen Verständnis von Modellkonsistenz und dem Einsatz von Konsistenzregeln auf der konkreten Formulierung von Regeln zur Verbesserung der Konsistenz zwischen SysML- und CAD-Modellen.

Folgende korrespondierende Forschungsfragen werden im Rahmen dieses Beitrags untersucht:

- Welche Arten von Konsistenzregeln sind zur Bewertung der Modellkonsistenz zu unterscheiden?
- Welche Formulierungen eignen sich für die Definition von Konsistenzregeln?
- Welcher Konsistenzregeln unterstützen bei der Bewertung der Konsistenz heterogener Modelle?

Grundlagen und Stand der Technik

Dieser Abschnitt erläutert notwendige Grundlagen zu den Themenfeldern Modellkonsistenz und Inkonsistenzen sowie die Bewertung der Modellkonsistenz anhand unterschiedlicher Typen von Konsistenzregeln.

Modellkonsistenz

Grundsätzlich kann Modellkonsistenz als eine Modelleigenschaft betrachtet werden, die zur Bewertung der Modellqualität und der Qualität des zu entwickelnden Systems verwendet werden kann /7/. Gleichzeitig ist die Modellkonsistenz wesentlich, um einen effizienten Entwicklungsprozess sicherzustellen /8/. Die Vermeidung bzw. Reduzierung von Modellinkonsistenzen stellt somit eine zentrale Herausforderung für ein effizientes MBSE dar /9/.

Modellinkonsistenz kann als logischer Widerspruch oder irrationale Existenz von Fakten, Artefakten oder Konzepten verstanden werden /10/. Basierend auf Vogel-Heuser et al. /11/, wird im Kontext dieses Beitrags unter Modellinkonsistenz eine Verletzung von domänenspezifischen oder domänenunabhängigen technischen Regeln oder Einschränkungen bei der Modellierung technischer Systeme verstanden. Es existieren verschiedene Beispiele für Modellinkonsistenzen, wie die Verletzung von Wohlgeformtheitsregeln, Inkonsistenzen in redundanten Informationen, Inkongruenz zwischen Modell und Testdaten und die fehlende Beachtung von Heuristiken oder Richtlinien /9/.

Bewertung der Modellkonsistenz

Modellkonsistenz lässt sich grundsätzlich in zwei Typen unterscheiden: 1) Intra-Modellkonsistenz, welche die Konsistenzbedingungen innerhalb eines Modells beschreiben, und 2) Inter-Modellkonsistenz, welche Konsistenzbedingungen betrachten, die modellübergreifend eingesetzt werden /8/.

Zur Bewertung der Modellkonsistenz greift dieser Beitrag diese Unterscheidung auf und schlägt die Verwendung von Intra- und Inter-Modellkonsistenzregeln vor. Dabei beschreiben Konsistenzregeln Bedingungen, die ein Modell erfüllen muss, um konsistent zu sein. Abbildung 1 stellt diese Unterscheidung anhand von SysML und CAD-Modellen am Beispiel eines aktiven Wankstabilisators vor. Bei dem Wankstabilisator handelt es sich um ein mechatronisches Fahrwerksystem im Automobil, welches insbesondere den Fahrkomfort in Kurvenfahrten verbessert.

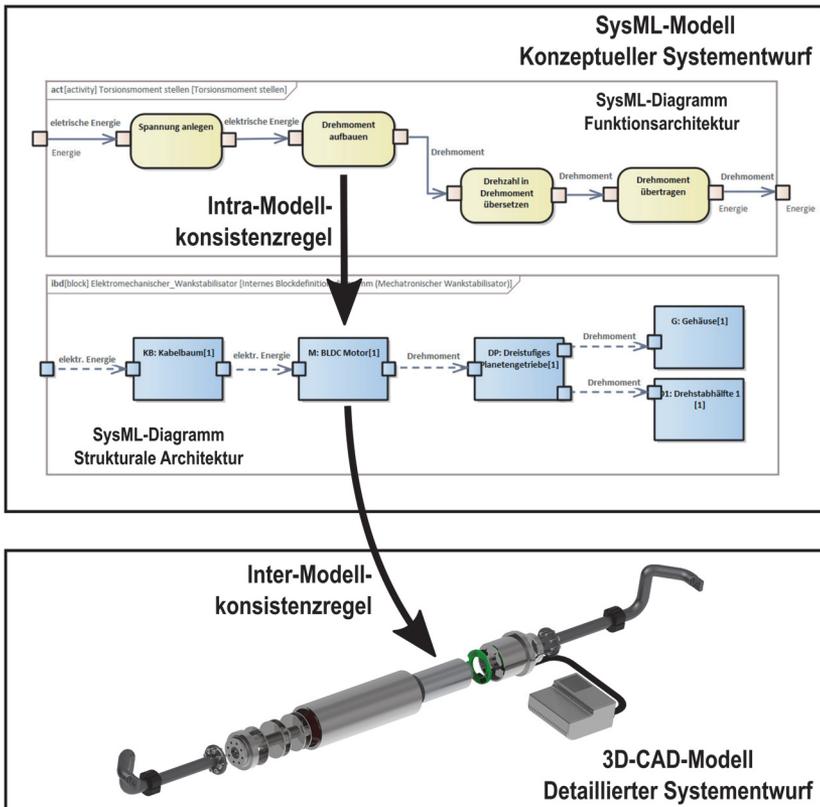


Abbildung 1: Unterscheidung von Intra- und Inter-Modellkonsistenzregeln

Abbildung 1 visualisiert die Anwendung von Konsistenzregeln innerhalb eines Modells und modellübergreifend. Model-based Systems Engineering wendet üblicherweise SysML-Modelle an, um bspw. die Entwicklung der Systemarchitektur zu unterstützen. Dabei berücksichtigt eine Systemarchitektur sowohl funktionale als auch strukturelle Architekturbeschreibungen, die miteinander verknüpft sind. Abbildung 1 stellt diese anhand von zwei separaten Diagrammen innerhalb eines SysML-Modells dar. Zur Sicherstellung der Konsistenz zwischen diesen separaten Architekturbeschreibungen innerhalb eines SysML-Modells können Intra-Modellkonsistenzregeln angewendet werden. Mit fortschreitendem Entwicklungsprozess müssen die definierten strukturellen Systemelemente (SysML-Modell) in einen detaillierten Entwurf überführt werden. Dabei werden diese durch konkrete geometrische und weitere Eigenschaften erweitert. In der mechanischen Produktentwicklungsdisziplin werden für diese Aktivität üblicherweise CAD-Modelle verwendet. Dadurch entstehen modellübergreifende Relationen, die anhand Inter-Modellkonsistenzregeln bewertet werden können.

Formulierung von Konsistenzregeln

Grundsätzlich ist bei der Formulierung von Konsistenzregeln zu beachten, dass es sich je nach Formulierungsart um positive oder negative Konsistenzregeln handelt. Positive Konsistenzregeln zeigen auf, dass ein Modell als konsistent betrachtet werden kann, wobei negative Konsistenzregeln auf die Existenz von Modellinkonsistenzen hinweisen /12/. Außerdem ist zu beachten, dass Konsistenzregeln sowohl für individuelle Modellelemente als auch für Elementtypen definiert werden können /13/.

Zielstellung dieser Arbeit ist es, geeignete Formulierungen für Konsistenzregeln zu erarbeiten. Basierend auf Hehenberger et al. /13/ wurden Satzschablonen für die Formulierung von positiven und negativen Modellkonsistenzregeln entwickelt, siehe Abbildung 2. Die Konsistenzregeln dienen dabei insbesondere der Modellanalyse auf Grundlage von Architekturmustern.

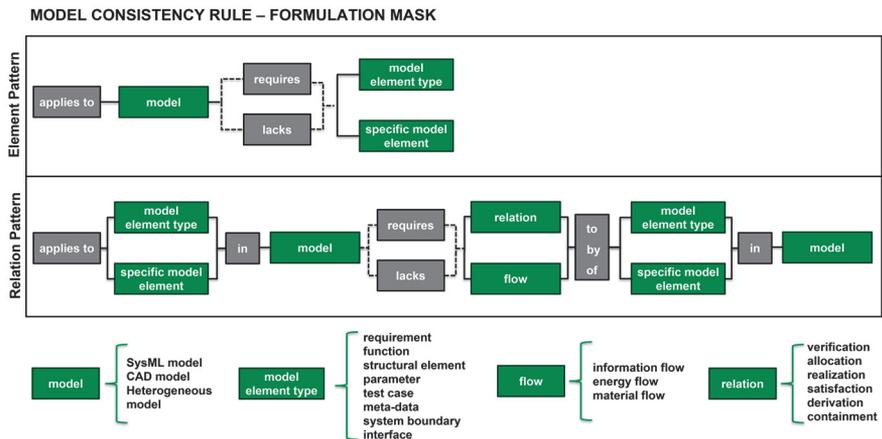


Abbildung 2: Satzschablone für Konsistenzregeln basierend auf /13/

Die eingeführte Satzschablone betrachtet das Vorhandensein (positive Konsistenzregel) bzw. das Fehlen (negative Konsistenzregel) notwendiger Modellelemente bzw. Modellelementtypen sowie deren Relationen und Flüsse untereinander in einem Modell oder modellübergreifend. Beispielhafte Konsistenzregeln, die der vorgegebenen Formulierung der Satzschablone folgen, stellt Tabelle 1 dar.

Tabelle 1: Beispielhafte Formulierung von Konsistenzregeln

Architekturmuster	Positive/ negative Konsistenzregel	Formulierung
Element Pattern	Positiv	"applies to <SysML model> requires <requirements>"
Element Pattern	Negativ	"applies to <CAD model> lacks <e-motor>"
Relation Pattern	Positiv	"applies to <function> in <SysML model> requires <realization> by <structural element> in <SysML model>"
Relation Pattern	Negativ	"applies to <BLDC motor> in <SysML model> lacks <allocation> to <BLDC motor> in <CAD model>"

Bewertung der Konsistenz heterogener Modelle

Dieser Beitrag schlägt zur Analyse der Modellkonsistenz die Verwendung von Konsistenzregeln vor und stellt deren Anwendung anhand heterogener Modelle vor. Heterogene Modelle ermöglichen die Integration unterschiedlichen Modellelemente in ein Modell (Visualisierung) /14/. So besteht beispielsweise die Möglichkeit SysML- und CAD-Modellelemente in einem heterogenen Modell zu kombinieren. In /9/ wurde die Anwendung heterogener Modelle zur Aufrechterhaltung der Modellkonsistenz vorgeschlagen. Anhand der Nutzung von Konsistenzregeln soll dieser Ansatz evaluiert werden.

Abbildung 3 zeigt ein manuell erzeugtes (analoges) heterogenes Modell, welches bei der Architekturentwicklung des Wankstabilisators unterstützen kann. Der Modellzweck ist die Darstellung der Rückverfolgbarkeit (Traceability) relevanter Modellelemente. In diesem Fall wird ein Änderungsszenario modelliert, indem die Anforderung *Increase working dynamics*, beispielweise für eine nachfolgende Produktgeneration, geändert wurde. Um eine umfangreiche Analyse der betroffenen Teilsysteme durchzuführen, stellt dieses Modell die Relationen zwischen Anforderungen und dazugehörigen Funktionen sowie Teilsysteme dar.

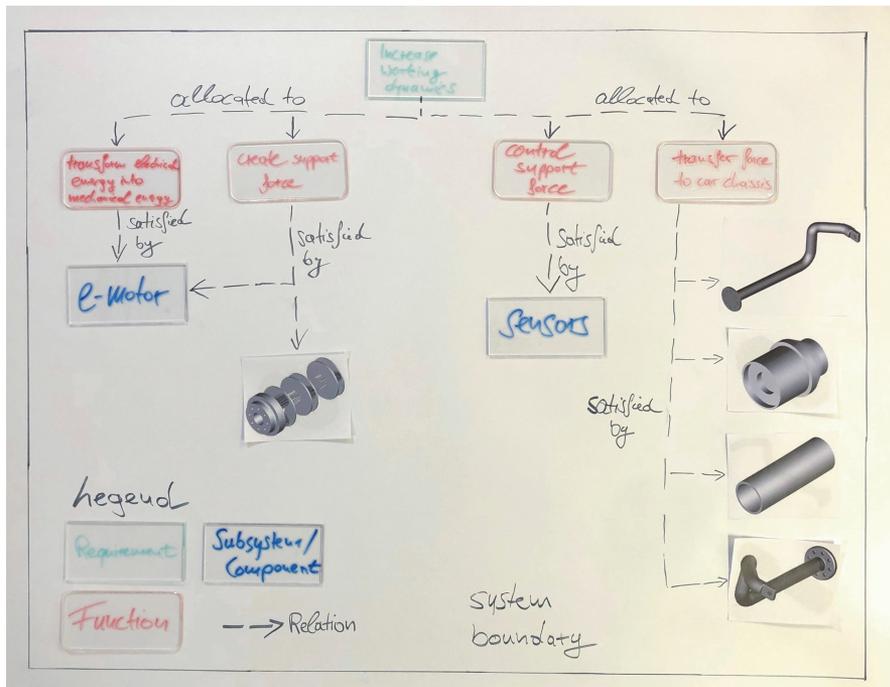


Abbildung 3: Heterogenes Modell zur Darstellung der Modelltraceability

Das heterogene Modell beinhaltet abstrakte und detailliertere Modellelemente. Die detaillierten CAD-Modellelemente visualisieren Elemente, die in der aktuellen Gestalt für die Folgegeneration übernommen werden können. Die abstrakten Modellelemente (*E-Motor*, *Sensoren*) müssen aufgrund der Anforderungsänderung umfangreich analysiert und gegebenenfalls geändert werden.

Um die Konsistenz dieses heterogenen Modells zu untersuchen, werden ausgehend von der erarbeiteten Satzschablone folgende Konsistenzregeln formuliert und bewertet, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Anwendung von Konsistenzregeln

	Konsistenzregel	Ergebnis
1	"applies to <requirement> in <heterogeneous model> requires <allocation> to <function> in <heterogeneous model>"	true
2	"applies to <function> in <heterogeneous model> requires <satisfaction> by <structural element> in <heterogeneous model>"	true
3	"applies to <structural element> in <heterogeneous model> requires <containment> of <parameter> in <heterogeneous model>"	false
4	"applies to <control support force> in <heterogeneous model> requires <satisfaction> by <control unit> in <heterogeneous model>"	false
5	"applies to <e-motor> in <heterogeneous model> lacks <energy flow> to <transmission> in <heterogeneous model>"	true
6	"applies to <e-motor> in <heterogeneous model> requires <energy flow> to <system boundary> in <heterogeneous model>"	false

Die Analyse des dargestellten Modells durch Anwendung von Konsistenzregeln ermöglicht das Ableiten verschiedener Erkenntnisse. Konsistenzregel 1 und 2 zeigen, dass eine grundsätzliche Traceability der Modellelemente vorliegt. Es fehlen jedoch konkrete Modellelemente, wie erforderliche Teilsysteme (*control unit*) und deren Parameterbeschreibungen (Konsistenzregel 3 und 4). Daraus lässt sich schließen, dass dieses Modell als unvollständig und inkonsistent betrachtet werden kann. Außerdem fehlen dem Modell die konkreten Abhängigkeiten (Flüsse) zwischen dem Modellelementen und zur Systemgrenze. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass bei der Modellanalyse mit Konsistenzregeln immer der Modellzweck zu berücksichtigen ist. Das betrachtete heterogene Modell zielte nicht auf die Modellierung von Schnittstellen und Abhängigkeiten zwischen den Modellelementen ab, somit sind die Konsistenzregeln 5 und 6 nichtzutreffend.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag erläutert die Formulierung und Anwendung von Konsistenzregeln im Model-based Systems Engineering. Konsistenzregeln dienen der Bewertung der Modellkonsistenz innerhalb eines Modells oder modellübergreifend. Um eine strukturierte Formulierung von Konsistenzregeln sicherzustellen, wurde eine Satzschablone entwickelt, welche insbesondere die Bewertung von Architekturmustern beinhaltet. Die erarbeitete Satzschablone wurde an einem heterogenen Modell beispielhaft angewendet, um mögliche Regelabweichungen vorzustellen. Im Allgemeinen zielt die Definition und Anwendung von Konsistenzregeln auf die Aufrechterhaltung der Modellkonsistenz und der Identifikation von Modellinkonsistenzen ab, dies führt zu einer besseren Modellqualität und damit einhergehend effizienteren Produktentwicklung.

Mit der zunehmenden Anzahl an produktbeschreibenden Modellen im MBSE nimmt auch die Anzahl erforderlichen Konsistenzregeln zu, um die Modellkonsistenz zu analysieren bzw. sicherzustellen. Daher beschäftigen sich zukünftige Forschungsarbeiten mit der Anwendung von Konsistenzregeln innerhalb digitaler Produktmodelle.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Arbeiten des niedersächsischen Zukunftslabors Mobilität. Das Teilprojekt wird gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (Fördernummer ZN3493) im Niedersächsischen Vorab der VolkswagenStiftung und betreut vom Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen (ZDIN).

Literatur

- /1/ VDI/VDE 2206: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme. Beuth Verlag, 2021, Berlin
- /2/ Andreasen, M.M.: Modelling—The Language of the Designer. Journal of Engineering Design, Vol. 5 No. 2, 1994, pp. 103–115
- /3/ Mordecai, Y.; Dori, D.: Towards a Quantitative Framework for Evaluating the Expressive Power of Conceptual System Models. INCOSE International Symposium, Vol. 26 No. 1, 2016, pp. 42–57
- /4/ Spanoudakis, G.; Zisman, A.: Inconsistency Management in Software Engineering: Survey and Open Research Issues. 2000, pp. 1 – 38
- /5/ Nuseibeh, B.: Ariane 5: Who Dunit?. In: IEEE Softw. 14 (3), 1997, S. 15–16, DOI: 10.1109/MS.1997.589224

- /6/ Friedenthal, S; Moore, A; Steiner, R.: A practical guide to SysML. The systems modeling language. Third edition. Waltham, MA: Elsevier/Morgan Kaufmann (The MK/OMG Press), 2015
- /7/ Kalibatiene, D.; Vasilecas, O.; Dubauskaite, R.: Rule Based Approach for Ensuring Consistency in Different UML Models. In: Information Systems: Development, Learning, Security, Bd. 161. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 1–16
- /8/ Fieber, F.; Huhn, M.; Rumpe, B.: Modellqualität als Indikator für Softwarequalität: eine Taxonomie. In: Informatik Spektrum 31 (5), S. 408–424, 2008, DOI: 10.1007/s00287-008-0279-4
- /9/ Schumacher, T.; Inkeremann, D.: Model Inconsistencies and Solution Approaches to Maintain Consistency in Model-based Systems Engineering. In: ICONS 2023: The eighteenth International Conference on Systems, April 24th-28th, 2023, Venice, Italy, IARIA, Wilmington, DE, pp. 23–28
- /10/ Herzig, S.J.I.; Qamar, A.; Reichwein, A.; Paredis, C.J.J.: A Conceptual Framework for Consistency Management in Model-Based Systems Engineering. In: Volume 2: 31st Computers and Information in Engineering Conference, ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Washington, DC, USA, 2011, S. 1329–1339
- /11/ Vogel-Heuser, B.; Fantuzzi, C.; Wimmer, M.; Böhm, M.; Fay, A.: Herausforderungen in der interdisziplinären Entwicklung von Cyber-Physischen Produktionssystemen. In: at - Automatisierungstechnik 67 (6), 2019, S. 445–454. DOI: 10.1515/auto-2018-0144
- /12/ Feldmann, S; Herzig, S.J.I.; Kernschmidt, K.; Wolfenstetter, T.; Kammerl, D.; Qamar, A. et al.: A comparison of inconsistency management approaches using a mechatronic manufacturing system design case study. In: 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Gothenburg, Sweden, 2015, S. 158–165
- /13/ Hehenberger, P.; Egyed, A.; Zeman, K.: Consistency Checking of Mechatronic Design Models. In: Volume 3: 30th Computers and Information in Engineering Conference. ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Montreal, Quebec, Canada, 2010, S. 1141–1148
- /14/ Jansen, S.; Welp, E.G.: A heterogeneous modelling approach for domain allocation in mechatronics. In: Proceedings of 16th International Conference on Engineering Design (ICED 2007), Paris, 2007