

**Entwicklung neuer Methoden zur eindeutigen und fehlerfreien
Kommunikation im Bereich der 3D-modellbasierten Arbeitsweise**

Von der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte DISSERTATION

vorgelegt von

Christopher Saal, M.Sc.

Begutachtung durch

Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold-Byhain

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph H. Stelzer

Tag der Einreichung: 04. März 2022

Tag der Verteidigung: 04. November 2022

Kurzzusammenfassung

Die Digitalisierung industrieller Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozesse hat mittlerweile in einer Vielzahl von Unternehmen Einzug gefunden und ist dort nicht mehr wegzudenken. Ausgehend von einem funktionalen 3D-CAD-Modell soll es möglich sein, nahezu alle produktbegleitenden Prozesse – von der Konstruktion bis zur Endabnahme beim Kunden – teil- oder vollautomatisiert zu steuern. Das Ziel ist die eindeutige Vergleichbarkeit konstruktiver, fertigungstechnischer und qualitätsrelevanter Daten im Produktentstehungsprozess. Gerade im Bereich der Qualitätssicherung und der abgeleiteten Messprotokollierung besteht diesbezüglich bisher nicht ausgeschöpftes Optimierungspotenzial. Die bestehende Entwicklungslücke stört die Durchgängigkeit der digitalen 3D-CAD-basierten Prozesskette und beeinträchtigt die Prozess- und Informationstransparenz innerhalb der Produktentstehung.

Mit der Verwendung der *Product and Manufacturing Information* (PMI) im 3D-CAD-Modell wird dieser Problematik zwar entgegengewirkt, jedoch ist es bislang nur begrenzt möglich, die Produkt- und Fertigungsinformationen eindeutig und unverändert in der heterogenen CAx-Systemlandschaft innerhalb der Produktentstehung zu transferieren. Neben der fehlenden Eindeutigkeit der PMI liegt die Ursache häufig bereits bei Fehldefinitionen der Informationen im Bereich der Bauteilkonstruktion. Eine eindeutige Zuordnung der Prüfmerkmale zu den jeweiligen Geometrieelementen wird nicht gewährleistet, sodass prüftechnisch ermittelte Soll-Wert-Abweichungen aus der Qualitätssicherung nicht direkt (ohne manuelle Nach- bzw. Mehrarbeit) dem entsprechenden geometrischen Element im 3D-CAD-Modell zugeordnet werden können.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher, eine Methode zu entwickeln, mit der die 3D-CAD-Modellinformationen semantisch korrekt definiert und auf Basis einer einheitlichen Kennzeichnung eindeutig im Produktentstehungsprozess identifiziert und maschinenlesbar weiterverarbeitet werden können. Zusätzlich werden aufbauend auf der eindeutigen Identifikation der Bauteilinformationen neue Methoden im Bereich der 3D-CAD-basierten Arbeitsweise entwickelt, die den Mitarbeiter im Bereich der Prüf- und Arbeitsplanung sowie bei arbeitsvorgangsspezifischen Aufgaben in der Fertigung entlasten.

Abstract

The digitization of industrial manufacturing and quality assurance processes has now found its way into many companies and is gaining momentum. By using a functional 3D-CAD model, it should be possible to control most product-related processes – from design to final acceptance by the customer – in a partially or fully automated manner. The goal is the unambiguous comparability of design, manufacturing, and quality-relevant data along the product-creation process. Especially in quality assurance and the derived measurement reports, the optimization potential in this field has not been exploited to date. The existing development gap disrupts the continuity of the digital 3D-CAD-based process chain and impairs information transparency within the product-creation processes.

While the use of Product and Manufacturing Information (PMI) in the 3D-CAD-model counteracts this problem, it has only been possible to transfer Product and Manufacturing Information unambiguously and without changes within a heterogeneous CAx-system landscape to a limited extent. In addition to the ambiguity, incorrect definitions in the field of product design are often the source of errors and a clear assignment of the inspection characteristics to the associated geometry elements is not guaranteed. As a result, deviations from the nominal value (determined by inspection technology) during the quality inspection process cannot be assigned directly to the corresponding geometry element without manual rework or additional work.

Therefore, this work aims to develop a method that ensures the semantic correctness and unambiguous identification of the 3D CAD model information along the product-creation process based on a unique and machine-readable characterization. In addition, regarding this unambiguous 3D CAD model information identification, new 3D-CAD-based methods are being developed to reduce employee inspection and production planning workloads as well as those related to process-specific tasks on the shop floor.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Fachabteilung T AMM DMT-DE der Siemens AG am Standort München. Die Abteilung T AMM DMT-DE beschäftigt sich mit der Entwicklung neuer Methoden im digitalen Fertigungsumfeld und deren effizienter Anwendung und Umsetzung in innovativen Unternehmen.

An dieser Stelle möchte ich **Frau Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold-Byhain** ganz herzlich für die Betreuung dieser Arbeit danken. Vielen Dank für die persönliche Betreuung und Unterstützung sowie für die sehr wertvollen fachlichen Anregungen und persönlichen Ratschläge während meiner gesamten Arbeit. Ein weiterer Dank gilt **Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph H. Stelzer** für das Interesse an meiner Arbeit und für die freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats.

Mein besonderer Dank gilt **Herrn Dr.-Ing. Peter Robl**, Leiter der Abteilung T AMM DMT-DE der Siemens AG, für die Ermöglichung der Promotion, für das entgegengebrachte Vertrauen, für die kompetente und engagierte Unterstützung, für die hervorragende Betreuung mit interessanten Gesprächen, Diskussionen, Ideen und Hilfestellungen sowie für die Zeit, die er sich für mich und meine Arbeit genommen hat.

Von ganzem Herzen möchte ich meinen Kollegen der Siemens AG am Standort München für das freundschaftliche Miteinander und für die vielen fachlichen und praktischen Ratschläge danken. Insbesondere gilt mein Dank Christian Lipp, Alexander Nowitschkow, Julien Mrowka, Sven Schumann, Stefan Krause, Michael Meyer-Hentschel, Adam Myszkowski und Oliver Lohse, die mir mit ihrer innovativen Arbeitsweise und in offenen Diskussionen sehr wertvolle Anregungen und Ideen für die Erstellung dieser Arbeit gegeben haben. Ein besonderer Dank gilt auch den Studierenden, die mit Praxis- und Abschlussarbeiten zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. Hier sind insbesondere Pierre Brionne, Reinhold Metrich, Sophie Rees, Bianca Scheuplein, Karla Tomicz und Cedric Schmitt zu nennen.

Zu guter Letzt gilt ein besonderer Dank meiner Familie und meinen Freunden, die mich auf diesem Weg begleitet und tatkräftig unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	II
Abstract	III
Danksagung	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Aufbau der Dissertation.....	5
2 Stand der Forschung und Technik	7
2.1 Relevante Begriffsdefinitionen zur Integration des 3D-CAD-Modells als Informationsträger in der Fertigung	7
2.2 Digitaler Wandel im industriellen Arbeitsumfeld.....	8
2.2.1 Industrie 4.0 und Digitalisierung.....	9
2.2.2 Virtual Twin, Digital Twin und Digital Thread.....	9
2.3 3D-CAD-basierte Prozesskette im Produktentstehungsprozess.....	10
2.3.1 Einordnung des Produktentstehungsprozesses in den Produktlebenszyklus.....	11
2.3.2 3D-CAD-basierte Prozesskette und unterstützende CAx-Systeme	11
2.4 Prozesse der Produktionsplanung und Qualitätssicherung.....	14
2.4.1 Prozessabläufe der Arbeitsplanung in der Fertigung	14
2.4.2 Prozessabläufe der Prüfplanung in der Fertigung.....	16
2.4.3 Ressourcenmanagement zur Erfüllung der Fertigungs- und Prüfaufträge	17
2.4.4 Prozessabläufe der Qualitätssicherung in der Fertigung.....	19

2.5	3D-CAD-Modelle als Informationsträger zur Lenkung der Fertigung.....	20
2.5.1	3D-CAD-Modelle als Informationsträger	20
2.5.2	Model-Based Definition	21
2.5.3	Features und Geometrielemente als geometrische und nichtgeometrische Informationen im 3D-CAD-Modell	23
2.5.4	Product and Manufacturing Information.....	24
2.5.5	Toleranzspezifikationen im 3D-CAD-Modell	26
2.5.6	Kennzeichnung und Identifikation der geometrischen und nichtgeometrischen 3D-CAD-Modellinformationen	28
2.6	Datenaustausch von 3D-CAD-Modellen	31
2.6.1	Interner und externer 3D-CAD-Datenaustausch	31
2.6.2	Prozessbeschreibung zum nativen 3D-CAD-Datenaustausch.....	34
2.6.3	Prozessbeschreibung zum neutralen 3D-CAD-Datenaustausch.....	34
2.7	Datenverwaltungssysteme für die digitale Fabrik.....	37
2.8	Fazit zum Stand der Forschung und Technik im Bereich der 3D-modellbasierten Arbeitsweise	40
3	Anforderungsprofil zur Methodenentwicklung	42
4	Entwicklung von Methoden zur 3D-modellbasierten Arbeitsweise in der Fertigung	46
4.1	Anwendungsbereich der neuen Methoden zur 3D-modellbasierten Arbeitsweise.....	46
4.2	Eindeutige Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell	47
4.2.1	Grundkonzept zur eindeutigen Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell.....	47
4.2.2	FII-Methode zur eindeutigen Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell.....	51
4.2.2.1	Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen in der 3D-CAD-Modellstruktur	51
4.2.2.2	FII-Methode über FII-Informationenfeatures im 3D-CAD-Modell	52
4.2.2.3	FII-Methode über FII-Attribute im 3D-CAD-Modell	54
4.2.2.4	Zwischenfazit zur FII-Methode im 3D-CAD-Modell.....	57
4.2.3	CAD-neutrale Verwendbarkeit der FII-Methode zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen.....	59
4.3	Maßnahmen zur Unterstützung des verlustfreien 3D-CAD-Datentransfers und der 3D-modellbasierten Prozessplanung	65

4.3.1 Absicherung der semantisch korrekten Bauteildefinition	65
4.3.1.1 Vorgehen zur semantischen Absicherung der Angabe von Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell.....	65
4.3.1.2 Klassifikation der Toleranzspezifikation in Form eines Informationsmodells.....	66
4.3.1.3 Überprüfung des 3D-CAD-Modells auf die semantisch korrekte Angabe von Form- und Lagetoleranzen	69
4.3.1.4 Implementierung des Überprüfungsmechanismus für Form- und Lagetoleranzen in den Konstruktionsprozess.....	73
4.3.2 3D-modellbasierte Prozessplanung für die Einzelteilerfertigung	75
4.3.2.1 Optimierte Datenintegration und Datenverwaltung innerhalb der Fertigung und Qualitätssicherung	75
4.3.2.2 Elektronischer Sachmerkmalaustausch für Betriebs- und Fertigungshilfsmittel.....	77
4.3.2.3 Vorauswahl der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel auf Basis der Informationen im 3D-CAD-Modell.....	79
4.3.2.4 Optimierte Informationsbereitstellung in Form von Arbeitsvorgangmodellen für die Fertigung und Qualitätssicherung.....	82
4.3.2.5 3D-Visualisierung von Arbeitsvorgängen für Fertigungs- und Prüfaufträge.....	85
4.4 Fazit zur Methodenentwicklung für eine 3D-modellbasierte Arbeitsweise in der Fertigung	87
5 Validierung der Methode zur Erreichung eines 3D-modellbasierten Fertigungsansatzes.....	90
5.1 Gesamtstruktur der technischen Umsetzung der 3D-modellbasierten Arbeitsweise	90
5.2 Industrielles Anwendungsbeispiel zur Validierung der Methoden im Bereich der 3D-modellbasierten Arbeitsweise.....	93
5.3 Technische Umsetzung der Methoden zur 3D-modellbasierten Arbeitsweise	94
5.3.1 Eindeutige Identifikation der Produkt- und Fertigungsinformationen im 3D-CAD-Modell.....	94
5.3.1.1 Prototypische Implementierung der FII-Methode für den nativen 3D-Datenaustausch.....	95
5.3.1.2 Eindeutige Kennzeichnung der Produkt- und Fertigungsinformationen in CAD-neutralen Austauschformaten.....	97
5.3.1.3 Identifikation der eindeutig gekennzeichneten Produkt- und Fertigungsinformationen in CAx-Systemen.....	98
5.3.2 Semantisch korrekte Absicherung der Tolerierungen im 3D-CAD-Modell	101
5.3.2.1 Prototypische Implementierung des Überprüfungsalgorithmus	101
5.3.2.2 Vorstellung und Beschreibung der zu untersuchenden Testfälle	101
5.3.2.3 Überprüfung der semantischen Korrektheit von Toleranzspezifikationen im 3D-CAD-Modell.....	102

5.3.3	Prozessplanung auf Basis der Informationen im 3D-CAD-Modell.....	104
5.3.3.1	Vorstellung des Arbeitsvorgangsmodells	104
5.3.3.2	3D-modellbasierte Zuweisung von Mess- und Lehrmitteln	105
5.3.3.3	Direkte Messwerterfassung auf Basis der eindeutig gekennzeichneten Produkt- und Fertigungsinformationen	108
6	Diskussion und Fazit zu den Ergebnissen im Bereich der 3D-modellbasierten Arbeitsweise	111
7	Zusammenfassung und Ausblick	114
7.1	Zusammenfassung.....	114
7.2	Ausblick.....	116
	Literaturverzeichnis.....	118
	Anhang A.....	134

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktureller Aufbau der Dissertation	5
Abbildung 2: <i>Digital Twin</i> und <i>Digital Thread</i> als Bindeglied zwischen digitaler und realer Welt in Anlehnung an [37].....	10
Abbildung 3: Produktentstehungsprozess und Produktlebensphasen in Anlehnung an [41, S. 6].....	11
Abbildung 4: Technische Aktivitäten und unterstützende IT-Systeme in Teilbereichen des Produktentstehungsprozesses in Anlehnung an [42, S. 243] [44, S. 228].....	12
Abbildung 5: Arbeits- und Prüfplanung innerhalb der Arbeits- bzw. Produktionsvorbereitung in Anlehnung an [56].....	15
Abbildung 6: Beschreibung eines Messtasters nach DIN 4000-178 [70].....	18
Abbildung 7: Eingliederung der Qualitätssicherung in den industriellen Produktionsprozess in Anlehnung an [74].....	20
Abbildung 8: Geometrie eines Würfels nach der B-Rep-Methode in einer STEP-Datei in Anlehnung an [84].....	22
Abbildung 9: Unterschiedliche Designfeatures und Geometrieelemente am Beispiel einer Welle in Anlehnung an [76, S. 59–64].....	24
Abbildung 10: Informationsfeatures in Form von PMI am Beispiel einer Stirnradwelle.....	25
Abbildung 11: Attribute und Symbolik des Toleranzrahmens nach DIN EN ISO 1101 in Anlehnung an [101].....	26
Abbildung 12: Abhängigkeit der ID-Vergabe von der Modellierungstechnik und vom eingesetzten CAD-System.....	29
Abbildung 13: Schnittstellen und Beziehungen zwischen Lieferant und Kunde beim internen und externen Datenaustausch in Anlehnung an [113, S. 91–98].....	32
Abbildung 14: Direkte und indirekte Konvertierung beim 3D-CAD-Datenaustausch in Anlehnung an [125].....	34
Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung für den 3D-CAD-Datenaustausch entlang der CAD-CAQ-Prozesskette.....	36
Abbildung 16: Vernetzungsarchitektur der Datenverwaltungssysteme im Unternehmen in Anlehnung an [138, S. 86].....	38
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Forschungspotenziale zur Integration des 3D-CAD-Modells im Produktentstehungsprozess.....	42
Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung der PMI-Inhalte für Form- und Lagetoleranzen und deren potenzielle Nutzungsmöglichkeiten innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette.....	46

Abbildung 19: Schematische Darstellung der Hypothese für ein Konzept zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette.....	49
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Kommunikation auf Basis der eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette.....	50
Abbildung 21: Informationszusammenhänge und Eigenschaften der Geometrielemente und Features im 3D-CAD-Modell.....	51
Abbildung 22: Unterschiedliche FII-Ansätze zur eindeutigen und durchgängigen Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell.....	52
Abbildung 23: FII-Methode über FII-Informationsfeatures im 3D-CAD-Modell	53
Abbildung 24: FII-Methode über FII-Informationsfeatures beim Import des 3D-CAD-Modells in ein beliebiges CAx-System	54
Abbildung 25: FII-Methode über FII-Attribute auf PMI-Ebene im 3D-CAD-Modell.....	55
Abbildung 26: FII-Methode über FII-Attribute auf Part-Ebene im 3D-CAD-Modell	56
Abbildung 27: Kennzeichnung der PMI über FII-Attribute auf Part-Ebene mit PMI-Name und PMI-ID als Wert.....	56
Abbildung 28: FII-Methode über FII-Attribute auf PMI-Ebene beim Import des 3D-CAD-Modells in ein beliebiges CAx-System	57
Abbildung 29: Eindeutige Rückverfolgbarkeit der PMI-ID mittels FII-Wert innerhalb der Produktentstehung bei internen und externen Prozessen	58
Abbildung 30: Qualitative Einordnung unterschiedlicher Lösungsstrategien zum 3D-Datenaustausch in Anlehnung an [124, S. 27–31]	60
Abbildung 31: Schematischer Ablauf zur Gewährleistung einer eindeutigen Kennzeichnung der 3D-CAD-Modellinformationen in CAD-neutralen Austauschformaten.....	61
Abbildung 32: Abläufe bei der Ergänzung des STEP-AP242-Formats mit FII-Attributen.....	63
Abbildung 33: Konzept zur Anlage eines FII-Attributs innerhalb des STEP-AP242-Formats auf PMI-Ebene und auf Part-Ebene	64
Abbildung 34: Drei Teilbereiche des Ansatzes zur semantisch korrekten Absicherung der Angabe von Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell	66
Abbildung 35: Informationsmodell zur Klassifikation der Toleranzspezifikationen nach DIN EN ISO 1101	68
Abbildung 36: Ablauf des Überprüfungsalgorithmus für Form- und Lagetoleranzen nach DIN EN ISO 1101	69
Abbildung 37: Klassenspezifische Attribute und Aktivitäten des Überprüfungsalgorithmus bei der Toleranzspezifikation.....	70
Abbildung 38: Ablauf des Überprüfungsalgorithmus der Klasse AB.....	71

Abbildung 39: Interaktion zwischen Anwender und IT-Tool bei der 3D-CAD-Bauteiltolerierung mit rechnerunterstützten Überprüfungsalgorithmen.....	74
Abbildung 40: Zusammenwirken von PDM/FDM mit ERP und MOM in einem Fertigungsbetrieb	76
Abbildung 41: Beispielhafter Ablauf für den automatisierten Sachmerkmalimport für die optimierte Datenverwaltung der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel nach DIN 4000.....	78
Abbildung 42: Darstellung des Mapping-Ansatzes von den 3D-CAD-Modellinformationen des zu fertigenden Bauteils zu den Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln.....	80
Abbildung 43: Darstellung der Mapping-Ansätze von den Informationen im 3D-CAD-Modell zu den Fähigkeiten der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel	81
Abbildung 44: Darstellung der verschiedenen Arbeitsvorgangsmodelle zur Herstellung einer Stirnradwelle	83
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Informationsinhalte des 3D-CAD-Mastermodells und der jeweiligen Arbeitsvorgangsmodelle.....	84
Abbildung 46: Abläufe bei der 3D-CAD-basierten Prüfplanung und Messwerterfassung	86
Abbildung 47: Darstellung des Gesamtkonzepts zur Nutzung einer eindeutigen PMI-ID für eine Produkt- und Fertigungsinformation im Produktentstehungsprozess.....	88
Abbildung 48: Nutzung des 3D-CAD-Modells mit unterschiedlichen Dateiformaten in der Validierungsumgebung.....	91
Abbildung 49: Anwendungsbereiche unterschiedlicher 3D-CAD-Dateiformate im Produktentstehungsprozess	92
Abbildung 50: 3D-CAD-Darstellung der Stirnradwelle als Validierungsbeispiel.....	93
Abbildung 51: Darstellung der PMI mit einem FII-Attribut auf PMI-Ebene in <i>Siemens NX</i>	96
Abbildung 52: Darstellung der PMI mit FII-Attribute auf Part-Ebene unter der Kategorie <i>PMI</i> in <i>Siemens NX</i>	96
Abbildung 53: Auszug aus einem STEP-AP242-Protokoll mit den PMI-IDs aus dem CAD-Erzeugersystem <i>Siemens NX</i>	97
Abbildung 54: Darstellung der NX-PMI nach der Übertragung in das JT-Format mittels der FII-Methode.....	98
Abbildung 55: Erfolgreiche Übertragung der FII-Attribute aus dem CAD-Erzeugersystem <i>Siemens NX</i> nach dem Import des STEP-AP242-Files in <i>CATIA V5</i>	99
Abbildung 56: Darstellung der FII-Attribute aus dem CAD-Erzeugersystem <i>Siemens NX</i> nach dem Import des STEP-AP242-Formats in <i>ZEISS CALYPSO</i> (Entwicklungsversion).....	100
Abbildung 57: Vier Beispiele einer semantisch fehlerhaften und unvollständigen Definition von Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell.....	102

Abbildung 58: Darstellung der identifizierten Fehler bei der Toleranzspezifikation im 3D-CAD-Modell.....	103
Abbildung 59: Gegenüberstellung des 3D-CAD-Mastermodells und des Arbeitsvorgangsmodells für das Hartdrehen.....	104
Abbildung 60: Wellenabschnitt aus dem Arbeitsvorgangsmodell für das Hartdrehen mit gekennzeichneten Produkt- und Fertigungsinformationen.....	105
Abbildung 61: Exemplarische Darstellung der 3D-modellbasierten Planung einer Messeinrichtung zur Zylindrizitätsmessung am Wellenabsatz.....	108
Abbildung 62: Benutzeroberfläche der Q-App zur Kennzeichnung der qualitätskritischen Merkmale im 3D-CAD-Modell auf Basis der PMI-ID.....	109
Abbildung 63: Benutzeroberfläche der Q-App zur direkten Messwerterfassung zu den definierten CTQ-Merkmalen im 3D-CAD-Modell.....	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Fehlermeldungen im CAD-System zu den fehlerhaften Toleranzspezifikationen im Validierungsbeispiel aus Abbildung 57	103
Tabelle 2:	Zusammenfassung und Zusammenhänge der PMI für den Wellenabschnitt der Stirnradwelle aus Abbildung 60	106
Tabelle 3:	Übersicht zu den prüfschrittrelevanten Informationen zur Ausführung der geforderten Prüfaufgabe	107

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AP	<i>Application Protocol</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AVOM	Arbeitsvorgangsmodell
B-Rep	<i>Boundary Representation</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CAP	<i>Computer-Aided Planning</i>
CAQ	<i>Computer-Aided Quality Assurance</i>
CAX	allgemeiner Überbegriff für rechnergestützte Verfahren x-beliebiger Art
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
CSG	<i>Constructive Solid Geometry</i>
CTQ	<i>Critical To Quality</i>
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLL	<i>Dynamic Link Library</i> (Dateiformat)
DMU	<i>Digital Mock-Up</i>
DWG	<i>Drawing</i> (Dateiformat)
DXF	<i>Drawing Interchange File Format</i> (Dateiformat)
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FDM	<i>Factory Data Management</i>
FHM	Fertigungshilfsmittel
FII	<i>Functional Identification Information</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i> (Dateiformat)
ID	Identifikationsnummer
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i> (Dateiformat)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	Informationstechnologie
JT	<i>Jupiter Tessellation</i> (Dateiformat)
KI	künstliche Intelligenz

MBD	<i>Model-Based Definition</i>
MBE	<i>Model-Based Engineering</i>
MOM	<i>Manufacturing Operations Management</i>
MRL	<i>Manufacturing Resource Library</i>
OCR	<i>Optical Character Recognition</i>
PDM	<i>Product Data Management</i>
PDF	<i>Portable Document Format</i> (Dateiformat)
PEP	Produktentstehungsprozess
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
PMI	<i>Product and Manufacturing Information</i>
PNG	<i>Portable Network Graphics</i> (Dateiformat)
QMS	<i>Quality Management System</i>
QIF	<i>Quality Information Framework</i> (Dateiformat)
QR	<i>Quick Response</i>
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
SML	Sachmerkmaliste
STEP	<i>Standard for the Exchange of Product Model Data</i> (Dateiformat)
TDM	<i>Tool Data Management</i>
TIFF	<i>Tagged Image File Format</i> (Dateiformat)
UDA	<i>User-Defined Attribute</i>
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
XML	<i>Extensible Markup Language</i> (Dateiformat)

1 Einleitung

In diesem Kapitel werden zunächst die Ausgangssituation und die Problemstellung vorgestellt, um die Motivation zur Erstellung dieser Arbeit darzulegen. Im Anschluss wird auf Basis der Problemstellung die Zielsetzung abgeleitet. Abschließend werden der Aufbau und die Strukturierung der vorliegenden Dissertation sowie die inhaltlichen Schwerpunkte der einzelnen Kapitel kurz erläutert.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Produktions- und Fertigungsunternehmen sind bestrebt, ihre Prozess- und Produktqualität beständig weiter zu verbessern, um sich am Markt zu behaupten [1]. Sie sind aufgefordert ihre Planungszeiten zu verkürzen, ihre Produktvielfalt zu steigern und gleichzeitig ihre Kosten zu senken [2]. Diese – einander meist widersprechenden Ziele – können durch die Nutzung digitaler Methoden erreicht werden, weshalb auch der Einsatz digitaler Informationsträger verstärkt in den Fokus produzierender Unternehmen rückt [3] [4] [5].

Im Bereich der 3D-CAD-basierten Produktentwicklung (CAD: *Computer-Aided Design*) existieren digitale Informationsträger bereits in Form von 3D-CAD-Modellen. Wo vor einigen Jahren Produktinformationen lediglich auf 2D-Zeichnungen und Zusatzdokumenten zu finden waren, werden fertigungs- und qualitätsrelevante Informationen zu einem Produkt, z. B. Maß-, Form- und Lagetoleranzen oder auch Werkstoffdaten, oftmals direkt 3D-CAD-Modellen zugeordnet [6]. Dies wird durch die Verwendung von Produkt- und Fertigungsinformationen (engl.: *Product and Manufacturing Information*, PMI) erreicht. Diese Informationen verhelfen zu einer integrierten und verbesserten Kommunikation gegenüber der herkömmlichen zeichnungsbasierten Arbeitsweise und fördern die Nutzung von 3D-CAD-Informationsmodellen als etabliertes Kommunikationsmittel zwischen Produktentwicklung und Fertigung [7]. Die 3D-modellbasierte Arbeitsweise wird in vielen Firmen bereits erfolgreich für die automatisierte CNC-Werkzeugmaschinenprogrammierung (CNC: *Computerized Numerical Control*) eingesetzt und gewährleistet dort schnellere, günstigere und qualitativ hochwertigere Fertigungsprozesse gegenüber der zeichnungsbasierten Methode.

Trotz der bereits erzielten Fortschritte wird die 3D-CAD-basierte Arbeitsweise in Unternehmen bislang noch unzureichend genutzt. Das 3D-CAD-Modell dient hier zumeist als sekundärer Informationsträger zur Visualisierung der Bauteilgeometrie [8]. Zweidimensionale Zeichnungen sowie textbasierte Zusatzdokumente sind noch immer die führenden Elemente zur Beschreibung von Produktspezifikationen und zur Steuerung nachgelagerter Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozesse, z. B. der Arbeits- und Prüfplanung oder der Programmierung von Koordinatenmessgeräten [7].

Nichtgeometrische Informationen, wie Maß-, Form- und Lagetoleranzen oder Oberflächenangaben werden unter Zuhilfenahme verschiedener 2D-Ansichten und

2D-Schnitte meist manuell auf der 2D-Zeichnung erzeugt. Die auf Basis des 3D-CAD-Modells erstellten 2D-Zeichnungen werden anschließend ausgedruckt und im Unternehmen verteilt. Nachträgliche Veränderungen am 3D-CAD-Modell erfordern die Aktualisierung der 2D-Zeichnungen, was zur Auslösung eines erneuten Druck- und Verteilungsprozesses führt. Diese wiederkehrenden Abläufe sind zeitintensiv, arbeitsaufwendig und kostspielig. Auch führt die Vielzahl der Fertigungsinformationen auf der 2D-Zeichnung zu Unübersichtlichkeit und häufig zu Überforderung bei den Werkern in der Fertigung [9]. Individuelle Interpretations- und Kommunikationsfehler sowie die Suche nach gesonderten Informationen zum jeweiligen Fertigungsschritt hemmen die Produktivität der Unternehmen [10].

Mit der Verwendung der 2D-Zeichnung gehen zudem entscheidende Zusammenhänge zwischen den geometrischen und funktionalen Anforderungen des zu fertigenden Bauteils verloren, sodass die direkte und automatische Ableitung von Arbeits- und Prüfvorgängen auf Basis des 3D-CAD-Modells nicht realisiert werden kann. Die Auswahl von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln zur Ausführung von Fertigungs- und Messaufgaben erfolgt individuell und losgelöst von den Produkt- und Fertigungsinformationen im 3D-CAD-Modell. Auch die direkte Rückverfolgbarkeit der im weiteren Verlauf ermittelten bauteilbezogenen Prozess- und Qualitätsdaten ist aufgrund von Informationsverlusten nicht mehr möglich und führt zum Bruch innerhalb der Prozesskette [11]. Aufwendige individuelle und zumeist abgekoppelte Prozesse zur Schließung dieser Lücke sind erforderlich, um die bei der Messung erfassten realen Bauteildaten aus der Qualitätssicherung den entsprechenden Elementen im 3D-CAD-Modell eindeutig zuordnen zu können. [12] [13]

Die Ursache für den Medienbruch zwischen dem 3D-CAD-Modell und der 2D-Zeichnung wird häufig mit den bestehenden Herausforderungen im Produktdatenaustausch begründet [14]. Unterschiedliche Systemschnittstellen, softwarespezifische Insellösungen sowie die Vielzahl von CAx-Softwareherstellern, Datenformaten und Modellierkernen (z. B. im CAD-Umfeld) sorgen für eine heterogene Anwenderumgebung, die den Datenaustausch der 3D-CAD-Modelle erschwert [15] [16, S. 22]. Steigt die Anzahl der Schnittstellen, erhöhen sich auch die Anzahl möglicher Fehlerquellen und das Risiko des Auftretens unterschiedlicher Fehlermöglichkeiten. Dieses Problem wird neben dem abteilungsübergreifenden Datenaustausch zudem beim unternehmensübergreifenden Datenaustausch mit Lieferanten festgestellt [17, S. 12–20]. Bei der Übertragung der 3D-CAD-Modelle geht heute meist die ursprüngliche Kennzeichnung der geometrischen und nichtgeometrischen Informationen aus dem Erzeugersystem verloren [11]. Eine einheitliche Kommunikationsbasis zwischen den verschiedenen Lieferanten und den beauftragten Unternehmensbereichen besteht somit nicht mehr. Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Datenanalysen haben gezeigt, dass auch der Ansatz zur Umwandlung der nativen CAD-Dateiformate in CAD-neutrale Austauschformate, z. B. nach ISO 10303 (*Standard for the Exchange of Product Model Data*, STEP) oder nach ISO 14306 (*Jupiter Tessellation*, JT), das Problem der fehlenden Eindeutigkeit nicht löst.

Ein weiterer Grund für den Medienbruch ist die teils unzureichende Sicherstellung der semantischen Qualität der geometrischen Toleranzen und der Produktspezifikationen im 3D-CAD-Modell. Obwohl 3D-CAD-Modelle bereits seit den 1990er-Jahren eingesetzt werden, existiert bis heute kein etabliertes Format bzw. Dokument für die normgerechte und semantisch korrekte 3D-CAD-Produktdefinition. Toleranzspezifikationen, die nach DIN EN ISO 1101 definiert sind, sind innerhalb der Norm lediglich in textueller Form für die menschliche Interpretation beschrieben und beziehen sich deshalb ausschließlich auf die Anwendung in 2D-Zeichnungen [18].

Auch die Anforderungen, die nach ISO 16792 an die 3D-CAD-Produktdefinition gestellt werden, beinhalten überwiegend Praktiken, die lediglich vom zweidimensionalen auf den dreidimensionalen Raum übertragen werden. Spezielle Normen und Regeln für die korrekte 3D-CAD-Bauteildefinition anhand von Produkt- und Fertigungsinformationen bestehen bisher nicht. Syntaktische und semantische Fehler, die während der 3D-CAD-Bauteildefinition entstehen, werden unbemerkt an Folgesysteme und Anwender übergeben und nur spät erkannt oder bleiben gänzlich unentdeckt. Die Weitergabe unvollständiger, fehler- und lückenhafter Informationen führt z. B. häufig zu Interpretationsproblemen in nachgelagerten CAQ-Systemen (CAQ: *Computer-Aided Quality Assurance*) zur automatischen Messprogrammgenerierung [13]. Hoher Änderungsaufwand und hohe Kosten sind die Folge [19, S. 15] [20, S. 892].

Die bestehenden Herausforderungen beeinträchtigen nicht nur die Prozessqualität, sondern hemmen auch die Mitarbeiterakzeptanz des 3D-CAD-Modells als führende Informationsquelle in der Fertigung. Die Umstellung auf neue Arbeitsmethoden sowie die Integration der Digitalisierung in die Bereiche der Fertigung und der bauteilbezogenen Qualitätssicherung werden erschwert [9].

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, die die durchgängige Nutzung des 3D-CAD-Modells als einzige und führende Informationsquelle von der Produktentwicklung über die Fertigung bis hin zur Qualitätssicherung unterstützt. Die überwiegend zeichnungsbasierte Arbeitsweise soll durch die 3D-modellbasierte Arbeitsweise abgelöst werden, um den Produktentstehungsprozess transparenter, weniger fehleranfällig, schneller und somit effizienter zu machen. Die bestehenden Herausforderungen bei der 3D-CAD-Bauteildefinition und die existierenden Kommunikationsbarrieren nach dem Transfer der 3D-CAD-Modellinformationen sind zu beheben.

Zur Gewährleistung einer eindeutigen Kommunikation ist eine einheitliche Sprache erforderlich, die von allen Beteiligten gleichermaßen interpretiert und verarbeitet werden kann. Dies ist auf zwischenmenschlicher und auf informationstechnischer Ebene gleichbedeutend erforderlich. Mit den methodischen Ansätzen dieser Arbeit soll diese Eindeutigkeit im Bereich der 3D-modellbasierten Arbeitsweise über die eindeutige Kennzeichnung der produkt- und fertigungsrelevanten Informationen im 3D-CAD-Modell

als eindeutiges Identifikationsmerkmal geschaffen werden. Die eindeutige Identifikation der 3D-CAD-Bauteilinformationen muss sowohl nach dem internen als auch nach dem externen Datenaustausch garantiert sein, um Zeit und Kosten bei der Suche nach Produktions- und Fertigungsfehlern einsparen zu können.

Mit der eindeutigen Rückverfolgbarkeit der 3D-CAD-Modellinformationen sollen bauteilbezogene Daten aus der Fertigung und der Qualitätssicherung den geometrischen und nichtgeometrischen Elementen aus der Konstruktion automatisch zugeordnet werden können. Treten Abweichungen von der geforderten Fertigungstoleranz auf, können mögliche Einflussfaktoren seitens der Fertigung oder der Bauteildefinition aufgedeckt und notwendige Maßnahmen zur Korrektur in Echtzeit eingeleitet werden. Die Vielzahl der unterschiedlichen am Markt existierenden CAX-Systeme erfordert diese Eindeutigkeit auch beim Einsatz neutraler Austauschformate.

Zur Gewährleistung einer durchgängigen 3D-CAD-Prozesskette sind semantisch korrekte Toleranzangaben im 3D-CAD-Modell erforderlich. Diese sind bereits bei der Produktdefinition zu überprüfen, um die Maschinenlesbarkeit der Informationen im 3D-CAD-Modell für nachfolgende Prozess- und Arbeitsschritte zu gewährleisten. Hierzu ist ein Untersuchungsmechanismus im CAD-System zu entwickeln, der die Produkt- und Fertigungsinformationen, z. B. Form- und Lagetoleranzen, auf ihre Vollständigkeit, Widerspruchsfreiheit und Eindeutigkeit überprüft. Individuelle Überprüfungsprotokolle auf Basis zweidimensional ausgelegter Normen und Praktiken entfallen somit an der Schnittstelle zwischen dem CAD-System und den nachfolgenden CAX-Systemen. Die frühzeitige Erkennung fehlerhafter Produktanforderungen sichert den Konstrukteur bei der Bauteildefinition ab, schützt vor aufwendigen Änderungsprozessen und sorgt für die Einsparung menschlicher, materieller und finanzieller Ressourcen.

Neben der eindeutigen Identifikation der Bauteilinformationen und der Absicherung semantisch korrekter Produkt- und Fertigungsinformationen sollen in dieser Arbeit neue Ansätze zur 3D-CAD-basierten Arbeits- und Prüfplanung entwickelt werden. Das Ziel ist die Ablösung individueller Planungs- und Entscheidungsprozesse auf Basis von Erfahrungswissen durch die semantischen Informationen im 3D-CAD-Modell. Betriebs- und Fertigungshilfsmittel können folglich automatisch auf Grundlage der Anforderungen aus den Informationen im 3D-CAD-Modell ausgewählt, beschafft und den jeweiligen Prozessschritten zur Verfügung gestellt werden.

Zusammengefasst sollen im Rahmen der vorliegenden Dissertation folgende zentrale Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie sind produkt- und fertigungsrelevante Informationen im 3D-CAD-Modell zu kennzeichnen, damit sie eindeutig im Produktentstehungsprozess identifiziert werden können?
- Wie kann die Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen systemneutral, also unabhängig von den eingesetzten IT-Lösungen, für den internen und externen Datenaustausch gewährleistet werden?

- Wie kann die semantisch korrekte Tolerierung im 3D-CAD-Modell sichergestellt werden, um die 3D-CAD-Modellinformationen maschinenlesbar für nachfolgende Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozesse nutzen zu können?
- Wie kann die automatische Zuweisung von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln basierend auf den Informationen im 3D-CAD-Modell realisiert werden?

Durch die Beantwortung dieser Fragestellungen wird die Akzeptanz digital gestützter Arbeitsweisen in fertigenden Unternehmen gefördert. Die entwickelten Methoden sollen die Ängste und Zweifel der Mitarbeiter bezüglich der Veränderungen in der digitalen Arbeitswelt nehmen und die Nutzung des 3D-CAD-Modells als Informationsträger in der Fertigung und der Qualitätssicherung fördern. Auch sollen die entwickelten Methoden als Ausgangsbasis für den Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) auf Fertigungsebene dienen. Mit einer durchgängigen 3D-modellbasierten Arbeitsweise wird dazu ein wesentlicher Beitrag geleistet.

1.3 Aufbau der Dissertation

Aufbauend auf den im vorangegangenen Abschnitt 1.2 erörterten wissenschaftlichen Fragestellungen ist die vorliegende Dissertation in sieben Kapitel gegliedert (siehe Abbildung 1).

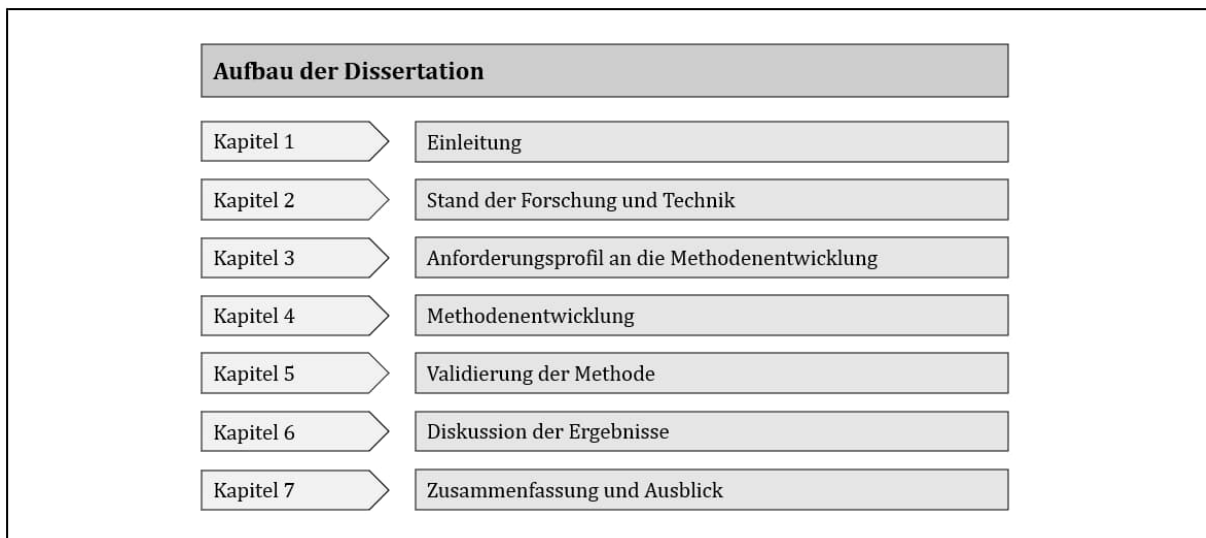


Abbildung 1: Struktureller Aufbau der Dissertation

Nach der Schilderung der Ausgangssituation, der Problemstellung und der Zielsetzung folgt die Darlegung des Standes der Technik, auf dem die Methodenentwicklung für den eindeutigen und durchgängigen Informationstransfer innerhalb des 3D-CAD-basierten Produktentstehungsprozesses aufbaut. Hier werden zunächst zentrale Begriffsdefinitionen zur Integration des 3D-CAD-Modells als Informationsträger in der Fertigung festgelegt und grundlegende Aspekte zum digitalen Wandel in Bezug auf den Digital-Twin-Ansatz beschrieben. Anschließend werden die Abläufe innerhalb der virtuellen Produktentstehung und die Prozessabläufe in den einzelnen Teilbereichen

erläutert. Weiterhin werden die Grundlagen der 3D-modellbasierten Arbeitsweise dargelegt und bereits bestehende Ansätze und IT-Software-Tools zum eindeutigen und durchgängigen Informationstransfer aufgezeigt. Im letzten Teil des zweiten Kapitels werden bestehende Datenformate und Schnittstellen sowie die für den Datenaustausch notwendigen Datenverwaltungssysteme im Bereich der 3D-CAD-basierten Fertigung beschrieben. Schließlich wird ein Fazit zu den aktuellen Lösungen und Vorgehensweisen gezogen.

Im dritten Kapitel wird das Anforderungsprofil an die zu entwickelnden Methoden erläutert. Es ergibt sich aus der einleitend beschriebenen Problemstellung und dem derzeitigen Stand der Forschung und Technik. Die konkreten Anforderungen an das Gesamtkonzept, die beteiligten Systeme, die CAx-Software und die IT-Schnittstellen sowie die 3D-CAD-Modelle und die prozessbeteiligten Akteure werden definiert.

Im vierten Kapitel wird die Methode der vorliegenden Dissertation beschrieben. Im ersten Teil wird das Konzept zur eindeutigen Rückverfolgbarkeit der 3D-CAD-Modellinformationen im Produktentstehungsprozess erläutert. Neben der eindeutigen Kennzeichnung der Produkt- und Fertigungsinformationen im CAD-Erzeugersystem werden neue Ansätze zur systemneutralen Umsetzung der Methode entwickelt. Im zweiten Abschnitt des vierten Kapitels werden verschiedene Methoden erarbeitet, die die Durchgängigkeit der 3D-Prozesskette auf Basis neuer Arbeitsmethoden fördern und die digital gestützte Automatisierung der Planungs- und Fertigungsprozesse unterstützen. Neben der Entwicklung einer generischen Methode zur automatisierten Absicherung der 3D-CAD-Bauteiltolerierung, werden neue Vorgehensweisen zur 3D-CAD-basierten Arbeitsweise definiert. Ansätze zur optimierten Informationsbereitstellung für den Werker in der Fertigung sowie die 3D-CAD-basierte Auswahl von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln schließen das Kapitel ab.

Im fünften Kapitel erfolgt die Validierung des Gesamtkonzepts von der Konstruktion über die Arbeitsvorbereitung und Fertigung bis zur Qualitätssicherung. Der Fokus liegt auf 3D-CAD-basierten Prüfprozessen im Bereich der manuellen und taktilen Messverfahren innerhalb der Qualitätssicherung. Die ausgearbeiteten Methoden werden auf ein industrielles Anwendungsbeispiel übertragen und auf ihre Wirksamkeit und Tragfähigkeit geprüft. Hier wird zudem die werksübergreifende Verwendung der Methode für ein funktionsfähiges Fabrikdatenmanagement thematisiert.

Im sechsten Kapitel werden die entwickelten Methoden unter Berücksichtigung der industriellen Verwendbarkeit diskutiert. Zudem werden identifizierte Lücken im Gesamtprozess erörtert und mit den Anforderungen aus dem dritten Kapitel abgeglichen. Erweiterte Anwendungsfelder werden in Betracht gezogen und neue Forschungsfelder im Bereich der 3D-CAD-Produktmodellierung thematisiert.

Den Abschluss dieser Arbeit bilden die Zusammenfassung und ein Ausblick auf potenzielle Forschungsschwerpunkte hinsichtlich des Ausbaus der Digitalisierung in der Fertigung.

2 Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung und Technik beschrieben, der für den Forschungsinhalt dieser Arbeit grundlegend ist. Neben relevanten Begriffsdefinitionen werden derzeit bestehende Methoden und Vorgehensweisen innerhalb der industriellen Fertigung und Qualitätssicherung erläutert und Modellierungsgrundlagen für die 3D-CAD-basierte Arbeitsweise dargestellt. Im weiteren Verlauf wird der aktuelle Stand zum 3D-CAD-Datenaustausch beschrieben, und die existierenden Forschungslücken aus den bisher publizierten wissenschaftlichen Arbeiten werden abgeleitet, um die Notwendigkeit der Erstellung dieser Arbeit zu belegen.

2.1 Relevante Begriffsdefinitionen zur Integration des 3D-CAD-Modells als Informationsträger in der Fertigung

Bereits im einleitenden Kapitel dieser Arbeit werden einige Begriffe genannt, die für das Verständnis des ausgearbeiteten Gesamtkonzepts grundlegend sind. Diese Begrifflichkeiten werden in diesem Abschnitt erläutert und für den weiteren Verlauf dieser Arbeit definiert.

Durchgängiges digitales Engineering ist eines der wesentlichen Charakteristika der vierten industriellen Revolution. Durchgängigkeit beschreibt in diesem Kontext nicht nur die rein physische Vernetzung aller Wertschöpfungsprozesse, sondern darüber hinaus auch die verlustfreie Verknüpfung der zugehörigen Daten und Datenflüsse über bestehende Schnittstellen hinweg. Mit der Gewährleistung der Durchgängigkeit werden diese Verknüpfungen bzw. Vernetzungen über den gesamten Lebenszyklus von Bauteilen, Produkten, Anlagen und Prozesse garantiert. [21]

In Anlehnung an [21] ist *Durchgängigkeit* in dieser Arbeit definiert als:

... Eigenschaft, bei der ausgehend von der Produktdefinition alle Prozesse im gesamten Lebenszyklus eines Produkts bzw. Bauteils eindeutig auf die Informationen im 3D-CAD-Modell zurückgeführt werden können.

Der interne und der externe Datenaustausch spielen im industriellen Umfeld und im Kontext dieser Arbeit eine wesentliche Rolle. Demzufolge ist eine systemneutrale Auslegung der Methoden zu berücksichtigen. Systemneutralität beinhaltet die softwareunabhängige Gewährleistung einer eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen beim 3D-CAD-Datenaustausch [22].

In Anlehnung an [22] ist *Systemneutralität* in dieser Arbeit definiert als:

... Eigenschaft, die die unternehmensübergreifende und softwareunabhängige Anwendbarkeit der Methoden ausgehend von der Produktdefinition bis zur Endabnahme beim Kunden beschreibt.

Für den elektronischen Datenaustausch ist eine eindeutige Identifikation der Produkt- und Prozessdaten grundlegend [23]. Sie ist die Basis für eine fehlerfreie Kommunikation auf interner und externer Geschäfts- bzw. Unternehmensebene. Zur Generierung der mit dieser Arbeit angestrebten automatischen Rückverfolgbarkeit der erfassten Daten aus der Fertigung und Qualitätssicherung bis zur Produktdefinition ist eine eindeutige Kennzeichnung der Informationen im 3D-CAD-Modell erforderlich [11].

In Anlehnung an [11] ist *Eindeutigkeit* in dieser Arbeit definiert als:

... Eigenschaft, bei der die erfassten Produkt- und Prozessinformationen direkt und unmissverständlich den entsprechenden geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im 3D-CAD-Modell zugeordnet werden können.

Zur Gewährleistung einer durchgängigen Prozesskette sowie einer systemneutralen und eindeutigen Merkmalsidentifikation ist es erforderlich, dass die zu transferierenden Informationen maschinenlesbar vom 3D-CAD-Modell bereitgestellt werden. Informationen sind maschinenlesbar, wenn sie auf eine bestimmte Art und Weise bzw. nach definierten Vorgaben bereitgestellt und programmiertechnisch ausgelesen und weiterverarbeitet werden können [12, S. 30–31]. Die rein visuelle Auswertung von Informationen durch den Menschen, wie sie beispielsweise anhand von 2D-Zeichnungen möglich ist, wird mit der maschinenlesbaren Informationsbereitstellung abgelöst bzw. um diese erweitert. Informationen können maschinenlesbar sein, aber dennoch keinen Sinn ergeben. Die Voraussetzung zur Übertragung einer sinnhaften Information ist die semantisch korrekte Definition der Anforderungen. Die Semantik umfasst die Beziehung zwischen Zeichen (Syntax) und deren Bedeutung [24]. Im Kontext dieser Arbeit bildet die sinnhafte Kombination der Produkt- und Fertigungsinformationen mit den referenzierten 3D-CAD-Geometrieelementen die Voraussetzung für die Maschinenlesbarkeit und zugleich für die Verarbeitbarkeit der Informationen.

In Anlehnung an [12] ist *Maschinenlesbarkeit* in dieser Arbeit definiert als:

... Eigenschaft, bei der die Informationsbereitstellung syntaktisch und semantisch so konzipiert ist, dass die 3D-CAD-Informationen von Maschinen interpretiert und programmiertechnisch weiterverwendet werden können.

2.2 Digitaler Wandel im industriellen Arbeitsumfeld

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen und die bereits bestehenden Ansätze zur Integration des digitalen Wandels innerhalb der Fertigung dargelegt. Begriffe wie *Industrie 4.0*, *Digitalisierung*, *Virtual Twin*, *Digital Twin* und *Digital Thread* werden beschrieben, und deren Bedeutungen für die Forschungsschwerpunkte dieser Dissertation werden näher erläutert.

2.2.1 Industrie 4.0 und Digitalisierung

In der Industrie 4.0 geht es um die Nutzung digitaler Informations- und Kommunikationssysteme zur Gewährleistung einer flexiblen und weitgehend autonomen Güterproduktion [25]. Hierbei kommt es zunehmend zur Verschmelzung der physikalischen und virtuellen Welt, um alle wertschöpfungs- und fertigungsrelevanten Informationen in Echtzeit zur Verfügung stellen zu können [26] [27].

Die Digitalisierung interner Unternehmensprozesse und die damit verbundene digitale Vernetzung von Mensch, Maschine, Produkt und IT-System ist grundlegend für den Erfolg des digitalen Wandels. Zur Erreichung dieser digitalen Vernetzung sind Standards erforderlich, die häufig als Basis für eine erfolgreiche Digitalisierung angesehen werden [28]. Grundlegend ist zudem die Erfassung, Auswertung und Reaktion auf die sich stetig anhäufenden Daten [29]. Die erfassten Daten sind zu synthetisieren und mit einem semantisch korrekten Kontext zu versehen, um aus den Daten verwertbare Informationen generieren zu können [30]. Diese sind im Anschluss fehlerfrei und lückenlos an Folgeprozesse zu übertragen, um bessere Vorhersagen im Fertigungsumfeld zu ermöglichen und die automatische Weiterentwicklung von Prozessen steuern zu können [21].

2.2.2 Virtual Twin, Digital Twin und Digital Thread

Die Ansätze *Virtual Twin*, *Digital Twin* und *Digital Thread* ermöglichen gemeinsam neue Strategien zur Bewertung und Analyse von Methoden, Prozessen und Produktkonzepten in einer virtuellen Umgebung [31] [32]. Beim Ansatz *Virtual Twin* (dt.: virtueller Zwilling) wird das reale Bauteil, das reale Produkt oder die reale Produktionsstätte auf virtueller Ebene in Gestalt eines 3D-CAD-Modells nachgebildet. Anhand des virtuellen Zwillings kann der Herstellungsprozess bereits vor der Fertigung des realen Bauteils simuliert und analysiert werden, und mögliche Schwachstellen können optimiert werden [33]. [34]

Der Ansatz *Digital Twin* (dt.: digitaler Zwilling) beschreibt die digitale Repräsentation einer Produktinstanz oder eines Systems, z. B. Merkmale, Verhalten oder Zustände von Maschinen, Steuerungen oder Arbeitsabläufen [32]. Der digitale Zwilling ist in der Lage, die entsprechenden Daten der zugehörigen Produktinstanz zu erfassen, zu speichern, zu verarbeiten und für Folgeprozesse bereitzustellen [35]. Durch Anreicherung des 3D-CAD-Modells mit den Produkt- und Prozessdaten entsteht aus dem virtuellen Zwilling der digitale Zwilling. [34]

Der Ansatz *Digital Thread* (dt.: digitaler Faden) beschreibt die Aufzeichnung der Lebenszeit eines Produkts oder Systems von seiner Entstehung bis zu seiner Beseitigung (siehe Abbildung 2). Mit diesem Ansatz entsteht ein universeller Zugriff auf verkettete Datenmengen im Produktlebenszyklus, und es wird die durchgängige Kopplung und Homogenität zwischen unterschiedlichen Prozessschritten gewährleistet [36]. [34]

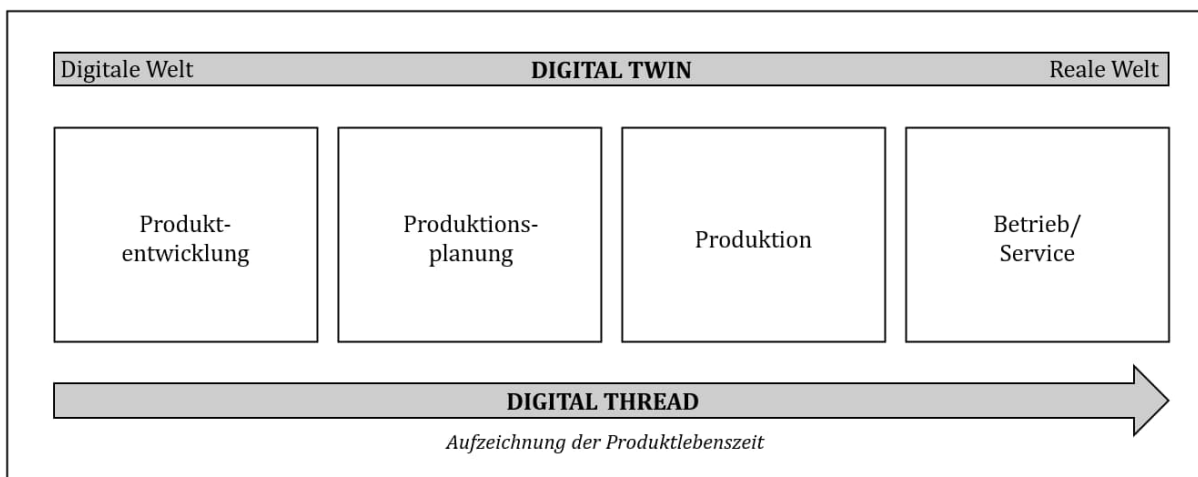


Abbildung 2: *Digital Twin* und *Digital Thread* als Bindeglied zwischen digitaler und realer Welt in Anlehnung an [37]

Mit dem digitalen Faden eines Produkts oder Bauteils wird die Rückverfolgbarkeit der Daten über die gesamte Lebensdauer eines Produkts von der Konstruktion bis hin zum Service sichergestellt [36] [38]. Der digitale Faden verbindet alle Fähigkeiten des digitalen Zwillings, z. B. Entwürfe, Leistungsdaten, Produktdaten, Lieferkettendaten und Software, die in die Erstellung des Produkts einfließen. Er ermöglicht in Kombination mit dem digitalen Zwilling die Erfassung von Konstruktionsanforderungen, Aufzeichnungen und allen prozessbeteiligten Daten zu einem Produkt oder Bauteil. Beide Ansätze unterstützen bei der Erstellung und Optimierung sowohl physischer als auch digitaler Prozesse über die gesamte Produktwertschöpfungskette hinweg. Weicht beispielsweise ein Bauteil bei der Qualitätsinspektion von den geforderten Soll-Werten ab, kann mithilfe des digitalen Fadens die Ursache dafür identifiziert werden. Die Einführung des digitalen Fadens ermöglicht somit die kontrollierte Analyse von Daten während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts. Diese Daten werden zu wertvollen Informationen verarbeitet und zu Optimierungszwecken verwendet. [34] [39]

Die Ansätze *Virtual Twin*, *Digital Twin* und *Digital Thread* gewinnen in den Bereichen der digitalen Fertigung und den cyber-physischen Systemen zunehmend an Bedeutung.

2.3 3D-CAD-basierte Prozesskette im Produktentstehungsprozess

In diesem Abschnitt werden der Produktentstehungsprozess und dessen Eingliederung in den Produktlebenszyklus festgelegt. Unterstützende IT-Systeme, deren Bedeutung und aktuell bestehende Herausforderungen in Bezug auf die 3D-CAD-basierte Prozesskette werden erläutert. Die einzelnen Phasen der Produktentstehung werden dargestellt, und die Prozessabläufe innerhalb der Teilbereiche werden beschrieben.

2.3.1 Einordnung des Produktentstehungsprozesses in den Produktlebenszyklus

Von der Produktidee und der Produktplanung bis zur Entsorgung durchläuft ein Produkt bzw. Bauteil unterschiedliche Produktlebensphasen. In der Literatur wird dies häufig als Produktlebenszyklus beschrieben. Innerhalb dieser Phasen wird das Produkt durch unterschiedliche Unternehmensprozesse beeinflusst (siehe Abbildung 3) [40, S. 3].

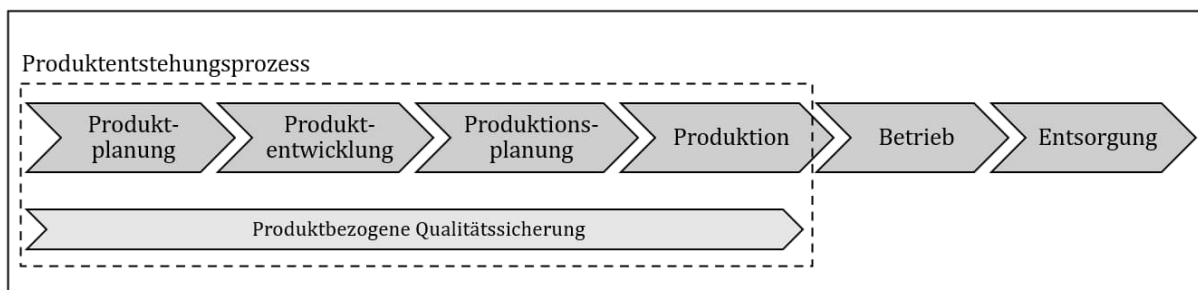


Abbildung 3: Produktentstehungsprozess und Produktlebensphasen in Anlehnung an [41, S. 6]

Nach Hehenberger [41] beginnt der Produktlebenszyklus mit der Produktplanung. Die Produktplanung umfasst alle Tätigkeitsbereiche von der Anforderungsdefinition bis zu den ersten Ideen und Entwürfen zu einem Produkt. In der Produktentwicklung werden diese anschließend konkretisiert und abgesichert, das heißt, 3D-CAD-Modelle, 2D-Zeichnungen und Stücklisten werden in dieser Phase erstellt und dienen als Informationsträger für nachfolgende Produktlebensphasen. Nach der Produktplanung und der Produktentwicklung folgen die Produktionsplanung und die Produktion. Innerhalb der Produktionsplanung werden die Voraussetzungen für die Produktion getroffen. Diese umfasst alle organisatorischen und logistischen Maßnahmen, die im Vorfeld der Produktion vorzunehmen sind. Typische Bestandteile dieser Phase sind die Erstellung von Arbeitsplänen, Prüfplänen und CNC-Programmen sowie die logistischen Planungen und die Bereitstellung aller notwendigen Fertigungsressourcen, z. B. von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln. Zur Produktionsphase gehören die Fertigung und die Montage. Über den Vertrieb gelangt das gefertigte Produkt schließlich in den Betrieb bzw. in die Nutzung. Zuletzt erfolgt die Entsorgung. [40, S. 8] [41, S. 6-7] [42]

Der Produktentstehungsprozess (PEP) ist nach Sendler [43, S. 8] eine Teilmenge des Produktlebenszyklus. Er umfasst die Produktplanung, die Produktentwicklung, die Produktionsplanung und die Produktion. Zur Einhaltung der geforderten Produktqualität sind zusätzlich parallel stattfindende Qualitätssicherungsprozesse im kompletten PEP erforderlich (siehe Abbildung 3). Einzelheiten hierzu werden in Abschnitt 2.4.4 erläutert.

2.3.2 3D-CAD-basierte Prozesskette und unterstützende CAx-Systeme

Der Einsatz von CAx-Systemen wird mit der Integration getrennter Funktionsbereiche und der Schaffung eines durchgängigen Informationsflusses zwischen den unterschiedlichen Teilbereichen in einem Unternehmen begründet [11] [14]. Mit der Unterstützung durch die IT-Systeme werden potenzielle Fehlentwicklungen im

Produktentstehungsprozess früher erkannt und können anschließend mit geringem Aufwand beseitigt werden [30, S. 18]. Neben den CAD-Systemen (CAD: *Computer-Aided Design*) im konstruktiven, den CAP-Systemen (CAP: *Computer-Aided Planning*) im planungstechnischen sowie den CAM-Systemen (CAM: *Computer-Aided Manufacturing*) im fertigungstechnischen Bereich, haben sich im Qualitätssektor die CAQ-Systeme (CAQ: *Computer-Aided Quality Assurance*) etabliert [11]. Zur vereinfachten Visualisierung ist die Qualitätssicherung in Abbildung 4 ausschließlich der Produktionsphase zugeordnet. In der Realität erstreckt sie sich über den kompletten Produktentstehungsprozess (siehe Abbildung 3). Die Grundlage für die rechnerunterstützte Programmablaufgenerierung zur Steuerung der CNC-Werkzeugmaschinen und Koordinatenmessgeräte bildet neben der 2D-Zeichnung vermehrt auch das 3D-CAD-Modell des zu fertigenden Produkts [41, S. 123].

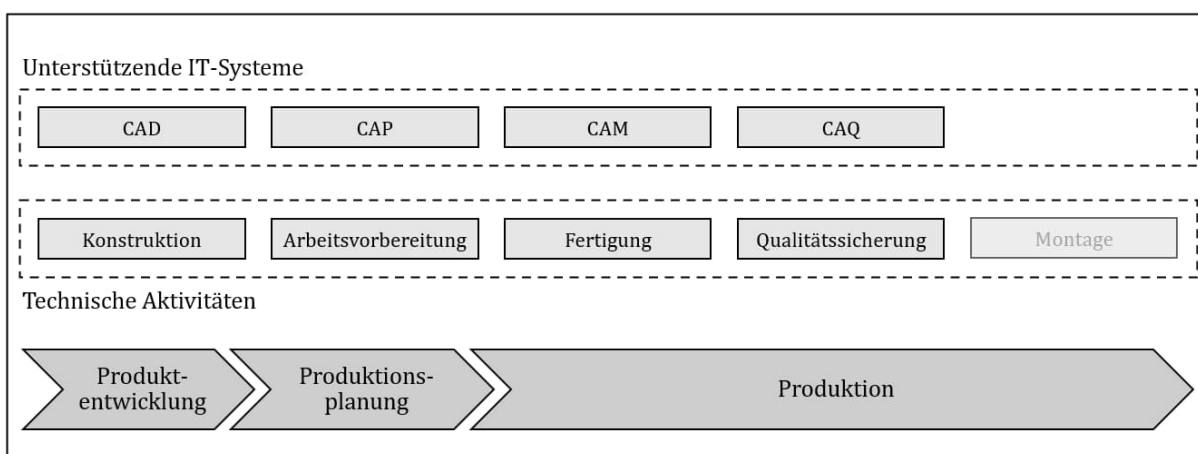


Abbildung 4: Technische Aktivitäten und unterstützende IT-Systeme in Teilbereichen des Produktentstehungsprozesses in Anlehnung an [42, S. 243] [44, S. 228]

Computer-Aided Design (CAD) kommt überwiegend in den Phasen der Produktplanung und der Produktentwicklung zum Einsatz. Hier werden aus zweidimensionalen Skizzen anhand systeminterner Operationen, z. B. durch Extrusion, dreidimensionale Körper generiert. Die feature-basierte Modellierung ist für eine semantisch korrekte Produktdefinition von fundamentaler Bedeutung und gewinnt aufgrund dessen im Bereich der digitalen Fabrik zunehmend an Bedeutung. Features bilden die Grundlage für die Kommunikation zwischen den unterschiedlichen CAx-Systemen, da sie neben geometrischen Produkthanforderungen auch anwendungs- und unternehmensspezifische Informationen beinhalten können. Aufgrund seiner Bedeutung innerhalb der 3D-CAD-basierten Prozesskette wird der Feature-Begriff in Abschnitt 2.5.3. erneut aufgegriffen und detailliert beschrieben. [30, S. 216–221]

Unter *Computer-Aided Planning* (CAP) wird die rechnergestützte Arbeitsplanung verstanden. Hier werden die Informationen und Anforderungen aus der Produktplanung und der Produktentwicklung für die technische Prozessplanung weiterverarbeitet. Anhand vordefinierter Informationen, z. B. Form- und Lagetoleranzen, Geometrieinformationen oder Werkstoffdaten, werden Arbeits- und Prüfpläne abgeleitet

und erstellt. Diese beinhalten sämtliche Arbeits- und Prüfvorgänge, die zur Herstellung und Qualitätsprüfung eines Bauteils notwendig sind. [41, S. 120–121]

Computer-Aided Manufacturing (CAM) beschreibt die computergestützte Fertigung. Die Hauptaufgabe des CAM besteht darin, computerbasiert bei der Erstellung und Simulation von Steuerungsprogrammen für CNC-Werkzeugmaschinen zu unterstützen. Mithilfe des CAM können zudem Werkzeug- und Spannpläne für die Fertigung generiert werden. Auch die Speicherung und Verwaltung der Steuerungsprogramme sowie fertigungsrelevanter Ressourcen können mithilfe von CAM umgesetzt werden. [45, S. 707]

Computer-Aided Quality Assurance (CAQ) beinhaltet die rechnergestützte Qualitätssicherung und umfasst unterschiedliche Bereiche, die sich von der Qualitätsplanung über die Qualitätsprüfung bis hin zur Qualitätslenkung erstrecken [41, S. 225–227]. Neben der Messdatenerfassung und Messprotokollierung unterstützt CAQ auch bei der Messgeräteprogrammierung sowie bei der Vernetzung unterschiedlicher Messsysteme und wird deshalb auch als ‚Bindeglied zwischen virtueller und realer Welt‘ verstanden [11] [13] [46, S. 106–107] [47]. Im CAQ-System werden die realen Messdaten des gefertigten Produkts mit den virtuellen 3D-CAD-Daten verglichen und ausgewertet [11].

Um eine durchgängige 3D-CAD-Prozesskette zu ermöglichen, ist eine Verschmelzung der einzelnen Teilbereiche inklusive ihrer CAX-Methoden notwendig. Jedoch ist die Umsetzung, speziell auf den organisatorischen und informationstechnischen Ebenen, mit unterschiedlichen Herausforderungen behaftet. Hierzu zählen unter anderem der Umgang mit internen Datenzugriffsrechten sowie die Einführung und Integration von Datenbank- und Schnittstellenlösungen für den Datentransfer innerhalb eines Unternehmens. Auch wenn sich die Schnittstellenthematik in der Vergangenheit verstärkt auf die Modellierkerne *Parasolid*, *ACIS* und *Granite* reduziert hat (dies entspricht ca. 80 % der am Markt eingesetzten CAD-Systeme), existieren die Schnittstellenproblematiken noch immer [30, S. 20]. [11]

Der Modellierkern (engl.: *Geometric Modeling Kernel*) eines CAD-Systems spielt innerhalb der CAX-Systemstruktur (überwiegend im CAD) eine zentrale Rolle, da er für alle grundlegenden Aufgaben im Zusammenhang mit der Modellierung des 3D-CAD-Modells, z. B. für dessen mathematische Beschreibung, Visualisierung und Datenverwaltung, verantwortlich ist. Modellierkerne stellen ihre notwendigen Datenstrukturen und Routinen auf Basis unterschiedlicher Programmiersprachen zur Verfügung und beinhalten somit einen wesentlichen Anteil des in einem CAD-System enthaltenen Wissens. Um den Entwicklungsaufwand eines CAD-Systems zu reduzieren, entscheiden sich daher viele der bekannten CAD-Systemanbieter für einen der verfügbaren lizenzierten CAD-Modellierkerne. Je nach verwendetem Modellierkern und dessen unterschiedlicher Struktur und Syntax sind die in einem CAD-System erzeugten CAD-Modelldaten unterschiedlich kompatibel zu anderen CAD-Systemen. Zur Ermöglichung der Kompatibilität ist der Einsatz direkter und indirekter Schnittstellen für den Datenaustausch zwischen den verschiedenen CAD-Systemen erforderlich. Die stetig fortschreitende Entwicklung effektiver unternehmensinterner Prozesse erfordert zudem

den Austausch von 3D-CAD-Daten zwischen fachbereichsübergreifenden CAx-Systemen. Die Entwicklung neuer Funktionen oder ganzer Softwarepakete, die über Schnittstellen an bestehende Softwaresysteme angebunden werden, ist hierzu erforderlich. Zur Entwicklung und Implementierung solcher Schnittstellen werden *Application Programming Interfaces* (APIs) verwendet, die einen umfangreichen Zugriff auf Funktionen der beteiligten CAx-Systeme ermöglichen. Beispielsweise ermöglichen APIs gängiger CAD-Systeme das Auslesen von 3D-CAD-Daten, die mit den herkömmlichen CAD-Funktionen nur schwer oder nicht zu ermitteln sind. [40] [48] [49]

2.4 Prozesse der Produktionsplanung und Qualitätssicherung

Die Aufwände für die Prozessplanung sind aufgrund der zunehmenden Produkt- und Bauteilkomplexität in den vergangenen Jahren gestiegen. Handlungsfelder der Arbeits-, Prüf- und Ressourcenplanung sowie deren Steuerung und die produktbezogene Qualitätssicherung haben sich folglich auf den kompletten Herstellungsprozess ausgedehnt, um eine effiziente Produktion durch optimierte Strukturen und Abläufe zu gewährleisten [50, S. 70]. Die Prozessabläufe der einzelnen Teilbereiche werden nachfolgend erläutert. [51] [52]

2.4.1 Prozessabläufe der Arbeitsplanung in der Fertigung

Die Arbeitsplanung ist Teil der Produktionsplanung (nachfolgend auch als Fertigungsplanung bezeichnet). Sie umfasst die Ablaufgestaltung der Prozesse, die zur Realisierung der geforderten Bauteileigenschaften ausgehend von einem vorgegebenen Ausgangszustand notwendig sind [50, S. 71]. Hierzu wird zunächst vom Arbeitsplaner ein Arbeitsplan erstellt. Der Arbeitsplan ist nach REFA [51] definiert. Er enthält alle Arbeitsvorgänge, die zur Fertigung eines Produkts bzw. Bauteils erforderlich sind. Die Arbeitsvorgänge sind dabei in logischer Reihenfolge angeordnet.

Der Arbeitsvorgang ist nach DIN 8580 [53] definiert und beschreibt die schrittweise Veränderung der Stoff- und Formeigenschaften eines Bauteilangangszustands in einen Bauteilendzustand. Zur Bestimmung der unterschiedlichen Arbeitsvorgänge und der zugehörigen Bearbeitungsverfahren sowie deren Reihenfolge werden Ausgangs- und Endprodukt gegenübergestellt und die entsprechenden Entscheidungen zur Erreichung der finalen Gestalt getroffen [54].

Im weiteren Verlauf der Arbeitsplanung kommt es zur Betriebsmittelplanung, z. B. geht es um den Einsatz von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln. Die Fertigungshilfsmittel (z. B. Werkzeuge) werden häufig als passive Betriebsmittel bezeichnet, da sie im Gegensatz zu den aktiven Betriebsmitteln (z. B. CNC-Werkzeugmaschinen) nicht eigenständig im Prozess tätig werden können. Beide sind direkt an der Fertigung beteiligt und somit entscheidend für die Produkt- bzw. Bauteilqualität. Besonderes Augenmerk ist hier auf die Fähigkeit der jeweiligen Ressource zu legen. Betriebs- und Fertigungshilfsmittel sind dann fähig, wenn ihre Eigenschaften bzw. Sachmerkmale (vgl. Abschnitt 2.4.3) den in der Produktdefinition festgelegten Anforderungen (z. B.

Fertigungstoleranzen) entsprechen bzw. diese mit ihrer Hilfe erreicht werden können. Bevor es zur konkreten Auswahl einer Ressource kommt, wird auf Basis der geometrischen Ausprägung des Bauteils und der geforderten Stückzahl zunächst das notwendige Bearbeitungsverfahren ausgewählt. Die Kombination aus Fertigungstechnologie und einzusetzender Ressource ergibt schließlich den wirtschaftlichen Berechnungsfaktor für die anfallenden Fertigungskosten. [50, S. 73–74]

In der Regel ist der Fertigungsplaner für die Durchführung der Fertigungsplanung verantwortlich. Dieser wird vom CAP-System (vgl. Abschnitt 2.3.2) unterstützt. Die rechnerunterstützte Fertigungsplanung zielt insbesondere darauf ab, die genannten Tätigkeiten mithilfe informationstechnischer Werkzeuge und Methoden umzusetzen, und bildet somit das Bindeglied zwischen Konstruktion und Fertigung (siehe Abbildung 5) [41] [55].

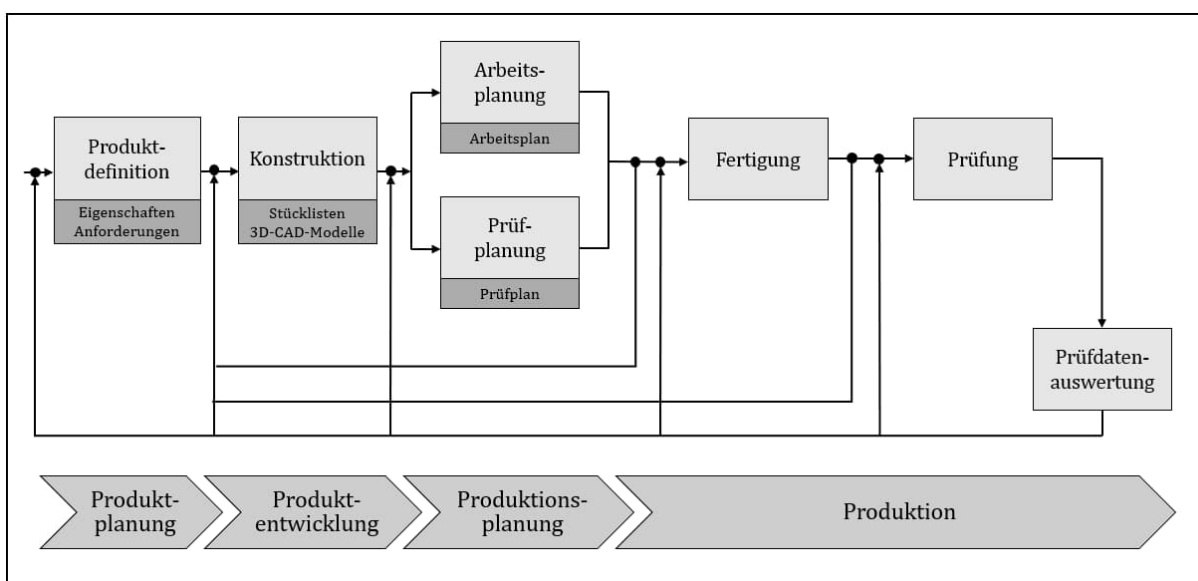


Abbildung 5: Arbeits- und Prüfplanung innerhalb der Arbeits- bzw. Produktionsvorbereitung in Anlehnung an [56]

Trotz der Rechnerunterstützung erfolgt die Produktions- bzw. Fertigungsplanung heute meist noch auf Basis der 2D-Zeichnung und ist unmittelbar von der Erfahrung und vom Wissen des jeweiligen Fertigungsplaners sowie vom unternehmensspezifischen Know-how und von existierenden Richtlinien abhängig [7] [57]. Individuelle Ablaufarbeitspläne sind die Folge und die Ursache variierender Fertigungszeiten und Fertigungskosten sowie einer abweichenden Bauteilqualität. Unternehmen sind bestrebt, den Arbeitsaufwand für die Arbeitsplanung stetig zu reduzieren bzw. möglichst gering zu halten. Hierzu werden die Konstruktionsdaten, z. B. geometrische und technologische Bauteilinformationen, teils direkt aus dem 3D-CAD-Modell in die existierenden Arbeitsplanungssysteme integriert oder automatisiert übernommen, um zeitintensive und fehleranfällige manuelle Eingabeprozesse zu vermeiden. [58, S. 34–35]

Es existieren bereits Ansätze zur automatisierten und 3D-CAD-basierten Arbeitsplangenerierung. Einer dieser Ansätze stammt von der simus systems GmbH [59]. Nach Analyse der 3D-CAD-Daten werden diese hinsichtlich ihrer geometrischen

Informationen klassifiziert. Über die Formgebung des Bauteils werden anschließend Rohstoffpreise und andere relevante Beschaffungsmittel direkt abgeleitet und in den Entscheidungsprozess einbezogen.

Ein weiterer Ansatz ist bei der Österreichischen Forschungsfördergesellschaft zu finden [60]. Die 3D-CAD-Modellinformationen werden auch hier zu Beginn aus dem 3D-CAD-Modell ausgelesen und anschließend mit sinnvollen Arbeitsvorgängen aus einer Wissensdatenbank verknüpft. Die Arbeitsvorgänge werden in einer logischen Reihenfolge übernommen, und der Arbeitsplan wird automatisch erstellt.

Humpa [61] befasst sich in seiner Dissertation mit der Entwicklung einer CAD-Methode zur Steigerung der Produktivität innerhalb des CAD-CAM-Prozesses. Mit der entwickelten Methode wird für den Konstrukteur die Möglichkeit geschaffen, den Konstruktions- und Produktmodellierungsprozess auf Basis fertigungstechnischer und wirtschaftlicher Anforderungen produktiver zu gestalten. Konstruktions-, Fertigungs- und Kalkulationsdaten werden auch hier über eine Datenbank gesammelt und entsprechend ausgewertet.

2.4.2 Prozessabläufe der Prüfplanung in der Fertigung

Auch die Prüfplanung ist Teil der Produktionsplanung. Sie wird zeitgleich zur Arbeitsplanung ausgeführt (siehe Abbildung 5) [62, S. 424] [56, S. 108]. Bei der Prüfplanung erfolgt zunächst die Festlegung der qualitätsrelevanten Prüfmerkmale. Im weiteren Verlauf werden die Prüfanweisungen verfasst, die eine Festlegung zur Durchführung der Prüfung beinhalten. Es folgen Prüfablaufpläne zur Bestimmung der Prüfabfolge (z. B. 100 % Prüfung) und messtechnikspezifische Festlegungen zur Ermittlung der Messergebnisse. Ähnlich wie bei der Arbeitsplanung werden auch hier die Betriebs- und Fertigungshilfsmittel (z. B. Messtaster oder Koordinatenmessgeräte) zur Durchführung der Prüfung bestimmt. Dabei ist insbesondere auf die Prozessfähigkeit der Ressourcen zu achten. Im Anschluss an die Prüfplanerstellung erfolgt die Prüfdatenauswertung [62, S. 488–489]. Sie ist Bestandteil der Qualitätssicherung (vgl. Abschnitt 2.4.4). [63] [64] [65]

Die zeitgleiche Ausführung der Arbeits- und Prüfplanung, wie es Pfeifer [62] definiert, wird in der Literatur teils kritisch hinterfragt, da bei der Prüfplanerstellung häufig auch auf Informationen des Arbeitsplans zurückgegriffen wird [66, S. 15]. Demnach können die Arbeits- und Prüfplanungsprozesse nicht zeitgleich, sondern nur zeitlich versetzt stattfinden, wenn Durchlaufzeiten in der Fertigung verkürzt werden sollen [66, S. 16]. Zur verstärkten Integration der Prüfplanung in die unterschiedlichen Bereiche des Produktentstehungsprozesses verfolgt Bernards [66] in seiner Dissertation daher den Ansatz einer modularen Prüfplanung. Die Verbesserung der Fertigungssteuerung steht dabei im Vordergrund.

Zur Unterstützung der Prüfplanung und zur eindeutigen Kennzeichnung der Prüfmerkmale sind bereits verschiedene IT-Werkzeuge und Anwendungen am Markt erhältlich. Die Kernfunktion der unterschiedlichen Softwarelösungen basiert auf dem

sogenannten Stempelprozess der Prüfmerkmale. Ähnlich wie bei der manuellen Prüfplanung werden kritische Qualitätsmerkmale (engl.: *Critical-To-Quality*-Merkmale, CTQs) mit Stempelnummern versehen, die von der Prüfplanung bis zur Qualitätsprüfung die Qualitätsmerkmale benennen bzw. kennzeichnen. Mithilfe von zusätzlichen IT-Softwarelösungen erfolgt dies rechnergestützt und teils auch automatisch. Diese Methode führt zu erheblichen Zeit- und Kosteneinsparungen gegenüber dem manuellen Prozess. Bekannte IT-Tools sind beispielsweise *BCT Inspector* der BCT Technology AG oder *infra CONVERT* der ELIAS GmbH. Sie ermöglichen die Stempelung von Prüfmerkmalen in 2D-Zeichnungen, die in CAD-Austauschformaten (z. B. DWG, DXF oder IGES) oder in Neutraldaten (z. B. PDF, TIFF oder PNG) vorliegen. Die Stempelung erfolgt hier überwiegend auf Basis der automatischen Texterkennung nach dem OCR-Verfahren (OCR: *Optical Character Recognition*) zur optischen Zeichenerkennung. Mithilfe des *BCT Inspector* kann neben der zeichnungsbasierten Stempelung auch die Stempelung der Prüfmerkmale direkt im 3D-CAD-Modell umgesetzt werden. Dies ist derzeit ausschließlich in den CAD-Systemen *Siemens NX* und *Solid Edge* möglich. Zusätzlich wird die Nutzung der Stempelung im neutralen Austauschformat JT (*Jupiter Tessellation*) gewährleistet. [67]

Der Stempelprozess der Prüfmerkmale ist im zweidimensionalen und im dreidimensionalen Bereich nahezu identisch. Die Zusatzsoftware greift auf die 2D-Zeichnung oder auf die Produkt- und Fertigungsinformationen im 3D-CAD-Modell zu und selektiert automatisch die für die Prüfplanung relevanten Bauteilmerkmale. Diese werden im Anschluss nummeriert (gestempelt), dokumentiert und gespeichert. Häufig erfolgt die Weiterverarbeitung der Merkmalsinformationen in *Microsoft-Excel*-Tabellen oder in prozessbegleitenden, teils selbst entwickelten, CAQ-Softwaresystemen. Die Verantwortlichen der Qualitätssicherung legen im weiteren Verlauf der Prüfplanung fest, welche Prüfplätze, Prüfmittel (z. B. Mess- und Lehrmittel) oder welche Prüfabläufe zur Durchführung der Prüfung notwendig sind. Die 3D-Stempelung mittels *BCT Inspector* ermöglicht zudem die Übergabe der Merkmalsinformationen an das Koordinatenmessgerät. Vorausgesetzt ist, dass die Bemaßung und die Tolerierung der 3D-CAD-Modelle mithilfe von Produkt- und Fertigungsinformationen vorliegen. Die Einordnung der Merkmalsinformationen in das Messprogramm erfolgt dabei durch die Übernahme der Stempelnummer der Prüfparameter in den Merkmalsnamen. Für die informationstechnische Weiterverwendung abseits der CAD-CAQ-Kette ist diese Lösung nur begrenzt geeignet. Prozessinformationen aus anderen Bereichen des *Product Lifecycle Management* (PLM) können folglich nicht eindeutig dem 3D-CAD-Modell zugeordnet werden. Auch Bedarf es stets des Einsatzes von Zusatzsoftware zur eindeutigen Kennzeichnung und Identifikation der Prüfmerkmale. [67]

2.4.3 Ressourcenmanagement zur Erfüllung der Fertigungs- und Prüfaufträge

Für eine erfolgreiche Umsetzung der Fertigungs- und Prüfaufträge sind Betriebs- und Fertigungshilfsmittel elementar. Zur Unterstützung bei deren Auswahl dienen die Normungsinhalte der Normreihe DIN 4000 [68] und DIN 4003 [69]. Neben Werkzeugen, Mess- und Lehrmitteln sowie Spannvorrichtungen als passive Betriebsmittel werden hier

auch CNC-Werkzeugmaschinen und Messgeräte standardisiert mit Sachmerkmalen beschrieben. Die Normreihe DIN 4000 umfasst die zweidimensionale Beschreibung der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel. Sie bildet die Basis für die dreidimensionale Modellierung nach DIN 4003. Die standardisierte Beschreibung der 3D-CAD-Modelle ermöglicht, die digitalen Repräsentanten der Ressourcen in den unterstützenden CAx-Systemen zu verwenden.

Die zweidimensionale Beschreibung nach DIN 4000 beinhaltet neben den Begriffsdefinition zu den entsprechenden Fertigungshilfsmitteln auch deren generische Objektklassenstruktur zur Klassifizierung der Ressourcen. Mit den standardisierten Begriffsdefinitionen wird zunächst eine einheitliche Benennung für die Komponenten und Komponentenbaugruppen der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel geschaffen. Dies ist die Grundlage für eine einheitliche Kommunikation zwischen den Herstellern und den Kunden und unterstützt zudem die Verwaltung und Organisation der Ressourcen innerhalb der Datenverwaltungssysteme (vgl. Abschnitt 2.7). Weiterhin werden beschreibende Sachmerkmale im Rahmen der Normreihe DIN 4000 festgelegt, die die Fähigkeiten und geometrischen Ausprägungen der Betriebsmittel definieren, die insbesondere im Bereich der Arbeitsvorbereitung erforderlich sind. Abbildung 6 zeigt beispielhaft einen Messtaster nach DIN 4000-178 [70] und einen Auszug aus der zugehörigen Sachmerkmalliste zur standardisierten Beschreibung für den Einsatz auf Koordinatenmessgeräten innerhalb der Qualitätssicherung. Im Rahmen der Normreihe DIN 4000 sind außerdem die Stücklistenstruktur und die Stücklistenfelder für den einheitlichen Zusammenbau der Fertigungshilfsmittel innerhalb der Simulationsumgebung sowie für den elektronischen Datenaustausch festgelegt. [28] [68]

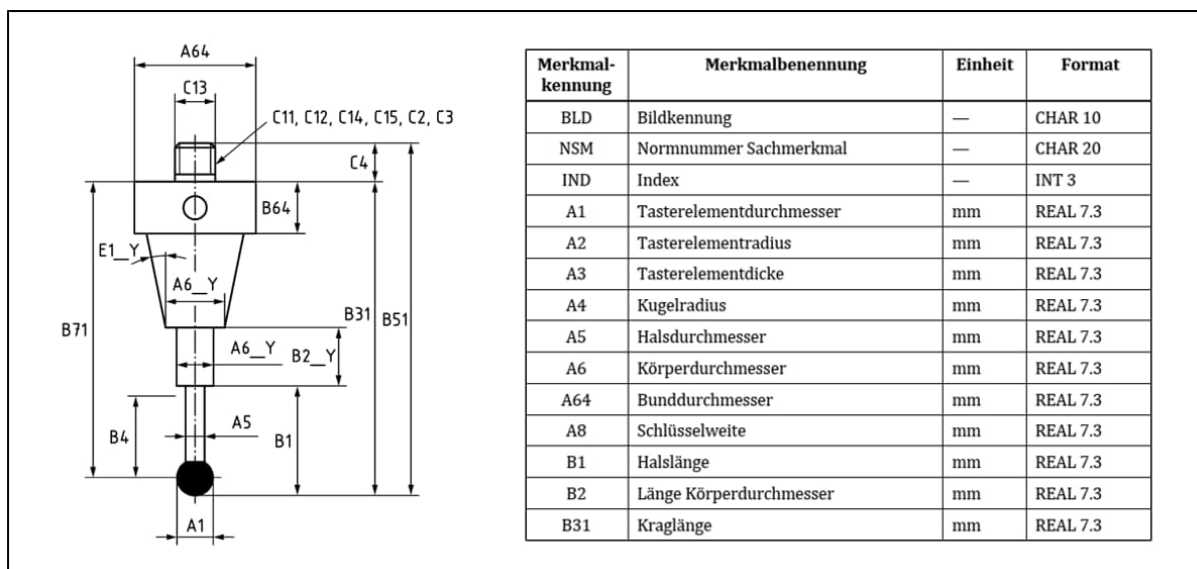


Abbildung 6: Beschreibung eines Messtasters nach DIN 4000-178 [70]

Die dreidimensionale Beschreibung nach DIN 4003 bezieht sich insbesondere auf die Verwendung der 3D-CAD-Modelle der eingesetzten Betriebs- und Fertigungshilfsmittel innerhalb der Simulationsumgebung. Hier werden Referenz- und Fügekoordinatensysteme, der Detaillierungsgrad der 3D-CAD-Modelle, die Farbgebung

der Komponenten und Komponentenbaugruppen, die Modellstruktur sowie Details zum elektronischen Datenaustausch (vgl. Abschnitt 2.6.1) festgelegt. [28] [69]

2.4.4 Prozessabläufe der Qualitätssicherung in der Fertigung

Die Erfassung und die Auswertung der Prozess- und Qualitätsdaten aus der Fertigung sind grundlegend für eine integrierte und optimierte Prozesseinflussnahme. Während der Bauteilfertigung werden die Ist-Zustände der Maschinen-, Betriebs- und Prozessdaten informationstechnisch erfasst. Die aufgenommenen Daten können z. B. Umgebungstemperaturen, Daten zur Abnutzung von Werkzeugen oder Schnittwerte während der Bearbeitung sein. Die Auswertung dieser Daten ist Teil der Qualitätssicherung. Sie kommt dann zum Einsatz, wenn die erforderliche Bauteilqualität überwacht oder eine Einhaltung gewährleistet werden muss. [71]

Nach Hehenberger [41] wird die produktbezogene Qualitätssicherung in die Teilbereiche Qualitätsplanung, Qualitätssteuerung und Qualitätsprüfung untergliedert. Die Qualitätsplanung entspricht der Prüfplanung aus Abschnitt 2.4.2. Die während der Prüfplanung als kritisch gekennzeichneten Bauteilmerkmale werden innerhalb der Qualitätssicherung auf die Einhaltung vorgegebener Qualitätsanforderungen überprüft. Die Erfassung der Ist-Werte erfolgt innerhalb der Qualitätsprüfung (siehe Abbildung 7). Die Qualitätssteuerung sorgt für die Abwicklung vorgegebener Prüfzyklen und komplettiert die Qualitätssicherung.

Aufgrund system- und prozessbedingter Schwankungen beim Fertigungsprozess können reale Fertigungszustände (Ist-Zustände) von den geplanten Fertigungszuständen (Soll-Zustände) abweichen. Weichen Ist- und Soll-Zustand voneinander ab, unterstützt das CAQ-System (vgl. Abschnitt 2.3.2) innerhalb der Qualitätssicherung bei der Ursachenermittlung [72].

Bei Koordinatenmessgeräten erfolgt die Erfassung des Ist-Zustands der Bauteile häufig auf Basis ausgewählter Messstrategien, die von der Ausprägung und Kombination der Features und Geometrieelemente (vgl. Abschnitt 2.5.3) im 3D-CAD-Modell abhängig sind. Erste Ansätze zur feature-basierten Qualitätssicherung sind bei Ciesla [73] zu finden. Ciesla beschreibt in seiner Dissertation Messstrategien, die Antast- und Auswertestrategien sowie Angaben zur Positionierung und Fixierung des zu prüfenden Objekts auf dem Koordinatenmessgerät beinhalten. Die Datenerfassung und die anschließende Datenauswertung ermöglichen die Identifizierung möglicher Fehlerquellen. Treten Abweichungen von der geforderten Produktqualität auf, erfolgt über eine Datenanalyse die Anpassung der Produktdefinition und Produktionsplanung [66, S. 15]. Fehler, die während der Konstruktion oder Fertigung auftreten bzw. entstehen, können ebenfalls ermittelt werden (siehe Abbildung 7 – gestrichelte Pfeile). [41]

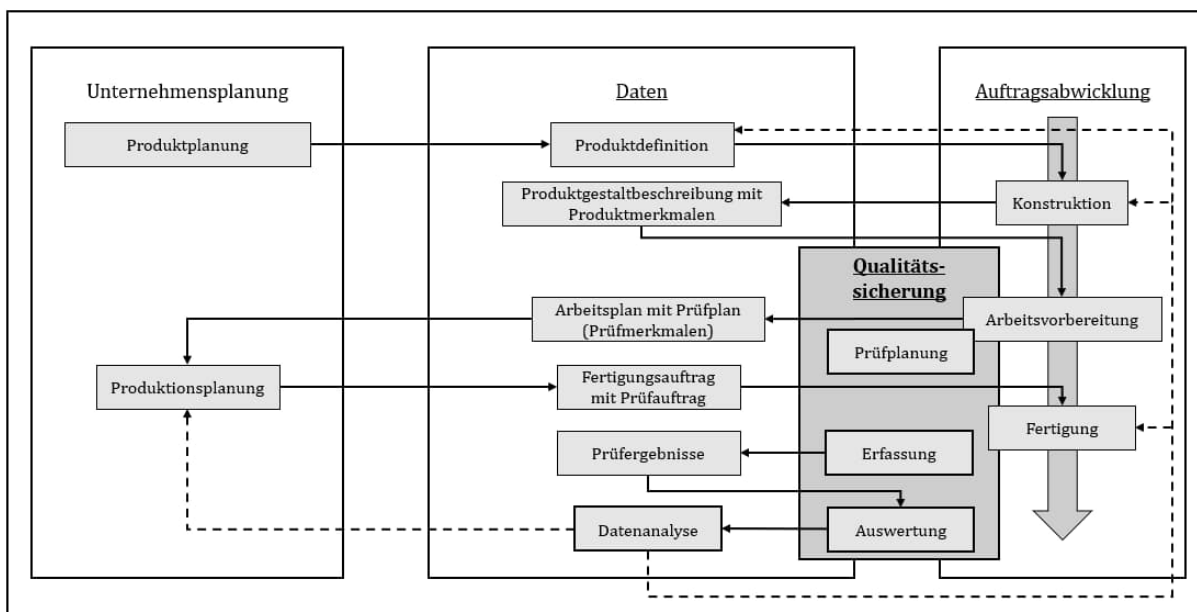


Abbildung 7: Eingliederung der Qualitätssicherung in den industriellen Produktionsprozess in Anlehnung an [74]

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Erfüllung bzw. Einhaltung der geforderten Bauteiltoleranzen. Die reale Bauteilqualität (Ist-Werte) wird im Rahmen der Qualitätsprüfung erfasst und mit den Soll-Werten aus der Bauteildefinition abgeglichen. Der Abgleich der Ist- und Soll-Werte ist häufig mit hohem Mehraufwand verbunden, da die Kennzeichnung (eindeutige Benennung oder eindeutiger Identifikator) der Bauteilmerkmale im CAD- und CAQ-Umfeld unterschiedlich ist. Die Merkmalsbezeichnung variiert zwischen den genannten CAx-Systemen, weshalb eine direkte und automatisierte Zuordnung der Ist- und Soll-Werte derzeit häufig nicht möglich ist [13].

2.5 3D-CAD-Modelle als Informationsträger zur Lenkung der Fertigung

In diesem Abschnitt werden 3D-CAD-Modelle und deren Rolle als Informationsträger im Bereich des Produktentstehungsprozesses beschrieben. Anschließend werden die Grundlagen der 3D-modellbasierten Definition (engl.: *Model-Based Definition*, MBD) und der Feature-Technologie erläutert sowie die Möglichkeiten zur Speicherung der Produkt- und Fertigungsinformationen im 3D-CAD-Modell aufgezeigt. Am Ende dieses Abschnitts werden aktuelle Methoden zur Kennzeichnung und Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen dargestellt.

2.5.1 3D-CAD-Modelle als Informationsträger

Die wissenschaftliche Forschungsgrundlage für die Methodenentwicklung der vorliegenden Dissertation sind 3D-CAD-Modelle, die als Informationsträger innerhalb der industriellen Fertigung agieren. Diese werden häufig auch als 3D-CAD-Mastermodelle bezeichnet. Sie sind der dreidimensionale Repräsentant für die Anforderungen aus der

Produktdefinition und somit die Informations- sowie Kommunikationsgrundlage innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette [75]. Die Basis hierfür bilden die Features und Geometrieelemente im 3D-CAD-Modell. Sie sind die Träger der geometrischen und fertigungsrelevanten Informationen, z. B. der Maß-, der Form- und der Lagetoleranzen. Die geometrischen Informationen werden direkt vom 3D-CAD-Modell repräsentiert, wohingegen die fertigungsrelevanten Informationen in Form von Informationsfeatures im 3D-CAD-Modell hinterlegt sind [76, S. 17–18]. Alle Informationen werden maschinenlesbar vom 3D-CAD-Modell für die Weiterverarbeitung in den Folgeprozessen zur Verfügung gestellt. Der große Vorteil der 3D-CAD-Mastermodell-Methode ist die Möglichkeit zur Parallelisierung von Prozessen und somit die Verkürzung der Markteinführungszeiten. [7] [77]

Mit der Einführung des 3D-CAD-Modells als Informationsträger wird der Erstellungs- und Pflegeaufwand für 2D-Zeichnungen und Zusatzdokumente reduziert, da mithilfe des 3D-CAD-Mastermodells eine zentrale Informationsbereitstellung für Folgeprozesse im Unternehmen realisiert werden kann. Auch die Vermeidung einer redundanten Datenhaltung geht mit dieser neuen Methode zur Informationsbereitstellung einher [12, S. 3–12]. Im Produktentstehungsprozess existiert demnach nur eine einzige Informationsquelle bzw. nur ein führender Datensatz. Schließlich können Folgeprozesse mit den Informationen im 3D-CAD-Mastermodell angereichert werden. Änderungen, die erst in fortgeschrittenen Phasen des Produktentstehungsprozesses vorgenommen werden, können mit geringem Mehraufwand dokumentiert, ergänzt und gespeichert werden. Schnelle und flexible Änderungsprozesse sind die Folge. [12, S. 3–12] [78]

2.5.2 Model-Based Definition

Model-Based Definition (MBD) ist eine Methode zur Ablösung der zeichnungsbasierten Produktdefinition, um Konstruktions- und Fertigungsinformationen digital innerhalb des CAx-Umfelds zu integrieren und den Produktentstehungsprozess zu beschleunigen [8] [38]. Ziel dieser Methode ist es, das 3D-CAD-Modell als einzige Informationsquelle für die Definition des Produkts zu nutzen und neben der 2D-Zeichnung auch weitere Dokumentationsformen abzuschaffen, die zur Produktdefinition verwendet werden. Die modellbasierte Bauteildefinition beinhaltet einen Prozess, der es den Designern und Konstrukteuren ermöglicht, alle zur vollständigen Produktdefinition notwendigen Informationen direkt in das 3D-CAD-Modell zu überführen und das 3D-CAD-Modell mit allen fertigungsrelevanten Informationen als Informationsträger für alle weiteren Prozessschritte zu qualifizieren. Die Methode wird von den nachgelagerten Funktionen wiederverwendet, um modellbasierte Fertigungs- und Qualitätssicherungsaktivitäten durchzuführen, und dient zur Umsetzung des Digital-Thread-Ansatzes aus Abschnitt 2.2.2 [38]. [78] [79]

Die MBD-Methode wird neben der Modellierungsmethode CSG (*Constructive Solid Geometry*) [80] überwiegend durch die Darstellung der 3D-CAD-Modelle nach der Modellierungsmethode B-Rep (*Boundary Representation*) ermöglicht. Mithilfe der CSG-Methode werden die Forminformationen eines dreidimensionalen Festkörpers als

eine Folge von Booleschen Operationen (z. B. Vereinigungen, Differenzen oder Schnittmengen) abgebildet, wohingegen die Hauptbestandteile der B-Rep-Methode Flächen und Kanten sind. Anhand der B-Rep-Methode ist es möglich, Produkt- und Fertigungsinformationen den jeweiligen geometrischen Elementen zuzuordnen. Die Topologie eines 3D-CAD-Modells nach B-Rep basiert auf logischen Verknüpfungen. Diese assoziieren die Anordnung und Verbindung von Elementen im räumlichen Informationsnetz, das auch Entitätennetz genannt wird. Die einzelnen Elemente (z. B. Eckpunkte, Kanten oder Flächen) sind logisch miteinander verknüpft und bilden die Datenstruktur systematisch ab (siehe Abbildung 8). Diese Struktur wird häufig bei standardisierten Austauschformaten genutzt, z. B. ISO 10303 (STEP) [81, S. 9]. [45]

Die Kombination aller Elemente mit deren Nachbarschaftsbeziehungen bildet das geschlossene 3D-CAD-Modell. Die Topologie allein reicht jedoch nicht aus, um die geschlossene Form vollständig zu beschreiben. Geometrien, durch die die Form und die Position der Körperelemente definiert werden, müssen ebenfalls in das Entitätsnetzwerk aufgenommen werden. Kommerzielle 3D-CAD-Modellierkerne basieren auf der B-Rep-Methode und unterstützen zusätzlich CSG-Funktionen. Diese Mischung ist die Grundlage für die feature-basierte Modellierung [81, S. 9]. Weiterführende Details zu den genannten Modellierungsmethoden und deren Datenstrukturen sind in der Fachliteratur [82] [83] beschrieben. [45]

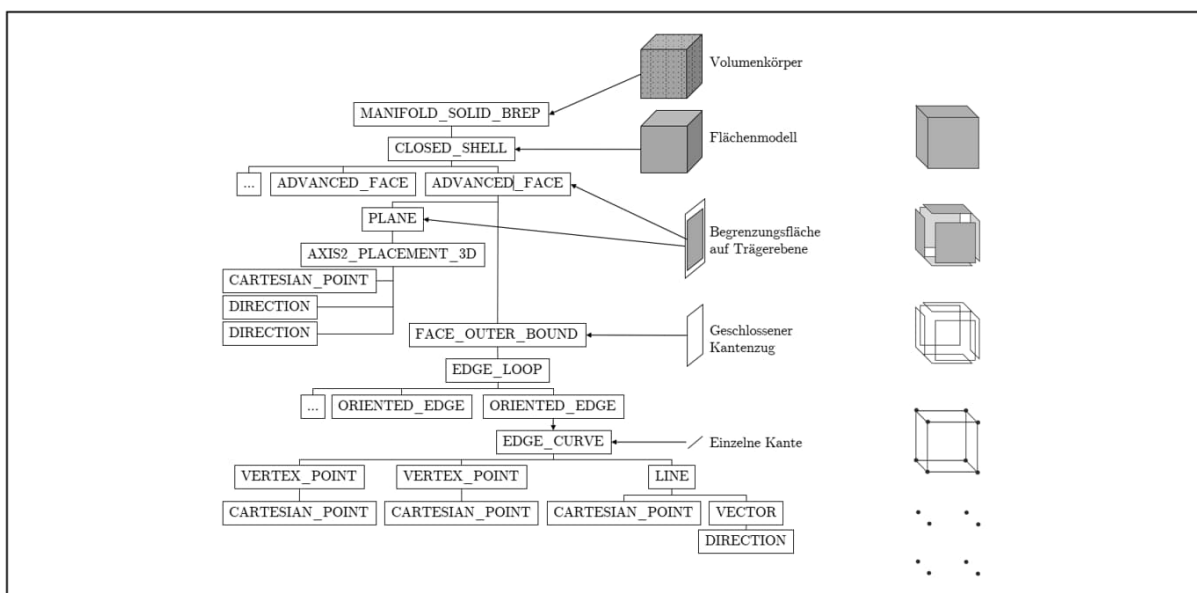


Abbildung 8: Geometrie eines Würfels nach der B-Rep-Methode in einer STEP-Datei in Anlehnung an [84]

Die MBD-Methode gewinnt aufgrund der vielen Vorteile verstärkt an Bedeutung in der Fertigung und Qualitätssicherung [85]. Mithilfe der MBD-Methode wird die Reduzierung manueller und individueller Prozessabläufe angestrebt. Zudem soll die MBD-Methode zur Fehlervermeidung in der Konstruktion, zur besseren Kommunikation und zu kürzeren Reaktionszeiten in der Fertigung verhelfen. Auch unterstützt diese Methode bei der Reduzierung der zu pflegenden Dateien und trägt aufgrund der genannten Aspekte zur Qualitätsoptimierung im Produktentstehungsprozess bei. [8] [78] [86]

2.5.3 Features und Geometrieelemente als geometrische und nichtgeometrische Informationen im 3D-CAD-Modell

Features werden im 3D-CAD-Modell für unterschiedliche Anwendungen im CAx-Umfeld verwendet. Ihr Einsatzgebiet umfasst alle Bereiche, die Produkt- bzw. Bauteilinformationen benötigen. Hierzu gehören die 3D-CAD-Modellierung, die Produktionsplanung, die Qualitätssicherung und die Kostenermittlung sowie die Simulation. Auf dem Gebiet der rechnergestützten Konstruktion hat sich verstärkt die Definition nach VDI 2218 [87] etabliert, in der ein Feature als eine Anhäufung aus einem oder mehreren Geometrieelementen beschrieben wird, die zusätzlich mit Semantik behaftet sein können [88].

Geometrieelemente sind bestimmte Teile eines Werkstücks oder Bauteils, wie Punkte, Linien oder Flächen [89]. Als Semantik wird die interpretierbare Geltung der Features verstanden, die mit den unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus und den prozessspezifischen Informationen und Daten einhergehen [87] [90].

Neben der Beschreibung von kompletten Bauteilen, Informationseinheiten sowie Gestalt-, Konstruktions- und Fertigungselementen wird ein Feature auch als informationstechnisches Element verstanden [87]. In Bezug auf den durchgängigen und eindeutigen Datentransfer vom CAD-System in die Nachfolgeprozesse und die begleitenden CAx-Systeme, z. B. ins CAQ-System, sind zunächst die Bedeutung und die Eigenschaften der Design- und Informationsfeatures näher zu betrachten. Von einer umfassenden Auflistung und Definition der übrigen Feature-Typen wird an dieser Stelle abgesehen. Details und Einzelheiten hierzu können der Fachliteratur [50] [76] entnommen werden.[11]

Designfeatures sind höherwertige Konstruktionselemente wie Rundungen, Fasen, Einstiche und Materialschnitte. Demzufolge ist es möglich, dass ein Designfeature aufgrund des im CAD-System hinterlegten Modellierkerns aus mehreren einzelnen Geometrieelementen (z. B. Flächen) besteht (siehe Abbildung 9 – Geometrieelemente A, B und C). Die Flächen des dargestellten Einstichs (DF2) werden innerhalb eines Arbeitsschritts in der Fertigung erzeugt und bilden die Referenzflächen für die Tolerierung der Einstichbreite und -tiefe. [11] [50, S. 41–49] [76, S. 18]

Informationsfeatures können auf einzelne Geometrieelemente und auf die entsprechenden Designfeatures verlinkt werden und so innerhalb der Produktdefinition entscheidende Zusatzinformationen (z. B. Form- und Lagetoleranzen oder Materialeigenschaften) direkt am 3D-CAD-Modell mitliefern (siehe Abbildung 9) [91]. Sie sind als Textinformation hinterlegt, bilden zusammen mit den geometrischen Informationen die semantisch korrekten Zusammenhänge ab und sind insbesondere für die Konstruktion, Planung, Programmierung und IT-Systemkommunikation vorgesehen [50, S. 41–49].

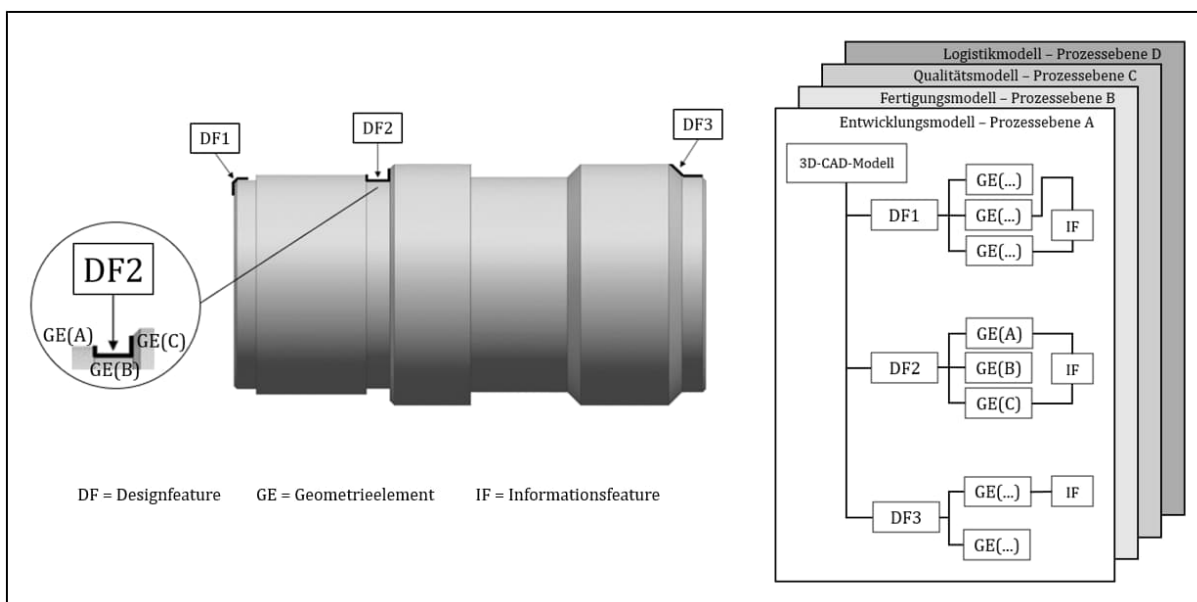


Abbildung 9: Unterschiedliche Designfeatures und Geometrielemente am Beispiel einer Welle in Anlehnung an [76, S. 59–64]

Die direkte Assoziation der geometrischen und nichtgeometrischen 3D-CAD-Modellinformationen wie sie in Abbildung 9 dargestellt ist, ist für den eindeutigen und fehlerfreien Datentransfer im Bereich der 3D-modellbasierten Arbeitsweise von großer Bedeutung. Die direkte Verlinkung der Informationsfeatures, Geometrielemente und Designfeatures ermöglicht den Transport der CAD-Daten in die unterschiedlichen Prozessebenen der Fertigung. Die Kommunikationsgrundlage, speziell im Bereich der 3D-CAD-basierten Fertigung, bilden die Informationsfeatures. Eine Sonderform dieser Feature-Art wird nachfolgend beschrieben. [92, S. 30–32] [50, S. 41]

2.5.4 Product and Manufacturing Information

Eine besondere Ausführung der Informationsfeatures aus Abschnitt 2.5.3 sind die Produkt- und Fertigungsinformationen, häufig auch als *Product and Manufacturing Information* (PMI) bezeichnet [7]. Sie kommen im CAx-Umfeld zum Einsatz, um Produkt- und Fertigungsinformationen, wie Maß-, Form- und Lagetoleranzen direkt am 3D-CAD-Modell anzubringen und dort festzulegen. Neben Angaben zur Tolerierung und zur geometrischen Dimensionierung können dem 3D-CAD-Modell mithilfe der PMI auch Prozesshinweise, z. B. Werkstoffspezifikationen und Anforderungen zu Oberflächenbehandlungen, zugewiesen werden. Die Vielzahl der unterschiedlichen Informationen lässt sich auf das gesamte Produktmodell oder auf einzelne Bereiche referenzieren (siehe Abbildung 10). [93] [94]

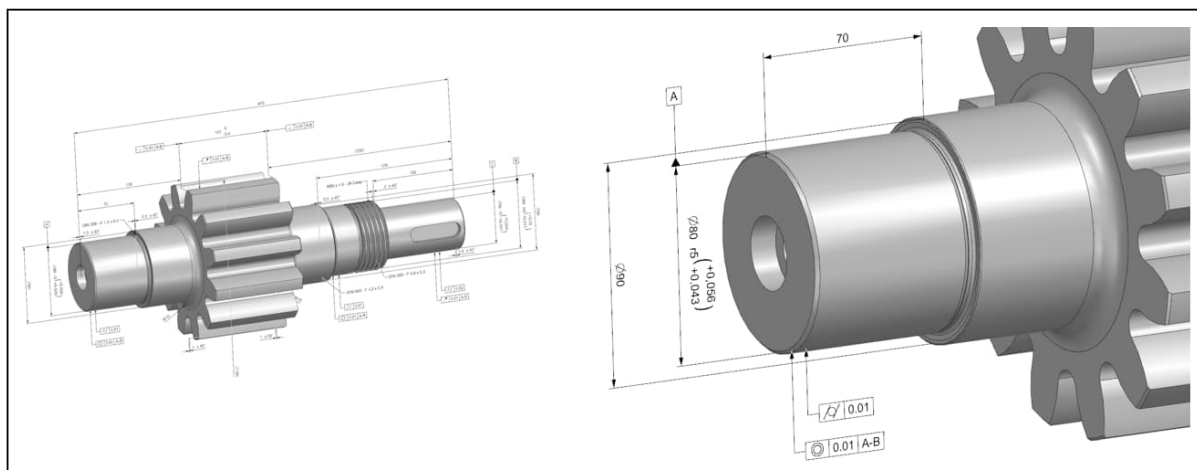


Abbildung 10: Informationsfeatures in Form von PMI am Beispiel einer Stirnradwelle

Mithilfe der PMI können die 2D-basierten Prozesse in der Fertigung und Qualitätssicherung durch das 3D-CAD-Modell abgelöst werden. Um die Akzeptanz und die Anwendung dieser neuen digitalen Methoden zu fördern, ist es notwendig, dass eine optimale Visualisierung und eine semantisch korrekte Definition der Informationen gewährleistet ist. Dies gilt insbesondere für Form- und Lagetoleranzen, deren Informationen durch die Assoziation in semantischen Datenmodellen kommuniziert werden, die nach den zweidimensional basierten Regeln gemäß DIN EN ISO 1101 [89] strukturiert und aufgebaut sind [95]. [96] [97]

Die grafische Darstellung der produkt- und fertigungsrelevanten Informationen, z. B. der Form- und Lagetoleranzen, erfolgt gemäß den Regeln nach DIN EN ISO 16792 [98] und ASME Y14.41-2019 [99]. Die nach DIN EN ISO 16792 definierten Verfahren für digitale Produktdefinitionsdaten und die darin gestellten Anforderungen umfassen die zur eindeutigen Produktbeschreibung notwendigen Inhalte des Informationsträgers sowie Anforderungen zur digitalen Visualisierung der Informationselemente.

Neben den physischen und funktionalen Produktdefinitionen sind nach DIN EN ISO 16792 auch Daten zum Fertigungsprozess enthalten [98, S. 4]. Angaben zur Strukturierung und Visualisierung der Daten sind jedoch nicht detailliert beschrieben. Beispielsweise werden Prüfmerkmale nicht behandelt und auch keine Festlegungen zur Darstellung qualitätskritischer Merkmale (vgl. Abschnitt 2.4.2) getroffen. Lediglich wird erwähnt, dass die Möglichkeit zur separaten Visualisierung bestimmter Annotationen, z. B. der Form- und Lagetoleranzen, gegeben sein muss [98, S. 14].

Die gezielte Anwendung im Hinblick auf die 3D-CAD-basierte Arbeitsweise wird nicht erläutert, und es wird auch nicht festgelegt, wie Produkt- und Fertigungsinformationen, z. B. Maßtoleranzen, in den Prozessaktivitäten weiterverwendet werden können. Dies betrifft überwiegend die Anwendungsbereiche der CAM- oder der Messgeräte-Programmierung. Auf Basis der ISO-Norm kann demnach keine 3D-CAD-basierte Arbeitsweise realisiert werden, sondern es können nur Festlegungen zur 2D-basierten Arbeitsweise (mit 2D-Zeichnungen) auf das 3D-CAD-Modell transferiert werden.

Die Bezeichnung PMI für Informationsfeatures im 3D-CAD-Modell hat sich im Fertigungsumfeld weitestgehend durchgesetzt, ist aber bislang nicht standardisiert. Folglich existieren Abweichungen bei den Bezeichnungen für Informationsfeatures innerhalb der herstellereigenen CAD-Systeme. *Siemens NX* und *CATIA* nutzen den Begriff *Product and Manufacturing Information* (PMI), wohingegen *Creo Parametric* den Ausdruck *Annotation Feature* verwendet. In dieser Arbeit kommt der Ausdruck *Product and Manufacturing Information* (PMI) zum Einsatz.

2.5.5 Toleranzspezifikationen im 3D-CAD-Modell

Wie bereits in Abschnitt 2.5.4 erwähnt, werden die Regeln für eine korrekte Bauteiltolerierung nach DIN EN ISO 1101 [89] vorgegeben. Diese Regeln gelten für die zeichnungsbasierte Darstellung von Bauteiltoleranzen, können jedoch aufgrund der Möglichkeiten zur Toleranzspezifikation im CAD-System mittels PMI auch auf das 3D-CAD-Modell angewendet werden. Die Norm besagt, dass geometrische Toleranzen stets unter Berücksichtigung der Anforderungen aus der Bauteilfunktion, der Fertigung und der Qualitätssicherung zu definieren und zu spezifizieren sind [89].

Zur Gewährleistung einer eindeutigen und vollständigen Bauteildefinition ist die Gesamtheit der technischen Beschreibungen sicherzustellen. Alle gestaltgebenden Eigenschaften, z. B. Dimension, Form, Lage und Oberflächenbeschaffenheit, sind über Allgemein- oder Einzeltoleranzen so zu definieren, damit das tolerierte Objekt über seine Lebensdauer hinweg seine vorgegebene Funktion stets erfüllen kann. Zu den bereits genannten Aspekten sind die Herstellbarkeit und die Prüfbarkeit der Toleranzangaben sowie die dabei entstehenden Kosten zu berücksichtigen. Nach DIN EN ISO 1101 werden die Toleranzangaben mithilfe eines Toleranzindikators festgelegt. Die Attribute und die Symbolik des Toleranzindikators sind in Abbildung 11 dargestellt. [100]

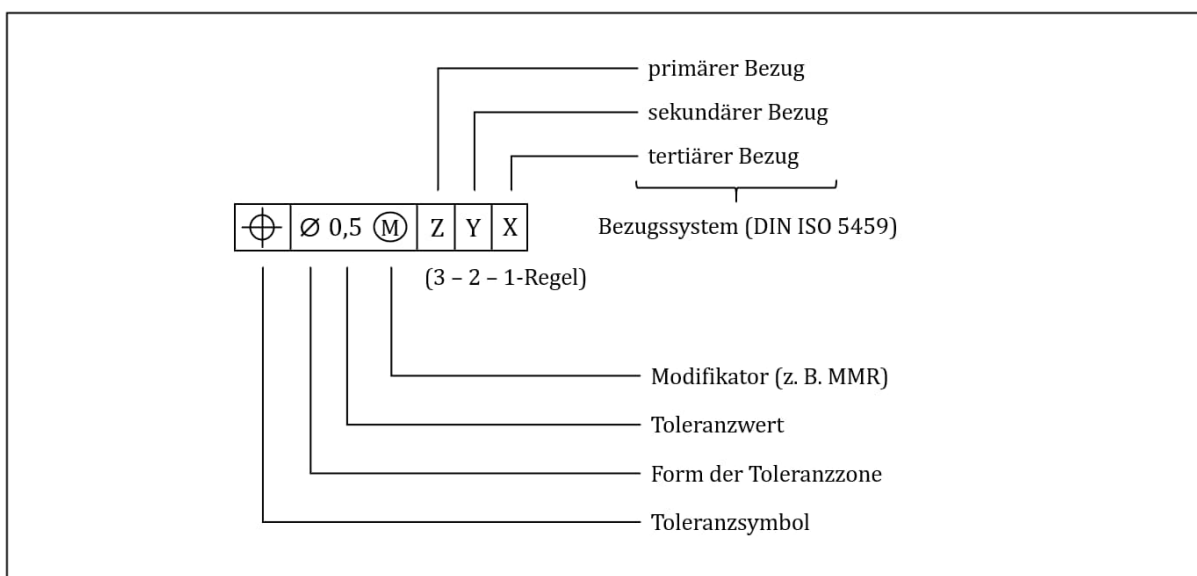


Abbildung 11: Attribute und Symbolik des Toleranzrahmens nach DIN EN ISO 1101 in Anlehnung an [101]

Im ersten Feld in Abbildung 11 wird das Toleranzsymbol nach DIN EN ISO 1101 dargestellt. Das Toleranzsymbol definiert die Referenz für die weitere Toleranzspezifikation zur Bestimmung der Toleranzart [89]. Innerhalb von DIN EN ISO 1101 sind alle geometrischen Toleranzsymbole definiert, die hier nicht weiter im Detail beschrieben werden. Bei Bedarf können diese der DIN EN ISO 1101 [89] entnommen werden.

Die Form der Toleranzzone wird durch die Kombination der intrinsischen Toleranzformen des Toleranzsymbols und des optionalen zusätzlichen Symbols auf der linken Seite des Toleranzwerts gebildet (siehe Abbildung 11). Im dargestellten Beispiel ist das Toleranzsymbol zur Ermittlung der Positionsgenauigkeit angegeben. Die Positionstoleranz kann die Form der Toleranzzone nicht genauer angeben. Das Durchmessersymbol weist ergänzend auf die kreiszylindrische Form der Toleranzzone hin. Ist kein Durchmessersymbol angegeben, ist die Toleranzzone ebenflächig begrenzt. [89] [101]

Der Toleranzwert legt die Größe des Bereichs fest, in dem sich das tolerierte Geometrieelement befinden darf. Er definiert den zulässigen Bereich der minimalen und maximalen Abweichung vom vorgegebenen Soll-Wert. Der innerhalb der Qualitätssicherung ermittelte Ist-Wert des gefertigten Bauteils darf diesen Bereich nicht über- bzw. unterschreiten. [89]

Der Modifikator beschreibt produktspezifische Informationen, die für die vollständige Bauteiltolerierung zusätzlich notwendig sind. Details hierzu können der DIN EN ISO 2692 [102] entnommen werden.

Das Bezugssystem und seine Bezüge dienen der Spezifizierung bestimmter Bauteilmerkmale, die für die umfassende Funktion der Toleranzangabe notwendig sind. Die Anzahl der anzugebenden Bezüge ist von der Art des vorab definierten Toleranzsymbols abhängig. Für die 3D-CAD-Prozesskette und die integrierte Verwendung der 3D-CAD-Modelle zur automatischen Erstellung von Messgeräteprogrammen ist die Überprüfung der semantisch korrekten Tolerierung, bereits innerhalb der Produktentwicklung, grundlegend. Dementsprechend lassen sich speziell im Hinblick auf die Qualitätssicherung entsprechende Forschungsvorhaben nennen, die nachfolgend dargestellt werden. [12] [89] [101]

Ciesla [73] beschreibt eine Methode, um die Durchgängigkeit der CAD-CAQ-Kette auf Basis der Feature-Technologie zu optimieren. Er scheiterte jedoch an den zu diesem Zeitpunkt nicht vollständig vorhandenen Werkzeugen zur Weitergabe der Informationen. Auch mit der Einführung des MBD-Ansatzes und der PMI-Methode bei der 3D-CAD-Modellierung lassen sich die Herausforderungen bezüglich der Datenqualität und der fehlenden Semantik bei der geometrischen Toleranzangabe nicht beheben, wie es Lipman und Filliben [103] beschreiben. Existierende Forschungsarbeiten von Humienny und Berta [104] [105] sowie Yip-Hoi und Gill [106], deren Fokus auf Schulungs- und Weiterbildungsmethoden zur semantisch korrekten Toleranzangabe am 3D-CAD-Modell

liegt, können die für die rechnergestützte Weiterverwendung der 3D-CAD-Modelle notwendige semantisch korrekte Tolerierung nicht sicherstellen.

Fengxia [107] beschreibt ähnliche Ansätze. Er stellt in seiner Publikation eine Methode vor, bei der der Konstrukteur direkt bei der Bauteiltolerierung im CAD-System unterstützt wird, indem mit vordefinierten Angaben die Auswahl weiterer Angaben gezielt eingeschränkt wird. Die Regeln, auf denen die Einschränkungen basieren, werden jedoch nicht erläutert. Es wird nicht ersichtlich, ob eine abschließende semantische Endkontrolle des 3D-CAD-Modells bezüglich der geometrischen Toleranzangaben erfolgt.

Abgekoppelt von den bisher genannten Veröffentlichungen stellen Frechette, et al. [97] eine Testumgebung vor, mit deren Hilfe geometrische Toleranzangaben hinsichtlich der Interpretation durch das 3D-CAD-System in Übereinstimmung mit den Regeln der DIN EN ISO 1101 getestet werden können. Inhaltliche Details zu den Hintergründen der Check-Routinen werden nicht genannt, da der Schwerpunkt im Aufbau der Testumgebung und der Prüfungsdurchführung liegt.

Eine weitere Publikation zum Thema stammt von Lipman und Filliben [103]. Diese befassen sich mit der Analyse der Regelkonformität in Bezug auf die syntaktische und semantische Repräsentation geometrischer Toleranzen zwischen nativen 3D-CAD-Daten und dem STEP-File.

Die Literaturrecherche zu Forschungsvorhaben, die zur vorliegenden Arbeit vergleichbar sind, belegt, dass derzeit keine allgemeingültigen Methoden existieren bzw. diese nicht wissenschaftlich publiziert sind, um die semantisch korrekte Bauteiltolerierung im 3D-CAD-Modell sicherzustellen.

2.5.6 Kennzeichnung und Identifikation der geometrischen und nichtgeometrischen 3D-CAD-Modellinformationen

Jede geometrische und nichtgeometrische Information eines 3D-CAD-Modells kann aufgrund seiner Attribute, seiner Beziehungen zu anderen Elementen und seiner Semantik charakterisiert werden. In CAx-Systemen ist der Name des Features oder Geometrieelements meist das direkt sichtbare Merkmal. Features und Geometrieelemente (vgl. Abschnitt 2.5.3) erhalten beim Erstellen einen Namen (und/oder einen Identifikator), der abhängig von der eingesetzten Software und vom verwendeten Modellierkern vergeben wird. Beispielsweise werden in der CAD-Software *PTC Creo Parametric* alle Features, die auf Skizzen basieren, als *Sketch Based Features* und alle Features, die die Kantengeometrie beeinflussen, als *Edge Features* benannt [108]. Aufgrund der systemspezifischen Handhabung ist es möglich, dass die Namen bei identischem 3D-CAD-Modell zwischen den entsprechenden CAD-Anbietern variieren.

Zusätzlich vergibt der Modellierkern eines CAD-Systems (vgl. Abschnitt 2.3.2) für jedes Feature und Geometrieelement ein separates Identifikationsattribut oder eine eindeutige Kennung (ID). Das Attribut variiert zwischen den unterschiedlichen CAD-Systemen und ist abhängig von der jeweiligen Modellierungstechnik. Parallel erstellt das CAD-System

bei der Tolerierung des 3D-CAD-Modells eine eindeutige Verbindung zwischen der ID der referenzierten Maßbezüge, dem Toleranzmaß und dem gewählten Geometrieelement. Die Assoziativität zwischen den Toleranz- und Bemaßungsinformationen sowie zum referenzierten Geometrieelement bzw. Designfeature wird somit vollständig gewährleistet. [6]

Die Auswirkung unterschiedlicher Modellierungstechniken auf die systemabhängige ID-Vergabe, z. B. im Vergleich zwischen *Siemens NX 1953* und *Creo Parametric 7.0*, ist in Abbildung 12 dargestellt. In Variante 1 wird die dargestellte Bohrung in drei getrennten Schritten konstruiert. Folglich werden drei unterschiedliche IDs für eine eindeutige Identifikation vom CAD-System erzeugt. Im Gegensatz zu Variante 1 wird die Bohrung in Variante 2 mithilfe des internen CAD-Bohrungstools erzeugt. Folglich ist nur eine ID für die komplette Bohrung erforderlich. Weitere Analysen zeigen, dass in Bezug auf die ID-Vergabe bei den CAD-Systemen keine Systematik zu erkennen ist, die sinnvolle Rückschlüsse und Zusammenhänge zwischen der Nummerierung und dem referenzierten Designfeature bzw. Geometrieelement erlauben. Die Identifikationsnummer wird vom CAD-System selbstständig und fortlaufend entsprechend der Erstellungsreihenfolge vergeben. [6]

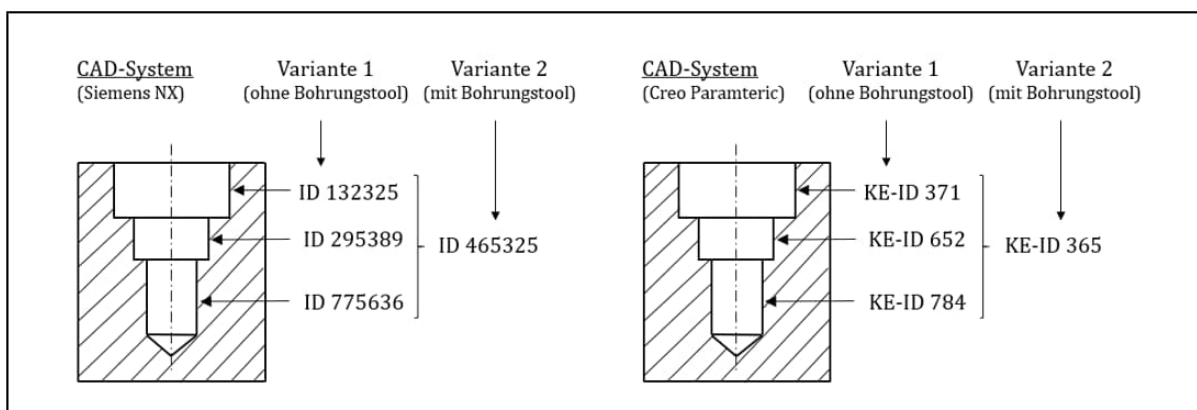


Abbildung 12: Abhängigkeit der ID-Vergabe von der Modellierungstechnik und vom eingesetzten CAD-System

Die systemabhängige Kennzeichnung der 3D-CAD-Modellinformationen sorgt für Kommunikationsprobleme über verschiedene industrielle Bereiche und Aktivitäten hinweg, da die Kennzeichnung die Grundlage für eine eindeutige Identifikation der geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im Produktentstehungsprozess bildet. Neben Unklarheiten auf zwischenmenschlicher Ebene sind es verstärkt informationstechnische Aspekte, die von den variierenden Kennungen beeinflusst werden. Wird ein 3D-CAD-Modell von einem Erzeugersystem in ein anderes Ziel-CAD-System transferiert, werden beim Auftreten unterschiedlicher Modellierkerne unterschiedliche IDs für identische Features und Geometrieelemente generiert. Die Eindeutigkeit der ursprünglichen (nativen) 3D-CAD-Modellinformationen geht somit verloren. Das gleiche Phänomen tritt bei der Modellübertragung in ein anderes Folgesystem, z. B. ins CAQ-System, auf. In der Literatur existieren bereits Forschungsansätze, die sich mit der eindeutigen und durchgängigen Identifikation der

Bauteilmerkmale zwischen CAx-Systemen beschäftigen. Neben externen Datenbanken, speziellen Dateiformaten und zusätzlichen Softwarelösungen wird auch der Mapping-Ansatz (von ‚ID-alt‘ zu ‚ID-neu‘) verfolgt.

Picard [58] beschreibt in seiner Dissertation einen Ansatz, bei dem die geometrischen und nichtgeometrischen 3D-CAD-Modellinformationen in einer separaten Datenbank gespeichert werden. Die real ermittelten Fertigungszustände zu einem Werkstück werden erfasst und über ein Werkstückinformationsmodell übertragen. Mittels Nutzung der Informationen aus der Datenbank und dem Werkstückinformationsmodell wird die Rückverfolgbarkeit der Bauteilinformationen ermöglicht.

Farjana et al. [109] und Safdar et al. [110] lösen das Problem der uneindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen über einen Mapping-Ansatz. Unter Zuhilfenahme einer Zusatzsoftware wird die eindeutige Identifikation zwischen zwei CAx-Systemen realisiert.

Ein weiterer Ansatz basiert auf dem im Jahr 2020 veröffentlichten QIF-Neutralformat [111]. Die Durchgängigkeit wird hier über eindeutige Merkmal-IDs geschaffen, allerdings werden diese beim Export ins QIF-Format (vgl. Abschnitt 2.6.3) neu und völlig losgelöst von der nativen Merkmal-ID des Erzeugersystems vergeben. Mit der Stempel-Methode [15] [49] kann die Durchgängigkeit ebenfalls erreicht werden (vgl. Abschnitt 2.4.2). Auch hier wird eine Zusatzsoftware für die Realisierung der eindeutigen Merkmalskennzeichnung verwendet.

Die derzeit am Markt verfügbaren IT-Tools konzentrieren sich überwiegend auf die 2D-basierte Arbeitsweise. Mit der 3D-CAD-basierten Stempelung existiert ein vielversprechender Ansatz, allerdings wird die Eindeutigkeit innerhalb der CAx-Prozesskette lediglich über die Benennung der Features und Geometrieelemente gewährleistet, die mithilfe der Stempelsoftware im 3D-CAD-Erzeugersystem neu generiert wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Schaffung der Durchgängigkeit wird in der Literatur über die Auszeichnungssprache XML (*Extensible Markup Language*) gewährleistet [108]. Bei diesem Ansatz müssen die Struktur und die Attribute eines 3D-CAx-Modells zunächst exportiert und separat abgespeichert werden. Zusätzliche Softwaretools, Schnittstellen und Konverter sind zur fehlerfreien Interpretation der Daten notwendig.

Die Herausforderung beim Austausch von 3D-CAD-Modellen besteht darin, systemneutrale Schnittstellen und Dateiformate ohne kostspielige und zeitaufwendige Zusatzapplikationen zu nutzen, um die durchgängige und eindeutige Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen zwischen den unterschiedlichen Anwendungssystemen zu gewährleisten. Wie diese Analyse zeigt, ist die anwendungsübergreifende Nutzung der IDs technologisch nur bedingt realisierbar. Zur Abhilfe werden häufig unternehmensinterne Lösungen entwickelt, um die Rückverfolgbarkeit der Bauteilmerkmale zwischen den CAx-Systemen zu gewährleisten. Die Folge sind unzählige unternehmensspezifisch und aufwendig entwickelte CAD-Schnittstellen, die für jede

Softwareversion, für jedes Austauschformat und für jedes neue Anwendungssystem eine spezifische Anpassung der Lösung erfordern. Eine durchgängige und eindeutige Identifikation der 3D-CAD-Bauteilinformationen wird durch die eben genannten Ansätze zwar realisiert, allerdings ist die Implementierung der Methoden mit hohem Zeit- und Ressourcenaufwand verbunden.

2.6 Datenaustausch von 3D-CAD-Modellen

Der Datenaustausch von 3D-CAD-Modellen ist für die 3D-CAD-basierte Fertigungssteuerung und für den Erfolg eines Unternehmens von zunehmender Bedeutung. Die unterschiedlichen Methoden des 3D-CAD-Datenaustauschs werden nachfolgend beschrieben. Neben dem nativen und dem neutralen Datenaustausch werden derzeitige Prozesse und Herausforderungen des unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden 3D-CAD-Datenaustauschs dargestellt. Existierende Ansätze zur Sicherstellung des 3D-CAD-Datentransfers schließen diesen Abschnitt ab.

2.6.1 Interner und externer 3D-CAD-Datenaustausch

Grundsätzlich wird zwischen horizontalen und vertikalen Prozessketten unterschieden [14]. Dabei ist mit ‚horizontal‘ das Zusammenwirken verschiedener Abteilungen (z. B. von Konstruktion und Arbeitsvorbereitung), diverser Technologien und unterschiedlicher Bearbeitungsschritte gemeint, wohingegen ‚vertikal‘ für die Zuarbeit auf technologie- und arbeitsschrittspezifischer Ebene steht (z. B. stehen Aufgabenfelder im Fokus, die speziell die Arbeitsvorbereitung betreffen) [14].

Unternehmensinterne Prozesse finden meist auf horizontaler Ebene statt. Hierbei sorgen die CAx-Systeme aus Abschnitt 2.3.2 für eine verstärkte Integration getrennter Unternehmensbereiche und unterstützen den durchgängigen Datenfluss. Ihre Vernetzung erfordert Schnittstellen und ist häufig mit Kompatibilitätsproblemen versehen, die durch den Einsatz unterschiedlicher Datenformate hervorgerufen werden [16, S. 22]. Diverse Datenformate ermöglichen die digitale Speicherung von Informationen, wohingegen Schnittstellen Gebilde von Bedingungen, Vereinbarungen und Regeln sind, die den Informationsaustausch zwischen miteinander kommunizierenden IT-Systemen und Systemkomponenten ermöglichen [61, S. 44–45]. Die Informationsübertragung kann nur dann stattfinden, wenn in den beteiligten IT-Systemen vergleichbare Datenformate zur Verfügung stehen. [14]

Häufig kommt es beim Datenaustausch auf nativer (vgl. Abschnitt 2.6.2) und neutraler (vgl. Abschnitt 2.6.3) Ebene zum Verlust von Informationen, da die Datenkompatibilität zwischen den unterschiedlichen CAx-Herstellern variiert. Der Grund hierfür sind die unterschiedlichen Systemstrukturen und CAD-Modellierkerne. [14]

Die Auslagerung von Prozessen und Leistungen gewinnt bei Unternehmen zunehmend an Bedeutung, da dadurch Personal- und Fixkosten eingespart werden können [112]. Häufig wird das sogenannte *Outsourcing* auch mit dem Fehlen von internem Know-how begründet. Hinter den genannten Vorteilen verbergen sich jedoch auch technische und

organisatorische Herausforderungen, die insbesondere den Datenaustausch betreffen. Neben unternehmensinternen Schnittstellen entstehen zusätzliche Datenschnittstellen aufgrund der Einbindung externer Lieferanten, die einzelne Bauteile oder Produkte für die Endmontage an das vertreibende Unternehmen liefern (siehe Abbildung 13). Aufgrund der unterschiedlichen Regelungen und Anforderungen einzelner Unternehmen, Teilbereiche oder Kunden kommt es zur Anhäufung unterschiedlicher IT- und CAx-Systeme. Beispielsweise ist es möglich, dass Lieferant und OEM (*Original Equipment Manufacturer*) unterschiedliche CAD-Systeme verwenden, was den externen Datenaustausch zusätzlich erschwert [61, S. 44–45]. Häufig sind manuelle Nacharbeiten die Folge heterogener Systemkombinationen. [14]

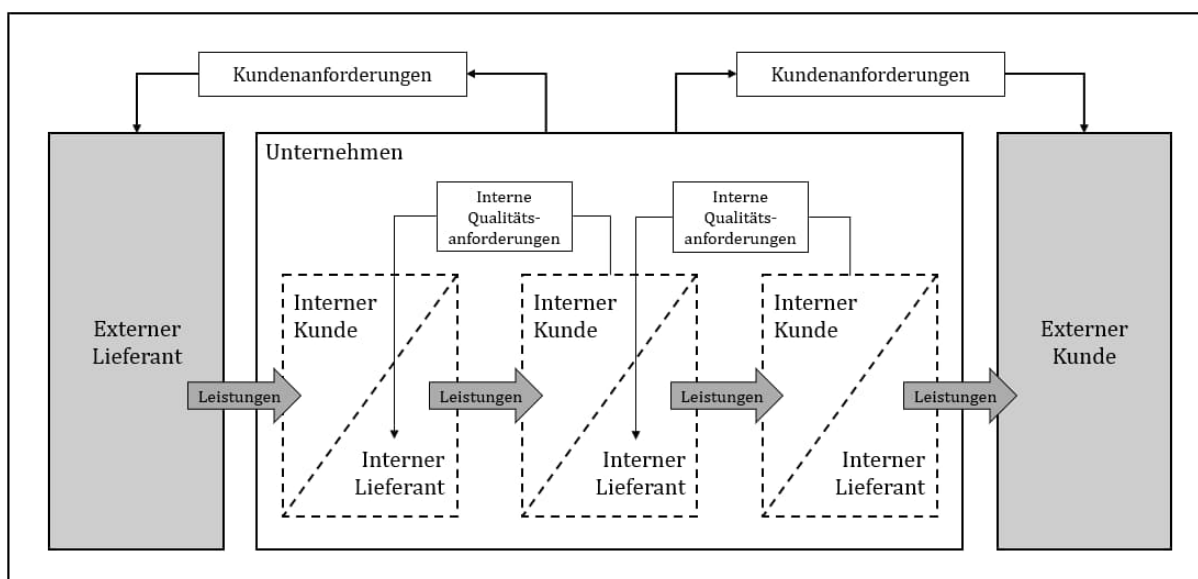


Abbildung 13: Schnittstellen und Beziehungen zwischen Lieferant und Kunde beim internen und externen Datenaustausch in Anlehnung an [113, S. 91–98]

Neben dem Austausch der 3D-CAD-Bauteilmodelle zwischen OEM und Lieferant existieren zudem Herausforderungen beim elektronischen Datenaustausch von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln zwischen Hersteller und Kunde. Sachmerkmallisten zur Beschreibung der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel (vgl. Abschnitt 2.4.3) werden z. B. häufig als *Microsoft-Excel-Files (*.xls)* ausgetauscht und können demnach nicht direkt und nicht ohne manuellen Mehraufwand vom Kunden weiterverarbeitet werden. Die für CNC-Simulationszwecke erforderlichen 3D-CAD-Daten der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel werden teilweise oder komplett vom Anwender nachkonstruiert oder aus Online-Katalogen in die internen CAD-Systeme geladen und manuell in die etablierten Datenverwaltungssysteme importiert. Aufgrund der lückenhaften Datenpflege bei den Anwendern fehlen viele beschreibende Sachmerkmale sowie verwaltungsrelevante Dokumente zu den Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln, die für ein durchgängiges Daten- und Ressourcenmanagement zur optimierten Prozesssteuerung erforderlich sind. Diese werden meist separat und mit hohem Aufwand nachträglich erzeugt, indem sie manuell abgetippt oder bei Firmen bestellt werden, die auf Datenaufbereitung spezialisiert sind. Dabei werden die Daten für die Weiterverwendung in CAx-Systemen (z. B. CAM- oder CAQ-Systemen) häufig manuell mit Koordinatensystemen, schneidenden und nicht

schneidenden Bereichen, Farben etc. angereichert, um für Simulationszwecke im digitalen Arbeitsumfeld einsetzbar zu sein. Dieses Vorgehen ist nicht nur zeitintensiv und unwirtschaftlich, sondern auch fehleranfällig und widerspricht dem Digitalisierungsvorhaben im Rahmen der Initiative Industrie 4.0. Der bereits nach DIN 26100 [114] und DIN 4000-102 [115] entwickelte Standard für den elektronischen Datenaustausch bleibt bis heute größtenteils ungenutzt. [28] [116]

Zur Gewährleistung eines effizienten Datentransfers zwischen Zulieferer und OEM sind Schnittstellen zu reduzieren und qualitativ hochwertige 3D-CAD-Daten bereitzustellen, um manuelle Nacharbeiten bei der Datenaufbereitung weitestgehend zu vermeiden. Im Zuge der Digitalisierung gewinnen Daten und folglich auch deren Qualität zunehmend an Bedeutung [117] [118]. Ihre Eignung für die jeweilige Anwendung wird nach Helmig und Hollmann [119] anhand unterschiedlicher Kriterien, z. B. der Fehlerfreiheit, bewertet. Die Einhaltung bzw. Erfüllung der geforderten Datenqualität unterliegt erheblichen Schwankungen, weshalb deren Sicherstellung noch immer eine entscheidende und häufig unterschätzte Herausforderung darstellt [117] [118] [119] [120]. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und stellen gerade beim Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Anwendungssystemen die Quelle der Qualitätsprobleme dar [118].

Zur Vorbeugung von Datenqualitätsproblemen ist eine fehlerfreie Informationsbereitstellung bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung anzustreben. In der Regel sind die geringsten Schnittstellenverluste zu erwarten, wenn Lieferant und OEM dasselbe CAD-System verwenden. Dies ist überwiegend beim Austausch nativer CAD-Daten der Fall. Auch der Austausch neutraler Datenformate senkt die Informationsverluste. Beide Arten des Datenaustauschs werden nachfolgend detailliert erläutert. [121]

Zur Sicherstellung der Datenqualität stehen bereits unterschiedliche Softwaretools und Anwendungen zur Verfügung. In Bezug auf die Gewährleistung fertigungsgerechter 3D-CAD-Modelle, reduziert sich deren Anzahl jedoch erheblich. Dies verdeutlicht den geringen Entwicklungsstand und belegt das hohe Entwicklungspotenzial auf diesem Forschungsgebiet. Neben Softwaretools, die die Einhaltung unternehmensinterner Standards bezüglich homogener Datenstrukturen und Modellierungsstrategien sicherstellen, existieren bereits Softwaretools zur Geometrieprüfung nach dem Import der 3D-CAD-Modelle in das Anwendersystem. Die Prüfungen zum Umfang und der Qualität der CAD-/CAM-Daten erfolgen überwiegend nach VDA-Empfehlungen, z. B. nach VDA 4950 [122] oder VDA 4955 [123]. Diese Standards werden bereits bei der Datenkonvertierung von nativen 3D-CAD-Daten in neutrale Austauschformate im CAD-CAM-Umfeld angewendet. Die bestehenden Ansätze sind jedoch nur beschränkt einsetzbar und hinsichtlich der Umsetzbarkeit fertigungsgerechter Konstruktionen weiterzuentwickeln. Bekannte Ansätze sind der *Q-Checker* der Firma Technia für *CATIA* oder der *CAX Quality Manager* der Firma Heidelberg für *Siemens NX*. Zu den CAD-internen Tools zählen beispielsweise *ModelCHECK* in *PTC Creo Parametrics* oder *NX-Check-Mate* in *Siemens NX*. Einige der genannten Softwaretools bieten die Möglichkeit die 3D-CAD-Modelle auf eine korrekte Tolerierung zu überprüfen (vgl. Abschnitt 2.5.5). Hierbei wird

der Fokus verstärkt auf die semantisch korrekte Spezifikation der Form- und Lagetoleranzen mittels PMI im 3D-CAD-Modell gelegt. Die bestehenden Softwaretools haben jedoch ein unterschiedliches Leistungsspektrum, was auf einen fehlenden Standard und auf zusätzliches Entwicklungspotenzial schließen lässt. [61]

2.6.2 Prozessbeschreibung zum nativen 3D-CAD-Datenaustausch

Eine Möglichkeit für den Austausch von 3D-CAD-Modellen zwischen zwei CAD-Systemen ist der native Datenaustausch. Diese Art des Datenaustauschs erfolgt über die direkte Konvertierung der 3D-CAD-Daten aus dem Erzeugersystem in ein anderes Zielsystem (siehe Abbildung 14). Es existiert eine direkte Schnittstelle zwischen den beteiligten CAD-Systemen. Ein Übersetzer ermöglicht die Konvertierung eines nativen Datenformats aus dem Erzeugersystem in ein natives Datenformat des Zielsystems. Es wird kein Zwischenformat benötigt, sodass die Informationen unmittelbar, also ohne Umweg, in das Zielsystem übertragen werden. Da die Informationen auf unmittelbarem Weg übertragen werden, wird das Risiko des Informationsverlusts deutlich reduziert. Der Nachteil ist, dass für diese Art der Übertragung zusätzliche Konverter notwendig sind. Die Anzahl der notwendigen Konverter wird nach der Formel $n \cdot (n - 1)$ berechnet, wobei n für die Anzahl der am Datenaustausch beteiligten CAD-Systeme steht. Angesichts der Vielzahl der in der Industrie eingesetzten CAD-Systeme erweist sich diese Art des Datenaustauschs als nicht geeignet, vor allem dann nicht, wenn externe Kunden oder Lieferanten an der Prozesskette beteiligt sind. [40, S. 327–347] [124, S. 16–17]

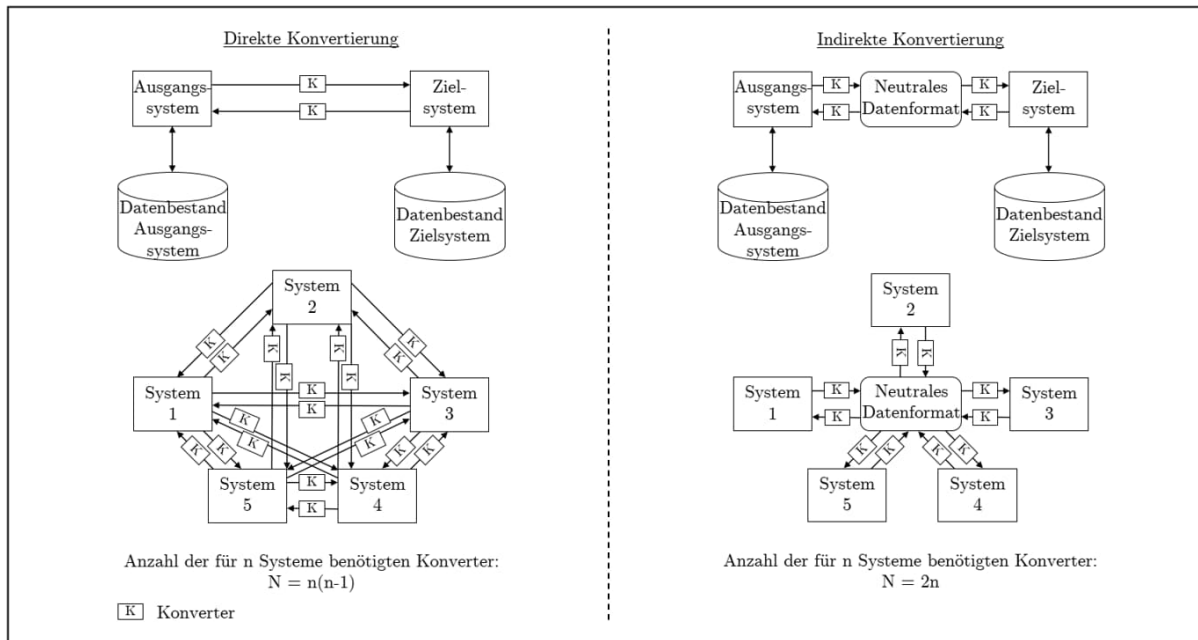


Abbildung 14: Direkte und indirekte Konvertierung beim 3D-CAD-Datenaustausch in Anlehnung an [125]

2.6.3 Prozessbeschreibung zum neutralen 3D-CAD-Datenaustausch

Im Gegensatz zum nativen 3D-CAD-Datentransfer lässt sich die Anzahl der notwendigen Konverter bei der indirekten Konvertierung nach der Formel $2 \cdot n$ berechnen. Auch hier

beschreibt n die Anzahl der am Datenaustausch beteiligten CAD-Systeme. Somit werden anhand dieser Methode nur jeweils zwei Konverter pro CAD-System notwendig. Zur Übertragung des CAD-unabhängigen Formats wird ein Konverter für den Import und ein Konverter für den Export benötigt. Die Vereinfachung der Datenaustauschstrukturen ist in Abbildung 14 dargestellt. Je nach Implementierung der Konverter im CAx-System können Informationsverluste bei der Datenübertragung auftreten. Jedoch ist die Entwicklung der gängigen Neutralformate derzeit weit fortgeschritten, sodass der vollständige 3D-CAD-Datentransfer überwiegend sichergestellt ist. [40, S. 327–347] [124, S. 16–17]

Für den neutralen 3D-CAD-Datenaustausch haben sich unterschiedliche Austauschformate als Übertragungsmedien etabliert. Die Auswahl geeigneter Austauschformate erfolgt meist branchenabhängig und anwendungsspezifisch. Im Folgenden wird der Fokus auf neutrale Austauschformate für den 3D-CAD-Datenaustausch gelegt. Die Verwendung 3D-CAD-neutraler Austauschformate findet überwiegend beim Informationsaustausch zwischen Hersteller und Kunde statt, um die Daten vor Dritten zu schützen und zu verhindern, dass die bereitgestellten Daten unkontrolliert genutzt oder verändert werden [61, S. 44–45].

Die neutralen Dateien können für die Anwendungen innerhalb unternehmensinterner CAx-Prozessketten und für externe Partner oder Subunternehmer verwendet werden, ohne das Know-how der Hersteller offenzulegen und die sensiblen Informationen aus der Entwicklung zu veröffentlichen. Werden neben den reinen Geometrieinformationen weitere Daten vom CAx-System benötigt, ist es möglich diese über geeignete Schnittstellen und erweiterte Anwendungssoftware aus dem CAD-System auszulesen [45]. Diese Zusatzinformationen können über spezielle Datenformate, sogenannte Auszeichnungssprachen, an das Zielsystem übertragen werden [45].

Der Vorteil der Auszeichnungssprachen liegt darin, dass Inhalt und Layout gezielt unterschieden werden. Auszeichnungssprachen sind maschinenlesbar und eignen sich insbesondere für die Darstellung hierarchisch strukturierter Daten. Abbildung 15 zeigt exemplarisch den neutralen Datentransfer zwischen der Produktentwicklung und der Qualitätssicherung. Dabei wird zunächst das native Dateiformat (z. B. *.prt oder *.asm) im CAD-Umfeld in ein neutrales Dateiformat (z. B. *.stp oder *.jt) konvertiert und anschließend der Export der Neutraldatei gestartet. Beim Import ins CAQ-System wird die Neutraldatei in das native Dateiformat des Zielsystems (z. B. *.sab) umgewandelt.

Aus den unterschiedlichen CAx-Systemumgebungen resultieren unterschiedliche Datenmodelle. Diese basieren auf unterschiedlichen Informationsmodellen, die die Interpretation und Übersetzung der 3D-CAD-Modellinformationen hemmen. Der Austausch reiner Geometrie- und Zusatzinformationen wird gegenwärtig nahezu fehler- und barrierefrei unterstützt, jedoch werden die Informationen zur eindeutigen Identifikation der Bauteilmerkmale nicht durchgängig mitgeliefert, sodass keine Rückführung der Informationen aus der produktbezogenen Qualitätssicherung in die Produktentwicklung stattfinden kann.

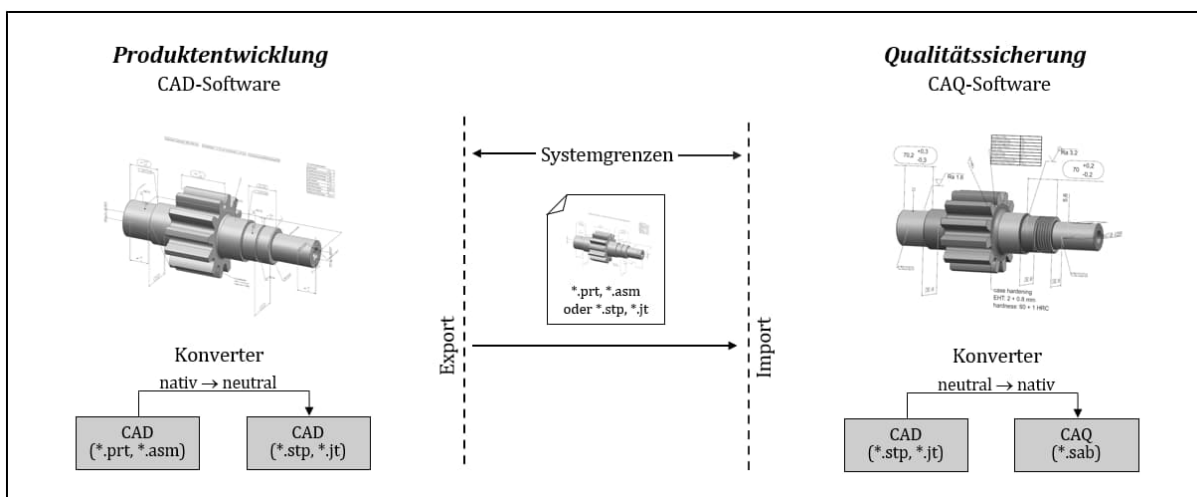


Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung für den 3D-CAD-Datenaustausch entlang der CAD-CAQ-Prozesskette

Ein neutrales Austauschformat für 3D-CAD-Daten nach dem Standard ISO 10303 ist STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*). Hierbei handelt es sich um eines der am weitesten verbreiteten Neutralformate im industriellen Umfeld. Mithilfe von STEP lassen sich im Gegensatz zu anderen Formaten nicht nur reine Geometriebeschreibungen, sondern auch Metadaten übertragen. Dazu gehören z. B. Konstruktionsdaten, Daten des Anforderungsmanagements, Prozessplanungsdaten oder auch Daten der Werkzeugwegsimulation und der CNC-Programmierung. [40, S. 272] [126]. Somit bietet STEP die Grundlage für eine durchgängige und rechnergestützte CAX-Prozesskette innerhalb der Produktentstehung [127]. [30]

Für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche werden nach ISO 10303 unterschiedliche Applikationsprotokolle definiert. Neben STEP AP203 [128] und STEP AP214 [129] existiert auch das Protokoll STEP AP242 [130]. Letztgenanntes ist das jüngst veröffentlichte Applikationsprotokoll. STEP AP242 ist die Zusammenführung der Applikationsprotokolle STEP AP203 und STEP AP214. Mit dem speziell für das 3D-modellbasierte Engineering entwickelten Protokoll STEP AP242 können erstmalig Informationsfeatures (z. B. PMI) exportiert werden, was die Verwendung dieses Neutralformats für die Methodenentwicklung im Rahmen dieser Arbeit qualifiziert [126]. Die Beschreibung der Geometrien erfolgt in STEP-Dateien über den B-Rep-Ansatz aus Abschnitt 2.5.2. Die STEP-Dateien sind unkomprimierte ASCII-Dateien, deren Dateistruktur durch die objektorientierte Modellierungssprache EXPRESS (*Expressive Power*) beschrieben wird [40, S. 334–335] [131]. [30] [124, S. 17–23]

Ähnlich wie die Formate nach ISO 10303 (STEP) ist JT (*Jupiter Tessellation*) ein Datenformat zur CAD-neutralen Beschreibung von 3D-CAD-Modellen, das auf der Norm ISO 14306 basiert. Das komprimierbare Binärformat dient hauptsächlich der Visualisierung von 3D-CAD-Geometrien und den entsprechenden Metadaten, z. B. von Bauteilattributen, Informationen zu Produktstrukturen und Fertigungsinformationen. Somit ist das JT-Format universell einsetzbar und dient insbesondere als Visualisierungsformat für die Fertigung, Simulation oder für digitale Versuchsmodelle

(engl.: *Digital Mock-Up*, DMU). Auch die Visualisierung von 3D-CAD-Daten auf Mobilgeräten wird unterstützt [12, S. 209–216]. Neben Visualisierungszwecken wird das JT-Format für den 3D-CAD-Produktdatenaustausch sowie für Collaborative-Engineering-Methoden eingesetzt. Das JT-Format ermöglicht die Integration dreier unterschiedlicher Geometriepräsentationen, mit denen die 3D-CAD-Informationen abgebildet werden können. Die Möglichkeit zur Übertragung von Fertigungsinformationen über PMI am 3D-CAD-Modell besteht auch hier wieder über den B-Rep-Ansatz. [12, S. 204–208] [40] [127] [132] [133]

Das QIF-Format (*QIF: Quality Information Framework*) ist in ISO 23952 genormt und dient zur Übersetzung nativer CAD-Dateien in ein XML-basiertes Standardformat. Das QIF-Format gewährleistet die Interoperabilität und Rückverfolgbarkeit von Produkt- und Prozessdaten über den gesamten Produktlebenszyklus und dient zur Unterstützung des Digital-Thread-Konzepts aus Abschnitt 2.2.2. Es umfasst – ausgehend von der Produktentwicklung über die Prüfplanung bis hin zur Auswertung und Messprotokollierung – unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten, um den Austausch von Messdaten über den gesamten Prozess der Qualitätssicherung in der Fertigung zu unterstützen. Die verschiedenen QIF-Anwendungsmodelle basieren auf der Auszeichnungssprache XML [134] [135] und einer Bibliothek von XML-Schemas, die sowohl die Datenintegrität als auch die Dateninteroperabilität bei der Implementierung modellbasierter Unternehmen gewährleisten. Darüber hinaus können in einem Unternehmen auch andere Datenmodelle und Austauschformate mit QIF-Daten koexistieren. Die Besonderheit des QIF-Standards zeigt sich in der Struktur des CAD-Modellaufbaus. Dieser ist nicht hierarchisch. Jedes Feature erhält eine eindeutige Identifikationsnummer (ID), um im CAx-Umfeld eindeutig zuweisbar bzw. identifizierbar zu sein. Diese ID wird neu vergeben, wenn das native 3D-CAD-Modell in ein QIF-MBD-Modell konvertiert wird. Nach erfolgter Konvertierung sind die neuen IDs der Features nicht identisch zu den ursprünglichen Feature-IDs der nativen Datei. Da das QIF-Format im Juli 2020 als ISO-23952-Standard veröffentlicht wurde, werden der direkte CAD-Export und der CAx-Import nach diesem Standard bislang nur von wenigen CAx-Softwareherstellern unterstützt. [136]

2.7 Datenverwaltungssysteme für die digitale Fabrik

Der Umgang mit Daten, z. B. Datenerfassung, Datenverwaltung und Datenaustausch, spielt innerhalb der Digitalisierung eine wesentliche Rolle [137]. Zur Erreichung einer erfolgreich integrierten Digitalisierung im Unternehmen sind die ermittelten Daten informationstechnisch zu speichern, um sie über vernetzte Datenbanksysteme für alle Prozessbereiche zur Verfügung zu stellen. Die hierfür relevanten Konzepte, IT-Systeme und deren Vernetzung sind in Abbildung 16 dargestellt und werden nachfolgend beschrieben.

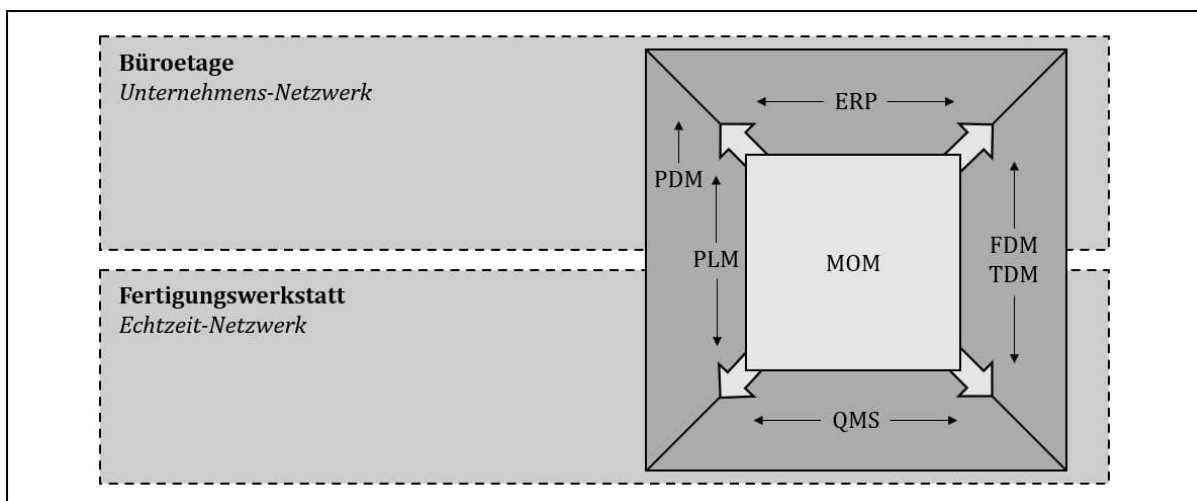


Abbildung 16: Vernetzungsarchitektur der Datenverwaltungssysteme im Unternehmen in Anlehnung an [138, S. 86]

Product Lifecycle Management (PLM) ist ein IT-gestütztes Unternehmenskonzept, mit dem alle Informationen zu einem Produkt über den gesamten Produktlebenszyklus verwaltet werden [139] [48]. Das Ziel ist die rechtzeitige Einbeziehung aller produktspezifischen Informationen in die Entwicklungsphase des Produkts, weshalb im Zentrum des PLM die interne und externe Kooperation der Unternehmensstruktur, der Kommunikation und des Informationsaustauschs zwischen Hersteller und Kunde stehen [43]. Die PLM-Architektur als Gesamtlösung umfasst mehrere einzelne IT-Systeme, die jeweils Teilkonzepte des Informationsmanagements im Unternehmen bilden. Neben der Integration eines *Product Data Management* (PDM) Systems sind weitere Schnittstellen zur Nutzung der Produktdaten innerhalb verschiedenster Geschäftsprozesse notwendig. Diese Schnittstellen ermöglichen die Kopplung an *Enterprise Resource Planning* (ERP) Systeme, um bestehende Unternehmensressourcen den Produkthanforderungen zuweisen zu können. [140, S. 9–12]

Das ERP-System ist ein Business-Management-System, um Daten aus Geschäftsaktivitäten zu sammeln, zu speichern, zu interpretieren oder zu teilen. Es unterstützt die effektive Nutzung von Unternehmensressourcen und erleichtert den Informationsfluss zwischen allen Geschäftsfunktionen eines Unternehmens. Nach dem Standard IEC 62264 gliedern sich die ERP-Aktivitäten in geschäftsbezogene und produktionsbezogene Bereiche. Der geschäftsbezogene Bereich umfasst alle Themen, die für die Verwaltung der Fertigungsorganisation notwendig sind. Die produktionsbezogenen Aktivitäten beziehen sich auf Festlegungen zur Werksplanung und logistische Aspekte wie Lagerbestände und die rechtzeitige Verfügbarkeit der Materialien. ERP-Lösungen besitzen Funktionen zur Prüfung der Verfügbarkeit potenzieller Ressourcen und übernehmen ggf. die Bestellung fehlender Artikel. Der Lagerort und die Anzahl von produktions- bzw. fertigungsrelevanter Ressourcen werden im Gegensatz zur materiellen Verfügbarkeit nicht berücksichtigt. [141] [142, S. 3–5]

Product Data Management (PDM) Systeme sind datenbankbasierte Informationssysteme, die Produktinformationen während des Produktentstehungsprozesses konsistent

speichern, verwalten und allen relevanten Geschäftsbereichen transparent zur Verfügung stellen. Produktinformationen sind z. B. 2D-Zeichnungen, 3D-CAD-Modelle oder Informationen zu Stücklisten und Werkstoffen. Die Verwaltung der Informationen erfolgt mithilfe von Metadaten (z. B. Struktur- und Klassifizierungsdaten). Dabei handelt es sich insbesondere um Informationen mit beschreibender und klassifizierender Funktion zur Verwaltung und Organisation von Informationsmedien. PDM-Systeme unterstützen bei der Erstellung, der Änderung, der Versionierung und der Archivierung von Produktstrukturen und bieten innerhalb des Produktentstehungsprozesses eine Integrationsplattform für prozessbegleitende CAx-Systeme, z. B. CAD-Systeme. Eigner und Stelzer [143, S. 31–36] beschreiben PDM als Verwaltung von Produkt- und Prozessmodellen mit dem Ziel, klare und reproduzierbare Produktkonfigurationen zu erzeugen. Das Produktmodell umfasst in diesem Zusammenhang die produktdefinierenden Daten, während das Prozessmodell die technischen und organisatorischen Geschäftsprozesse abbildet. [30, S. 519]

Über das *Factory Data Management* (FDM) werden die Daten der Fabrik- und Prozessplanung verwaltet und bereitgestellt [76, S. 15]. Die Grundlage hierfür ist eine gemeinsame Datenbasis, die aufgrund von Internet- und Cloud-Technologien nicht mehr zwingend einer räumlichen Gebundenheit unterworfen bzw. an einen einheitlichen physischen Datenspeicher gebunden sein muss [144, S. 163–195]. Das FDM gewährleistet außerdem, dass sämtliche Mitarbeiter im Unternehmen mit denselben Daten arbeiten und ein Mehraufwand in Form der doppelten Eingabe oder der Nacharbeitung fehlerhafter Daten sowie Datenredundanzen vermieden werden. Neben den produktunabhängigen Werkzeug- und Maschinendaten ist es für eine durchgängige und funktionierende Fabrikplanung von großer Bedeutung, dass auch die CNC-Programme aus der CAM-Programmierung im FDM verwaltet werden [76, S. 15]. Demnach ist das FDM eine IT-Lösung zur Verwaltung von Werkzeug-, Maschinen- und Technologieinformationen, wobei die reine Werkzeugdatenverwaltung häufig vom *Tool Data Management* (TDM) übernommen wird [76, S. 103]. [76, S. 102–108]

Mithilfe des TDM-Systems wird die Verfügbarkeit von Werkzeugen organisiert, die für die Fertigung eines Produkts oder Bauteils benötigt werden. Neben der Werkzeugklassifizierung, der Werkzeugbeschreibung und der Werkzeugdokumentation zur richtigen Werkzeugauswahl spielen der aktuelle Standort, die Anzahl sowie der Zustand der Werkzeuge eine entscheidende Rolle. Weiterhin wird mit dem TDM-System der Lagerbestand der Fertigungshilfsmittel innerhalb der Fabrik organisiert. Demzufolge wird mittels TDM-Lösungen die notwendige Transparenz bezüglich der Werkzeugbestände gewährleistet und der Zustand sowie der aktuelle Standort (z. B. der Lagerort) der Werkzeuge werden bereitgestellt. [145]

Nach dem Standard IEC 62264 werden mithilfe des *Manufacturing Operations Management* (MOM) alle Aktivitäten innerhalb einer Produktionsanlage unterstützt, die die Koordination von Personal, Ausrüstung und Material in der Fertigung beinhalten. Die zur Koordination benötigten Daten stammen einerseits aus den PDM-, ERP-, FDM- und TDM-Systemen (siehe Abbildung 16) und andererseits aus den Betriebsdaten, z. B. aus

Produktionsbestätigungsinformationen oder Prozessdaten aus der Fertigung. Im Gegensatz zu ERP-Systemen arbeitet MOM mit dynamischen Daten, wie beispielsweise Daten direkt aus dem Bereich der Fertigungswerkstatt. Das MOM ist auf Basis dieser Daten in der Lage, zentrale Entscheidungen im Fertigungsbereich zu treffen oder bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen. Typische Daten sind Informationen zur Verfügbarkeit, zum aktuellen Standort oder zu den Eigenschaften prozessbeteiligter Maschinen, Vorrichtungen oder Werkzeuge [146]. Für eine prozess- und zeitnahe Fertigungsplanung und -steuerung sind all diese Funktionalitäten notwendig. Sie gewährleisten nicht nur die nötige Prozesstransparenz, sondern bilden parallel auch den Informations- und Materialfluss ab. [141] [147] [148] [149]

Das *Quality Management System* (QMS) sammelt, speichert und verwaltet produkt- sowie prozessbezogene Qualitätsdaten über den kompletten Produktentstehungsprozess [150]. Zur Speicherung der Qualitätsdaten dient häufig eine zentrale Datenbank, um anhand der Daten eine umfassende Bewertung und Optimierung der Prozess-, Produkt- und Bauteilqualität durchzuführen [17, S. 9–15]. Häufig werden messtechnisch erfasste Ist-Daten aus der Qualitätsprüfung im QMS verwaltet, um diese mit den Soll-Daten aus dem PDM-System bzw. mit dem 3D-CAD-Modell oder dem Prüfplan abzugleichen. Das QMS wird häufig in die vorhandene IT-Infrastruktur (z. B. PDM, ERP oder FDM) integriert. Die unterschiedlichen Datenverwaltungssysteme kommunizieren über das MOM, wodurch die abteilungsübergreifende und durchgängige Kommunikation im Unternehmen sichergestellt wird.

2.8 Fazit zum Stand der Forschung und Technik im Bereich der 3D-modellbasierten Arbeitsweise

Der Grundgedanke, die 2D-basierte Arbeitsweise im Produktentstehungsprozess durch 3D-basierte Methoden abzulösen, ist nicht neu. Wie dem Stand der Technik dieser Arbeit zu entnehmen ist, existieren bereits Forschungsansätze und Lösungsvorschläge, die mithilfe der modellbasierten Produktdefinition (vgl. Abschnitt 2.5.2) das Ziel haben, den Produktentstehungsprozess effektiver, schneller und transparenter zu gestalten. Das Ziel der Ablösung der 2D-Zeichnung besteht darin, Medienbrüche sowie manuelle Tätigkeiten und individuelle Fehlerquellen zu reduzieren. Mit der Einführung des 3D-CAD-Modells als Informationsträger werden zwar einige dieser Medienbrüche eliminiert, jedoch entstehen innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette weitere, teils neue Herausforderungen, die mit der 3D-CAD-basierten Arbeitsweise einhergehen (vgl. Abschnitt 1.1).

Die durchgängige Nutzung der 3D-CAD-Modellinformationen ist derzeit nicht garantiert (vgl. Abschnitt 2.5.6). Dies führt zu erheblichen Beeinträchtigungen im Bereich der 3D-CAD-basierten Organisation und Steuerung von Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozessen (vgl. Abschnitt 2.4.4). Werden die bestehenden Herausforderungen nicht behoben, werden die klassischen 2D-basierten Prozesse in den Unternehmen bestehen bleiben, und das 3D-CAD-Modell wird weiterhin lediglich als Basis zur Erzeugung der 2D-Zeichnung und zu Visualisierungszwecken genutzt werden.

Potenzial für die wissenschaftliche Durchdringung bieten die Methoden im Bereich der virtuellen Produktentwicklung. Maßnahmen, die insbesondere den Datenaustausch betreffen, müssen bereits in der frühen Phase der Produktentstehung abgesichert werden. Bestehende Ansätze zur Gewährleistung einer durchgängigen Kennzeichnung bzw. Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen basieren meist auf aufwendigen, unternehmensspezifisch programmierten Schnittstellen oder auf dem Einsatz zusätzlicher Software (vgl. Abschnitt 2.5.6). Diese Methoden sind für eine begrenzte Anwendung innerhalb einer Firma hilfreich, aber für den unternehmensübergreifenden Datenaustausch meist noch ungeeignet.

Elementar für einen fehlerfreien Datenaustausch und für die Akzeptanzförderung der modellbasierten Arbeitsweise ist die Absicherung semantisch korrekt tolerierter Bauteile. Bisherige Forschungsansätze (vgl. Abschnitt 2.5.5) zeigen, dass derzeit keine allgemeingültigen Methoden publiziert sind, die sich insbesondere mit der semantisch korrekten Bauteiltolerierung für die Weiterverwendung in Folgeprozessen befassen. Die Analysen und die Recherchen im Rahmen dieser Arbeit belegen weiterhin, dass gerade Prozesse der Arbeitsvorbereitung, z. B. die Arbeits- und Prüfplanung, meist individuell und 2D-basiert erfolgen (vgl. Abschnitt 2.4.1 und Abschnitt 2.4.2). Fehlende Methoden, die die bereits bestehenden Möglichkeiten des MBD (vgl. Abschnitt 2.5.2) nutzen, sind hierfür die Ursache. Häufig werden Datenbanken aus Erfahrungswerten angelegt, die den Planer bei der Festlegung der Arbeits- und Prüffolgen sowie bei der Ressourcenauswahl unterstützen (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Die erzielten Erkenntnisse und die identifizierten Lücken in der Nutzung von 3D-CAD-Daten zeigen das Forschungspotenzial im Bereich der 3D-CAD-basierten Arbeitsweise und begründen die Notwendigkeit zur Erstellung dieser Arbeit. Neue Methoden und Ansätze sind erforderlich, um das 3D-CAD-Modell als führenden Informationsträger in den Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozess erfolgreich zu integrieren und das Vertrauen in den 3D-CAD-basierten Prozess bei den Anwendern zu stärken. Diese Feststellungen legen die Hypothese nahe, dass die Schwerpunkte und größten Herausforderungen derzeit noch beim Datenaustausch der 3D-CAD-Modelle liegen. Entscheidende Merkmalsinformationen gehen beim Datentransfer der 3D-CAD-Modelle einerseits aufgrund von Definitions- und andererseits aufgrund von Interpretationsproblemen verloren. Die direkte Rückverfolgbarkeit und die eindeutige Identifikation von 3D-CAD-Merkmalsinformationen kann über die Nutzungskette hinweg nicht gewährleistet werden und sorgt für individuelle, zeitaufwendige und fehleranfällige Abläufe in der Fertigung und der Qualitätssicherung.

Zur Erreichung einer durchgängigen Nutzung des 3D-CAD-Modells im Produktentstehungsprozess wird im nachfolgenden Kapitel 3 ein Anforderungsprofil zur Methodenentwicklung erstellt. Dieses orientiert sich insbesondere an den im Rahmen dieser Arbeit definierten Zielen zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen und zur Sicherstellung der Datenqualität beim Austausch der 3D-CAD-Modelle sowie zur nachgelagerten 3D-CAD-basierten Prozessplanung in der Fertigung (vgl. Abschnitt 1.2).

3 Anforderungsprofil zur Methodenentwicklung

3D-CAD-Modelle als Informationsträger können die Prozesse innerhalb der Produktentstehung lenken [7] [12, S. 3–12]. Auf Basis eines korrekt, vollständig und funktional definierten 3D-CAD-Modells werden die Folgeprozesse wie Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Qualitätssicherung automatisch gesteuert [7]. Die Kommunikation zwischen den unterschiedlichen Abteilungen in einem Unternehmen sowie über Unternehmensgrenzen hinweg basiert auf den geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im 3D-CAD-Modell. Während die Realisierung des modellbasierten Engineerings (MBE) in einzelnen Teilbereichen bereits erfolgreich erfolgt ist (z. B. im CAM-Umfeld), besteht für die durchgehende und nahtlose Vernetzung der Informationsprozesse und Informationsflüsse innerhalb der virtuellen Produktentstehung noch unausgeschöpftes Forschungspotenzial (vgl. Kapitel 2). Abbildung 17 stellt den Soll-Prozess und die derzeit bestehenden Potenziale von der Konstruktion bis zur Qualitätssicherung schematisch dar.

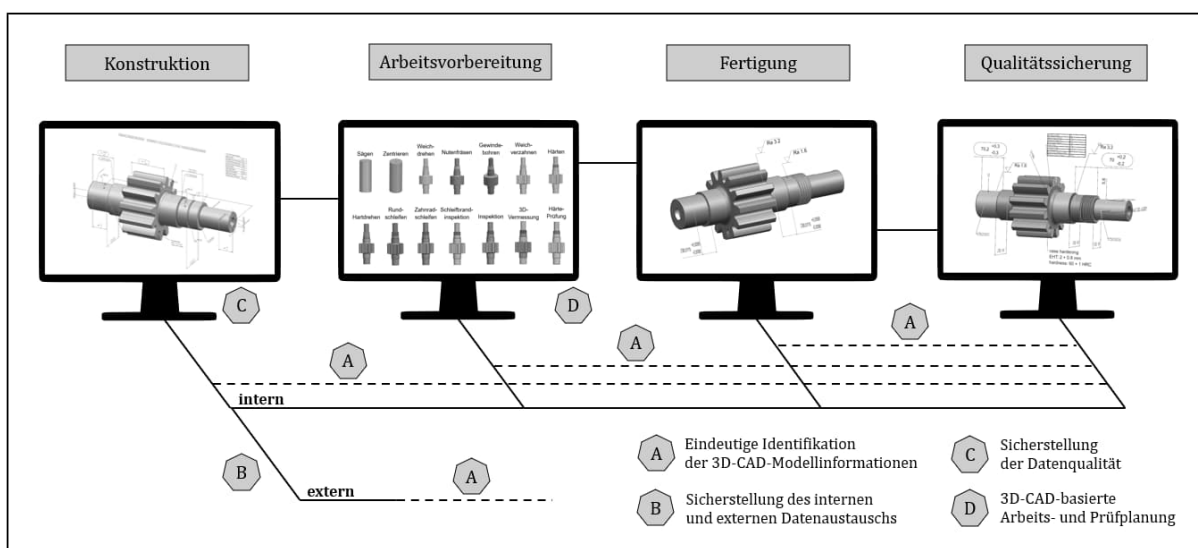


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Forschungspotenziale zur Integration des 3D-CAD-Modells im Produktentstehungsprozess

Mit der Integration der 3D-CAD-Modelle als Informationsträger in den Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozess sollen die Aufwände beim Austausch prozessrelevanter Informationen reduziert werden. Nach Berente et al. [151] kann dieses Ziel mit den vier Prinzipien der Prozessintegration – Pünktlichkeit (engl.: *timeliness*), Zugänglichkeit (engl.: *accessibility*), Transparenz (engl.: *transparency*) und Granularität (engl.: *granularity*) – erreicht werden. Der wissenschaftliche Ansatz nach Berente et al. ist auch für die Sicherstellung der durchgängigen 3D-CAD-basierten Prozesskette von Bedeutung, weshalb die einzelnen Prinzipien aus diesem Ansatz das Anforderungsprofil des Forschungsvorhabens der vorliegenden Dissertation darstellen. Die vier Prinzipien beschreiben die Prozessintegration vollständig, schließen sich jedoch nicht gegenseitig aus.

Die Prinzipien Pünktlichkeit und Zugänglichkeit werden den transferierenden Aktivitäten bei der Prozessintegration und somit dem Daten- und Informationsaustausch zugeordnet. Die Prinzipien Transparenz und Granularität gehören zu den transformierenden Aktivitäten innerhalb der Fertigung und Qualitätssicherung. Sie beziehen sich weniger auf den Informationsfluss, sondern verstärkt auf die Art und Weise der Informationsbereitstellung durch das 3D-CAD-Modell. [151]

Das Pünktlichkeitsprinzip umfasst die Pünktlichkeit der Informationen. Die Anforderungen des Prinzips werden erreicht, wenn keine Verzögerungen beim Informationsfluss vorhanden sind. Die prozessrelevanten Informationen müssen dementsprechend pünktlich bzw. genau zu dem Zeitpunkt verfügbar sein, an dem sie benötigt werden. Nach Berente et al. sind die Anforderungen des Pünktlichkeitsprinzips selten die Ursache für eine mangelnde Integration einzelner Prozessteilnehmer. Die mangelnde Erfüllung der Bestandteile des Prinzips kann jedoch den Gesamtprozess verzögern und spielt somit für die Gewährleistung einer durchgängigen Prozesskette eine entscheidende Rolle. Eine Methode zur Erfüllung dieser Anforderungen ist die Kommunikation und die Steuerung sämtlicher Aktivitäten im modellbasierten PEP (vgl. Abschnitt 2.3) über denselben Informationsträger, z. B. das 3D-CAD-Modell (vgl. Abschnitt 2.5.1). Hierzu ist es erforderlich, die in allen Aktivitäten generierten Informationen in einem singulären und fabriktragenden 3D-CAD-Modell zu hinterlegen. Die Generierung und die Haltung redundanter Daten sowie das Aufkommen unnötiger Medienbrüche müssen verhindert werden, um zeitaufwendige und individuelle Nacharbeiten und somit die Verzögerung des Informationsflusses zu vermeiden. Die automatische Rückverfolgbarkeit von Prozess- und Planungsparametern zu den Informationen im 3D-CAD-Modell muss durchgängig über alle Prozessteilnehmer hinweg gewährleistet sein. Die während der Produktentwicklung definierten Bauteilanforderungen müssen für Folgeprozesse eindeutig interpretier- und zuweisbar sein. Hierfür ist die durchgängige Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen (vgl. Abschnitt 2.5.6) für interne und externe Unternehmensprozesse sicherzustellen (siehe Abbildung 17 – Bereich A). Anhand der in dieser Arbeit entwickelten Methode müssen die bauteildefinierenden Informationen so gekennzeichnet werden, dass sie für IT-Folgesysteme eindeutig und durchgängig interpretierbar sind, damit alle Prozessteilnehmer stets eindeutig auf Basis derselben Bauteilmerkmale im 3D-CAD-Modell kommunizieren können. [151]

Im Gegensatz zum Pünktlichkeitsprinzip geht es beim Zugänglichkeitsprinzip um die Zugänglichkeit der Informationen. Wird ein Prozess, z. B. ein Qualitätssicherungsprozess, gestartet, müssen die Informationen nicht nur rechtzeitig und eindeutig zur Verfügung stehen, sondern auch ohne großen Mehraufwand bezogen bzw. genutzt werden können. Nach Culnan [152] müssen die relevanten Informationen stets verlässlich und unkompliziert erreichbar sein, um die Anforderungen des Zugänglichkeitsprinzips erfüllen zu können. Die technische und syntaktische Zugänglichkeit spielt hier eine entscheidende Rolle. Nach Strong et al. [120] muss zudem die Lesbarkeit bzw. Interpretierbarkeit der syntaktischen Informationen durch einzelne Prozessteilnehmer gewährleistet sein. Dabei sind mögliche Potenziale aus dem Datentransfer von einem CAX-

System (z. B. CAD-System) in ein anderes CAx-System (z. B. CAQ-System) zu erschließen. Geometrische und nichtgeometrische Informationen im 3D-CAD-Modell müssen innerhalb der CAx-Prozesskette unverändert übertragen werden sowie für externe Partner zur eindeutigen Kommunikation auf zwischenmenschlicher und informationstechnischer Ebene zur Verfügung stehen und nutzbar sein (siehe Abbildung 17 – Bereich B). In Bezug auf die Problemstellung der vorliegenden Dissertation (vgl. Abschnitt 1.1) ist daher ein systemneutraler Ansatz unabhängig von den eingesetzten CAx-Systemen zu verfolgen, um eine Methode für den internen und externen Datenaustausch zu entwickeln. Entsprechend sind Anforderungen an die Datenformate für den Datenaustausch sowie an die prozessbeteiligten IT-Systeme zu stellen. Das eingesetzte Datenformat muss die verlust- und fehlerfreie Übertragung der Informationen im 3D-CAD-Modell zur Realisierung der 3D-CAD-basierten Arbeitsweise unterstützen. Zudem müssen die vom CAD-System bereitgestellten Informationen aus der Bauteildefinition, z. B. die PMI (vgl. Abschnitt 2.5.4), vom Austauschformat übertragen und von den CAx-Systemen interpretiert werden können. Weiterhin sollte das eingesetzte Datenformat flexibel in Unternehmensabläufe integrierbar und mit den prozessbeteiligten Anwendungssystemen kompatibel sein (vgl. Abschnitt 1.2). Erzeuger- und Zielsysteme müssen über entsprechende Schnittstellen zu den eingesetzten Austauschformaten verfügen. Dabei sind kommerziell verfügbare und weit verbreitete Austauschformate für die Methodenentwicklung priorisiert einzusetzen, um die größtmögliche Anzahl von CAx-Anwendungssystemen einheitlich mit Informationen versorgen zu können. [151]

Das Transparenzprinzip bezieht sich auf die Transparenz der übertragenen Informationen. Diese Transparenz wird erreicht, wenn beim Informationsaustausch die Informationen für alle Prozessbeteiligten leicht zu verstehen sind. Das Prinzip bezieht sich nach Carlile [153] auf das Verständnis der Prozessinformationen und die Semantik der Informationen. Zur Erreichung der Ziele des Transparenzprinzips werden nach Volkoff et al. [154] häufig Ansätze der Prozess- und Informationsstandardisierung eingesetzt. Die Notwendigkeit semantisch korrekter und maschinenlesbarer Informationen muss bei der vorliegenden Methodenentwicklung berücksichtigt werden, um die Qualität der zu übermittelnden Daten sicherzustellen (siehe Abbildung 17 – Bereich C). Regeln oder Verfahren für die semantisch korrekte 3D-CAD-Bauteiltolerierung (vgl. Abschnitt 2.5.5) sind zu entwickeln, um vollständige, logische und umsetzbare Produkthanforderungen an die datennutzenden Bereiche übergeben zu können. Aufwendige Änderungsmanagementprozesse können so bereits in der frühen Phase der Produktentstehung vermieden werden. Zur informationstechnischen Weiterverarbeitung innerhalb der Prozesskette muss zudem die Maschinenlesbarkeit der Informationen im 3D-CAD-Modell gewährleistet sein. [151]

Der Detaillierungsgrad, der für den CAx-Prozess relevanten Informationen, wird über das Granularitätsprinzip definiert. Dabei wird der Detaillierungsgrad der zu übertragenden Daten von den erforderlichen bzw. geplanten Aktivitäten und von den Prozessteilnehmern bestimmt. Da aufgrund der unterschiedlichen Prozessphasen, z. B. im Produktentstehungsprozess, phasenspezifisch unterschiedlich viele Informationen

benötigt werden, kommt es häufig zu Konflikten bezüglich der Vollständigkeit der Informationen. Die Bereitstellung der Informationen in frühen Phasen der Produktentstehung gewinnt zunehmend an Bedeutung hinsichtlich der Lösung dieser bestehenden Konflikte [154]. Laut Browning [155] ist die Bereitstellung zu vieler Informationen häufig weniger zielführend, als zu wenige Daten zu liefern. Zur Abhilfe schlägt Browning [155] vor, jedem Prozessteilnehmer nur die Informationen bereitzustellen, die tatsächlich für die Ausführung der geplanten Aktivität benötigt werden. Folglich ist der Detaillierungsgrad der Informationen prozessspezifisch auszulegen. Arbeits- und Prüfplanungsprozesse müssen möglichst automatisch auf Basis des 3D-CAD-Modells mit all seinen Informationen abgeleitet werden können (siehe Abbildung 17 – Bereich D). [151]

Zur Erfüllung der Anforderungen (Pünktlichkeit, Zugänglichkeit, Transparenz und Granularität) werden in der vorliegenden Dissertation neue Methoden im Bereich der Produktdefinition behandelt, die den Datentransfer und die Kommunikation im Produktentstehungsprozess optimieren. Entsprechend der definierten Ziele aus Abschnitt 1.2 werden neue Methoden zur eindeutigen Kennzeichnung und fehlerfreien Definition der 3D-CAD-Modellinformationen entwickelt. Darüber hinaus werden neue Ansätze erforscht, die die 3D-CAD-basierte Prozessplanung in der Fertigung und Qualitätssicherung betreffen, um die Durchgängigkeit und Nutzung des 3D-CAD-Modells innerhalb der Produktentstehung zu fördern und unnötige Medienbrüche zu vermeiden. Neue Methoden zur gezielten Informationsbereitstellung und zur Entlastung der Mitarbeiter runden die Themenschwerpunkte der vorliegenden Dissertation ab.

4 Entwicklung von Methoden zur 3D-modellbasierten Arbeitsweise in der Fertigung

Im vorliegenden Kapitel werden auf Basis des Stands der Forschung und Technik (vgl. Kapitel 2) und gemäß dem abgeleiteten Anforderungsprofil (vgl. Kapitel 3) methodische Ansätze zur Realisierung einer durchgängigen 3D-CAD-basierten Prozesskette entwickelt.

4.1 Anwendungsbereich der neuen Methoden zur 3D-modellbasierten Arbeitsweise

Die neu zu entwickelnden Methoden beziehen sich auf die Bereiche der Produktentwicklung im digitalen Fertigungsumfeld und basieren im Wesentlichen auf den Produkt- und Fertigungsinformationen (vgl. Abschnitt 2.5.4) im 3D-CAD-Modell (siehe Abbildung 18). Die eindeutige Kennzeichnung der 3D-CAD-Modellinformationen zur Generierung einer einheitlichen Kommunikationsbasis in der CAx-Prozesskette und zur Vermeidung derzeit bestehender Herausforderungen bei der Rückverfolgbarkeit ermittelter Prozessparameter bildet den Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Dissertation.

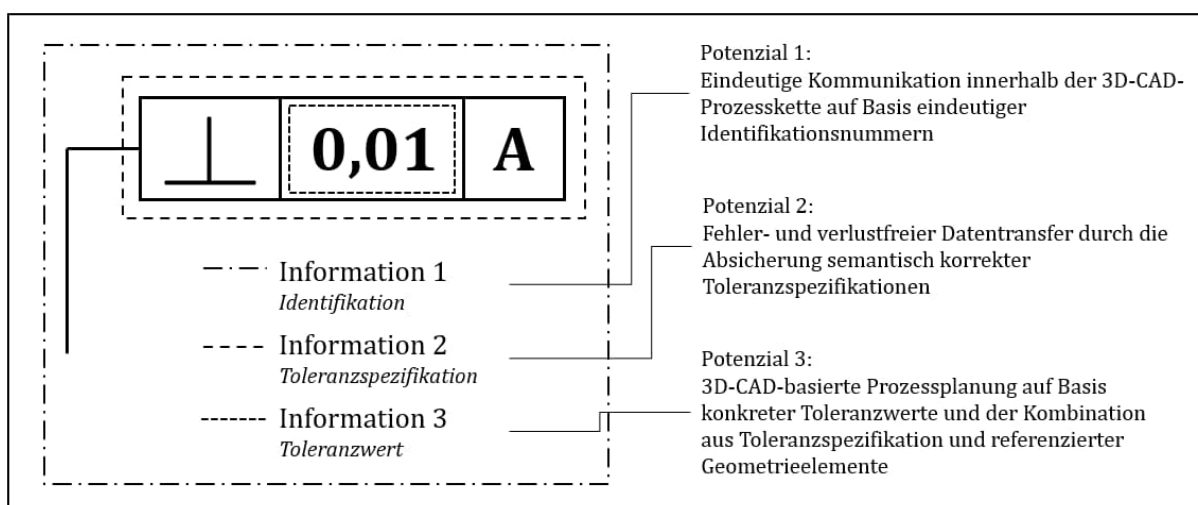


Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung der PMI-Inhalte für Form- und Lagetoleranzen und deren potenzielle Nutzungsmöglichkeiten innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette

Die Informationsinhalte der PMI werden am Beispiel der Form- und Lagetoleranzen zur Strukturierung der Methodenentwicklung in drei Klassen eingeteilt. Die erste Information (siehe Abbildung 18) beinhaltet die Identifikationsnummer (ID), die vom CAD-Erzeugersystem generiert wird. Diese Identifikationsnummer bietet Potenzial für die Behebung derzeit bestehender Herausforderungen zur eindeutigen Kommunikation zwischen den IT-Systemen im gesamten Produktentstehungsprozess (vgl. Abschnitt 4.2). Die zweite Information (siehe Abbildung 18), hier die Toleranzspezifikation, bietet Potenzial zur Sicherstellung eines fehler- und verlustfreien 3D-CAD-Datentransfers. Die Informationen innerhalb des Toleranzrahmens (vgl. Abschnitt 2.5.5) werden auf

semantische Korrektheit überprüft (vgl. Abschnitt 4.3.1). Die dritte Information (siehe Abbildung 18) umfasst die 3D-CAD-basierte Steuerung und Planung von Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozessen. Die Kombination aus Toleranzspezifikation, referenzierter Geometrieelemente und definiertem Toleranzwert spielt im Beispiel für Form- und Lagetoleranzen eine wesentliche Rolle (vgl. Abschnitt 4.3.2). Die methodischen Ansätze zur verlustfreien und eindeutigen Rückverfolgbarkeit von Produkt- und Prozessparametern innerhalb der CAx-Prozesskette werden nachfolgend detailliert beschrieben.

4.2 Eindeutige Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell

Die Methode zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen zielt darauf ab, die Rückverfolgbarkeit der Prozessinformationen im Produktentstehungsprozess durchgängig zu gewährleisten und diese den entsprechenden Geometrieelementen (z. B. Flächen) im 3D-CAD-Modell eindeutig zuweisen zu können. Nachfolgend wird zunächst das Grundkonzept zur eindeutigen Kennzeichnung der Informationen im 3D-CAD-Modell beschrieben. Im Anschluss erfolgt die detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Ansätze zur Schaffung der Eindeutigkeit entlang der CAx-Prozesskette. Ein kurzes Zwischenfazit zu den entwickelten Methoden und die CAD-neutrale Auslegung für den systemneutralen Datenaustausch runden diesen Abschnitt ab.

4.2.1 Grundkonzept zur eindeutigen Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher IT-Systemgrenzen, IT-Schnittstellen und herstellerspezifischer IT-Softwarelösungen gehen häufig wesentliche Informationen zur eindeutigen Identifikation der geometrischen und nichtgeometrischen 3D-CAD-Modellinformationen im Produktentstehungsprozess verloren. Dies tritt verstärkt beim bereichs- und unternehmensübergreifenden Datenaustausch der 3D-CAD-Modelle auf. Analysen (vgl. Abschnitt 2.5.6) haben gezeigt, dass die ursprüngliche Kennzeichnung der Features und Geometrieelemente (z. B. durch Identifikationsnummern) beim 3D Datenaustausch nicht unverändert an benachbarte CAx-Systeme übergeben wird, da die CAx-Systeme beim Import des 3D-CAD-Modells neue Identifikationsmerkmale für die 3D-CAD-Modellinformationen vergeben. Die eindeutige Rückverfolgbarkeit der Informationen entlang der CAx-Prozesskette geht somit verloren.

Zur eindeutigen Nutzung der 3D-CAD-Modellinformationen muss die Kennzeichnung der Merkmale maschinenlesbar und informationstechnisch verarbeitbar sein. Die zunehmende Einbindung externer Lieferanten sowie die meist heterogene IT-Systemlandschaft im Fertigungsumfeld (vgl. Abschnitt 2.6.1) erfordern zudem die Kompatibilität und Anwendbarkeit der vorliegenden Methode beim systemneutralen Datenaustausch der 3D-CAD-Modelle.

Zunächst soll ein einfaches Beispiel aus dem Alltag helfen, die Notwendigkeit der eindeutigen Identifikation von Informationen im 3D-CAD-Modell zu verdeutlichen.

Hierzu wird vorweg angenommen, dass jede Person in einem Land einen länderspezifischen Pass ausgestellt bekommt, in dem der Name und eine eindeutige länderspezifische Passnummer dokumentiert sind. Reist eine Person von einem Land in ein anderes Land, kann diese Person weder durch ihre Passnummer noch durch ihren Namen eindeutig identifiziert werden, da die Passnummer lediglich für das Herkunftsland gültig ist. Um diese Person international eindeutig identifizieren zu können, unabhängig davon, in welchem Land sie sich gerade befindet oder sich aufgehalten hat, muss dieser Person ein neues und eindeutiges Merkmal zugewiesen werden. Dieses neue Merkmal muss in jedem Land gleich, also neutral (länderunabhängig) interpretiert werden können. Die Person sollte dieses Merkmal stets mit sich tragen, um eindeutig identifiziert werden zu können, unabhängig von ihrem Namen oder ihrer lokalen Passnummer.

In Bezug auf die Thematik der vorliegenden Dissertation ist die zuvor beschriebene Person z. B. als PMI (Informationsfeature) im 3D-CAD-Modell und die verschiedenen Länder als die unterschiedlichen CAx-Systeme entlang der Prozesskette zu betrachten. Für produkt- und fertigungsrelevante Informationen im 3D-CAD-Modell muss demnach eine eindeutige Kennzeichnung definiert werden, die unveränderlich entlang der gesamten CAx-Prozesskette bestehen bleibt. Diese Eindeutigkeit kann über die Definition neuer Merkmale im 3D-CAD-Modell realisiert werden. Das neu erzeugte Merkmal enthält die ursprüngliche (native) ID des Informationsfeatures aus dem CAD-Erzeugersystem. Auf Basis dieses Merkmals kann die eindeutige Kommunikation innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette erfolgen.

Abbildung 19 veranschaulicht die Prozesshypothese für den 3D-CAD-Datenaustausch. Dabei wird zusätzlich zum 3D-CAD-Modell ein neu generiertes Merkmal im 3D-CAD-Modell als Schlüsselement für eine konsistente, unveränderte und eindeutige Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen zwischen den CAD-, CAP-, CAM- und CAQ-Systemen innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette angewendet.

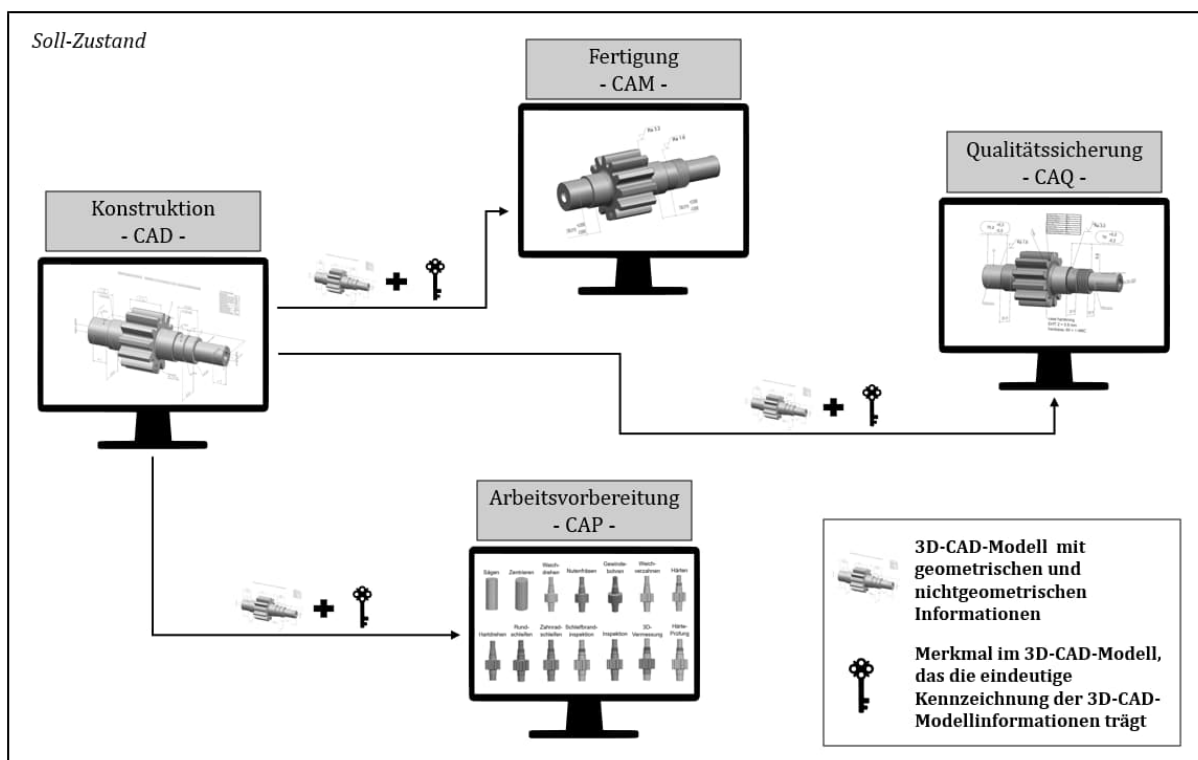


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Hypothese für ein Konzept zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette

Werden bei der physikalischen Bauteilfertigung die vordefinierten Anforderungen aus der Produktdefinition nicht erfüllt, sind im Bereich der Qualitätssicherung mögliche Fehlerquellen hierfür zu identifizieren und entsprechende Korrekturmaßnahmen im Fertigungsprozess vorzunehmen.

Die Informationsfeatures (z. B. Produkt- und Fertigungsinformationen) im 3D-CAD-Modell sind Träger dieser Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.5.4). Sie eignen sich deshalb als digitales Werkzeug zur Kommunikation innerhalb der CAx-Umgebung. Die Kombination aus dem Informationsfeature und dem neu generierten Merkmal im 3D-CAD-Modell bietet die Möglichkeit zur eindeutigen Identifikation der fertigungs- und qualitätsrelevanten 3D-CAD-Modellinformationen. Auf Basis dieser Eindeutigkeit können Bauteilinformationen eindeutig über bestehende Systemgrenzen der CAx-Prozesskette hinweg transportiert und rückverfolgt werden. Ausgehend vom CAQ-System können mithilfe dieses Ansatzes z. B. mögliche Fehlerquellen im CAD-, CAP- oder CAM-System eindeutig identifiziert werden (siehe Abbildung 20). [156]

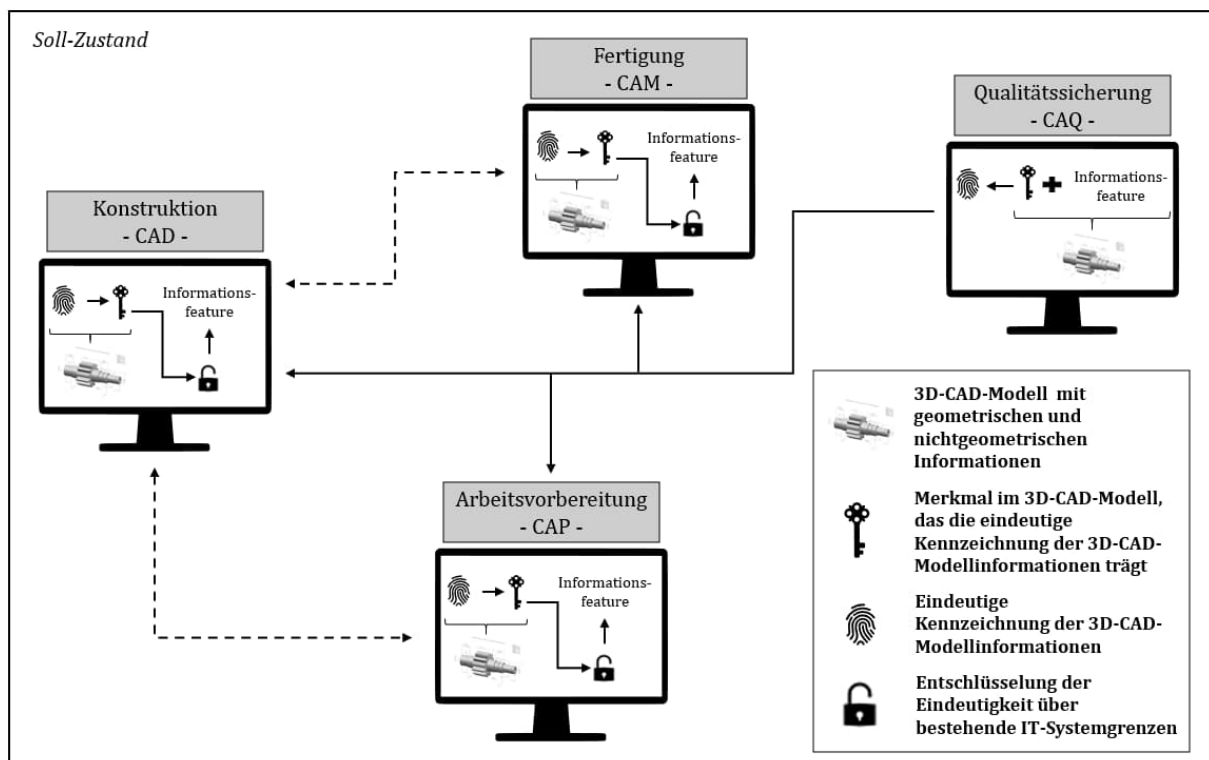


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Kommunikation auf Basis der eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette

Die eindeutige Identifikation kann auf Basis nativer und neutraler CAD-Formate mithilfe der nachfolgend beschriebenen Methode ermöglicht werden. Die in der CAD-Struktur neu definierten Merkmale werden als Speicherort des eindeutigen Identifikators für die 3D-CAD-Modellinformationen verwendet. Im Folgenden wird diese Methode als *Functional Identification Information* (dt.: funktionale Identifikationsinformation) bezeichnet. ‚Funktional‘ beschreibt hier die Eindeutigkeit und Maschinenlesbarkeit der Identifikationsinformation entlang der CAX-Prozesskette.

In diesem Zusammenhang ist zunächst festzulegen, welche Beschreibungsparameter (z. B. Ziffernfolgen, Zeichenketten oder spezielle Benennungen) die gewünschte Eindeutigkeit liefern, um Doppelkennungen innerhalb des 3D-CAD-Bauteils zu vermeiden und Interpretations- sowie Kommunikationsprobleme zwischen den IT-Systemen zu verhindern. Wie in Abschnitt 2.5.6 beschrieben, vergibt das CAD-System bei der Bauteilkonstruktion für jedes Feature und Geometrieelement eine ID. Diese wird für alle geometrischen und nichtgeometrischen Elemente im 3D-CAD-Modell erzeugt. Auch dem Informationsfeature (z. B. PMI) wird im CAD-System eine derartige ID zugewiesen. Die vom CAD-Erzeugersystem generierten IDs liefern die geforderte Eindeutigkeit der 3D-CAD-Modellinformationen. Derzeit ist es allerdings nicht möglich, die eindeutigen IDs unverändert in die heterogene CAX-Systemlandschaft zu übertragen, da abhängig vom Modellierkern der CAX-Systeme neue IDs vergeben werden.

4.2.2 FII-Methode zur eindeutigen Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell

4.2.2.1 Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen in der 3D-CAD-Modellstruktur

Wie in Abschnitt 4.2.1 erläutert, beschreibt die FII-Methode, die Definition neuer Merkmale innerhalb der 3D-CAD-Modellstruktur zur Generierung einer durchgängigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen. Ziel ist es, ein eindeutiges Identifikationsmerkmal für geometrische und nichtgeometrische Informationen im 3D-CAD-Modell zu generieren, das sich entlang der CAx-Prozesskette, z. B. beim Export von 3D-CAD-Modellen oder deren Konvertierung in ein Neutralformat, nicht verändert.

Die PMI als Informationsfeature trägt nicht nur die nichtgeometrischen fertigungs- und qualitätsrelevanten Anforderungen zu bestimmten Bauteilprägungen, sondern ist zudem direkt mit den Geometrieelementen und Designfeatures im 3D-CAD-Modell verknüpft. Häufig sind mehrere Geometrieelemente mit einem Informationsfeature verlinkt und bilden im Verbund das tolerierte Designfeature im 3D-CAD-Modell (vgl. Abschnitt 2.5.3). Folglich können Prozessinformationen (z. B. aus der Fertigung oder Qualitätssicherung) über das Informationsfeature bis hin zum einzelnen Geometrieelement zurückverfolgt werden.

In Abbildung 21 sind die Informationszusammenhänge der Features (Informations- und Designfeatures) und Geometrieelemente im 3D-CAD-Modell dargestellt. Die gezeigten Zusammenhänge entsprechen nicht der Modellierungsvorschrift. Die Darstellungsweise soll zum besseren Verständnis der nachfolgend beschriebenen FII-Methode dienen.

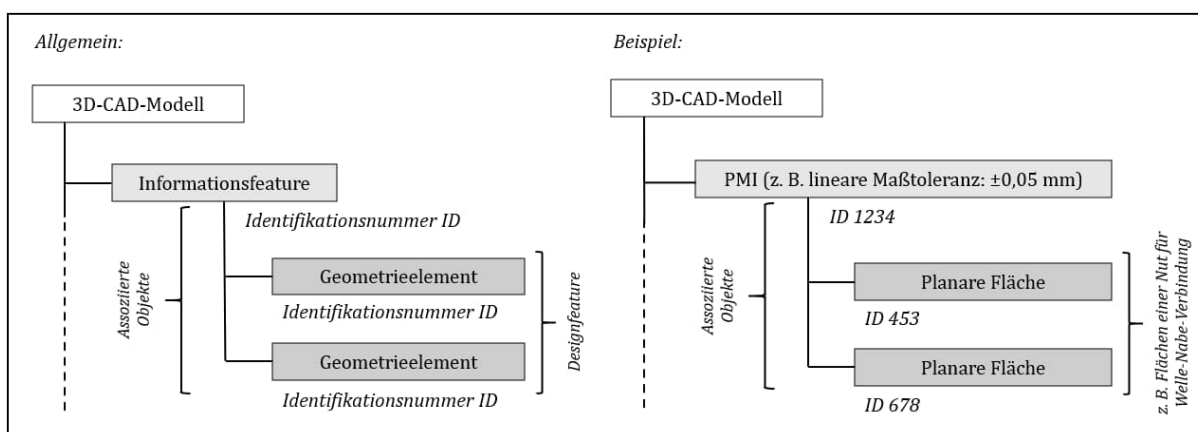


Abbildung 21: Informationszusammenhänge und Eigenschaften der Geometrieelemente und Features im 3D-CAD-Modell

Neben der Auswahl geeigneter Beschreibungsparameter zur Generierung eindeutig festgelegter Identifikationsmerkmale muss definiert werden, welches Merkmalstyp im 3D-CAD-Modell für den geplanten Informationstransfer geeignet ist. Analysen haben gezeigt, dass mithilfe der PMI-Methode die Informationsinhalte bzw. die Werte der Produkt- und Fertigungsinformationen (z. B. Toleranzwert einer Zylindrizität von 0,1 mm

oder eine lineare Maßtoleranz von $\pm 0,05$ mm) fehlerfrei und unverändert innerhalb der CAx-Systeme übertragen werden können, vorausgesetzt, es liegt für Form- und Lagetoleranzen eine semantisch korrekte Toleranzspezifikation bei der Bauteildefinition vor (vgl. Abschnitt 4.2). Diese Eigenschaft wird gezielt zur Übertragung eindeutiger Identifikationsinformationen genutzt, sodass der Fokus der FII-Methode nachfolgend auf die eindeutige Identifikation der PMI im 3D-CAD-Modell liegt.

Im Verlauf der Forschungstätigkeiten ergaben sich schließlich zwei unterschiedliche Möglichkeiten zur Realisierung des FII-Ansatzes. Zum einen kann die Identifikationsinformation über zusätzliche Informationsfeatures im 3D-CAD-Modell transportiert werden, und zum anderen besteht im CAD-Umfeld die Möglichkeit, die Identifikationsinformationen als Attribut der zugehörigen PMI zu definieren. In Abbildung 22 ist links der Ansatz über FII-Informationsfeatures und rechts der Ansatz über FII-Attribute im 3D-CAD-Modell dargestellt. FII-Attribute können auf PMI- und auf Part-Ebene im 3D-CAD-Modell definiert werden [156].

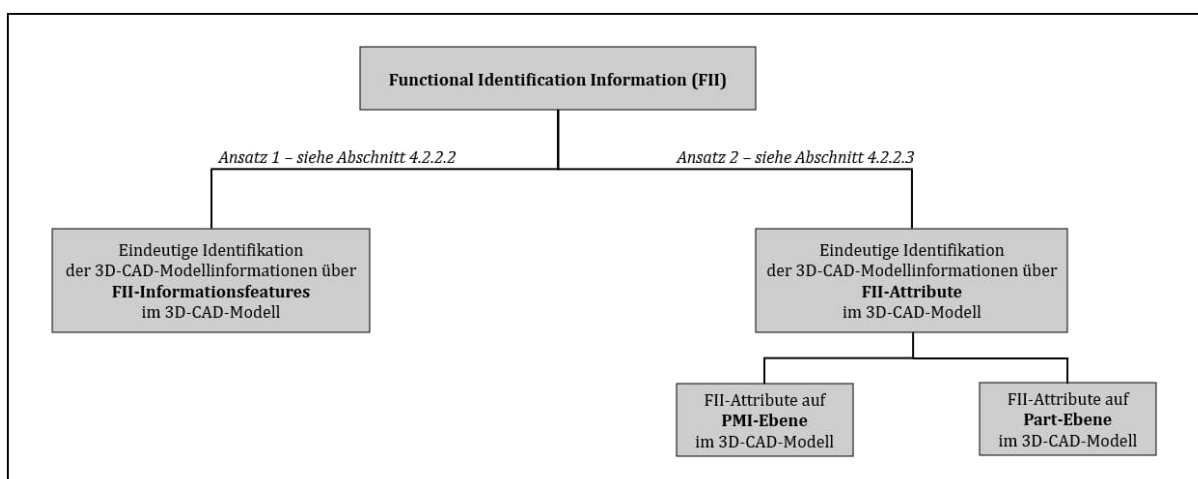


Abbildung 22: Unterschiedliche FII-Ansätze zur eindeutigen und durchgängigen Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell

4.2.2.2 FII-Methode über FII-Informationsfeatures im 3D-CAD-Modell

Im CAD-Umfeld besteht die Möglichkeit, die FII über Informationsfeatures im 3D-CAD-Modell zu transportieren (siehe Abbildung 22 – links). Ähnlich wie beim 3D-CAD-basierten Austausch der Toleranzinformationen werden in diesem Lösungsansatz die Informationen zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen mithilfe eines zusätzlich definierten FII-Informationsfeatures übertragen. Die bereits während der Bauteilkonstruktion vordefinierten Informationsfeatures (z. B. PMI) bekommen dabei ein übergeordnetes Informationsfeature im 3D-CAD-Modell zugewiesen (siehe Abbildung 23). Beide stehen in direkter Assoziation zueinander. Das FII-Informationsfeature zur Übertragung der FII steht somit in direktem Zusammenhang mit dem Informationsfeature zur Definition der Bauteilanforderung. Folglich sind auch die tolerierten Geometrielemente und Designfeatures im 3D-CAD-Modell direkt assoziiert (vgl. Abschnitt 4.2.2.1).

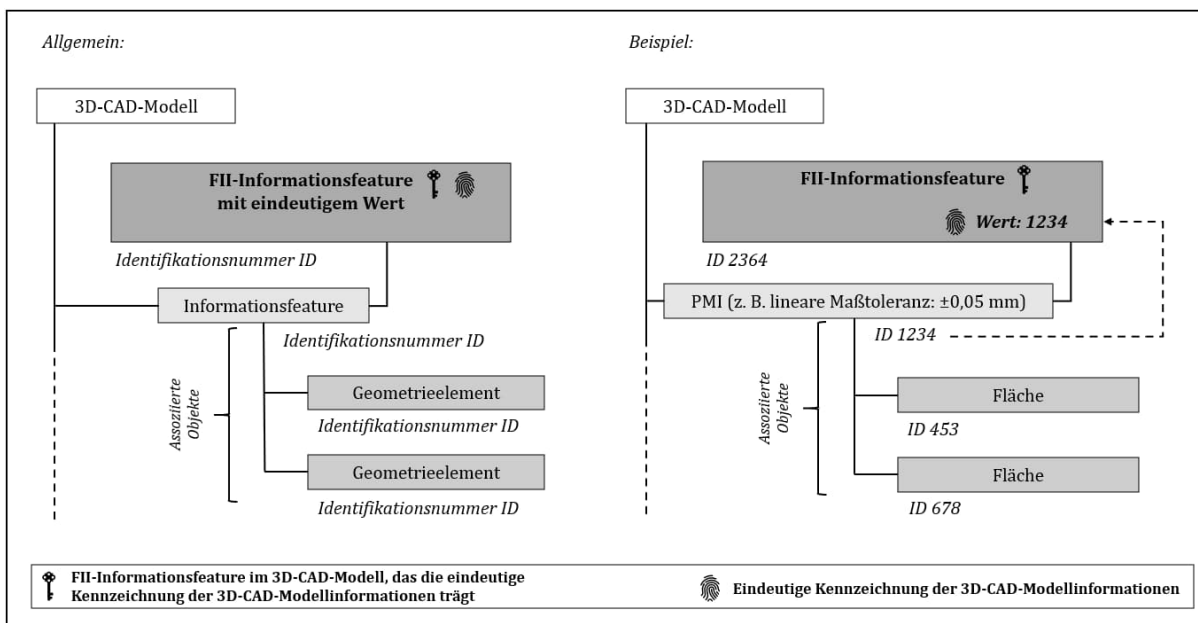


Abbildung 23: FII-Methode über FII-Informationenfeatures im 3D-CAD-Modell

Beim FII-Ansatz aus Abbildung 23 wird dem bereits bestehenden Informationsfeature ein zusätzliches FII-Informationenfeature zur eindeutigen Kennzeichnung zugewiesen. Die ursprüngliche vom CAD-System vergebene Identifikationsnummer der PMI zur Definition der Bauteilanforderung (z. B. Form- und Lagetoleranz, Linearbemaßung oder Rauheitsangabe) wird als Wert an das neu definierte FII-Informationenfeature übergeben und dort maschinenlesbar abgespeichert (siehe Abbildung 23). Der FII-Wert wird für die Weiterverwendung innerhalb der Prozesskette ‚eingefroren‘ und bleibt somit auch beim bzw. nach dem Datenaustausch der 3D-CAD-Modelle unverändert. Wird innerhalb der Qualitätssicherung ein Fehler bei der Bauteilfertigung identifiziert, kann die ursprüngliche ID über das FII-Informationenfeature ermittelt und direkt mit den CAD-Daten und Informationen in den unterschiedlichen CAx-Bereichen abgeglichen werden. Folglich wird die maschinenlesbare Rückverfolgbarkeit über die eindeutige Feature-ID aus dem CAD-Erzeugersystem gewährleistet.

Im Beispiel aus Abbildung 23 ist die PMI mit der ID 1234 mit zwei Flächen (Geometrieelemente) und der zusätzlichen FII der PMI verknüpft. Als zusätzliches und neu definiertes Feature besitzt das FII-Informationenfeature ebenfalls eine separate ID im CAD-System. In Abbildung 23 besitzt dieses FII-Informationenfeature beispielhaft die ID 2364. Für die weitere Nutzung in der CAx-Prozesskette ist jedoch lediglich der FII-Wert (hier 1234) interessant, der exakt der ID der PMI zur Bauteildefinition entspricht.

Nach dem Import des 3D-CAD-Modells in ein anderes CAx-System hat die ID der PMI häufig nicht mehr den Wert 1234, sondern einen anderen neuen Wert, z. B. 3484 (siehe Abbildung 24). Aufgrund der beschriebenen Methode zur FII-Bildung entspricht der Wert der assoziierten FII der ursprünglichen und eindeutigen ID aus dem CAD-Erzeugersystem (hier die ID 1234). Die durchgängige Rückverfolgbarkeit bleibt somit über das FII-Informationenfeature auch nach dem Export des 3D-CAD-Modells in ein beliebiges CAx-System bestehen.

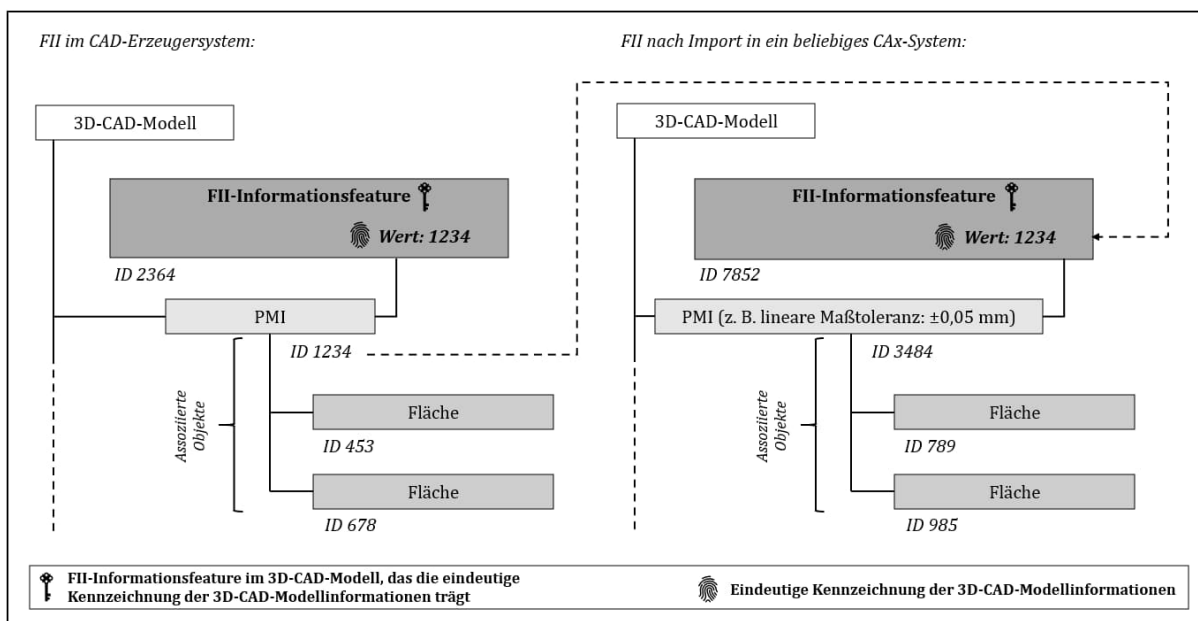


Abbildung 24: FII-Methode über FII-Informationsfeatures beim Import des 3D-CAD-Modells in ein beliebiges CAx-System

Wird die eindeutige Kennzeichnung und somit die eindeutige Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen über die FII-Methode in Gestalt eines FII-Informationsfeatures generiert, wird eine durchgängige Rückverfolgbarkeit der 3D-CAD-Modellinformationen erreicht. Über das eindeutige Identifikationsmerkmal (ID) wird zunächst das FII-Informationsfeature identifiziert, dessen Wert die native ID aus dem CAD-Erzeugersystem beinhaltet. Durch die direkte Abhängigkeit zwischen dem FII-Informationsfeature und der PMI zur Spezifikation der Bauteilanforderungen werden schließlich auch die assoziierten Geometrieelemente und Designfeatures eindeutig im Produktentstehungsprozess identifiziert.

4.2.2.3 FII-Methode über FII-Attribute im 3D-CAD-Modell

Wie in Abbildung 22 rechts dargestellt, kann die FII als FII-Attribut im 3D-CAD-Modell definiert bzw. gespeichert werden. Dieses neue Attribut kann entweder auf PMI-Ebene oder übergeordnet auf Part-Ebene im 3D-CAD-Modell definiert werden. Im PMI-Datenmodell existieren folglich der CAD-erzeugersystemspezifische Name des Informationsfeatures sowie das neu generierte FII-Attribut, das die ursprüngliche und eindeutige ID des CAD-Erzeugersystems als Wert (z. B. 1234) beinhaltet (siehe Abbildung 25). Das neu generierte FII-Attribut der PMI wird im CAD-System definiert. Jede PMI besitzt bei diesem Ansatz ein zusätzliches FII-Attribut, das die ursprüngliche ID der PMI aus dem Erzeugersystem als Wert trägt.

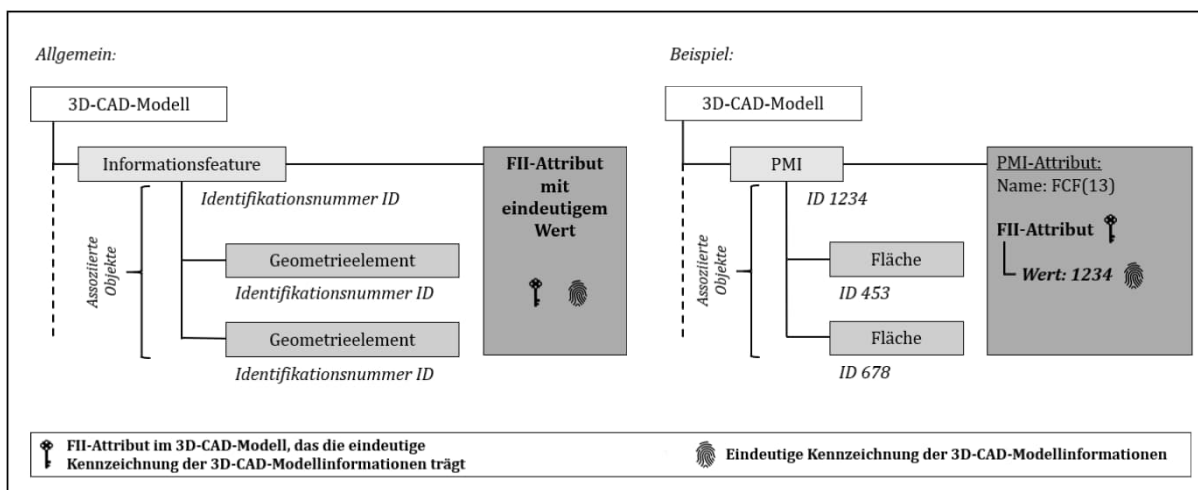


Abbildung 25: FII-Methode über FII-Attribute auf PMI-Ebene im 3D-CAD-Modell

Das neu generierte FII-Attribut bekommt die ursprüngliche ID aus dem CAD-Erzeugersystem zugewiesen und wird für die Prozessteilnehmer (z. B. CAx-Systeme) zur eindeutigen Identifikation der PMI innerhalb der CAx-Prozesskette zur Verfügung gestellt. Der Speicherort für das FII-Attribut inkl. Wert im 3D-CAD-Modell ist somit klar festgelegt. Dadurch sind die FII für die informationstechnische Weiterverarbeitung direkt zugänglich und abrufbar.

Zur systemneutralen Umsetzung der FII-Methode wird vorausgesetzt, dass die CAD-neutralen Austauschformate (vgl. Abschnitt 2.6.3) die Übertragung der neu generierten FII-Attribute ermöglichen und den Transfer der Informationen zur eindeutigen Identifikation auf systemneutraler Ebene unterstützen. Analysen und Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation haben jedoch gezeigt, dass es derzeit nicht möglich ist, die FII-Attribute auf PMI-Ebene mittels CAD-neutraler Austauschformate innerhalb der CAD-Struktur eines 3D-CAD-Modells zu übertragen. Demnach ist zum jetzigen Zeitpunkt mit derzeit verfügbaren Formaten die FII nicht als FII-Attribut auf PMI-Ebene, sondern direkt als FII-Attribut auf Part-Ebene im 3D-CAD-Modell zu speichern (siehe Abbildung 26). Aus diesem Grund wird die Methode der eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen über FII-Attribute auf Part-Ebene entwickelt. Hier wird zusätzlich zur ID auch der ursprüngliche Name der PMI im FII-Attribut gespeichert.

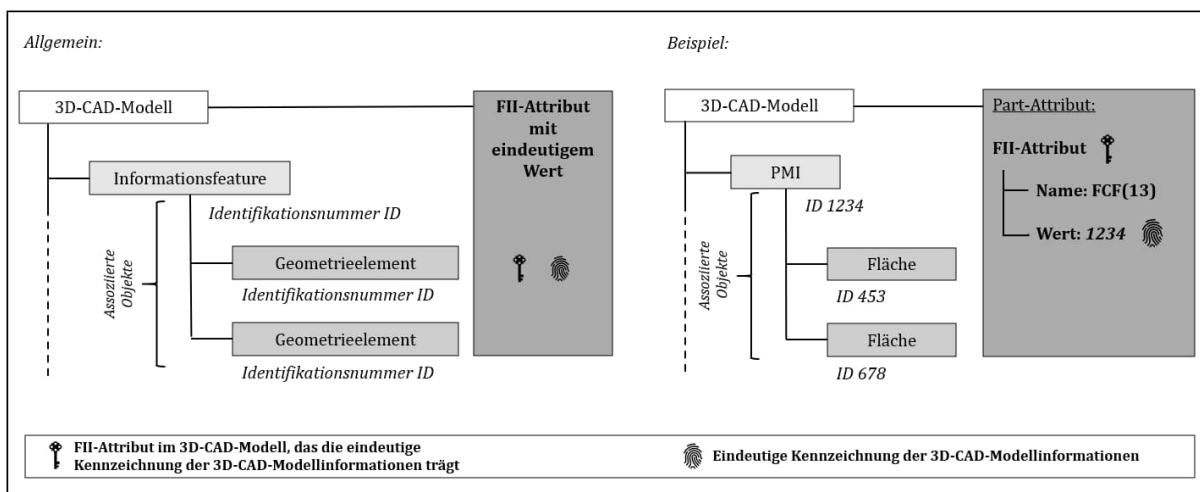


Abbildung 26: FII-Methode über FII-Attribute auf Part-Ebene im 3D-CAD-Modell

Wird das FII-Attribut auf Part-Ebene definiert, erfolgt die eindeutige Kennzeichnung nicht direkt über das FII-Attribut auf PMI-Ebene (siehe Abbildung 25), sondern über das FII-Attribut auf Part-Ebene. Dabei erfolgt die eindeutige Kennzeichnung der PMI zunächst über dessen Benennung (siehe Abbildung 27). Der Name des FII-Attributs auf Part-Ebene entspricht dem Namen der PMI (z. B. FCF(13)), deren ID aus dem CAD-File in das FII-Attribut übertragen wird. Über den PMI-Namen (definiert als Attribut auf PMI-Ebene) wird die direkte Verbindung zwischen den Attributen auf Part- und PMI-Ebene hergestellt. Folglich können die PMI im 3D-CAD-Modell identifiziert, selektiert und eindeutig charakterisiert werden. Die FII-Methode über FII-Attribute auf Part-Ebene ist somit eine weitere Möglichkeit zur eindeutigen Kennzeichnung und Identifikation der produkt- und fertigungsrelevanten Informationen im 3D-CAD-Modell. Diese Methode unterstützt zusätzlich die systemneutrale Anwendung entlang der CAx-Prozesskette.

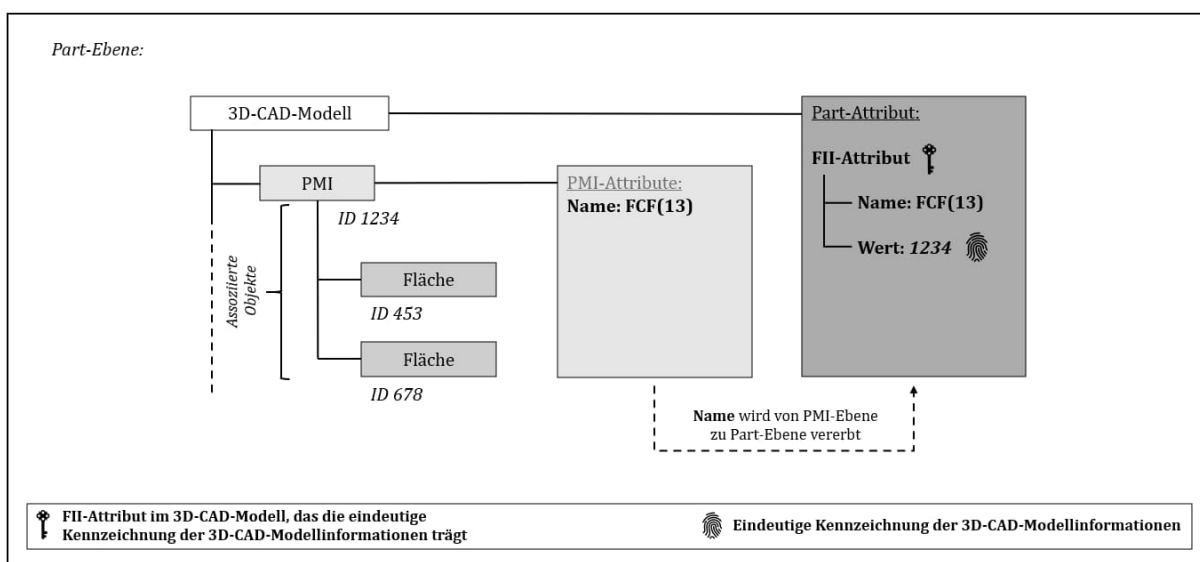


Abbildung 27: Kennzeichnung der PMI über FII-Attribute auf Part-Ebene mit PMI-Name und PMI-ID als Wert

Der FII-Ansatz über die Anwendung von FII-Attributen gewährleistet die eindeutige Rückverfolgbarkeit der 3D-CAD-Modellinformationen. Kernelement sind hierbei die

Attribute im 3D-CAD-Modell und die vom CAD-Erzeugersystem generierten PMI-IDs. Die ursprüngliche Kennzeichnung der Produkt- und Fertigungsinformationen im 3D-CAD-Modell bleibt unverändert als zusätzlich abrufbare FII beim Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen CAX-Systemen bestehen. Jede PMI im 3D-CAD-Modell kann mittels des FII-Werts somit eindeutig im Produktentstehungsprozess und unabhängig vom jeweiligen IT- oder CAX-System identifiziert werden (siehe Abbildung 28). Wird zum Beispiel eine Bauteilanforderung beim Fertigungsprozess nicht erfüllt und vom CAQ-System als fehlerhaft identifiziert, kann die betroffene PMI mithilfe des FII-Attributs eindeutig erfasst und die Fehlerursache ermittelt werden.

Auf Basis der Maschinenlesbarkeit der FII-Methode kann die Rückverfolgung der Prozessparameter für die Fehlerermittlung automatisiert erfolgen. Die PMI im 3D-CAD-Modell haben bei dieser Methode im FII-Wert identische IDs, unabhängig vom CAX-System.

In Abbildung 28 ist dargestellt, wie vom CAD-Erzeugersystem die ID 1234 für die PMI vergeben wird. Nach dem Import des 3D-CAD-Modells in ein beliebiges CAX-System (z. B. CAQ-System) wird derselben PMI vom CAQ-internen Modellierkern jedoch die ID 3484 zugeteilt. Mithilfe des im CAD-Erzeugersystem neu generierten FII-Attributs an der PMI des 3D-CAD-Modells kann das CAD-PMI über den FII-Attributwert eindeutig zugeordnet werden.

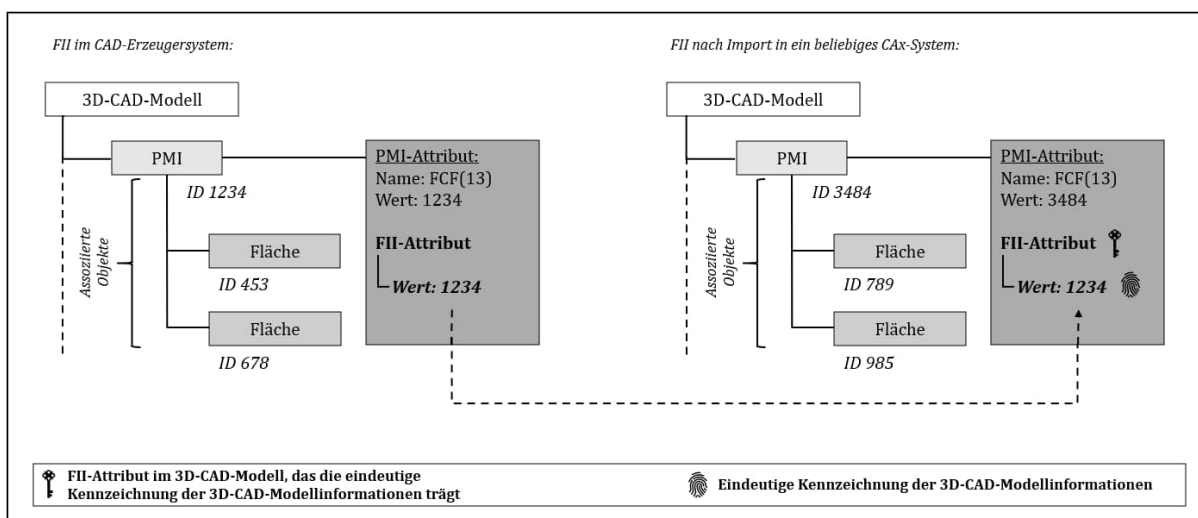


Abbildung 28: FII-Methode über FII-Attribute auf PMI-Ebene beim Import des 3D-CAD-Modells in ein beliebiges CAX-System

4.2.2.4 Zwischenfazit zur FII-Methode im 3D-CAD-Modell

Werden innerhalb der Qualitätssicherung Abweichungen am Bauteil gegenüber den Bauteilanforderungen im 3D-CAD-Modell festgestellt, so beginnt die Ermittlung bzw. Detektion möglicher Fehlerquellen. Unabhängig davon, ob es sich um ein Zukaufteil oder um ein intern gefertigtes Bauteil handelt, müssen die ermittelten Ist-Werte zur Fehleranalyse mit den bauteilspezifischen Daten aus der Konstruktion, der Arbeitsvorbereitung und der Fertigung abgeglichen werden. Der Abgleich und die

Kommunikation zwischen den unterschiedlichen Fertigungsbereichen erfolgen bei einem modellbasierten Ansatz auf Basis des 3D-CAD-Modells und dessen Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI).

Analysen (vgl. Abschnitt 2.5.6) haben gezeigt, dass die ursprünglichen Kennzeichnungen (z. B. IDs) der 3D-CAD-Bauteilinformationen beim 3D-Datenaustausch mit den entsprechenden bereichsspezifischen CAx-Systemen häufig ihre Eindeutigkeit verlieren. Mit der entwickelten FII-Methode (vgl. Abschnitt 4.2.2) sind die 3D-CAD-Modellinformationen im Produktentstehungsprozess und in den beteiligten CAx- und IT-Systemen eindeutig gekennzeichnet. Die Identifikationsnummer ID 1234 (siehe Abbildung 29), die eine PMI in einem bestimmten CAx-System eindeutig kennzeichnet, ist dann nicht mehr nur ein Attribut innerhalb eines einzelnen CAx-Systems, sondern ein eindeutiges Identifikationsmerkmal im 3D-CAD-Bauteil, das die Rückverfolgbarkeit von Bauteil- und Prozessinformationen im PEP ermöglicht.

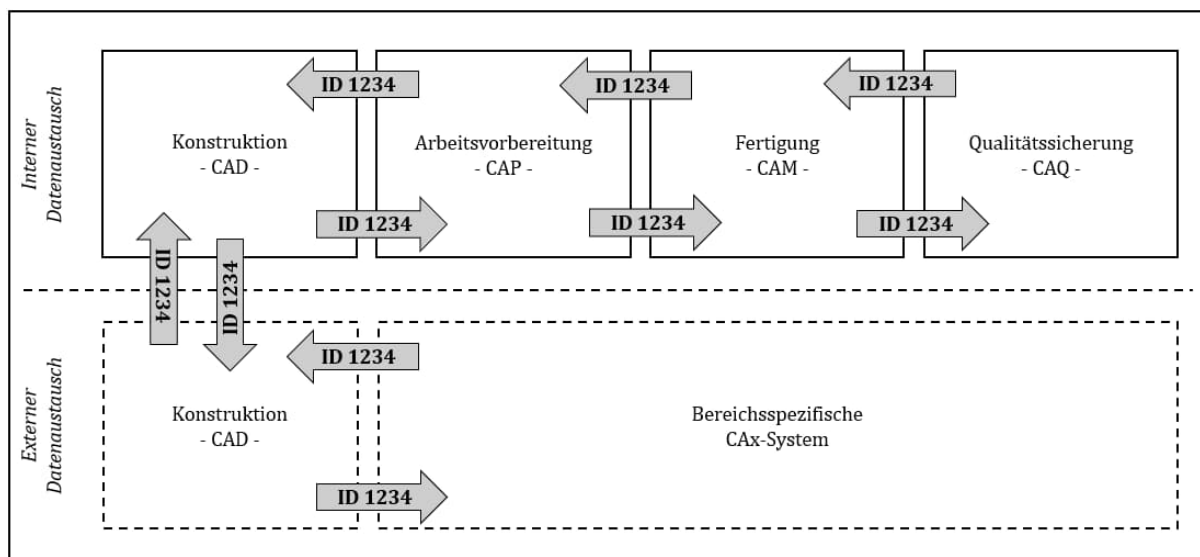


Abbildung 29: Eindeutige Rückverfolgbarkeit der PMI-ID mittels FII-Wert innerhalb der Produktentstehung bei internen und externen Prozessen

Die FII-Methode ist im CAD-Erzeugersystem zu implementieren, in dem das 3D-CAD-Modell erstellt wird. Die Werte der neu generierten FII-Informationenfeature oder FII-Attribute entsprechen den ursprünglichen IDs aus dem CAD-Erzeugersystem. Das erforderliche FII-Merkmal, das die eindeutige ID enthält, muss im CAD-System zum Zeitpunkt der PMI-Erstellung oder spätestens beim Speichervorgang, aber noch vor dem 3D-Datenaustausch erfolgen.

Außerdem muss im CAD-System die Möglichkeit gegeben sein, FII-Attribute für geometriespezifische Elemente zusätzlich zu generieren oder die FII-Methode direkt auf Part-Ebene zu implementieren. Ist diese Möglichkeit nicht gegeben, ist das FII-Merkmal als zusätzliches FII-Informationenfeature zu definieren, das die eindeutige ID beinhaltet. Das FII-Informationenfeature bildet somit eine neue Unterklasse innerhalb der bereits bestehenden Informationsfeature-Klasse im 3D-CAD-Modell (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Als Unterklasse innerhalb der Informationsfeature-Struktur im CAD-System ist es möglich,

die FII in anderen CAX-Systemen zu interpretieren und zu lesen, vorausgesetzt die PMI-Methode (vgl. Abschnitt 2.5.4) ist bereits im CAX-System implementiert.

Analysen und Recherchen im Kontext der vorliegenden Forschungsarbeit haben gezeigt, dass die PMI-Funktionalität und die innerhalb der FII-Methode genutzten Funktionen häufig nicht oder nur teilweise von den CAD-Systemen unterstützt werden. Alternativ könnte diese Funktionslücke mithilfe der neutralen CAD-Austauschformate behoben werden, jedoch werden die Zusatzinformationen zu den IDs hier bisher nicht gespeichert und können somit beim CAD-neutralen Datenaustausch nicht übertragen werden. Um diesen Informationsverlust zu beheben, wird nachfolgend eine Methode entwickelt, die die eindeutige Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen für den Datentransfer mittels CAD-neutraler Datenformate ermöglicht.

4.2.3 CAD-neutrale Verwendbarkeit der FII-Methode zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen

Häufig unterliegen die Methoden des 3D-Datenaustauschs strategischen und politischen Einflüssen, die träge Prozessänderungen zur Folge haben [124, S. 27–31]. Demnach müssen zur optimalen Lösungsfindung unterschiedliche Ansätze betrachtet und unternehmensspezifisch analysiert werden. Neben der theoretischen Umsetzbarkeit der neuen Methoden zum 3D-Datenaustausch werden häufig Kriterien bzgl. des Nutzens, der Einführungswahrscheinlichkeit und der Umsetzungsgeschwindigkeit der neuen Methode sowie deren Akzeptanzpotenzial zur Entscheidungsfindung in Betracht gezogen [124, S. 27–31]. Diese Kriterien werden maßgeblich von den IT-Systemherstellern, Software-Schnittstellenprogrammierern, Konstrukteuren und Endanwendern beeinflusst.

Erfahrungen haben gezeigt, dass mit unzureichendem Druck auf die IT-Systemanbieter, die Wahrscheinlichkeit zur Änderungsbereitschaft ihrer IT-Systemfunktionalitäten sinkt. Gleiches ist häufig auch im Umfeld der Schnittstellenprogrammierung zu erkennen. Die zumeist träge Performance der Systemanbieter bei der Anpassung ihrer IT-Systeme erfordert neue Vorgehensweisen, die unabhängig von den CAD-Erzeugersystemen entwickelt und im industriellen Umfeld integriert werden können [124, S. 27–31]. Aufgrund dieser Beweggründe rücken verstärkt CAD-neutrale Austauschformate in den Fokus der Unternehmen, um die Wahrscheinlichkeit, den Nutzen und die Geschwindigkeit der Umsetzung bestmöglich erfüllen zu können (siehe Abbildung 30).

Der größte Nutzen wird meist beim direkten Eingriff in die existierenden Neutralformate erzielt. Aus Abbildung 30 geht hervor, dass mit der Manipulation der erzeugten STEP-Datei die besten Ergebnisse gegenüber anderen Lösungsstrategien, z. B. der direkten Änderung der ISO-Standards (z. B. ISO 10303), erzielt werden können. Dies wird aus dem linken Diagramm in Abbildung 30 deutlich. Hier ist das Verhältnis aus Wahrscheinlichkeit und Nutzen der Umsetzung am größten. Ähnliches gilt für den rechten Bereich in Abbildung 30. Neben der Anpassung der Modellerstellung sowie der Anpassung der Import-/Exportoptionen bietet auch hier die Manipulation der STEP-Datei das beste Verhältnis aus Wahrscheinlichkeit und Geschwindigkeit der Umsetzung. Informationsverluste im Datenaustausch und Inkompatibilitäten der CAX-Systeme lassen

sich so direkt im Ursprung beheben. Der Konstrukteur ist somit nicht aufgefordert, seine Methodik bei der 3D-CAD-Modellerstellung und PMI-Definition zu ändern, weshalb Akzeptanz gegeben ist und zusätzlich das Risiko zur fehlerhaften Modellierung reduziert wird. Neben einer hohen Wahrscheinlichkeit der neuen Methodenumsetzung kann mit der Manipulation der Neutraldatei (z. B. STEP-Datei) auch eine höhere Umsetzungsgeschwindigkeit im Anwenderbereich erzielt werden, da die Anpassungen unabhängig von den CAD-Systemanbietern erfolgen [124, S. 27–31].

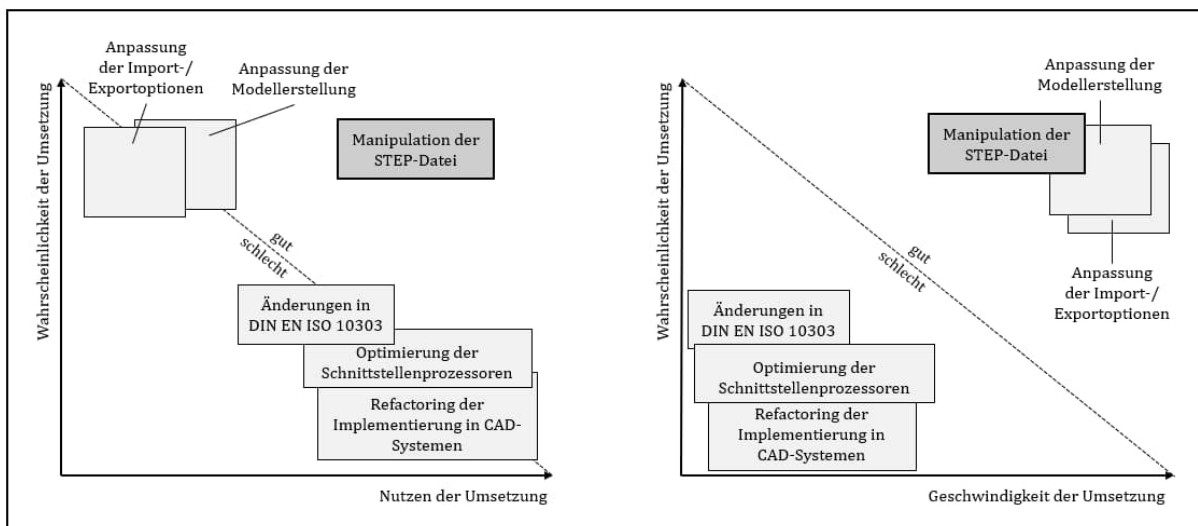


Abbildung 30: Qualitative Einordnung unterschiedlicher Lösungsstrategien zum 3D-Datenaustausch in Anlehnung an [124, S. 27–31]

Um die Anforderungen an die CAD-Systemhersteller bzgl. der Funktionsanpassungen für den Datenaustausch möglichst gering zu halten und den neutralen Datenaustausch zu unterstützen, wird die entwickelte FII-Methode mithilfe der FII-Attribute aus Abschnitt 4.2.2.3 innerhalb der neutralen CAD-Austauschformate implementiert. Zur durchgängigen und maschinenlesbaren Kommunikation auf Basis einer neutral anwendbaren FII-Methode kann die zu übertragende Datenmenge beim Datenaustausch reduziert und das Know-how der jeweiligen Unternehmen geschützt werden. Auch Kompatibilitätsprobleme verschiedener Dateiformate in den CAx-Systemen werden mit einer CAD-neutralen FII-Integration reduziert.

Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Analysen haben gezeigt, dass die IDs der PMI nicht in den CAD-neutralen Austauschformaten (z. B. STEP AP242 oder JT) gespeichert werden. Die PMI-ID zur eindeutigen Kennzeichnung geht also im Datenaustausch verloren und wird folglich nicht innerhalb der CAx-Folgesysteme (z. B. CAQ-System) übertragen. Zur Beseitigung dieser Informationslücke wird im weiteren Verlauf eine Methode entwickelt, die die CAD-Neutralformate ergänzt, um unabhängig vom CAD-Erzeugersystem die Eindeutigkeit der 3D-CAD-Modellinformationen mittels der FII-Methode zu ermöglichen.

Die ursprüngliche PMI-ID, die von jedem CAD-System bei der Konstruktion erzeugt wird, wird in das CAD-neutrale Austauschformat implementiert, indem die Information zur eindeutigen Identifikation der Bauteilmerkmale in den FII-Attributen des 3D-CAD-

Modells (vgl. Abschnitt 4.2.2.3) gespeichert wird [156]. Ist das zu exportierende 3D-CAD-Modell bestimmt, wird das 3D-CAD-Modell als CAD-neutrales Austauschformat exportiert. Abhängig von den Funktionsumfängen des eingesetzten CAD-Erzeugersystems sind unterschiedliche Aktionen zur Implementierung der FII im CAD-neutralen Austauschformat notwendig (siehe Abbildung 31).

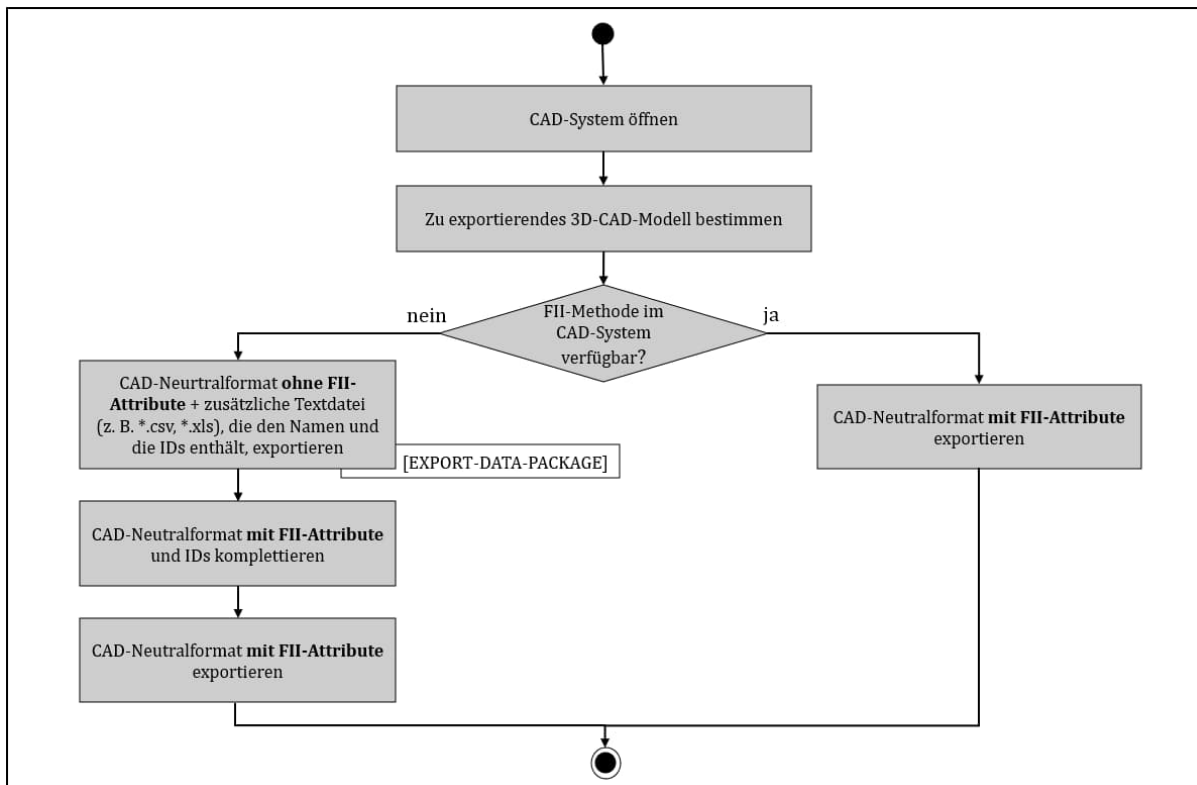


Abbildung 31: Schematischer Ablauf zur Gewährleistung einer eindeutigen Kennzeichnung der 3D-CAD-Modellinformationen in CAD-neutralen Austauschformaten

Wie in Abschnitt 4.2.2.3 erläutert, kann das FII-Attribut zur Schaffung der Eindeutigkeit auf Part- oder auf PMI-Ebene im 3D-CAD-Modell definiert werden. Mithilfe dieser Ansätze kann zum Beispiel einer Produkt- und Fertigungsinformation im 3D-CAD-Modell mit dem Namen *Lineal Dimension* und der ursprünglichen (vom CAD-Erzeugersystem generierten) ID 1234 entweder ein FII-Attribut mit dem Wert 1234 auf PMI-Ebene oder ein FII-Attribut mit dem Wert 1234 inklusive des Namens *Lineal Dimension* auf Part-Ebene erzeugt werden. Die durchgängige und eindeutige Rückverfolgbarkeit ist über den in Abschnitt 4.2.2.3 beschriebenen Ansatz möglich.

Um die Durchgängigkeit auch beim CAD-neutralen Datenaustausch sicherstellen zu können, müssen zusätzliche Informationen vom CAD-Erzeugersystem bereitgestellt werden. Die zusätzlichen Informationen sind der Name und die ID des Informationsfeatures, das eindeutig gekennzeichnet werden soll. Diese beiden Informationen werden über eine Schnittstelle aus dem CAD-System extrahiert und in einer neutralen Textdatei (z. B. *.csv oder *.xls) zur weiteren Verwendung gespeichert. Mit der CAD-seitigen Bereitstellung der Zusatzinformationen in Form einer neutralen Textdatei inklusive des CAD-neutralen Austauschformats (z. B. STEP AP242) wird das

neutrale CAD-Austauschformat mit den FII-Attributen ergänzt (siehe Abbildung 31 – links). Das erweiterte Neutralformat enthält somit alle Informationen, die zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen notwendig sind.

Die FII-Methode wird nachfolgend auf das STEP-AP242-Format (vgl. Abschnitt 2.6.3) angewendet. Das STEP-AP242-Format (nach ISO 10303) wird aufgrund seiner weitreichenden Verbreitung, seiner funktionalen Verwendbarkeit und seiner hohen Kompatibilität zu CAx-Systemen exemplarisch ausgewählt. Das JT-Format (vgl. Abschnitt 2.6.3) und das QIF-Format (vgl. Abschnitt 2.6.3) werden hier nicht betrachtet. Die Methode zur eindeutigen Kennzeichnung bzw. Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell (vgl. Abschnitt 4.2.2) wird vom JT-Format (nach ISO 14306) zwar ohne manipulativen Eingriff in die Neutraldatei unterstützt, jedoch wird das JT-Format derzeit noch nicht ausreichend von CAx-Systemen unterstützt. Beispielsweise kann die automatische Messgeräteprogrammierung in den bekannten und etablierten CAQ-Systemen nicht auf Basis des JT-Formats erfolgen, wodurch ein Bruch innerhalb der Prozess- und Informationskette entsteht. Dennoch wird die Möglichkeit zur Anwendung der FII-Methode im JT-Format im weiteren Verlauf dieser Arbeit erneut aufgegriffen (vgl. Abschnitt 4.3.2.5 und Abschnitt 5.1). Auch das QIF-Format, das erst seit dem Jahr 2020 als ISO-Standard veröffentlicht ist, wird nicht weiter betrachtet, da dieses Format heutzutage noch kaum in Unternehmen im Einsatz ist.

Gemäß den Ergebnissen aus dieser Analyse wird nachfolgend das STEP-AP242-Format nach ISO 10303 für die CAD-neutrale Methodenentwicklung ausgewählt. Das STEP-AP242-Format wird auf Basis des FII-Attribut-Ansatzes (vgl. Abschnitt 4.2.2.3) mit dem ursprünglichen (nativen) PMI-Namen und der PMI-ID aus dem CAD-Erzeugersystem ergänzt. Zur Vervollständigung der STEP-Datei wird die neutrale Textdatei (sie beinhaltet diese zwei zusätzlichen Feature-Informationen) und die aus dem CAD-Erzeugersystem abgeleitete STEP-AP242-Datei (ohne FII) benötigt (siehe Abbildung 32).

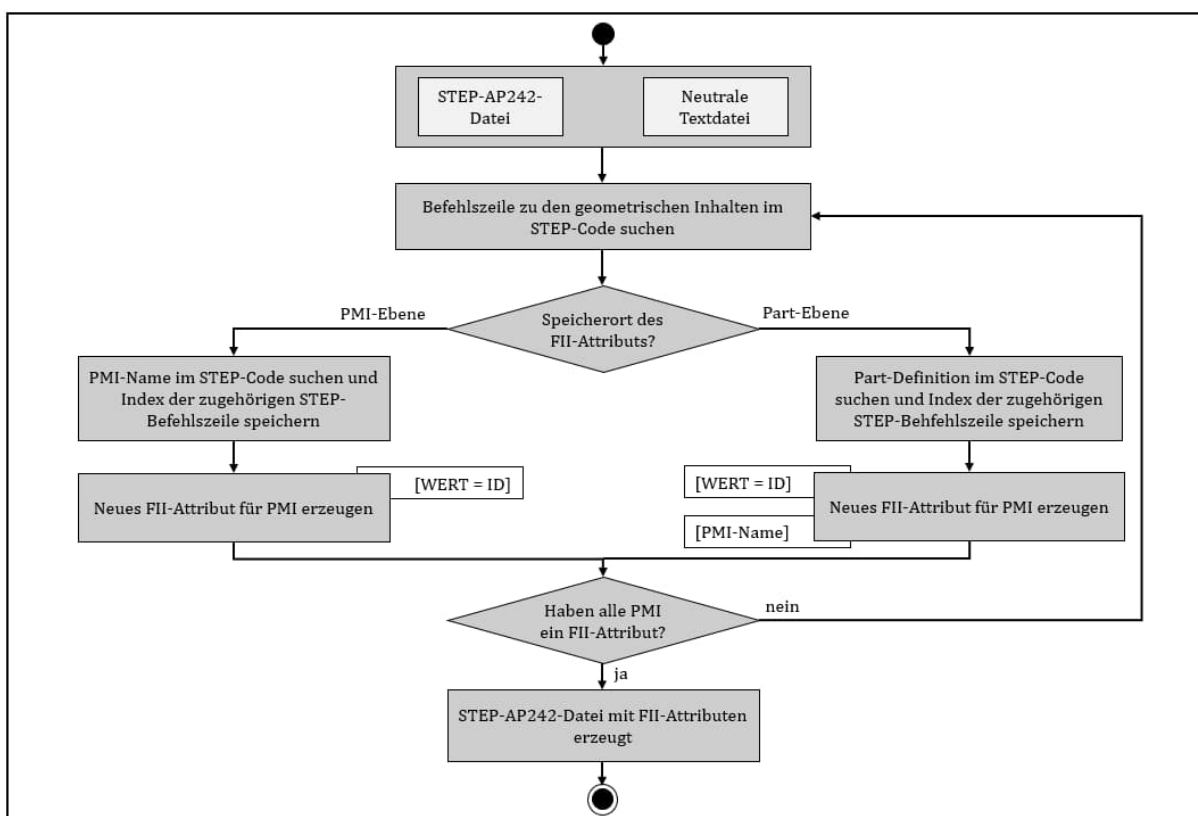


Abbildung 32: Abläufe bei der Ergänzung des STEP-AP242-Formats mit FII-Attributen

Die neutrale Textdatei (z. B. *.csv oder *.xls) enthält die Informationen (PMI-ID und PMI-Name) zur Ergänzung der neutralen CAD-Datei im STEP-AP242-Format. Zur Definition der FII-Attribute im STEP-AP242-Format wird die notwendige Befehlszeile zu den geometrischen Inhalten im STEP-Code gesucht. Im weiteren Verlauf werden zwei Parallelprozesse ausgelöst (siehe Abbildung 32), einer zur Generierung der FII-Attribute auf PMI-Ebene und ein weiterer zur Generierung der FII-Attribute auf Part-Ebene im STEP-File. Dazu wird auf PMI-Ebene im STEP-File eine PMI auf Basis seines PMI-Namens gesucht. Dieser ist in der neutralen Textdatei zusammen mit der eindeutigen PMI-ID hinterlegt. Der Index (z. B. #1) der betreffenden Befehlszeile zur PMI-Definition im STEP-Code wird gespeichert (siehe Abbildung 33).

Auf Bauteil-Ebene wird der Index der zugehörigen Befehlszeile im STEP-Code identifiziert und ebenfalls abgespeichert. Im Anschluss wird für alle PMI ein FII-Attribut erstellt und dieses anhand der identifizierten Befehlszeilen des STEP-Codes entweder auf PMI- oder auf Part-Ebene zugewiesen. Der Wert, der in das FII-Attribut geschrieben wird, entspricht der ID aus der neutralen Textdatei. Für das FII-Attribut im STEP-File auf PMI-Ebene wird zusätzlich der Name *FII* vergeben. Der Name des FII-Attributs auf Part-Ebene ist identisch zum PMI-Namen, der in der Textdatei hinterlegt ist, um eindeutig innerhalb der CAD-Struktur identifiziert werden zu können.

Zur Definition eines zusätzlichen FII-Attributs im STEP-AP242-Format sind insgesamt acht Befehlszeilen innerhalb des STEP-Codes erforderlich, wobei zwei der acht Zeilen bereits in der zu ergänzenden STEP-AP242-Datei enthalten sind. Aus diesem Grund ist es von Bedeutung, dass die Zeilenindizes (z. B. #4) dieser Funktionen zu Beginn des

Importprozesses identifiziert werden, um im weiteren Verlauf die neu generierten FII-Attribute gezielt im STEP-File zu erzeugen. Diese beiden Zeilen definieren im ursprünglichen STEP-AP242-Format die geometrischen Informationen und die Zusammenhänge des 3D-CAD-Modells mit den spezifizierten PMI.

Für die CAD-neutrale Umsetzung der FII-Methode muss zusätzlich der Wert des FII-Attributs definiert werden. Dieser wird über die Funktion *Integer Representation Item* festgelegt und an die STEP-Datei übermittelt (siehe Abbildung 33 – Bereich A und B, #3). Außerdem werden das FII-Attribut und der zugehörige Name der PMI über die Funktionen *General Property* und *Property Definition* im STEP-AP242-Format ergänzt (siehe Abbildung 33 – Bereich A und B, #4, #5).

Die Funktion *Property Definition* legt fest, ob das FII-Attribut auf PMI-Ebene (siehe Abbildung 33 – Bereich A, #1) oder auf Part-Ebene (siehe Abbildung 33 – Bereich B, #1) gespeichert wird. Zur Vervollständigung der FII-Attribut-Anlage werden die Funktionen *General Property Association*, *Representation* und *Property Definition Representation* benötigt. Die einzelnen Befehlszeilen werden entsprechend der Vorgaben nach ISO 10303-242 verbunden. Zum Beispiel muss die Funktion *Representation* des FII-Attributs (siehe Abbildung 33 – Bereich A und B, #7) mit der Funktion *Geometric Representation Context* der STEP-Datei (siehe Abbildung 33 – Bereich A und B, #2) verknüpft werden.

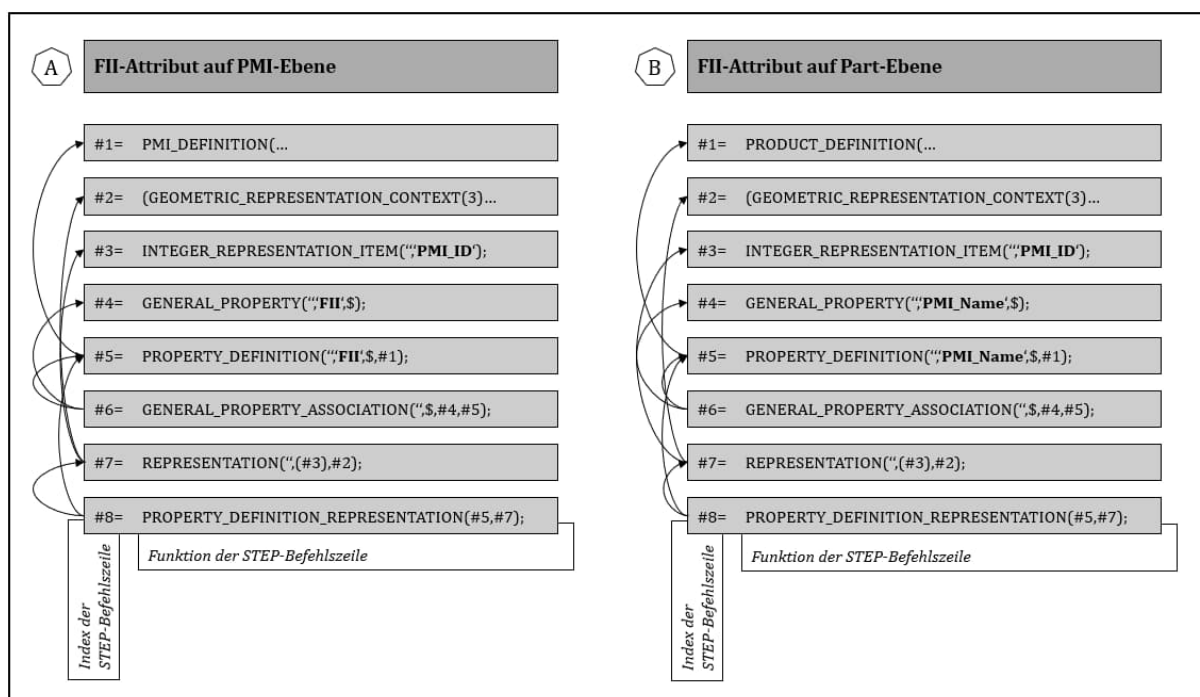


Abbildung 33: Konzept zur Anlage eines FII-Attributs innerhalb des STEP-AP242-Formats auf PMI-Ebene und auf Part-Ebene

Nach Übermittlung der FII aus dem Text-File an die neu definierten FII-Attribute wird schließlich eine modifizierte STEP-AP242-Datei erzeugt, die sowohl auf PMI- als auch auf Bauteil-Ebene die zur Eindeutigkeit notwendigen FII-Attribute enthält. Somit können unabhängig vom verwendeten CAD-Erzeugersystem die Informationen zur eindeutigen Interpretation im STEP-File integriert und beliebig weitergenutzt werden. Dadurch

ermöglicht das neue STEP-File *STEP AP242+* die eindeutige Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen im CAD-neutralen Datenaustausch.

4.3 Maßnahmen zur Unterstützung des verlustfreien 3D-CAD-Datentransfers und der 3D-modellbasierten Prozessplanung

Aufbauend auf die Methode zur eindeutigen Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell (vgl. Abschnitt 4.2) werden in diesem Kapitel neue Methoden entwickelt, die zur Einführung und Realisierung der 3D-CAD-basierten Arbeitsweise in der Fertigung notwendig sind. Hierzu werden in Abschnitt 4.3.1 Methoden für einen fehler- und verlustfreien Informationsaustausch beim 3D-CAD-Datenaustausch entwickelt. Dabei liegt der Fokus auf der Absicherung semantisch korrekter Toleranzspezifikationen für Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell. Die Methoden in Abschnitt 4.3.2 ermöglichen eine 3D-CAD-basierte Fabrik- und Prozessplanung inklusive des dafür notwendigen Ressourcenmanagements. Neue Ansätze zur arbeitsvorgangsspezifischen Informationsbereitstellung auf Fabrikebene runden das Kapitel zur Methodenentwicklung ab.

4.3.1 Absicherung der semantisch korrekten Bauteildefinition

4.3.1.1 Vorgehen zur semantischen Absicherung der Angabe von Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell

Funktionale 3D-CAD-Modelle (vgl. Abschnitt 2.5.1) lenken die Fertigung der Zukunft [7] [77]. Dies setzt voraus, dass die hierfür notwendigen Informationen vollständig und fehlerfrei im 3D-CAD-Modell vorliegen und an die Folgesysteme im PEP übergeben werden können. Fehlerhaft definierte Informationen im 3D-CAD-Modell haben häufig Informationsverluste bei der Datenübertragung zur Folge, die beispielsweise die automatische Generierung von Messgeräteprogrammen im CAQ-System unmöglich machen. Die Notwendigkeit, die PMI-Festlegungen im 3D-CAD-Modell vor dem Datentransfer auf ihre semantisch korrekte und sinnvolle Tolerierung zu überprüfen, ist daher unabdingbar. Deshalb wird im nächsten Schritt eine Methode entwickelt, die die Toleranzspezifikation im 3D-CAD-Modell (insbesondere für Form- und Lagetoleranzen, siehe Abbildung 18) auf Vollständigkeit, Eindeutigkeit und Widerspruchsfreiheit überprüft. Die Festlegungen nach DIN EN ISO 1101 (vgl. Abschnitt 2.5.5) werden auf die Anwendungen im 3D-CAD-Umfeld übertragen und für die maschinenlesbare und semantisch korrekte Implementierung in der 3D-CAD-Bauteilgeometrie spezifiziert.

Die methodischen Ansätze zur systemneutralen Absicherung der Toleranzspezifikation im 3D-CAD-Modell werden in drei Teilbereiche untergliedert: die Klassifikation der Festlegungen nach DIN EN ISO 1101, die Überprüfung der semantisch korrekten Toleranzangabe sowie die Darstellung und Visualisierung möglicher Tolerierungsfehler (siehe Abbildung 34). Zunächst werden die nach DIN EN ISO 1101 festgelegten Toleranzvorgaben klassifiziert, um im Anschluss typenspezifische Algorithmen zur Überprüfung der semantischen Korrektheit der Toleranzspezifikationen zu entwickeln.

Schließlich werden methodische Ansätze ausgearbeitet, die den Konstrukteur bei der 3D-CAD-Bauteiltolerierung auf Basis der ausgearbeiteten Methode unterstützen und zur Förderung der Akzeptanz der neuen 3D-CAD-basierten Methoden beitragen.

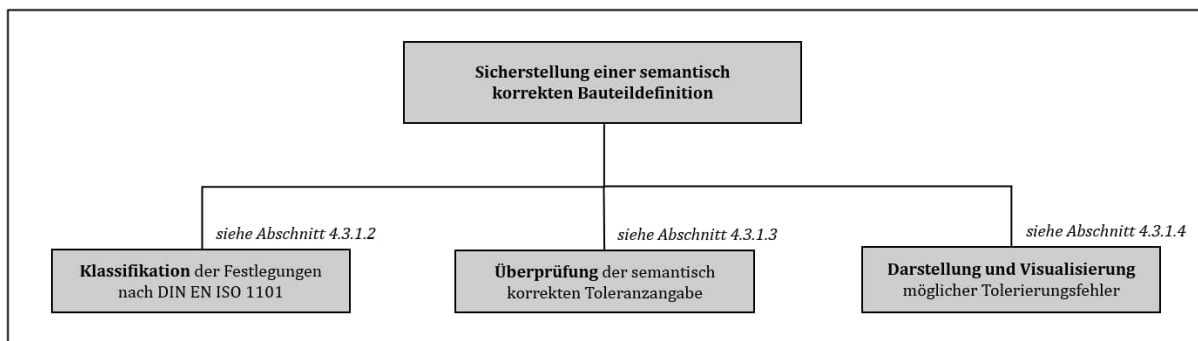


Abbildung 34: Drei Teilbereiche des Ansatzes zur semantisch korrekten Absicherung der Angabe von Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell

4.3.1.2 Klassifikation der Toleranzspezifikation in Form eines Informationsmodells

Bei der Angabe von Form- und Lagetoleranzen nach DIN EN ISO 1101 ist zwingend darauf zu achten, dass eine sinnvolle und semantisch korrekte Kombination aus den referenzierten Geometrieelementen und den angewendeten Toleranzsymbolen berücksichtigt wird. Beispielsweise ist bei der Angabe einer Ebenheitstoleranz sicherzustellen, dass das referenzierte Geometrieelement im 3D-CAD-Modell eine ebene Fläche ist. Die Kombination aus der Ebenheitsanforderung und dem referenzierten Element muss sinnhaft sein. Jedoch erlaubt der Modellierkern im CAD-System häufig einen hohen Gestaltungsfreiraum bei der Kombination aus Toleranzsymbol und Geometrieelement.

Flächen, Kanten und Linien können unabhängig von der Sinnhaftigkeit und der semantischen Korrektheit nach DIN EN ISO 1101 referenziert und beliebig mit Toleranzsymbolen kombiniert werden. Nach DIN EN ISO 1101 sind Referenzen auf Körperkanten eigentlich nicht zulässig. Lediglich Flächen und definierte Linien (z. B. für die Rundheitstoleranzen) sind als Referenzgeometrieelemente vorgesehen. Die Bemaßung und Tolerierung auf Körperkanten im 3D-CAD-Umfeld sorgt für Interpretationsfehler und Informationsverluste in den nachfolgenden CAx-Systemen, z. B. bei der Messprogrammgenerierung im CAQ-System auf Basis der PMI im 3D-CAD-Modell. Die Auflistung der zulässigen Kombinationen zur Festlegung der Form- und Lagetoleranzen nach DIN EN ISO 1101 bestehend aus Toleranzsymbol und Geometrieelement können dem Anhang A – Tabelle A1 entnommen werden.

Bei der Festlegung der Toleranzbezüge sind die Eignung und die Korrektheit zu berücksichtigen. Eignung bezieht sich darauf, ob abhängig von der Toleranzart bzw. vom Toleranzsymbol ein Bezug notwendig bzw. zulässig ist oder nicht. Ist die Bezugsangabe zulässig, ist diese auf Korrektheit zu prüfen.

Nach den Regeln in DIN EN ISO 1101 muss bei der Toleranzspezifikation sichergestellt werden, dass die Verwendung eines Bezugssymbols für das definierte Toleranzsymbol vorgesehen ist. Beispielsweise ist es nach DIN EN ISO 1101 nicht zulässig, den Formtoleranzen ergänzende Bezugssymbole zuzuweisen. Die Referenz wird bei Formtoleranzen generell über die Angabe von Indikatoren gesteuert. Ausnahmen bilden Flächen- und Linienprofile, die für die exakte Ort- bzw. Richtungsangabe der Toleranzzone zulässig sind. Die Überprüfung der Zulässigkeit der Bezugsangabe ist in diesem Fall nicht möglich, da mittels des Toleranzsymbols nicht erkennbar ist, ob ein Flächen- oder Linienprofil zur Angabe einer Form-, Richtungs- oder Ortsspezifikation verwendet wird.

Nach DIN EN ISO 1101 ist die Angabe des Toleranzindikators ebenfalls auf Eignung und Korrektheit zu überprüfen. Die vier Indikatoren (Schnittebenen-, Orientierungsebenen-, Kollektionsebenen- und Richtungselementindikator) sind nur in Kombination mit bestimmten Toleranzsymbolen zulässig (siehe Anhang A – Tabelle A2).

Das Toleranzbezugssystem wird zur Spezifikation von Positions-, Linien- und Flächenprofilltoleranzen benötigt. Die Kombination aus einem Bezugssystem orthogonaler Geometrielemente und Bemaßungslinien legt die exakte Lage der Toleranzzone im dreidimensionalen Raum fest und sind demnach bei der Klassifizierung und den abgeleiteten klassenspezifischen Überprüfungsalgorithmen gesondert zu berücksichtigen.

Unter Berücksichtigung der genannten Einflussparameter lassen sich die Toleranzspezifikationsklassen A, AI, AB, AIB und AIBL bilden (siehe Abbildung 35). Jede der fünf Klassen beinhaltet unterschiedliche Toleranzspezifikationen nach DIN EN ISO 1101. Diese sind abhängig von den klassenspezifischen Überprüfungsmerkmalen, die nachfolgend beschrieben werden. [156]

Bei der Spezifikation von Form- und Lagetoleranzen in einem 3D-CAD-Modell sind die Festlegungen der Klasse A in allen Fällen zu prüfen, da hier die Minimalanforderungen an die Toleranzspezifikation eingebunden sind, die alle Toleranzspezifikationsklassen betreffen (siehe Abbildung 35). Zylindrizitäts- und Symmetrieangaben sind der Klasse A zugeordnet. Die Klasse AI umfasst die Geradheit, die Ebenheit, die Rundheit und die Neigung, wohingegen Klasse AB ausschließlich Toleranzangaben beinhaltet, die eine Konzentritätsprüfung verlangen. Die Regeln zur Klasse AIB werden aufgerufen, wenn Parallelität und Rechtwinkligkeit sowie axialer und radialer Rund- bzw. Gesamtrundlauf zur Erfüllung der Bauteilfunktion gefordert sind. Ergänzend bilden Linien- und Flächenprofilltoleranzen sowie Positionstoleranzen die Klasse AIBL (siehe Abbildung 35).

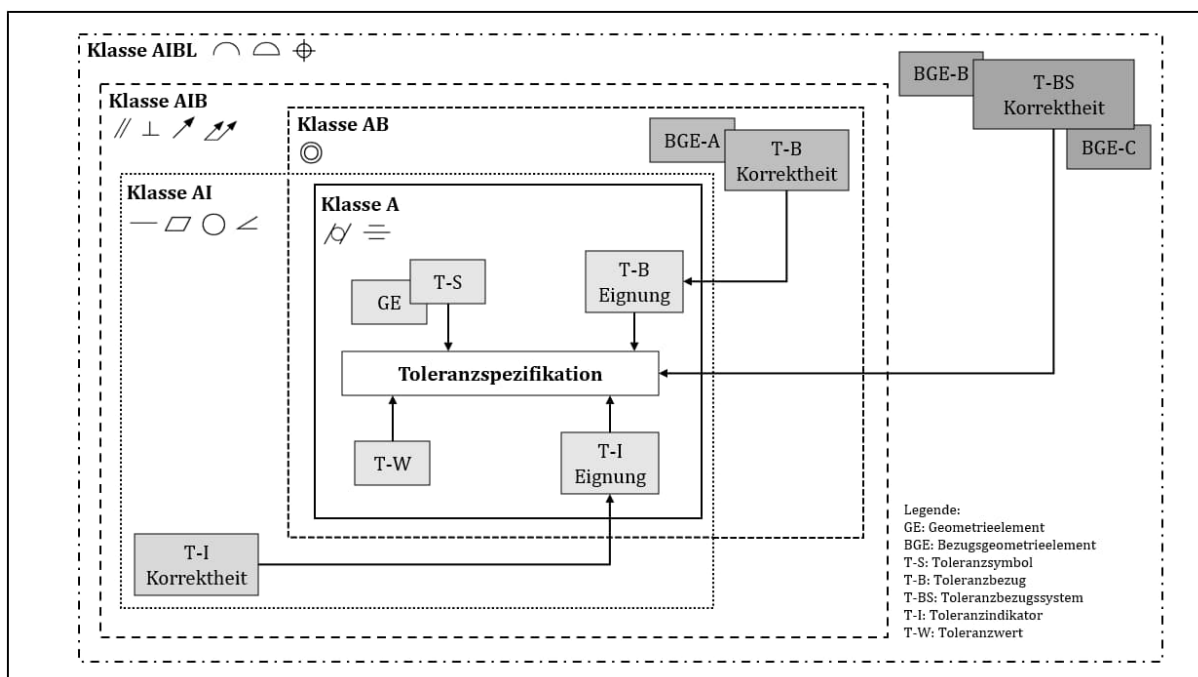


Abbildung 35: Informationsmodell zur Klassifikation der Toleranzspezifikationen nach DIN EN ISO 1101

Die Klasse A (siehe Abbildung 35) umfasst Toleranzangaben, die stets zu prüfen sind. Wie in Abbildung 35 dargestellt ist, bilden das Toleranzsymbol in Korrelation mit dem Geometrieelement, dem Toleranzwert sowie Eignungsprüfungen definierter Bezüge und Indikatoren die Abfrageparameter zu Festlegungen dieser Klasse. Die Klasse AI ergänzt die Klasse A um die Korrektheitsprüfung des verwendeten Indikators im 3D-CAD-Modell. Ist bei der 3D-CAD-Bauteiltolerierung ein Indikator notwendig, wird zur Sicherstellung der semantischen Korrektheit der angegebene Indikator in Kombination mit den Informationen aus der Klasse A bei der Überprüfung berücksichtigt.

Unabhängig von der Klasse AI ergänzt die Klasse AB die Klasse A um Toleranzangaben, die einen Bezug erlauben bzw. benötigen. Innerhalb der Klasse AB wird die Kombination aus der Lage des Bezugsgeometrieelements gegenüber dem tatsächlich tolerierten Geometrieelement auf Sinnhaftigkeit und Korrektheit überprüft. Die Klasse AIB vereint die drei zuvor genannten Klassen A, AI und AB. Sie umfasst damit sämtliche Toleranzangaben, die sowohl Indikatoren als auch Bezüge beinhalten. Die Klasse AIBL enthält neben den Elementen innerhalb der bereits vorgestellten Klassen zusätzliche Informationen zur exakten Lage der Bezugsgeometrieelemente. Mit dieser Klassifikation ist für jedes Toleranzsymbol nach DIN EN ISO 1101 klar definiert, welcher Überprüfungsablauf bzw. Überprüfungsalgorithmus (vgl. Abschnitt 4.3.1.3) für die Kontrolle der semantisch korrekten Anwendung der Bauteiltoleranzen für Form- und Lage zu wählen ist.

4.3.1.3 Überprüfung des 3D-CAD-Modells auf die semantisch korrekte Angabe von Form- und Lagetoleranzen

Zur Überprüfung der Semantik von Form- und Lagetoleranzen sind logische Abläufe notwendig. Aufbauend auf dem Informationsmodell und der Klassifizierung aus Abschnitt 4.3.1.2 werden nachfolgend klassenspezifische Algorithmen entwickelt, die Fehler bei der 3D-CAD-Bauteiltolerierung mittels PMI automatisch identifizieren und im Anschluss dem Konstrukteur aufzeigen (vgl. Abschnitt 4.3.1.4). Zum Start des Algorithmus wird das 3D-CAD-Modell auf vorhandene PMI untersucht. Existiert mindestens eine Produkt- und Fertigungsinformation zur Bestimmung der Form und Lage, wird zunächst das Toleranzsymbol ermittelt und im Anschluss einer Toleranzspezifikationsklasse aus Abschnitt 4.3.1.2 zugeordnet.

Es folgt die Überprüfung der semantisch korrekten Toleranzangabe nach den klassenspezifischen Regeln und Festlegungen. Der Überprüfungsalgorithmus bleibt so lange aktiv, bis alle PMI, die im 3D-CAD-Modell gefunden werden, auf Eindeutigkeit, Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit geprüft sind. Abbildung 36 zeigt den schematischen Ablauf des Überprüfungsmechanismus der Klassen A, AI, AB, AIB und AIBL. Ergänzend werden die Attribute und Aktivitäten der klassenspezifischen Überprüfungsalgorithmen in Abbildung 36 in Form einer Darstellung nach UML-2-Standard (UML: *Unified Modeling Language*) beschrieben. Die Richtung der Pfeile beschreibt nach UML-2-Standard die Abhängigkeiten der einzelnen Klassen voneinander. Demnach bildet Klasse A die Basis für die weiteren Klassen AI, AB, AIB und AIBL.

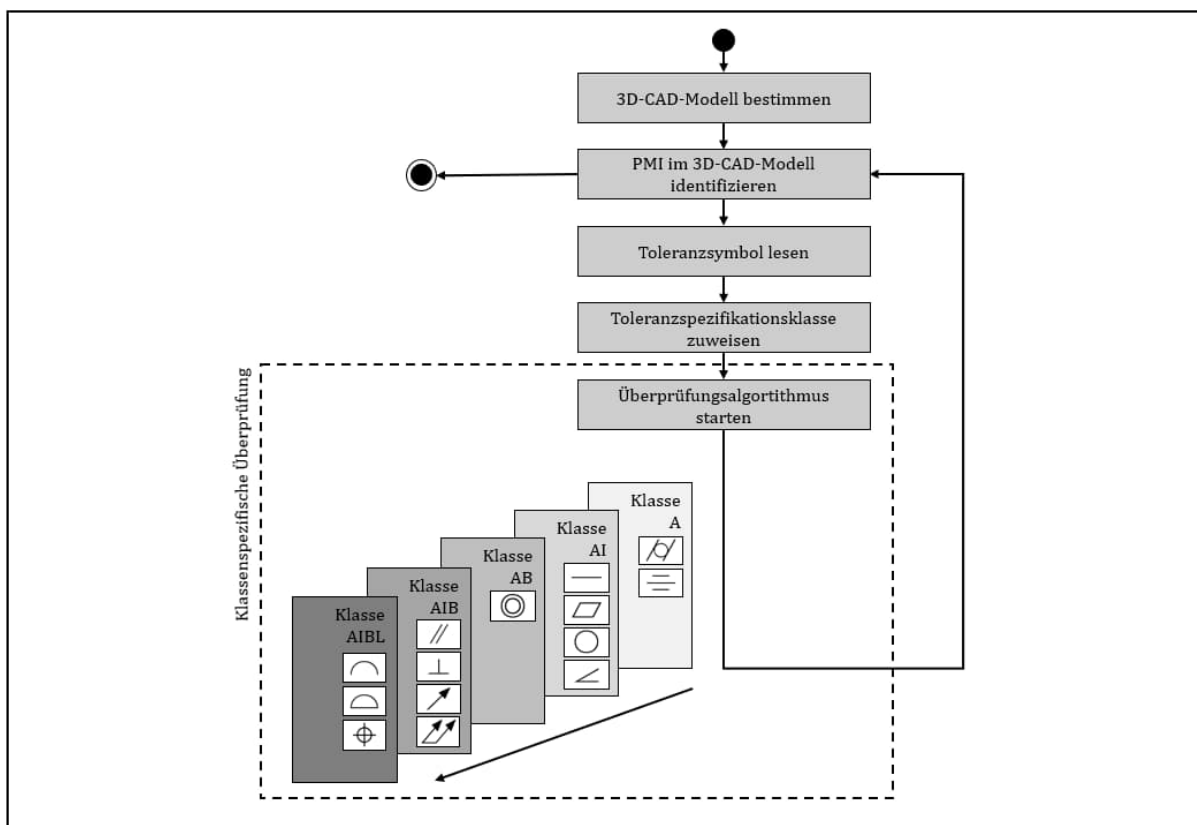


Abbildung 36: Ablauf des Überprüfungsalgorithmus für Form- und Lagetoleranzen nach DIN EN ISO 1101

Die Regeln zur semantischen Überprüfung für Angaben nach Klasse A werden unabhängig von der jeweiligen Toleranzspezifikation angewendet. Sie bilden die Basis der Überprüfungsalgorithmen der weiteren Toleranzspezifikationsklassen. Neben dem Toleranzsymbol und dem Toleranzwert werden die Zulässigkeiten der Bezüge und Indikatoren abgefragt. Der Algorithmus beginnt mit der Abfrage bzw. Prüfung des tolerierten Geometrieelements (siehe Abbildung 37 – Klasse A). Ist ein Geometrieelement referenziert, wird der Typ des Elements (z. B. ebene oder zylindrische Fläche) ermittelt und geprüft, ob dieses Geometrieelement in Kombination mit dem angegebenen Toleranzsymbol zulässig ist.

Im weiteren Verlauf wird der festgelegte Toleranzwert (vgl. Abschnitt 2.5.5) überprüft. Der Toleranzwert (T-W) muss positiv sein ($T-W > 0$), da ansonsten ein Fehler ausgegeben wird und die Überprüfung der entsprechenden PMI beendet ist. Ist der eingetragene Wert positiv, werden die festgelegten Angaben hierzu überprüft. Ist ein Bezug definiert, wird ermittelt, ob die Bezugsangabe in Verbindung mit dem Toleranzsymbol notwendig bzw. erlaubt ist. Bei zulässiger Angabe des Bezugs wird im Anschluss der Indikator geprüft, vorausgesetzt, ein zusätzlicher Indikator ist angegeben. Nach Ermittlung des Indikatorotyps wird auch hier die Zulässigkeit der Kombination mit dem verwendeten Toleranzsymbol ermittelt. Sind weitere PMI zur Festlegung und Angabe von Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell vorhanden, beginnt der beschriebene Ablauf von vorne (siehe Abbildung 36).

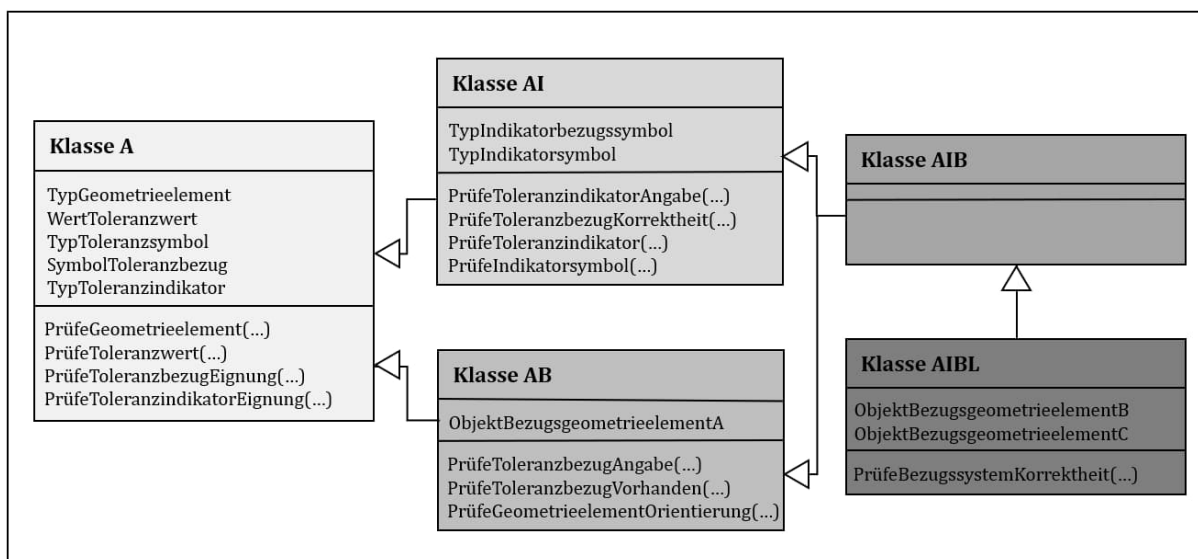


Abbildung 37: Klassenspezifische Attribute und Aktivitäten des Überprüfungsalgorithmus bei der Toleranzspezifikation

Der Überprüfungsalgorithmus zur Toleranzspezifikationsklasse AI (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) wird bei Geradheit, Ebenheit, Rundheit und Neigung nach DIN EN ISO 1101 aufgerufen. Wie bei allen Klassen startet der Algorithmus mit den Abfrageparametern der Klasse A. Da die Angabe eines Indikators nicht für jedes Toleranzsymbol bzw. nicht für jede Toleranzart dieser Klasse verpflichtend ist, wird zunächst überprüft, ob ein Indikator im zu prüfenden Informationsfeature des 3D-CAD-Modells vorhanden ist. Ist ein Indikator angegeben, wird zunächst die Existenz des zugehörigen Bezugssymbols und dessen

Referenz im 3D-CAD-Modell ermittelt und schließlich die Korrektheit des Bezugs geprüft. Sind alle Spezifikationen korrekt, wird die Angabe des Indikatorsymbols analysiert. Je nach Indikatortyp sind nur bestimmte Toleranzarten bei der Toleranzspezifikation zulässig (siehe Anhang A – Tabelle A2). Wird eine fehlerhafte Anwendung festgestellt, wird eine Fehlermeldung an den Konstrukteur ausgegeben. Die Art und Weise, wie der Nutzer über die fehlerhafte Bauteildefinition informiert wird, wird in Abschnitt 4.3.1.4 im Detail beschrieben. Der Überprüfungsalgorithmus für Toleranzspezifikationen nach Klasse AI ist damit abgeschlossen.

Sind zur Sicherstellung der Bauteilfunktion konzentrische Eigenschaften gefordert, wird der Prüfungsalgorithmus der Klasse AB aufgerufen. Dieser startet zunächst mit den Check-Routinen der Klasse A und führt im Anschluss die Überprüfung des Bezugssymbols durch. Ist im Toleranzrahmen ein Bezugssymbol angegeben, wird die korrekte Orientierung des referenzierten Geometrieelements überprüft. Hierzu wird die kollineare Lage der Mittellinie des Geometrieelements und des Bezugsgeometrieelements zueinander verglichen. Als Geometrieelement wird in diesem Fall das Element beschrieben, auf das die PMI direkt referenziert, wohingegen das Bezugsgeometrieelement das Element beschreibt, auf das das Bezugssymbol referenziert. Wird die Konzentrität nicht erfüllt, wird ein Fehler ausgegeben und mit der Überprüfung der nächsten PMI fortgefahren. Zur Verdeutlichung wird in Abbildung 38 der Überprüfungsalgorithmus der Klasse AB detailliert beschrieben.

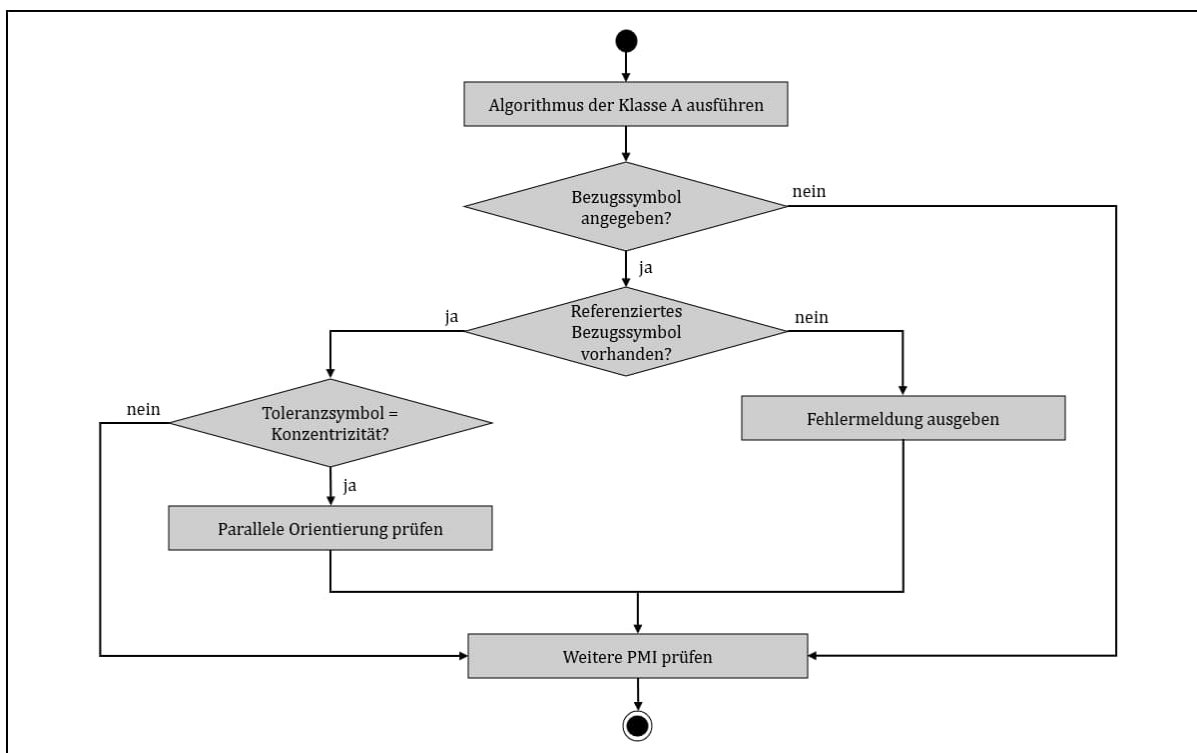


Abbildung 38: Ablauf des Überprüfungsalgorithmus der Klasse AB

Der Algorithmus der Klasse AIB baut auf den Algorithmen der Klassen AI und AB auf und dient der Absicherung der Parallelität, der Rechtwinkligkeit, des Rundlaufs und des Gesamtrundlaufs nach DIN EN ISO 1101. Nach fehlerfreiem Durchlauf des

Überprüfungsschemas zur Klasse AI folgen die logischen Abläufe und Abfragen des Algorithmus zur Klasse AB. Anstelle der Konzentrität werden je nach Tolerierungsvorgabe die Parallelität und die Rechtwinkligkeit überprüft, und die korrekte Orientierung der referenzierten Geometrielemente und Bezugsgeometrielemente wird kontrolliert.

Für die Toleranzsymbole Rundlauf und Gesamtrundlauf findet keine Orientierungsprüfung statt. Ob die Orientierungen der Vektoren zueinander parallel oder rechtwinklig verlaufen muss, ist vom Toleranzsymbol und von den referenzierten Geometrielementen abhängig (siehe Anhang A – Tabelle A3). Ist zum Beispiel die Rechtwinkligkeit zwischen einer ebenen und einer zylindrischen Fläche gefordert, müssen die projizierten Vektoren parallel zueinander verlaufen.

Die Ausrichtung der Vektoren zueinander wird über das Skalarprodukt errechnet. Hierzu ist die Normierung der Vektoren notwendig. Vektoren stehen rechtwinklig zueinander, wenn das Skalarprodukt gleich Null (Skalarprodukt = 0) ist. Ergibt das Skalarprodukt zweier Vektoren den Wert 1 oder -1, verlaufen die Vektoren parallel im dreidimensionalen Raum.

Basierend auf dem Algorithmus zur Klasse AIB wird für Positions-, Linienprofil- und Flächenprofiltoleranzen der Überprüfungsalgorithmus der Klasse AIBL benötigt. Die Besonderheit der Toleranzspezifikationen der Klasse AIBL besteht darin, dass bis zu drei Bezugsgeometrielemente spezifiziert werden können, um die genaue Lage der Toleranzzone im dreidimensionalen Raum zu bestimmen. Diese werden beim Aufrufen der Klasse AIBL auf Korrektheit kontrolliert, indem die Rechtwinkligkeit bzw. die Orthogonalität der einzelnen Bezugsgeometrielemente zueinander untersucht wird. Hier wird zunächst die Lage der primären und sekundären Bezugsgeometrielemente überprüft. Zur Lageermittlung werden, wie beim Algorithmus der Klasse AIB, die Vektoren zur Errechnung des Skalarprodukts verwendet. Liegen die Bezugsflächen rechtwinklig zueinander und ist ein tertiärer Bezug im 3D-CAD-Modell spezifiziert, wird auch dessen Vektor berechnet. Es folgt die Berechnung der Skalarprodukte primär-tertiär sowie sekundär-tertiär. Wird in beiden Fällen die Rechtwinkligkeit nachgewiesen, ist die Toleranzspezifikation korrekt. Falls dies nicht der Fall ist, wird eine Fehlermeldung im CAD-System ausgegeben.

Unabhängig von den angewendeten Algorithmen zu den jeweils unterschiedlichen Toleranzspezifikationsklassen A bis AIBL werden zusätzlich zur ganzheitlichen Absicherung der 3D-CAD-Bauteiltolerierung die Bezüge auf semantische Korrektheit getestet. Hierzu werden alle Bezüge im 3D-CAD-Modell ausgelesen, und es wird überprüft, ob sie auf ein Geometrielement im 3D-CAD-Modell referenziert sind. Ist kein Geometrielement referenziert, wird dem Konstrukteur eine Fehlermeldung übermittelt.

Alle Variationen von Form- und Lagetoleranzen, die in Gestalt von PMI im 3D-CAD-Modell hinterlegt sind, werden anhand der beschriebenen Methode eindeutig klassifiziert und können auf Basis der entwickelten Algorithmen nach den Festlegungen der DIN EN ISO 1101 auf ihre vollständige, eindeutige und widerspruchsfreie Anwendung im

3D-CAD-Modell überprüft werden [156]. Somit wird gewährleistet, dass Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell vor dem 3D-Datenaustausch semantisch korrekt definiert sind und nachträgliche Änderungsmaßnahmen vermieden werden.

Kommunikations- und Interpretationsprobleme zwischen den unterschiedlichen CAx-Systemen aufgrund unzureichender Maschinenlesbarkeit der im 3D-CAD-Modell bereitgestellten Informationen werden mit der Methode zur Absicherung der semantischen Korrektheit umgangen. Mit der eindeutigen Kennzeichnung der PMI für Form- und Lagetoleranzen und der Sicherstellung der semantisch korrekten Definition der PMI, werden zentrale Voraussetzungen seitens der CAD-Anwendung für eine durchgängige Nutzung des 3D-CAD-Modells innerhalb der CAx-Prozesskette geschaffen.

4.3.1.4 Implementierung des Überprüfungsmechanismus für Form- und Lagetoleranzen in den Konstruktionsprozess

In den Abschnitten 4.3.1.2 und 4.3.1.3 werden Methoden beschrieben, die zur Absicherung einer semantisch korrekten Bauteiltolerierung mit Form- und Lagetoleranzen dienen, sodass ausschließlich sinnvolle und maschinenlesbare Toleranzspezifikationen im 3D-CAD-Modell innerhalb der Produktentwicklung generiert werden. Basierend auf diesen Methoden soll der Konstrukteur direkt bei der Bauteiltolerierung im CAD-System unterstützt werden. Dazu sind Regeln und Kriterien für eine optimierte Anwendung der Methode im Konstruktionsprozess festzulegen.

Die beschriebenen Anforderungen aus Kapitel 3 werden konkretisiert, um eine benutzerfreundliche Bedieneroberfläche des Überprüfungsmechanismus im CAD-System zu gewährleisten. Ein transparenter Informationsfluss zwischen Konstrukteur und Überprüfungsmechanismus ist notwendig, um den Konstrukteur bei der Festlegung der Toleranzangaben zu unterstützen (siehe Abbildung 39). Zur Gewährleistung einer optimalen Interaktion zwischen IT-Lösung und Anwender müssen Hilfsmittel hinsichtlich der Darstellungsart, der Interaktivität und des Automatismus bereitgestellt werden. Übersichtliche, selbsterklärende und einheitliche Benutzeroberflächen sollen den Konstrukteur entlasten und für die Erhöhung der Akzeptanz des Umstiegs auf eine 3D-CAD-basierte Arbeitsweise sorgen.

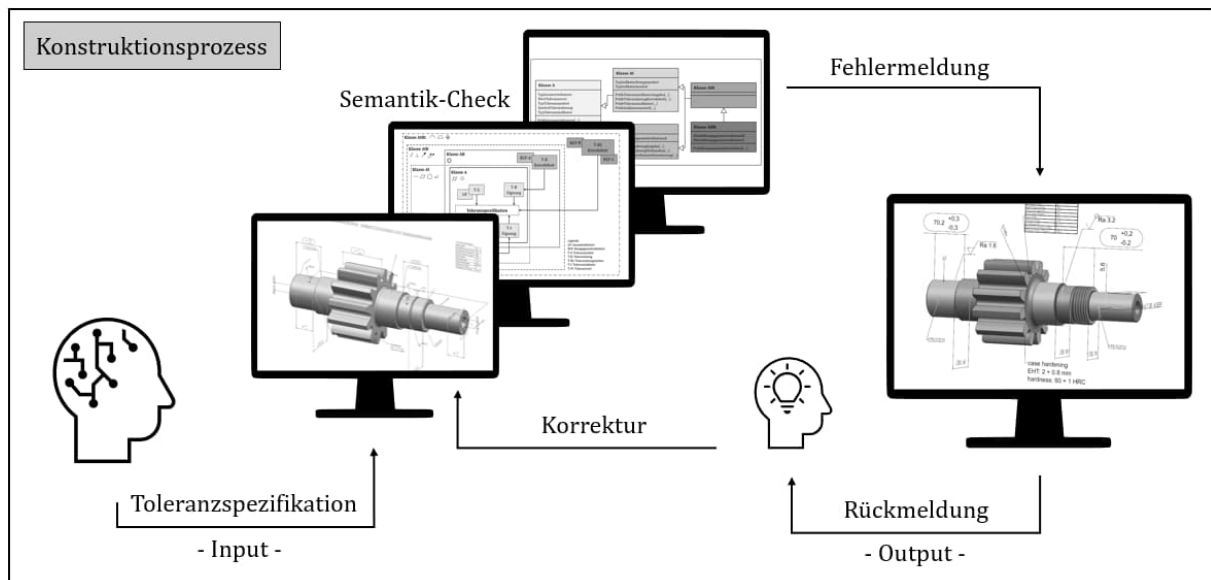


Abbildung 39: Interaktion zwischen Anwender und IT-Tool bei der 3D-CAD-Bauteiltolerierung mit rechnerunterstützten Überprüfungsalgorithmen

Zur optimierten Darstellung von Rückmeldungen zu Prüfungsergebnissen an den Konstrukteur werden grafische Benutzeroberflächen (engl.: *Graphical User Interfaces*, GUIs) eingesetzt. Diese werden im Vordergrund der CAD-Anwendungsplattform als aktive und frei bewegliche Funktionsfenster angezeigt, die homogen zum Design des CAD-Systems zu entwickeln sind. Auch sollte der Informationsgehalt hinsichtlich der angezeigten Fehlermeldungen aus dem Überprüfungsalgorithmus möglichst präzise und übersichtlich sein, um individuelle Fehlinterpretationen durch den Konstrukteur zu vermeiden. Um dem Konstrukteur bei aktivem Überprüfungsfenster die Möglichkeit zu bieten das 3D-CAD-Modell und die Toleranzspezifikationen zu modifizieren, ist zudem auf die Dimension des Sicht- bzw. Darstellungsbereichs zu achten.

Zur Darstellung der Fehler wird im vorliegenden Lösungsansatz eine interaktive Liste bevorzugt, um die Interaktion zwischen Konstrukteur und IT-Lösung zu fördern. Bei Auswahl eines Listenelements wird dem Konstrukteur direkt die dazugehörige Fehlermeldung aus dem Überprüfungsalgorithmus angezeigt. Auch die referenzierten Bezüge und Geometrieelemente werden mit der Auswahl visuell im 3D-CAD-Modell dargestellt. Mithilfe dieses Lösungsansatzes wird der Konstrukteur aktiv bei der Fehlerbehebung unterstützt, wodurch die zeitintensive Suche nach möglichen Fehlerquellen deutlich reduziert wird.

Dem Konstrukteur werden nur spezielle bzw. vordefinierte Ergebnisse und Fehlermeldungen angezeigt, möglichst ohne individuelle Einstellungsmöglichkeiten durch den Anwender. Die Umsetzung der beschriebenen Methode zur optimierten Programm-Nutzer-Interaktion wird in Kapitel 5 dieser Arbeit beschrieben.

4.3.2 3D-modellbasierte Prozessplanung für die Einzelteilerfertigung

4.3.2.1 Optimierte Datenintegration und Datenverwaltung innerhalb der Fertigung und Qualitätssicherung

Wie in Abschnitt 4.1 bereits beschrieben, beinhalten die Informationsfeatures im 3D-CAD-Modell eine Vielzahl von Informationen, die für eine durchgängige 3D-CAD-basierte Arbeitsweise genutzt werden können. Auch für die Prozessplanung (z. B. Arbeits- und Prüfplanung) bei der Fertigung von Einzelteilen sind diese Informationen essenziell. Die notwendigen Methoden und Ansätze werden nachfolgend entwickelt. Hierzu werden zunächst die Ansätze zur 3D-CAD-basierten Prozess- und Ressourcenplanung beschrieben. Anschließend werden neue Methoden zur optimierten Bereitstellung der 3D-CAD-Informationen entwickelt, um die gezielte Informationsbereitstellung in der Fertigung und Qualitätssicherung zu ermöglichen, z. B. bei der 3D-Visualisierung von Arbeitsvorgängen (z. B. Messwertermittlung) in der Werkstatt.

Die Methode zur 3D-modellbasierten Prozess- und Ressourcenplanung beruht zum einen auf dem funktionalen 3D-CAD-Modell als Informationsträger (vgl. Abschnitt 2.5.1) und zum anderen auf der Verwaltung von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln (vgl. Abschnitt 2.4.3), die keinen direkten Bezug zum Bauteil haben. Hierzu zählen beispielsweise spanabhebende Werkzeuge, Maschinen und Anlagen oder Mess- und Lehrmittel. All diese Ressourcen unterliegen der Änderungshoheit der Prozessplanung und werden dort initial angelegt und gepflegt.

Die Metadaten (Stammdaten) zu den jeweiligen Ressourcen werden in die Datenverwaltungssysteme, z. B. ins FDM-System (vgl. Abschnitt 2.7), eingetragen und dort verwaltet. Zu den Metadaten zählen die eindeutige Identifikationsnummer des entsprechenden Betriebs- und Fertigungshilfsmittels, die Klassifizierung, die ressourcenspezifische Benennung sowie die Hersteller- und die Katalognummer. Häufig werden ergänzende Zusatzdokumente zu den Ressourcen, also zu den Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln, im FDM-System abgelegt. Diese zusätzlichen Dokumente sind z. B. eine 2D-Zeichnung, ein 3D-CAD-Modell, technische Datenblätter, Stücklisten oder andere begleitende Informationen.

Neben der Verwaltung von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln im FDM-System werden die Produktinformationen separat im PDM-System (vgl. Abschnitt 2.7) mit einem eigenen Datenmodell verwaltet. Beide IT-Systeme besitzen abgestimmte Schnittstellen zu den CAx-Systemen (vgl. Abschnitt 2.3.2) und werden nach Bedarf an mehreren Standorten bzw. in verschiedenen Werken genutzt, um den Unternehmen eine zentrale Datenbasis zur Verfügung zu stellen [157]. Die Daten auf dieser Ebene sind statisch und verändern sich nicht bzw. unterliegen dem Änderungsmanagement. Analog sind die Informationen wie Prozessplanungsdaten (z. B. Arbeits- und Prüfpläne) in ERP-Systemen (vgl. Abschnitt 2.7) meist statisch und werden dort mittels Änderungsmanagement verwaltet und meist auch dort erzeugt [157].

Produkt- und Fabrikdaten werden im ERP-System für die Prozessplanung angewendet (siehe Abbildung 40). Die Betriebs- und Fertigungshilfsmittel werden bei der Erstellung der Prozesspläne zu den einzelnen Arbeitsvorgängen verlinkt. Mit der Überführung der Planungsdaten in die tatsächliche Ausführungsebene (z. B. Fertigungswerkstatt) wird der Prozessplan aus dem ERP-System an das MOM (vgl. Abschnitt 2.7) übergeben. Bei diesem Vorgang werden neben den statischen Soll-Daten die dynamischen Ist-Daten, z. B. der Produktionsstart, festgelegt. Die dynamischen Daten sind abhängig von der jeweiligen Fertigungssituation und können sich im Gegensatz zu den statischen Daten über die Dauer der Ausführung des Fertigungsauftrags stets ändern.

Die Ressourcen aus dem FDM-System werden mengenmäßig und in ihrem ortsabhängigen Ist-Zustand organisatorisch für die Fertigung bereitgestellt. Zusätzlich wird im MOM stets der Fertigungsstand der physikalischen Bauteile nachverfolgt bzw. ermittelt. Auch der Qualitätszustand und der mengenmäßige Bestand werden hier gepflegt [157].

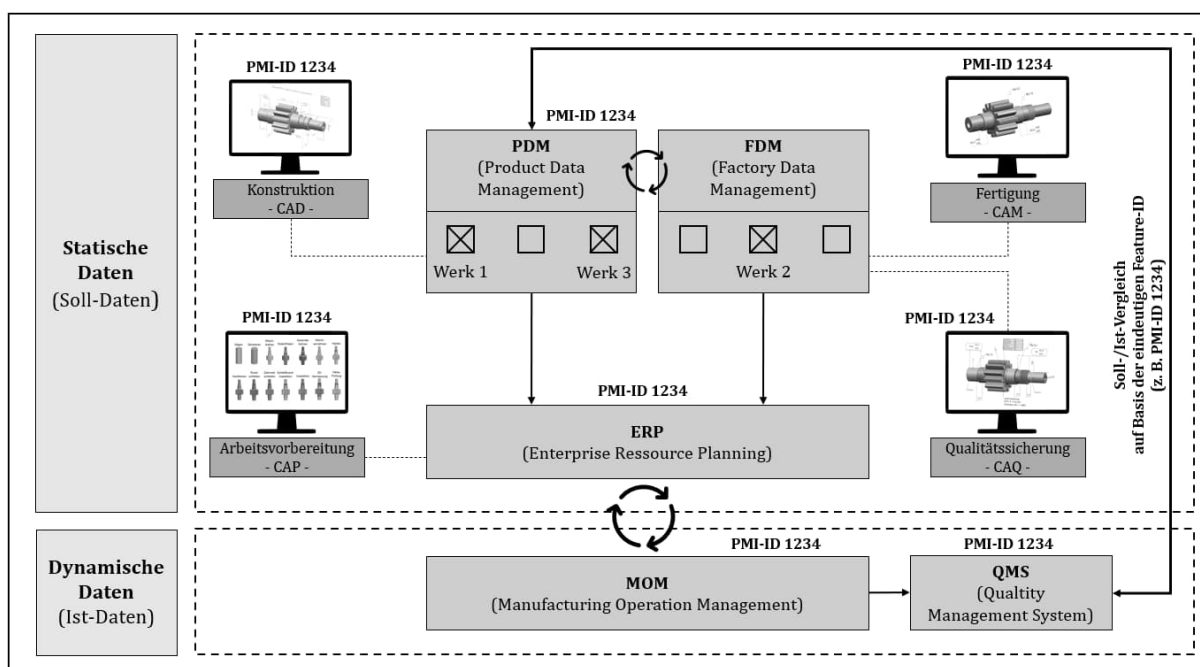


Abbildung 40: Zusammenwirken von PDM/FDM mit ERP und MOM in einem Fertigungsbetrieb

Im MOM erhalten die Bauteile oder verwendeten Ressourcen aus dem FDM- und PDM-System eine eindeutige Nummer, die auch als Serial- oder Equipment-Nummer bezeichnet wird [157]. Dies ermöglicht z. B. die Zuordnung der Ist-Daten zu einem bestimmten Werkzeug, einer Vorrichtung oder einem Bauteil. Zusätzlich kann die Verfügbarkeit der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel in Echtzeit abgefragt werden. Dies erfolgt z. B. durch Sensoren an den Objekten oder kontinuierliche Buchungsvorgänge bzw. Rückmeldungen. Durch die Verfügbarkeitsabfragen wird zudem sichergestellt, dass die Fertigungsaufträge in der vorgegeben bzw. geplanten Zeit fertiggestellt und rechtzeitig an den Kunden ausgeliefert werden [157].

Die qualitätsspezifischen Ist-Daten zu einem gefertigten Bauteil werden im QMS (vgl. Abschnitt 2.7) erfasst und verwaltet, um diese mit den Soll-Daten aus dem PDM-System direkt abgleichen zu können. Der Soll-/Ist-Vergleich einzelner Prüfmerkmale erfolgt auf Basis der Methode zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen (vgl. Abschnitt 4.2.2). In Abbildung 40 wird die durchgängige Eindeutigkeit der 3D-CAD-Informationen des zu fertigenden Bauteils beispielhaft mit der PMI-ID 1234 dargestellt.

Gemäß den vorliegenden Beschreibungen und den Erkenntnissen aus Abschnitt 2.7 werden im FDM zunächst nur statische Daten (z. B. ID eines Bohrers, Soll-Länge oder Soll-Drehzahl eines Bohrers) zu Ressourcen und CNC-Programmen verwaltet. Beim Start eines Fertigungsauftrags werden die statischen Daten mithilfe der MOM-Funktionen mit den dynamischen Daten verbunden. Diese Daten (z. B. Lagerort eines Bohrers, Ist-Länge oder Ist-Drehzahl eines Bohrers) liegen dynamisch vor und ändern sich stetig über die Zeit ihrer Verwendung.

Die Klassifizierung der physikalischen Betriebs- und Fertigungshilfsmittel und deren beschreibender Sachmerkmale (vgl. Abschnitt 2.4.3) ist ein zentraler Bestandteil zur Realisierung der 3D-CAD-basierten Fertigung und Qualitätssicherung. Mithilfe der Sachmerkmale werden die physikalischen Objekte, z. B. Werkzeuge und Messmittel, mit ihren Parametern, z. B. Höhe, Länge, Durchmesser und Gewicht, eindeutig beschrieben. Die Vollständigkeit und Korrektheit dieser Daten ist für die Methode der parametrischen Vorauswahl der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel zu den jeweiligen Arbeitsschritten von großer Bedeutung. Basierend auf diesen Daten wird im Bereich der Prozessplanung entschieden, ob die vorhandenen Betriebs- und Fertigungshilfsmittel für den entsprechenden Arbeitsschritt eingesetzt werden können und die Anforderungen der PMI beim zu fertigenden Bauteil erfüllt werden.

Die Übernahme der vom Hersteller ausgelieferten Werkzeug- oder Messmittel-Parameter in die IT-Systeme der Unternehmen (z. B. FDM-System) erfolgt überwiegend manuell, was zeitaufwendig, fehlerbehaftet und kostspielig ist. Zur Vermeidung dieses unwirtschaftlichen Störfaktors und zur Reduzierung unvollständiger und fehlerhafter Sachmerkmaldaten, die die Prozessplanung beeinträchtigen, wird in Abschnitt 4.3.2.2 eine Methode beschrieben, die den automatischen Import der herstellereigenen Sachmerkmale der Betriebs- und Fertigungshilfsmitteldaten in die Verwaltungssysteme der Kunden bzw. Anwender ermöglicht.

4.3.2.2 Elektronischer Sachmerkmalaustausch für Betriebs- und Fertigungshilfsmittel

Nach Eingang einer Bestellung für ein Betriebs- oder Fertigungshilfsmittel (z. B. ein Prüfmittel oder eine Werkzeugkomponente) liefert der Hersteller das physikalische Objekt inklusive der objektbeschreibenden Daten an den Kunden aus. Die Übermittlung der objektbeschreibenden Daten erfolgt mithilfe einer Container-Datei nach DIN 26100 (vgl. Abschnitt 2.6.1). Das zu transferierende Datenpaket enthält die Nummer der Norm für den Datenaustausch nach DIN 4000, die Firmenkennung des Lieferanten nach

DIN 4000-1 und das Datum sowie die Uhrzeit des Erstellzeitpunkts des Datenpakets in Form eines elektronischen Lieferscheins.

Mit Ablage des Datenpakets beim Kunden wird der Importvorgang in dessen FDM- oder TDM-System (vgl. Abschnitt 2.7) ausgelöst. Die Container-Datei wird gelesen und auf mögliche Fehler überprüft (siehe Abbildung 41). Ist die Container-Datei vollständig und fehlerfrei, wird der Datenimport gestartet. Zunächst wird für das neu anzulegende Objekt die richtige Klasse im FDM- oder TDM-System gesucht, dort eine neue ID für das entsprechende Betriebs- und Fertigungshilfsmittel angelegt und die Übertragung der Sachmerkmallistendaten aus dem XML-File nach DIN 4000-102 (vgl. Abschnitt 2.6.1) begonnen. Ist die Ressource inklusive ihrer Sachmerkmale bereits angelegt, wird im Rahmen dieser Methode geprüft, ob die Sachmerkmalwerte überschrieben werden können.

Bei einem Massenimport mehrerer Komponenten werden die Merkmale zur eindeutigen Identifikation automatisiert in das jeweilige Datenverwaltungssystem übernommen. Enthält das Datenpaket lediglich eine Komponente, hat der Anwender zusätzlich die Möglichkeit, das Identifikationsmerkmal (ID) für die Zielklasse manuell festzulegen. Nach erfolgreicher Klassenzuordnung bzw. Überprüfung der Verfügbarkeit der entsprechenden Klasse kommt es schließlich zur Klassifizierung des Bauteils und zur Anlage der bauteilspezifischen Attribute auf Basis der ausgelieferten XML-Datei nach DIN 4000-102 (siehe Abbildung 41).

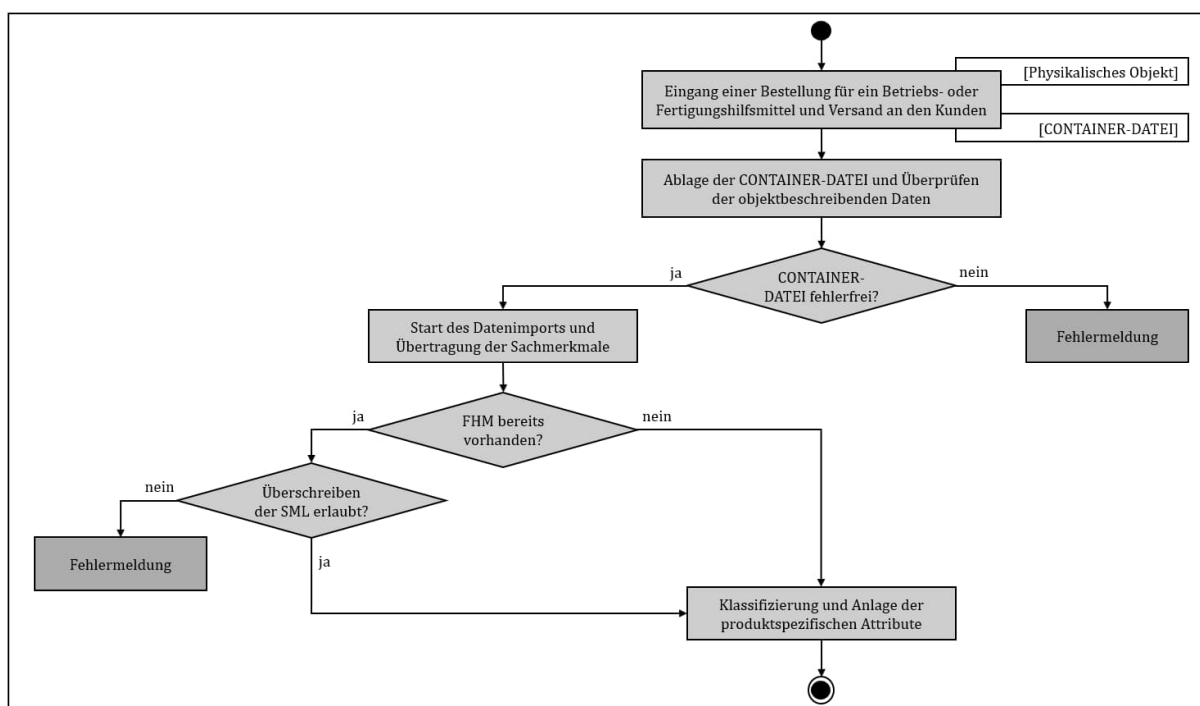


Abbildung 41: Beispielhafter Ablauf für den automatisierten Sachmerkmalimport für die optimierte Datenverwaltung der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel nach DIN 4000

Zusätzlich werden auch die 2D- und/oder 3D-Dateien (z. B. STEP-File oder JT-File) automatisiert mittels der in Abbildung 41 dargestellten Methode in das Datenverwaltungssystem übertragen. Der Importvorgang wird automatisch

abgebrochen, sobald ressourcenspezifische Sachmerkmale oder 3D-CAD-Daten nicht den festgelegten Standards nach DIN 4000 und DIN 4003 entsprechen. Wird das 3D-STEP-File fehlerfrei ausgeliefert, wird es in ein natives 3D-CAD-File (z. B. NX-Part-File) konvertiert und anschließend abgespeichert. Zusätzlich kann abhängig vom nativen 3D-CAD-File ein JT-File abgeleitet werden. Nach Abschluss des 3D-Imports ist der automatisierte Datenimportvorgang beendet. Die 3D-CAD-Modelle der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel sowie die Sachmerkmale können für die weiteren Prozesse innerhalb der Fertigung (z. B. zur Programmierung von Koordinatenmessgeräten oder CNC-Werkzeugmaschinen) genutzt werden.

Sind die Sachmerkmale vollständig und korrekt nach den Vorgaben des Herstellers beim Kunden angelegt, können die Daten auch zur 3D-CAD-basierten Prozessplanung genutzt werden. Die detaillierte Beschreibung zur 3D-modellbasierten Auswahl der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel wird nachfolgend beschrieben.

4.3.2.3 Vorauswahl der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel auf Basis der Informationen im 3D-CAD-Modell

Zur Ablösung der manuellen Zuweisung von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln (z. B. Werkzeuge, Prüf- und Messmittel oder Koordinatenmessgeräte) zu den jeweiligen Arbeits- und Prüfschritten des zu fertigenden Bauteils wird im Folgenden eine Methode entwickelt, bei dem die Ressourcenauswahl auf Basis der geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im 3D-CAD-Modell des zu fertigenden Bauteils gesteuert wird. Hierbei sind verschiedene Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Zunächst müssen die geometrischen Elemente, die zu fertigen bzw. zu prüfen sind, im 3D-CAD-Modell identifiziert werden. Die geometrische Ausprägung (z. B. zylindrisch) des Geometrieelements bildet das primäre Kriterium zur Auswahl der notwendigen Betriebs- und Fertigungshilfsmittel. Auch die geometrischen Abmaße der 3D-CAD-Objekte liefern wichtige Informationen für die passende Ressourcenauswahl.

Das zu bearbeitende Werkstück muss im Hinblick auf seine geometrischen Abmaße innerhalb des Arbeitsraums der Maschine oder dem Messgerät aufgenommen werden können. Ist das Werkstück hinsichtlich seiner Ausprägung (Länge, Breite und Höhe) größer als der maximal zulässige Arbeitsraum der Maschinen oder des Messgeräts, kann es bereits im Vorfeld für die Bearbeitung bzw. für den Messvorgang ausgeschlossen werden.

Die Übereinstimmung (Mapping) zwischen den vordefinierten Bauteilanforderungen und den entsprechenden Ressourcenfähigkeiten muss gewährleistet sein, um eine Vorauswahl der vorhandenen Ressourcen zum jeweiligen Fertigungsauftrag des Bauteils gewährleisten zu können oder bei Bedarf die Bestellung benötigter Ressourcen in Auftrag zu geben. Abbildung 42 zeigt auf der linken Seite das Entwicklungsmodell (Prozessebene A) mit den vorhandenen Geometrieelementen und Features (Design- und Informationsfeatures) im 3D-CAD-Modell. Das dargestellte Entwicklungsmodell stützt sich auf die Inhalte aus Abbildung 9 in Abschnitt 2.5.3.

In Abhängigkeit von den Kombinationen aus geometrischer und nichtgeometrischer Informationen im 3D-CAD-Modell werden verschiedene Prozesse im Bereich der Fertigung (Prozessebene B) und der Qualitätssicherung (Prozessebene C) ausgelöst. Beispielsweise wird zur Fertigung von Prozess 1 die Maschine 1, die Vorrichtung 1 sowie das Werkzeug 1 und das Werkzeug 2 benötigt. Zur anschließenden Prüfung der gefertigten Geometrie ist im dargestellten Beispiel das Messmittel 1 notwendig.

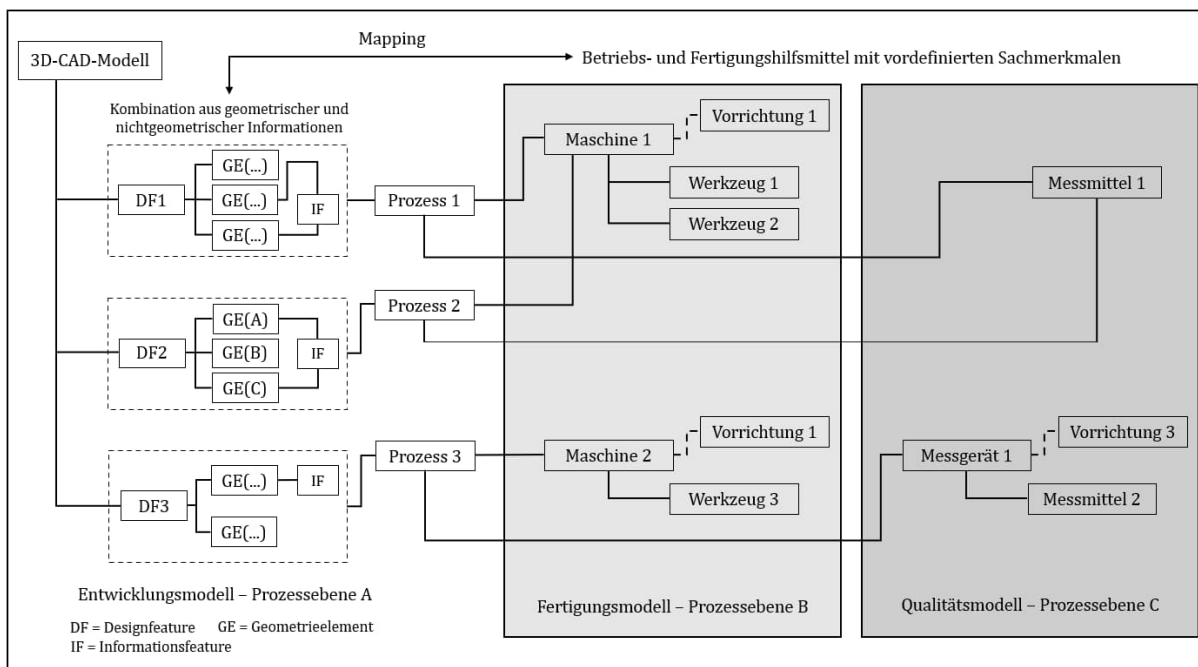


Abbildung 42: Darstellung des Mapping-Ansatzes von den 3D-CAD-Modellinformationen des zu fertigenden Bauteils zu den Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln

Für die 3D-CAD-basierte Auswahl arbeits- und prüfschrittrelevanter Betriebs- und Fertigungshilfsmittel müssen die ressourcenspezifischen Sachmerkmale mit den Informationen (z. B. Abmaße und PMI) des zu fertigenden Bauteils übereinstimmen. Das Betriebs- und Fertigungshilfsmittel muss die Fähigkeit besitzen, die Anforderungen zum jeweiligen Arbeitsschritt ausführen bzw. die geforderte Genauigkeit bei Qualitätsprüfungen ermitteln zu können. Die Informationsfeatures bzw. PMI im 3D-CAD-Modell beinhalten diese Informationen, die für das Mapping zwischen den Bauteilanforderungen und den Sachmerkmalen der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel benötigt werden. Stimmen Bauteilanforderungen und Ressourcenfähigkeit nicht überein bzw. können die Vorgaben aus dem 3D-CAD-Modell des Bauteils nicht eingehalten werden, kann das entsprechende Betriebs- und Fertigungshilfsmittel für den Fertigungs- bzw. Prüfauftrag nicht genutzt werden. Beispielsweise kann ein Prüf- bzw. Messmittel mit einer maximalen Genauigkeit (Sachmerkmal nach DIN 4000) von 0,02 mm nicht zur Inspektion einer Bauteilanforderung eingesetzt werden, bei der eine Genauigkeit von 0,01 mm gefordert wird.

Das Mapping zwischen den festgelegten Bauteilanforderungen und den Fähigkeiten der verfügbaren Ressource schafft die Basis für die 3D-CAD-basierte Ressourcenzuweisung zum entsprechenden Fertigungs- bzw. Prüfschritt. Der beschriebene Ansatz kann zudem

für den Bereich der Arbeitsplanung, z. B. für die Auswahl geeigneter Werkzeugmaschinen, verwendet werden. Ist die Maschine nicht fähig, z. B. eine geforderte Rautiefe zu erreichen, kann sie bereits im Vorfeld für die Fertigung des entsprechenden Geometrieelements ausgeschlossen werden. Eignet sich die Maschine hingegen für den auszuführenden Fertigungsauftrag, kann sie bei der Arbeitsplanung berücksichtigt und für den Auftrag reserviert bzw. eingeplant werden.

Abbildung 43 zeigt links erneut das 3D-CAD-Modell inklusive seiner Features und Geometrieelemente. Um schließlich eine konkrete Vorauswahl fähiger Betriebs- und Fertigungshilfsmittel treffen können, muss zunächst die geometrische Ausprägung der vom Informationsfeature assoziierten Geometrieelemente identifiziert werden (siehe Abbildung 43 – Punkt 1.1 und 1.2).

Ein weiteres Entscheidungskriterium für die 3D-modellbasierte Ressourcenauswahl ist der festgelegte Toleranzwert bzw. die geforderte Genauigkeit der zu fertigenden 3D-CAD-Objekte (siehe Abbildung 43 – Punkt 2.0). Diese Information ist im PMI enthalten.

Ist die Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen abgeschlossen, werden die Informationen mit den Sachmerkmalen der im Unternehmen vorhandenen Betriebs- und Fertigungshilfsmittel abgeglichen (vgl. Abschnitt 2.4.3 und Abschnitt 4.3.2.2). Stimmen die Anforderungen aus dem 3D-CAD-Modell (z. B. Genauigkeit) mit den Sachmerkmalen eines Betriebs- und Fertigungshilfsmittels überein, kann die Ressource zur Ausführung des Arbeitsschritts festgelegt und im ERP-System (vgl. Abschnitt 2.7 und Abschnitt 4.3.2.1) reserviert werden.

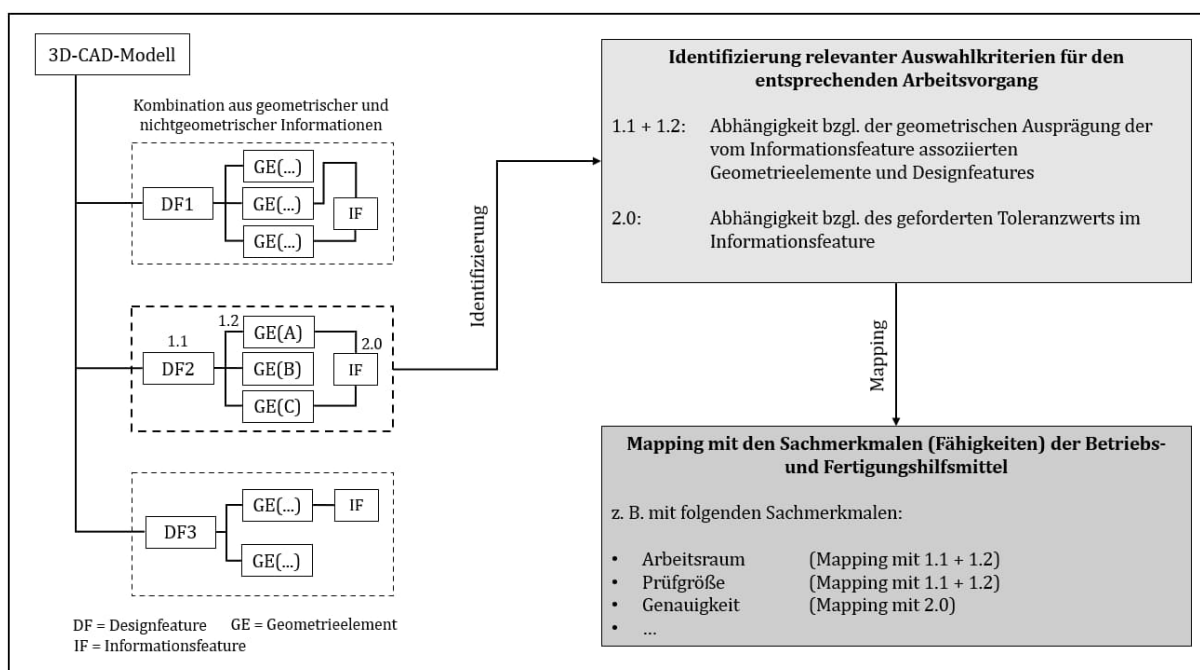


Abbildung 43: Darstellung der Mapping-Ansätze von den Informationen im 3D-CAD-Modell zu den Fähigkeiten der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel

Beim methodischen Ansatz zur 3D-CAD-basierten Ressourcenauswahl spielt die Übereinstimmung der geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im

3D-CAD-Modell mit den Informationen der beschreibenden Sachmerkmale der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel eine wesentliche Rolle (siehe Abbildung 43). Der im CAx-Umfeld häufig genutzte Mapping-Ansatz (vgl. Abschnitt 2.5.6) wird hier angewendet.

Für das Mapping werden die Sachmerkmale aus den bestehenden Werkzeugnormen nach DIN 4000 verwendet. Abhängig von der Vielzahl unterschiedlicher Werkzeuge und Messmittel im Unternehmen kann die Auswahl möglicher Ressourcen im Unternehmen für den jeweiligen Fertigungs- oder Prüfauftrag bei $n = 0$, $n = 1$ oder $n > 1$ liegen. Der Parameter n steht hier für die Anzahl der im Unternehmen verfügbaren Ressourcen, die mit den PMI-Anforderungen im 3D-CAD-Modell übereinstimmen.

Grundsätzlich erfolgt das Mapping auf Basis der statischen Daten (vgl. Abschnitt 4.3.2.1) innerhalb der Datenverwaltungssysteme. Nach erfolgter Vorauswahl können die fähigen Betriebs- und Fertigungshilfsmittel z. B. in das ERP-System (vgl. Abschnitt 2.7) zur Erstellung des Arbeits- und Prüfplans übertragen werden.

4.3.2.4 Optimierte Informationsbereitstellung in Form von Arbeitsvorgangsmodellen für die Fertigung und Qualitätssicherung

Zur Unterstützung der 3D-CAD-basierten Fertigung und Qualitätssicherung können in einem 3D-modellbasierten Ansatz Arbeitsvorgangsmodelle (AVOMs) aus dem 3D-CAD-Mastermodell (vgl. Abschnitt 2.5.1) abgeleitet werden. Mithilfe dieser AVOMs können dem Nutzer bzw. Anwender (z. B. Werker) arbeitsschrittspezifische Informationen zielgerichtet für die Fertigung oder Qualitätssicherung bereitgestellt werden. Informationen, die für den jeweiligen Arbeits- bzw. Messschritt nicht relevant sind, werden im AVOM somit nicht angezeigt, wodurch die Anwender vor unnötigen Informationsüberladungen geschützt werden. Neben mehr Prozesstransparenz gegenüber den herkömmlichen 2D-zeichnungsbasierten Prozessen und Arbeitsweisen wird zusätzlich eine Reduzierung der zu transferierenden Datenmengen innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette erreicht.

Bei der Ableitung der AVOMs aus dem Engineering-Modell (siehe Abbildung 44) werden assoziative Kopien der 3D-CAD-Geometrie erstellt, die von der geometrischen Ausprägung auf den jeweiligen Arbeitsvorgang angepasst werden. Änderungen am Engineering- bzw. am 3D-Master-Modell des Fertigteils, wirken sich so unmittelbar auf die assoziativ verlinkten Geometrien aus. Anpassungen am 3D-CAD-Mastermodell (z. B. Änderung eines Wellendurchmessers) führen direkt zu Änderungen in den verlinkten AVOMs.

Die Absicherung der semantisch korrekten Tolerierung (vgl. Abschnitt 4.3.1) des 3D-CAD-Mastermodells ist auch hier von essenzieller Bedeutung, um Fehlfestlegungen und Unvollständigkeiten innerhalb der AVOMs zu vermeiden. In Abbildung 44 werden zur Verdeutlichung die einzelnen AVOMs dargestellt, die zur Herstellung einer Stirnradwelle in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Prozessschritten erzeugt werden. Die einzelnen Arbeitsschritte reichen von der Bereitstellung des Rohmaterials bis hin zum AVOM für die Qualitätsendprüfung.

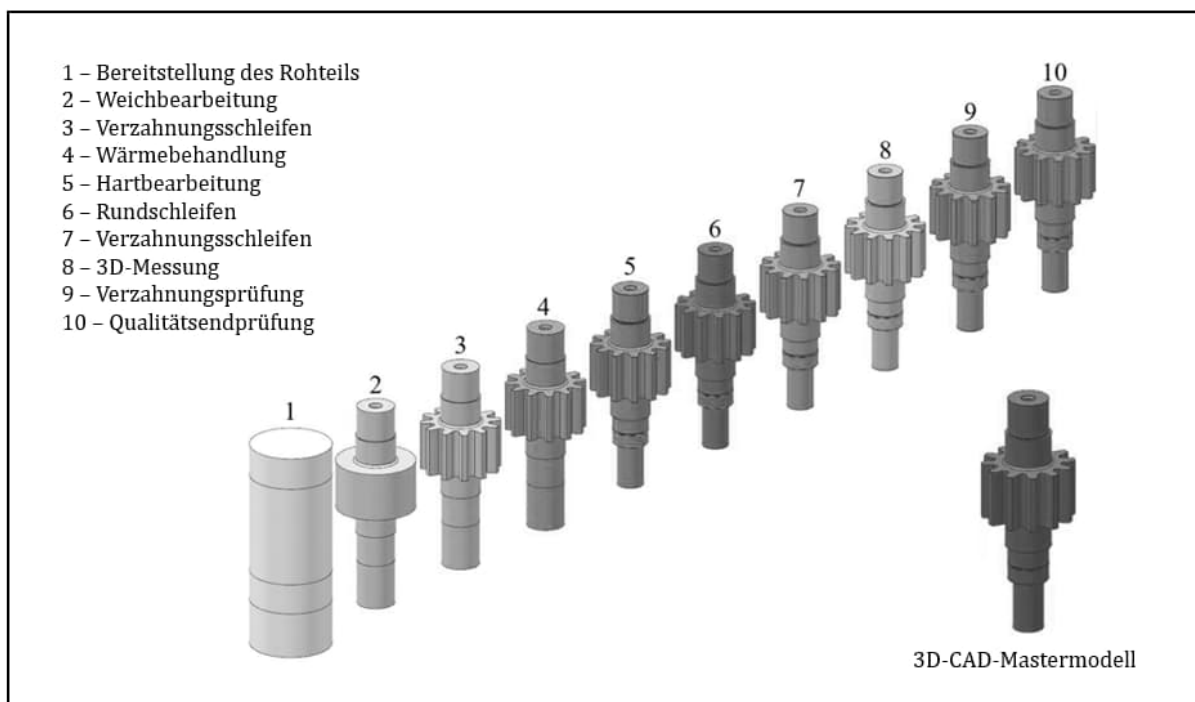


Abbildung 44: Darstellung der verschiedenen Arbeitsvorgangsmodele zur Herstellung einer Stirnradwelle

Der grundlegende Unterschied zwischen den AVOMs und dem 3D-CAD-Mastermodell liegt in der Ausprägung der Informationsgehalte. Arbeitsvorgangsmodele umfassen gezielt nur die arbeitsschrittspezifischen Informationen für den speziellen Arbeitsvorgang (z. B. den Hartdrehprozess bei der Wellenfertigung mit einem entsprechenden Aufmaß auf der Fertigteilgeometrie), wohingegen 3D-CAD-Mastermodelle alle Informationen bzw. Anforderungen für ein Fertigteil enthalten. Beispielsweise umfasst das 3D-CAD-Mastermodell einer Stirnradwelle 41 PMI, wohingegen das AVOM zur Weichbearbeitung nur 15 PMI beinhaltet (siehe Abbildung 45).

Die PMI-IDs behalten bei der Ableitung der Arbeitsvorgangsmodele ihre Eindeutigkeit. Über die FII-Methode (vgl. Abschnitt 4.2.2.2) wird sichergestellt, dass die PMI mit der ID 1234 im Engineering-Modell auch im abgeleiteten Arbeitsvorgangmodell die ID 1234 hat. Die eindeutige und durchgängige Rückverfolgbarkeit zum Engineering-Modell bleibt somit erhalten.

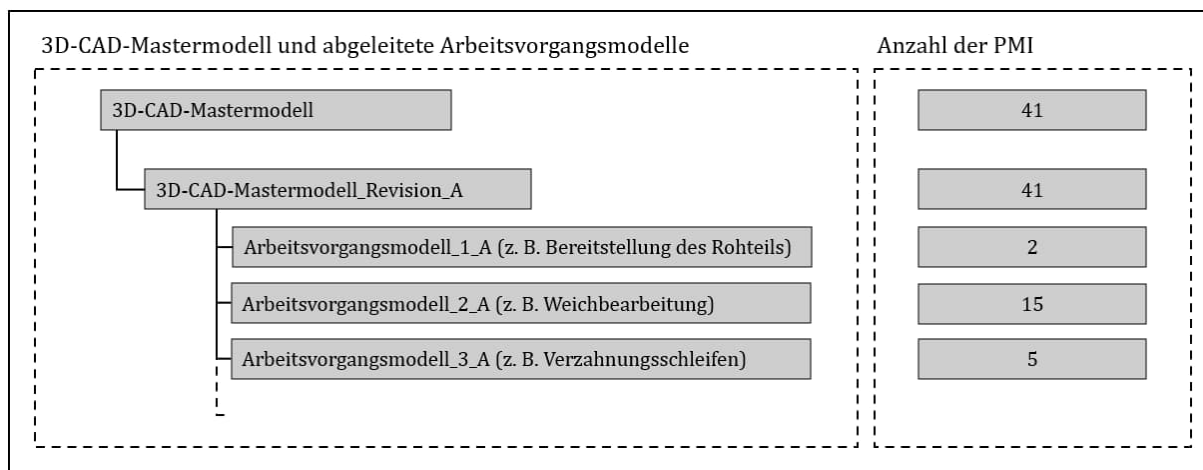


Abbildung 45: Gegenüberstellung der Informationsinhalte des 3D-CAD-Mastermodells und der jeweiligen Arbeitsvorgangsmodelle

Der methodische Ansatz zur Erzeugung der 3D-AVOMs basiert auf den Informationen im 3D-CAD-Mastermodell und den daraus resultierenden Fertigungsverfahren. Die Kombination aus den geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im 3D-CAD-Modell entscheidet über das entsprechende Fertigungsverfahren, das zur Realisierung der geforderten Bauteilspezifikation geeignet ist. Zur Bearbeitung eines Zylinders wird beispielsweise auf Basis der Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) im 3D-CAD-Modell entschieden, ob das Geometrieelement (z. B. Zylinder) geschliffen, geschlichtet, weich- oder hartgedreht werden muss.

Weitere Angaben, z. B. Form- und Lagetoleranzen, Oberflächenangaben oder Maßtoleranzen ergänzen die Spezifikation der Fertigungsaufgabe. Der methodische Ansatz zur Ableitung eines AVOMs zielt darauf ab, die Auswahl der entsprechenden Fertigungsverfahren auf Basis eines Regelwerks in einer Datenbank festzuhalten. Basierend auf den unterschiedlichen Fertigungsverfahren können die einzelnen Arbeitsvorgangsmodelle auch automatisiert auf Basis der Informationen im 3D-CAD-Mastermodell erzeugt werden. Dies kann z. B. über Regelwerke oder KI-Methoden erfolgen.

Die Methode und das Vorgehen zur Generierung der AVOMs sind umfangreich. Sie unterliegen daher einem separaten Forschungsthema und werden hier nicht vollständig entwickelt. Für die Weiterentwicklung der 3D-CAD-basierten Arbeitsweise wird jedoch der Grundgedanke zur Verwendung dieser AVOMs genauer verfolgt, und es werden neue Methoden für die optimierte Bereitstellung und Nutzung in den Prozessen der Fertigung entwickelt. Die Hypothese eines methodischen Ansatzes zur Nutzung der Arbeitsvorgangsmodelle in Kombination mit der eindeutigen Identifikation der produkt- und fertigungsrelevanten 3D-CAD-Modellinformationen (vgl. Abschnitt 4.2.2) und der 3D-modellbasierten Ressourcenauswahl (vgl. Abschnitt 4.3.2.) wird nachfolgend erläutert.

4.3.2.5 3D-Visualisierung von Arbeitsvorgängen für Fertigungs- und Prüfaufträge

Die Prüfplangenerierung sowie die anschließende Durchführung der Prüfung sind häufig durch ein hohes Maß manueller Prozesse gekennzeichnet und erfolgen häufig losgelöst vom 3D-CAD-Modell (vgl. [7] und Abschnitt 2.4.1). Die bereits während der Konstruktion generierten Informationen werden meist auf 2D-Zeichnungen übertragen, sodass der Inhalt der 3D-CAD-Modelle nicht durchgängig innerhalb der CAx-Prozesskette genutzt wird. Mit der Ableitung der 2D-Zeichnung aus dem 3D-CAD-Modell geht die Assoziativität der Informationen zum ursprünglichen 3D-CAD-Modell verloren, wodurch die Rückverfolgbarkeit der ermittelten Qualitätsdaten zu den Bauteilanforderungen unterbrochen wird [7]. Zudem werden dem Werker bei der Abarbeitung der Prüfaufgabe (z. B. nach dem Weichdrehprozess) häufig weitaus mehr als die für diesen Prüfschritt relevanten Informationen bereitgestellt. Diese Art von Informationsüberladung ist zeit- und kostenintensiv, da viel Freiraum für individuelle Interpretationsmöglichkeiten beim Werker existiert und die Vielzahl von Informationen zusätzlich zur Überforderung der Werker führen kann.

Diese Probleme in der heute weit verbreiteten 2D-basierten Arbeitsweise sollen mit der Methode zur durchgängigen Nutzung der 3D-CAD-Modelle innerhalb der Arbeits- und Prüfplanung abgelöst werden. Die neue Methode verfolgt den Ansatz, die Arbeits- und Prüfplangenerierung anhand der Informationen im 3D-CAD-Modell zu realisieren, ohne zusätzliche Dokumente wie die 2D-Zeichnung oder eine Aufmaßtabelle im Prozess zu nutzen. Über die visuelle Darstellung der prüfrelevanten Informationen im 3D-CAD-Modell wird der Werker unmittelbar und schrittweise bei der Durchführung der Prüfaufgabe unterstützt. Hierzu werden dem Werker am Arbeitsplatz (z. B. an der CNC-Drehmaschine) nur genau die Informationen im 3D-CAD-Arbeitsvorgangsmodell (siehe Abbildung 44) angezeigt bzw. bereitgestellt, die er zur Ausführung des Arbeitsschritts (z. B. Weichdrehprozess bei der Wellenfertigung) benötigt. Die detaillierten Abläufe bei der 3D-CAD-basierten Prüfplanung und der anschließenden Messwerterfassung werden in Abbildung 46 dargestellt und nachfolgend im Detail beschrieben.

Nachdem das 3D-CAD-Modell bestimmt ist, werden arbeitsschrittspezifische Arbeitsvorgangsmodelle aus dem 3D-CAD-Mastermodell abgeleitet (vgl. Abschnitt 4.3.2.4). Die im AVOM enthaltenen Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) werden dem Prüfplaner im CAP-System bereitgestellt. Diese Informationen kann der Prüfplaner direkt im CAP-System als kritisch bzw. qualitätsrelevant kennzeichnen (siehe Abbildung 46). Den zu prüfenden PMI können zusätzlich die benötigten Betriebs- und Fertigungshilfsmittel (z. B. Prüf- und Messmittel) manuell durch den Prüfplaner oder automatisiert auf Basis der 3D-CAD-Modellinformationen (vgl. Abschnitt 4.3.2.3) zugewiesen werden.

In der Fertigungswerkstatt werden dem Anwender (z. B. Werker oder Messtechniker) die prüfrelevanten PMI direkt (z. B. mittels einer Qualitätsapplikation) im 3D-CAD-Modell angezeigt (z. B. auf einem Tablet-PC oder auf einem Smartphone) und visuell hervorgehoben. Die Visualisierung erfolgt beispielweise mit dem neutralen JT-Austauschformat.

In einem weiteren Schritt werden dem Anwender die durchzuführende Prüfreihefolge inklusive der notwendigen Betriebs- und Fertigungshilfsmittel angezeigt. Im Anschluss erfolgt die Erfassung der Messdaten nach den vorgegebenen Hinweisen.

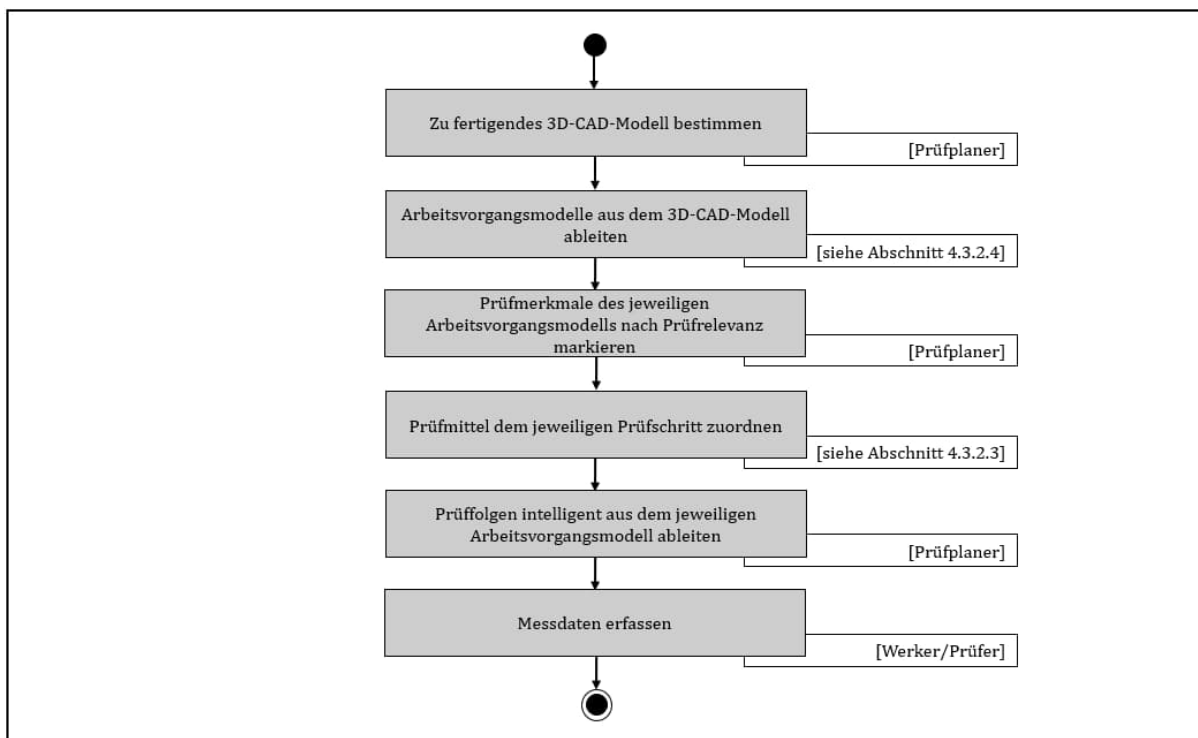


Abbildung 46: Abläufe bei der 3D-CAD-basierten Prüfplanung und Messwerterfassung

Über die Methoden zur eindeutigen Identifikation der Produkt- und Fertigungsinformationen im 3D-CAD-Modell aus Abschnitt 4.2.2 können die Informationen zur Prüfrelevanz der PMI und die zugehörigen Messwerte entlang der CAx-Prozesskette eindeutig rückverfolgt werden. Jeder erfasste Messwert kann so eindeutig den Anforderungen aus Bauteilkonstruktion zugewiesen werden, da die ermittelten Messdaten direkt mit den PMI-IDs aus dem CAD-Erzeugersystem gekoppelt sind. So entsteht die Basis für einen virtuellen Zwilling (vgl. Abschnitt 2.2), der die direkte Rückverfolgbarkeit der Messdaten von der Qualitätssicherung in die Konstruktion ermöglicht und auf Basis des Digital-Thread-Ansatzes (vgl. Abschnitt 2.2.2) Transparenz innerhalb der Produktentstehung schafft.

Die gezielte Informationsbereitstellung durch ein Arbeitsvorgangsmodell entlastet den Mitarbeiter bei seiner täglichen Arbeit, reduziert individuelle Fehler bei der Messdatenerfassung in der Fertigungswerkstatt sowie im Messraum und sorgt zudem für geringere Einarbeitungszeiten bei neu auszuführenden Tätigkeiten und bei der Einarbeitung neuer Mitarbeiter.

4.4 Fazit zur Methodenentwicklung für eine 3D-modellbasierte Arbeitsweise in der Fertigung

In den vorangegangenen Abschnitten 4.1, 4.2 und 4.3 werden neue Konzepte zur direkten und funktionalen Nutzung der Informationen im 3D-CAD-Modell zur Vermeidung von Informationsverlusten innerhalb der Produktentstehung ausgearbeitet. Hierzu werden die 3D-CAD-Modelle mit Zusatzinformationen angereichert und regelbasierte Prozesse im Bereich der Konstruktion und Prozessplanung entwickelt.

Die neuen Methoden basieren im Wesentlichen auf der Verwendung von Informationsfeatures in Form von Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) im 3D-CAD-Modell. Die Motivation und die methodischen Ansätze zur Ausarbeitung der entwickelten Methoden beruhen auf den vier Prinzipien der Prozessintegration nach Berente et al.: Pünktlichkeit, Zugänglichkeit, Transparenz und Granularität (vgl. Kapitel 3).

Der Kern des vorliegenden Konzepts ist die eindeutige Kennzeichnung der produkt- und fertigungsrelevanten Informationen im 3D-CAD-Modell des zu fertigenden Bauteils. Diese eindeutige Kennzeichnung ermöglicht die eindeutige Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen und die Rückverfolgbarkeit der zugehörigen Prozessdaten, z. B. der Qualitätsdaten im Produktentstehungsprozess, und dient der Erfüllung der Prinzipien Pünktlichkeit und Zugänglichkeit (vgl. Kapitel 3). Im Rahmen des Functional-Identification-Information-Ansatzes (vgl. Abschnitt 4.2.2) werden die Attribute zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen maschinenlesbar abgespeichert und anschließend für die Weiterverwendung innerhalb prozessbeteiligter CAx-Systeme ‚eingefroren‘. Diese Eindeutigkeit kann über die Informationsfeatures und deren Attribute im 3D-CAD-Modell realisiert werden. Über die ursprüngliche (native) PMI-ID aus dem CAD-Erzeugersystem wird so eine eindeutige Kommunikation innerhalb der 3D-CAD-Prozesskette sichergestellt.

Gegenüber den bisherigen Ansätzen (vgl. Abschnitt 2.5.6) ist die entwickelte Methode systemneutral einsetzbar und erfordert nur geringen Implementierungsaufwand im Vergleich zu aufwendigen, teils unternehmensspezifisch entwickelten CAD-Schnittstellen und IT-Zusatzsoftwarelösungen. Die bereits bestehenden Methoden sind für den internen Gebrauch innerhalb einer Firma zwar hilfreich, aber für den unternehmensübergreifenden Datenaustausch meist noch ungeeignet.

Mithilfe der FII-Methode wird Abhilfe geleistet. Auf Basis der Produkt- und Fertigungsinformationen im 3D-CAD-Modell kann eine eindeutige und durchgängige Kommunikation auf informationstechnischer Ebene realisiert werden. Weicht beispielsweise ein Merkmal eines Bauteils bei der Qualitätsprüfung vom geforderten Soll-Wert ab, kann ausgehend von der eindeutigen PMI-ID auf die Ursache innerhalb sämtlicher Bereiche der virtuellen Produktentstehung geschlossen werden (siehe Abbildung 47). Mögliche Fehlerquellen können so beispielsweise aufgrund unzulässiger Maschinenparameter bei der Bauteilfertigung identifiziert werden.

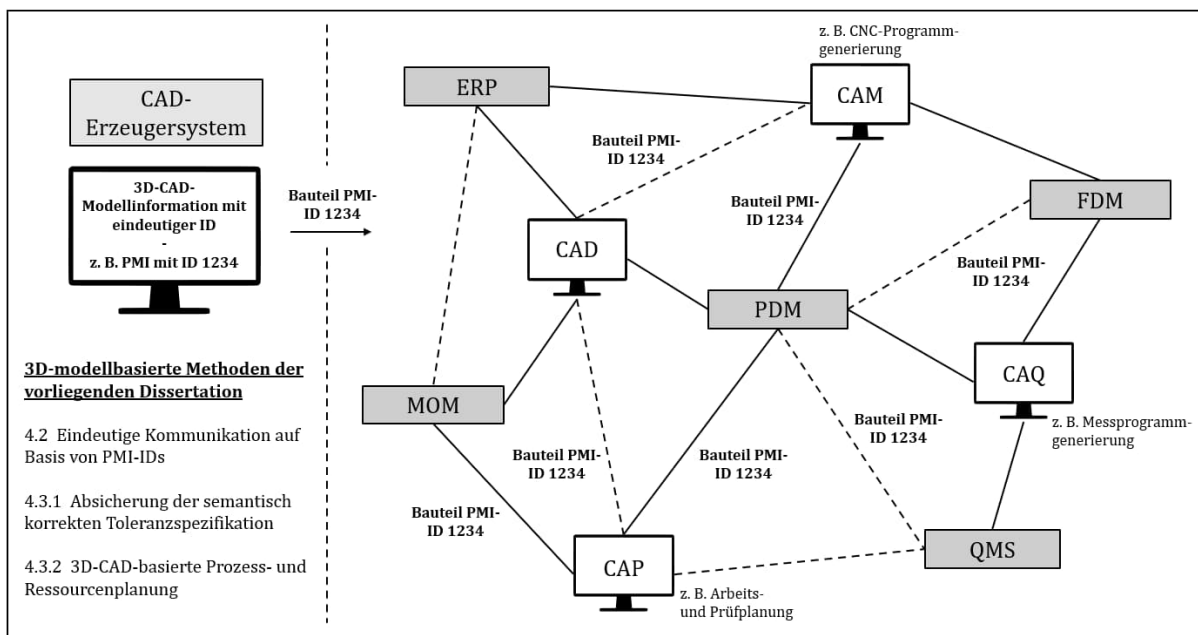


Abbildung 47: Darstellung des Gesamtkonzepts zur Nutzung einer eindeutigen PMI-ID für eine Produkt- und Fertigungsinformation im Produktentstehungsprozess

Elementar für einen fehlerfreien Datenaustausch und für die Akzeptanzförderung der modellbasierten Arbeitsweise ist die Absicherung semantisch korrekt tolerierter 3D-CAD-Modelle. Zusätzlich zur eindeutigen Kennzeichnung der 3D-CAD-Modellinformationen wird daher eine Methode entwickelt, die die Semantik der Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) im 3D-CAD-Modell sicherstellt (vgl. Abschnitt 4.3.1). Neue Methoden zur Absicherung semantisch korrekter Toleranzspezifikationen für Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell werden erarbeitet, um unvollständig, fehlerhaft und sinnfrei spezifizierte 3D-CAD-Modelle in der Fertigung zu vermeiden. Zudem werden mit der entwickelten Methode Informationsverluste beim 3D-Datenaustausch entlang der CAx-Prozesskette reduziert, um die Datenqualität im virtuellen Produktentstehungsprozess zu erhöhen.

Durchgeführte Recherchen (vgl. Abschnitt 2.5.5) belegen, dass bereits unterschiedliche Forschungsansätze auf diesem Gebiet vorliegen, jedoch existieren derzeit keine allgemeingültig publizierten Methoden, die sich insbesondere auf die semantisch korrekte Bauteiltolerierung im 3D-CAD-Modell für die Weiterverwendung in Folgeprozessen beziehen. Mit der semantischen Absicherung der 3D-CAD-Informationen wird das Transparenzprinzip (vgl. Kapitel 3) erfüllt, da die Semantik grundlegend für die Maschinenlesbarkeit im CAx-Umfeld ist.

Zur Förderung der 3D-CAD-basierten Arbeitsweise und zur Ablösung der 2D-Zeichnung in der Fertigung werden ferner neue Methoden für den Bereich der Prozess- und Qualitätsplanung entwickelt. Diese beziehen sich auf das Granularitätsprinzip (vgl. Kapitel 3). Die neuen Vorgehensweisen beinhalten die Verwendung der Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) für die Auswahl von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln im Bereich der Arbeitsvorbereitung sowie für die arbeitsschrittspezifische Informationsbereitstellung in der Fertigung. Hierfür werden unter anderem 3D-CAD-

Arbeitsvorgangsmodelle (z. B. für die 3D-Vermessung auf Koordinatenmessgeräten) aus dem Engineering-Modell abgeleitet. Diese sind ebenfalls Träger der eindeutigen PMI-IDs, sodass die ermittelten Messwerte den entsprechenden Features und Geometrieelementen im 3D-CAD-Modell eindeutig zugewiesen werden können.

Analysen und Recherchen haben gezeigt, dass gerade Prozesse der Arbeitsvorbereitung, z. B. die Arbeits- und Prüfplanung, derzeit meist individuell und 2D-basiert erfolgen (vgl. Abschnitt 2.4.1 und Abschnitt 2.4.2). Darüber hinaus werden häufig Datenbanken aus Erfahrungswerten angelegt, die den Planer bei der Festlegung der Arbeits- und Prüffolgen sowie bei der Ressourcenauswahl unterstützen (vgl. Abschnitt 2.4.1). Die entwickelten Ansätze zur 3D-CAD-basierten Prozessplanung beinhalten die bereits bestehenden Möglichkeiten des MBD (vgl. Abschnitt 2.5.2) und tragen zur Etablierung des 3D-CAD-Modells als führende Informationsquelle in der Fertigung und Qualitätssicherung bei.

5 Validierung der Methode zur Erreichung eines 3D-modellbasierten Fertigungsansatzes

In diesem Kapitel werden die Methoden und Festlegungen aus Kapitel 4 dieser Dissertation validiert. Zur Überprüfung der Tragfähigkeit wird das entwickelte Konzept auf ein 3D-CAD-Modell angewendet und die Plausibilität der entwickelten Methode im Produktentstehungsprozess in der Fertigung validiert. Mit der Validierung wird die Anwendbarkeit der Methode überprüft. Hierzu wird in Abschnitt 5.1 zunächst die Gesamtstruktur der technischen Umsetzung beschrieben. Es folgen die Vorstellung des Validierungsbeispiels und die technische Umsetzung der einzelnen Teilmethoden. Die erzielten Ergebnisse werden anschließend kurz zusammengefasst.

5.1 Gesamtstruktur der technischen Umsetzung der 3D-modellbasierten Arbeitsweise

In Abbildung 48 ist die Gesamtstruktur der technischen Umsetzung zur Validierung der entwickelten Methoden aus Kapitel 4 dargestellt. Für die Bereitstellung funktionaler 3D-CAD-Modelle ist ein 3D-CAD-System erforderlich, das die Definition von Informationsfeatures (z. B. PMI) zur Festlegung der Bauteilanforderungen (z. B. Form- und Lagetoleranzen) im 3D-CAD-System ermöglicht. Darüber hinaus besteht die Anforderung an das CAD-System, FII-Attribute im 3D-CAD-Modell festzulegen, um das neu entwickelte Konzept zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen (vgl. Abschnitt 4.2) umsetzen bzw. validieren zu können. Das CAD-System *NX 1953* von Siemens erfüllt die genannten Anforderungen, sodass die eindeutige Kennzeichnung der 3D-CAD-Modellinformationen sowie die 3D-CAD-basierten Toleranzspezifikationen über PMI unterstützt werden (siehe Abbildung 48).

Neben der feature-basierten Modellierung ermöglicht *NX 1953* die Ausführung benutzerdefinierter Zusatzprogrammierungen und CAD-Funktionen, die als dynamische Programmbibliothek (engl.: *Dynamic Link Library, DLL*) direkt im CAD-System ausgeführt werden können. Über die Programmierschnittstelle *NX Open* kann aktiv auf den Inhalt der geöffneten 3D-CAD-Datei zugegriffen, deren 3D-CAD-Informationen gelesen und direkt bearbeitet werden. Die *NX-Open-API* (API: *Application Programming Interface*) unterstützt die Programmiersprachen *C/C++*, *Visual Basic*, *C#*, *Java* und *Python*. Zur Implementierung der entwickelten Methoden (vgl. Kapitel 4) in die CAD-Umgebung von *Siemens NX* wird nachfolgend die Programmiersprache *Visual Basic.NET* in Verbindung mit *NX Open* verwendet.

Das Arbeitsplanungstool soll bei der Bereitstellung arbeitsvorgangsspezifischer 3D-CAD-Modelle unterstützen. Dazu sind detailliert ausgearbeitete Regelwerke erforderlich, die die Erzeugung bzw. Ableitung der AVOMs aus dem 3D-CAD-Mastermodell ermöglichen. Die Ausarbeitung dieser Regelwerke unterliegt einem separaten Forschungsschwerpunkt (vgl. Abschnitt 4.3.2.4). Zur Validierung der beschriebenen Methoden nach Abschnitt 4.3.2.4 und Abschnitt 4.3.2.5 werden die AVOMs für diese Arbeit daher manuell im CAD-

System erzeugt. Dieses Vorgehen erklärt auch die direkte Verknüpfung des Arbeitsplanungstools mit dem CAD-System (siehe Abbildung 48).

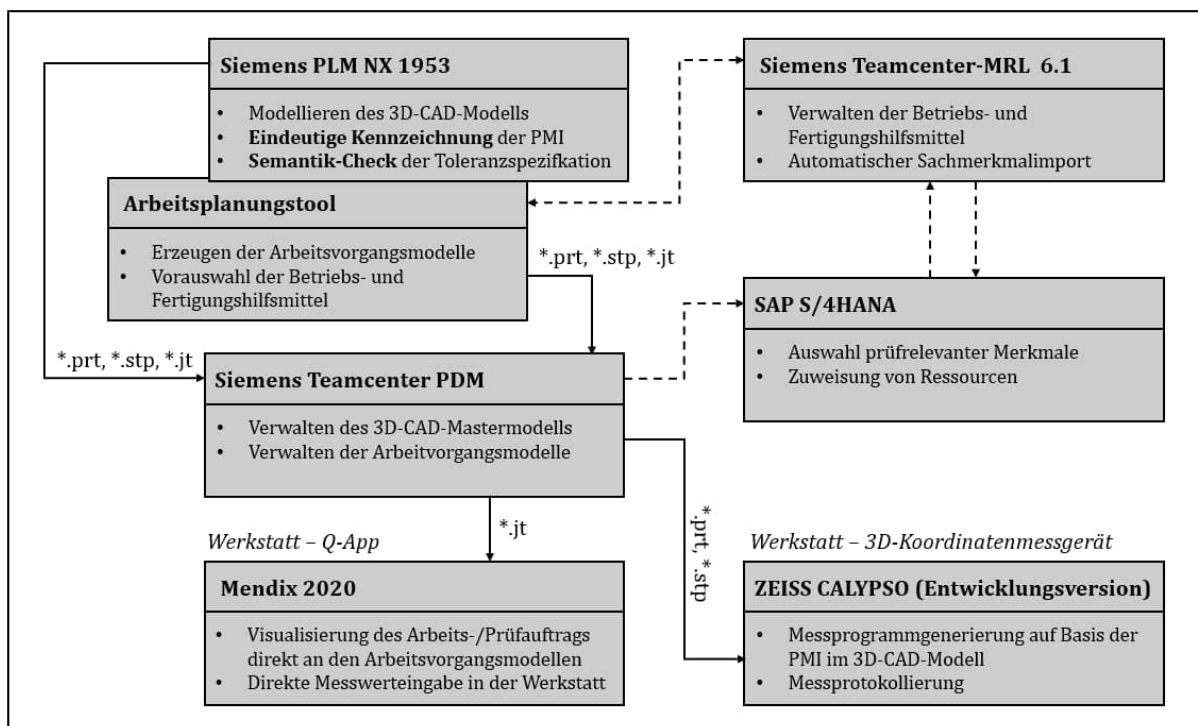


Abbildung 48: Nutzung des 3D-CAD-Modells mit unterschiedlichen Dateiformaten in der Validierungsumgebung

Für die Verwaltung der 3D-CAD-Modelle wird innerhalb der Validierung das PDM-System (vgl. Abschnitt 2.7) *Siemens Teamcenter* verwendet. Hier können die 3D-CAD-Mastermodelle und die zugehörigen AVOMs verwaltet werden. Zu jedem 3D-CAD-Modell werden zur Validierung ein natives Dateiformat (*.prt) und zwei neutrale Dateiformate (*.stp, *.jt) erzeugt (siehe Abbildung 49). Die Notwendigkeit dieser drei unterschiedlichen Datei-Formate wird nachfolgend noch genauer erläutert.

Das NX-Part-File (*.prt) wird bei der 3D-CAD-Modellierung im NX-CAD-System erzeugt und kann für die 3D-CAD-basierte Programmierung von Koordinatenmessgeräten und CNC-Werkzeugmaschinen genutzt werden. Für den unternehmensübergreifenden Datenaustausch und für die Einbindung externer Geschäftspartner oder Subunternehmer wird zusätzlich ein STEP-File nach ISO 10303 (vgl. Abschnitt 4.2.3) erzeugt. Dieses kann ebenfalls zur automatischen Programmgenerierung auf Basis der PMI im 3D-CAD-Modell eingesetzt werden.

Das JT-File nach ISO 14306 (vgl. Abschnitt 2.6.3) dient der Visualisierung innerhalb der entwickelten Qualitätsapplikation (Q-App) in der Fertigungswerkstatt (vgl. Abschnitt 4.3.2.5). Das neutrale Austauschformat JT eignet sich bislang noch nicht für die funktionale Verwendung innerhalb der Messsoftware der Koordinatenmessgeräte (vgl. Abschnitt 4.2.3). In Abbildung 49 sind die unterschiedlichen Anwendungsbereiche und Einsatzgebiete der 3D-CAD-Datenformate im Rahmen der vorliegenden Validierung dargestellt.

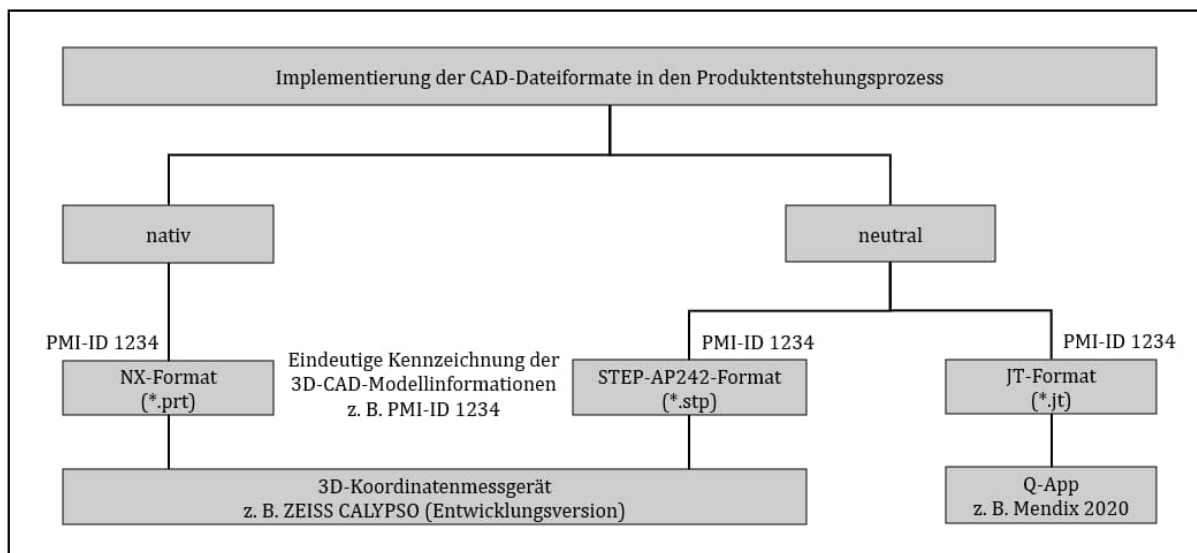


Abbildung 49: Anwendungsbereiche unterschiedlicher 3D-CAD-Dateiformate im Produktentstehungsprozess

Zur zentralen Verwaltung der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel wird innerhalb dieser Validierung das FDM-System *Siemens Teamcenter MRL* verwendet. Die *Manufacturing Resource Library* (MRL) ist eine *Teamcenter*-Anwendung, die Klassifizierungs- und Datenverwaltungsfunktionen für fertigungsrelevante Ressourcen bereitstellt. Beispielsweise kann direkt aus dem CAM-System *NX-CAM* heraus auf die *Teamcenter MRL* zugegriffen werden, um Komplettwerkzeuge in den CAM-Prozess einzubinden. Die *MRL*-Anwendung ordnet die Daten in einer Hierarchie mit Klassen und Unterklassen an. Innerhalb dieser Klassen verwaltet das Klassensystem Sachmerkmale wie die Werkzeuglänge, den Werkzeugschneidedurchmesser oder Informationen zum Hersteller und Schneidstoff (vgl. Abschnitt 4.3.2.3). Zur Ermöglichung eines automatisierten und fehlerfreien Werkzeugdatenaustauschs ist die MRL so aufgebaut, dass die Daten aus Katalogen von Werkzeuglieferanten direkt importiert werden können (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Dabei können die Herstellerdaten (z. B. Sachmerkmallisten) derzeit nach den Standards der Normreihe DIN 4000 oder ISO 13399 verarbeitet werden [116].

Zur Visualisierung der Prozessinformationen zu den jeweiligen Arbeitsvorgängen in der Fertigung wird die Low-Code-Plattform *Mendix* als MOM/MES-System (vgl. Abschnitt 2.7) eingesetzt. *Mendix* beinhaltet eine Reihe von 3D-Widgets und 3D-Viewer, die die direkte Arbeit mit 3D-CAD-Modellen in Form des JT-Formats des Bauteils unterstützen. Dem Werker werden mithilfe eines internen 3D-Viewer die JT-Dateien zu den jeweiligen Arbeitsvorgängen in der Fertigungswerkstatt angezeigt. Mithilfe der MOM/MES-Funktionalitäten und der entwickelten Q-App als QMS zur fertigungsbegleitenden Messung können spezielle 3D-Visualisierungen genutzt werden, die z. B. das Hervorheben der PMI im 3D-CAD-Modell sowie das direkte Erfassen und Zuweisen von Ist-Werten aus einer Messung zu den qualitätskritischen PMI im 3D-CAD-Modell ermöglichen (vgl. Abschnitt 4.3.2.5). Detaillierte Informationen zu Low-Code-Plattformen und -Methoden können der Literatur [158] entnommen werden.

Die Stirnradwelle besteht aus sechs verschiedenen Zylinderabsätzen, von denen die beiden äußeren zur Lagerung der Stirnradwelle genutzt werden. Zusätzlich trägt die Stirnradwelle eine Verzahnung (Designfeature nach Abschnitt 2.5.3). Sie ist metrisch-geradeverzahnt, was der direkten Kraftübertragung auf ein weiteres Zahnrad dient. Zudem sind ein Außengewinde sowie eine Passfedernut im Bauteil definiert. Die Passfedernut dient zur Realisierung einer Welle-Nabe-Verbindung. Die Verbindung ist formschlüssig und wird zur Übertragung des Drehmoments verwendet. Weiterhin besitzt das dargestellte Validierungsbeispiel zwei Zentrierbohrungen (Designfeatures nach Abschnitt 2.5.3) an den jeweiligen Wellenenden. Diese sind zur Positionierung und Spannung des Bauteils auf der CNC-Drehmaschine zur Drehbearbeitung vorgesehen.

Zusätzlich zu den verschiedenen Designfeatures ist die Stirnradwelle mit einer Vielzahl unterschiedlicher Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) angereichert (vgl. Abschnitt 2.5.4). Diese Art von Informationsfeatures sowie deren Kombination mit den im 3D-CAD-Modell enthaltenen Geometrieelementen und Designfeatures spielen innerhalb der Methodenentwicklung dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 4.2.2) eine entscheidende Rolle. Insgesamt enthält das Bauteil 33 PMI in Form von linearen Maßtoleranzen, Durchmesserbemaßungen, Rauheiten sowie Form- und Lagetoleranzen.

Als Validierungsbeispiele werden nicht alle PMI, die im 3D-CAD-Modell enthalten sind, im Detail berücksichtigt und auf Basis der entwickelten Methoden nach Kapitel 4 validiert. Die relevanten Wellenabschnitte und PMI werden in den unterschiedlichen Abschnitten in Kapitel 5 separat beschrieben und in Bezug auf den jeweiligen Anwendungsfall im 3D-modellbasierten Ansatz untersucht.

5.3 Technische Umsetzung der Methoden zur 3D-modellbasierten Arbeitsweise

Die technische Umsetzung der in Kapitel 4 entwickelten Methoden gliedert sich in drei Phasen. In der ersten Phase werden die PMI des 3D-CAD-Modells eindeutig im CAD-Erzeugersystem gekennzeichnet, und die Beständigkeit bzw. Durchgängigkeit der ihrer Kennzeichnung wird beim Import des 3D-CAD-Modells in andere CAx-Systeme getestet (vgl. Abschnitt 5.3.1). In der zweiten Phase wird das 3D-CAD-Modell der Stirnradwelle auf eine semantisch korrekte Bauteiltolerierung überprüft (vgl. Abschnitt 5.3.2). In der dritten Phase werden die Konzepte und Möglichkeiten einer 3D-CAD-basierten Prozessplanung anhand der Stirnradwelle validiert (vgl. Abschnitt 5.3.3).

5.3.1 Eindeutige Identifikation der Produkt- und Fertigungsinformationen im 3D-CAD-Modell

In diesem Abschnitt erfolgt die Validierung der in Abschnitt 4.2 entwickelten Methode zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen. Die Eindeutigkeit der Kennzeichnung der Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) bildet die Grundlage für die eindeutige Identifikation der PMI sowie für die einheitliche Kommunikation im

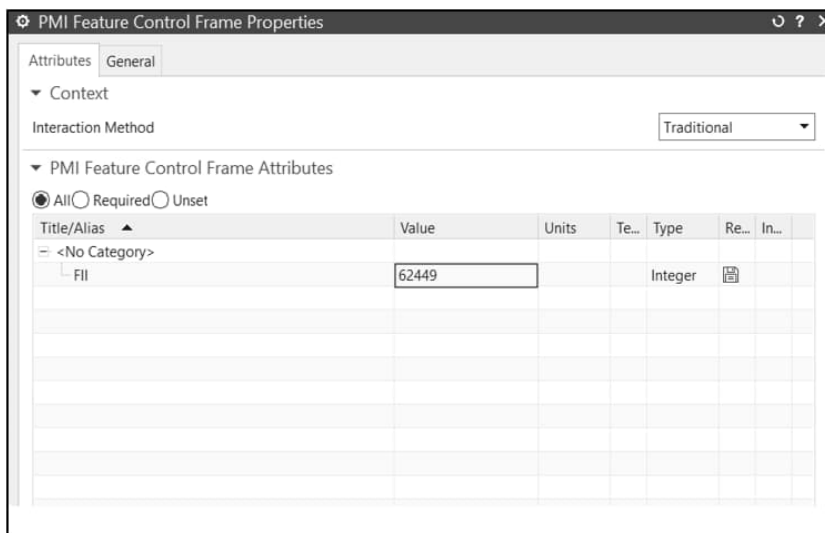
virtuellen Produktentstehungsprozess und zur Realisierung des Digital-Twin-Ansatzes (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Nachdem die PMI-IDs zu den im 3D-CAD-Modell festgelegten PMI im CAD-System *Siemens NX* als FII-Attributwert (vgl. Abschnitt 4.2.2.3) gespeichert und ‚eingefroren‘ werden, wird die systemneutrale Anwendbarkeit der FII-Methode mithilfe des STEP-AP242-Formats (vgl. Abschnitt 4.2.3) validiert. Schließlich erfolgt die Validierung der Methode zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen im CAX-Umfeld.

5.3.1.1 Prototypische Implementierung der FII-Methode für den nativen 3D-Datenaustausch

Zur Implementierung der FII-Methode im CAD-System *Siemens NX* werden die *NX-Open-API* und die Programmiersprache *Visual Basic.NET* verwendet. Für die systemübergreifende Anwendbarkeit der FII-Methode werden die FII-Attribute im 3D-CAD-Modell auf PMI- und auf Part-Ebene generiert (vgl. Abschnitt 4.2.2.3). Zur Generierung der Eindeutigkeit muss dazu die PMI-ID sowie der PMI-Name aus dem nativen 3D-CAD-Modell ausgelesen werden. Zur Ermittlung dieser Informationen und zur automatischen Erstellung der FII-Attribute dient der *Visual-Basic-Programmcode*.

Zunächst wird die ID jedes PMI (z. B. der Wert 62449) ermittelt und als FII-Attribut gespeichert. Auf PMI-Ebene wird ein FII-Attribut mit dem Namen *FII* erzeugt (siehe Abbildung 51). Der FII-Attributwert entspricht dabei der ursprünglichen PMI-ID aus dem CAD-Erzeugersystem *Siemens NX*. Die FII-Attribute werden im CAD-System *Siemens NX 1953* in Form von *User-Defined Attributes (UDAs)* definiert. Die UDA-Funktion bietet die Möglichkeit, die Werte der IDs auf PMI- und auf Part-Ebene zu speichern. Mithilfe des entwickelten Programmcodes können die eindeutigen Identifikationsmerkmale automatisiert im 3D-CAD-Modell gespeichert und für Folgeprozesse ‚eingefroren‘ werden. Die IDs zu den PMI sind schreibgeschützt und stehen unverändert für den informationstechnischen und maschinellen Leseprozess zur Verfügung. Der FII-Ansatz über FII-Informationfeatures (vgl. Abschnitt 4.2.2.2) wird hier nicht weiter betrachtet.

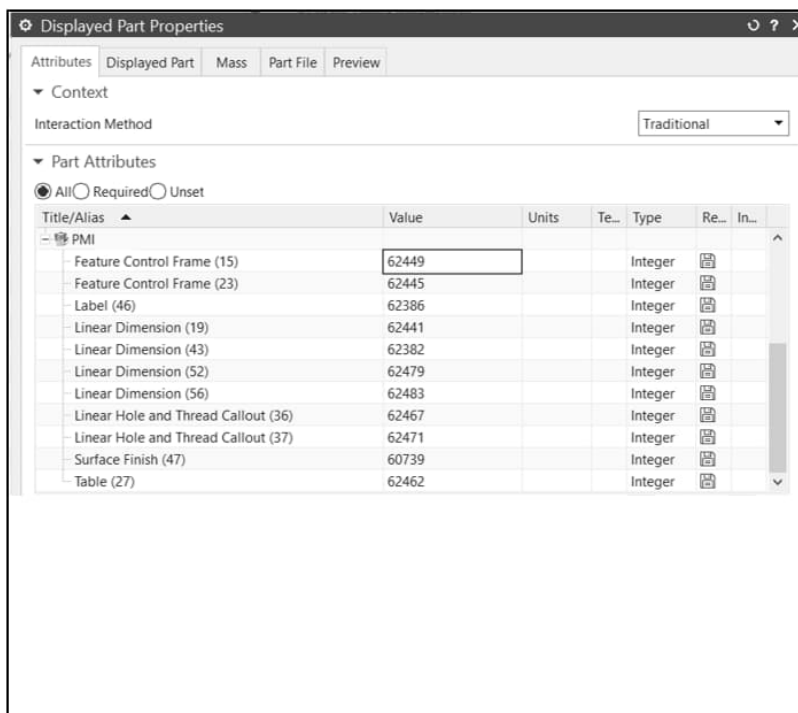


FII-Methode:
(vgl. Abschnitt 4.2.2.3)

- PMI-ID, z. B. Wert 62449, wird als Integer-Wert auf PMI-Ebene im 3D-CAD-Modell gespeichert
- FII-Attribut trägt den Namen *FII*
- FII-Attribute sind schreibgeschützt
- Alle PMI besitzen ein FII-Attribut mit dem Wert xy

Abbildung 51: Darstellung der PMI mit einem FII-Attribut auf PMI-Ebene in *Siemens NX*

Die FII-Attribute auf Part-Ebene werden nach dem zugehörigen PMI-Namen im 3D-CAD-Modell benannt und enthalten zusätzlich als Wert die vom CAD-Erzeugersystem generierte PMI-ID (z. B. den Wert 62449). Mit der Implementierung dieser FII-Methode auf Part-Ebene werden die FII-Attribute unter der Kategorie mit dem Namen *PMI* im 3D-CAD-Modell gespeichert (siehe Abbildung 52).



FII-Methode:
(vgl. Abschnitt 4.2.2.3)

- PMI-ID, z. B. Wert 62449, wird als Integer-Wert auf Part-Ebene im 3D-CAD-Modell gespeichert
- FII-Attribute tragen den Namen des PMI, der vom CAD-System vergeben wird, z. B. *Feature Control Frame (15)*
- FII-Attribute sind schreibgeschützt
- Alle FII-Attribute werden mit dem Wert xy unter der Kategorie *PMI* gespeichert

Abbildung 52: Darstellung der PMI mit FII-Attribute auf Part-Ebene unter der Kategorie *PMI* in *Siemens NX*

5.3.1.2 Eindeutige Kennzeichnung der Produkt- und Fertigungsinformationen in CAD-neutralen Austauschformaten

Zur systemneutralen Anwendung der FII-Methode (vgl. Abschnitt 4.2.3) müssen die FII-Attribute im 3D-CAD-Modell unverändert in die CAD-neutralen Austauschformate übertragen (konvertiert) werden können, um ihre Eindeutigkeit im Neutralformat für die weitere Verwendung innerhalb der Prozesskette zu gewährleisten. Für eine verlustfreie und vollständige Übertragung der FII vom nativen CAD-File, z. B. in das hier angewendete STEP-AP242-File, ist eine Manipulation des neutralen Austauschformats erforderlich. Hierfür werden die zu manipulierende STEP-AP242-Datei und eine zusätzliche Textdatei benötigt, die die PMI-IDs aus der CAD-Datei enthalten (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Innerhalb dieser Validierung wird als Textdatei eine CSV-Datei verwendet, mit deren Hilfe die Speicherung der PMI-IDs und der PMI-Namen ermöglicht wird. Das STEP-AP242-Format kann mit der FII-Methode aus Abschnitt 4.2.3 sowohl auf der Part-Ebene als auch auf der PMI-Ebene mit den originalen FII-Attributen aus dem nativen CAD-File ergänzt werden.

Die Vorauswahl der Speicherebene (Part-Ebene oder PMI-Ebene) erfolgt mithilfe einer grafischen Oberfläche, die dem Anwender beim Export des nativen 3D-CAD-Modells im CAD-System *Siemens NX* angezeigt wird. Mit dem Export des 3D-CAD-Modells wird die STEP-AP242-Datei mit den FII-Attributen vervollständigt und als modifizierte STEP-AP242-Datei gespeichert. Die so ergänzte STEP-AP242-Datei enthält nun auch die vom CAD-Erzeugersystem generierten PMI-IDs (siehe Abbildung 53). Die PMI-IDs (z. B. der Wert 62449) aus Abschnitt 5.3.1.1 sind damit auch in der modifizierten STEP-AP242-Datei enthalten und können für den systemneutralen Datenaustausch entlang der CAX-Prozesskette verwendet und maschinenlesbar verarbeitet werden (siehe Abbildung 53).

<pre>#8968=INTEGER_REPRESENTATION_ITEM('',62449.); #8969=INTEGER_REPRESENTATION_ITEM('',62441.); #8970=INTEGER_REPRESENTATION_ITEM('',62445.); #8971=INTEGER_REPRESENTATION_ITEM('',62462.); #8972=INTEGER_REPRESENTATION_ITEM('',62467.); #8973=INTEGER_REPRESENTATION_ITEM('',62471.); #8974=INTEGER_REPRESENTATION_ITEM('',62382.); #8975=INTEGER_REPRESENTATION_ITEM('',62386.); ... </pre> <p style="text-align: right;">Eindeutige PMI-IDs</p>	<p>FII-Methode: (vgl. Abschnitt 4.2.3)</p> <ul style="list-style-type: none">• PMI-ID, z. B. Wert 62449, wird im STEP-AP242-File ergänzt• Modifikation des STEP-AP242-Files über die Definition der FII-Attribute auf PMI- oder auf Part-Ebene im neutralen 3D-CAD-Modell
--	--

Abbildung 53: Auszug aus einem STEP-AP242-Protokoll mit den PMI-IDs aus dem CAD-Erzeugersystem *Siemens NX*

Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, wird zur visuellen Unterstützung in der Fertigungswerkstatt das JT-Format verwendet. In einem Messprozess werden die im 3D-CAD-Modell definierten Bauteilanforderungen auf Basis der PMI-IDs gemessen. Die so

ermittelten Messwerte werden direkt dem 3D-CAD-Modell zugewiesen. Dementsprechend ist zu prüfen, ob die FII-Attribute und die zugehörigen PMI-IDs mithilfe der entwickelten FII-Methode auch in das JT-Format übertragen werden können (vgl. Abschnitt 4.2.3). Dafür wird das 3D-CAD-Modell der Stirnradwelle als NX-Part-File in das JT-Neutralformat konvertiert und anschließend mit der JT-Visualisierungssoftware (*JT2Go*) geöffnet. Der Test zeigt, dass alle PMI und deren eindeutige PMI-IDs im JT-Format abrufbar bzw. sichtbar sind (siehe Abbildung 54). Im Gegensatz zum STEP-Format aus Abbildung 53 sind die PMI-IDs hier nicht auf Part- und auf PMI-Ebene, sondern ausschließlich auf PMI-Ebene gespeichert (vgl. Abschnitt 4.2.3).

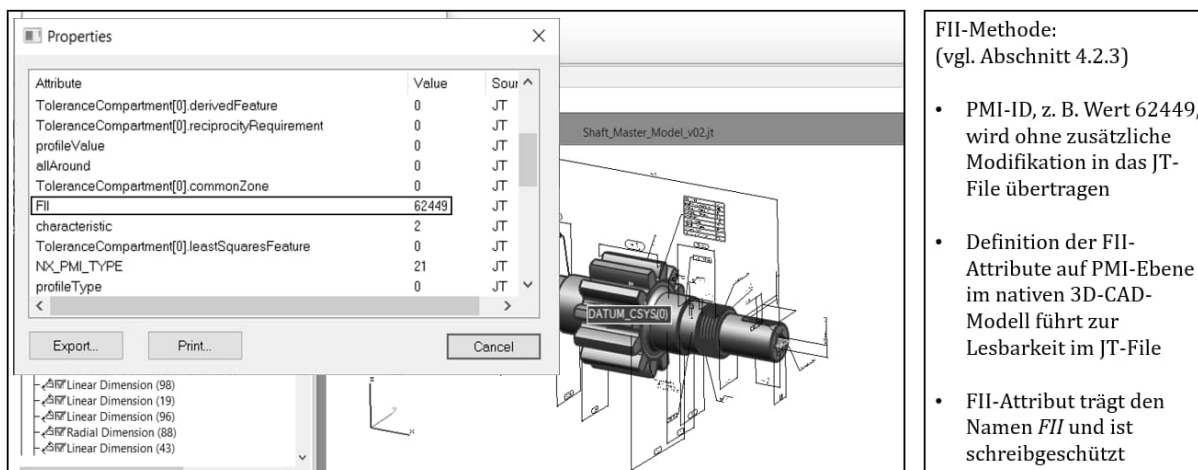


Abbildung 54: Darstellung der NX-PMI nach der Übertragung in das JT-Format mittels der FII-Methode

Bei Verwendung des CAD-Systems *NX* werden die FII-Attribute über den FII-Ansatz (vgl. Abschnitt 4.2.2.3 und Abschnitt 4.2.3) in das neutrale STEP-AP242-File und in das JT-File lesbar und unverändert übertragen. Die PMI-IDs werden dabei entweder auf CAD-Part-Ebene im STEP-AP242-File oder auf PMI-Ebene im JT-File gespeichert. Die entwickelte FII-Methode aus Abschnitt 4.2 ist somit CAD-neutral anwendbar und unterstützt die eindeutige Identifikation und Rückverfolgbarkeit der Prozessinformationen in der Produktentstehung.

5.3.1.3 Identifikation der eindeutig gekennzeichneten Produkt- und Fertigungsinformationen in CAX-Systemen

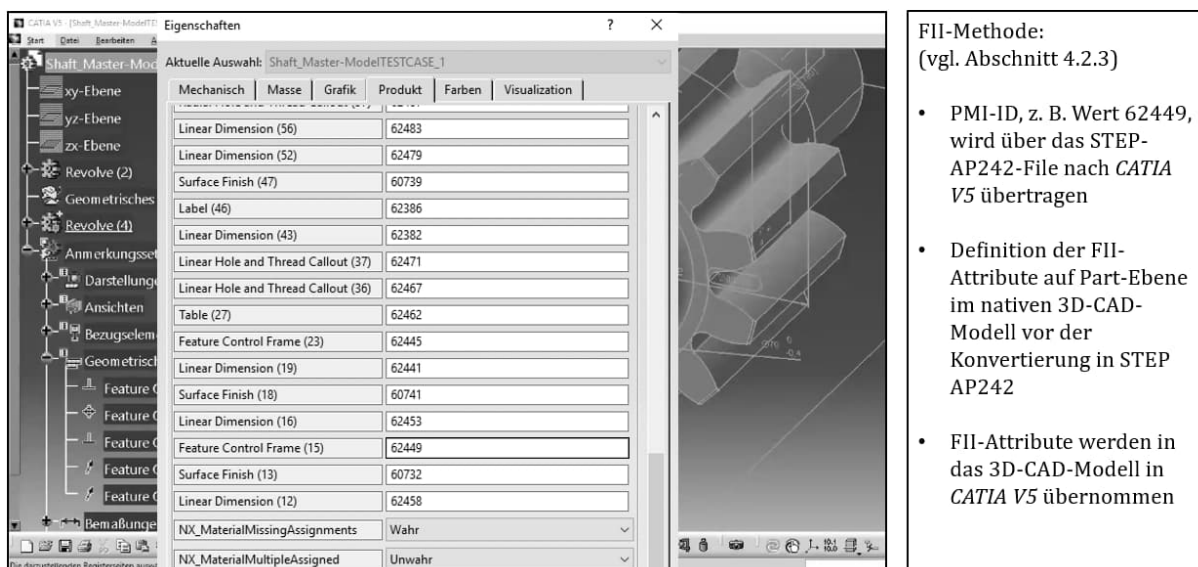
Nach der Implementierung der FII-Methode in der CAD-Software *Siemens NX* (vgl. Abschnitt 5.3.1.1) wird das 3D-CAD-Testmodell in die neutralen CAD-Formate STEP AP242 und JT konvertiert. Die eindeutige Kennzeichnung der Produkt- und Fertigungsinformationen auf Basis der FII-Methode bleibt auch in den neutralen CAD-Austauschformaten bestehen (vgl. Abschnitt 5.3.1.2). Demzufolge können die CAD-Daten und die CAD-Informationen auf nativem oder neutralem Weg ausgetauscht werden. Abhängig von den Funktionalitäten und der Kompatibilität des jeweiligen IT-Systems kann somit das entsprechende 3D-CAD-Modell (nativ oder neutral) für die auszuführende Aufgabe genutzt und angewendet werden.

Sind externe Partner in den Prozess eingebunden, wird erfahrungsgemäß der systemneutrale Datenaustausch mittels neutraler CAD-Austauschformate bevorzugt. Sind im Produktentstehungsprozess lediglich firmeninterne Stellen bzw. Bereiche beteiligt, erfolgt der Austausch in der Regel auf Basis der nativen Daten (vgl. Abschnitt 2.6.1).

Zur vollständigen Validierung beider Szenarien werden nachfolgend der systemneutrale (vgl. Abschnitt 2.6.3) und der native Ansatz (vgl. Abschnitt 2.6.2) validiert. Für den systemneutralen Ansatz wird zunächst der Informationstransfer zwischen dem CAD-System *Siemens NX 1953* und dem CAD-System *CATIA V5* über das manipulierte STEP-AP242-Format (vgl. Abschnitt 5.3.1.2) durchgeführt. Dieser Test soll die native und die systemneutrale Übertragung der PMI-IDs mittels der FII-Methode aus dem CAD-Erzeugersystem belegen.

Mit der Konvertierung der nativen *NX*-Datei in das STEP-AP242-Format werden die FII-Attribute auf Part-Ebene erzeugt, und die native PMI-ID wird dort abgelegt. Nach dem Import der STEP-Datei in *CATIA V5* können die FII-Attribute gelesen werden (siehe Abbildung 55). Trotz unterschiedlicher Modellierkerne (vgl. Abschnitt 2.3.2) beider CAD-Systeme sind die PMI-IDs und die PMI-Benennungen nach dem 3D-Datenaustausch in beiden CAD-Systemen vorhanden und identisch. Die PMI-ID mit dem Wert 62449 aus dem CAD-Erzeugersystem *Siemens NX* wird auch von *CATIA V5* als PMI-ID mit dem Wert 62449 erkannt und kann somit eindeutig rückverfolgt werden.

Die Eindeutigkeit der geforderten Informationen im 3D-CAD-Modell über den systemneutralen Ansatz (vgl. Abschnitt 4.2.3) wird somit mithilfe der FII-Methode aus Abschnitt 4.2.2 gewährleistet. Die Lesbarkeit der FII-Attribute im CAD-System über das manipulierte STEP-AP242-File wird derzeit jedoch nur auf Part-Ebene unterstützt. Das Auslesen der FII-Attribute auf PMI-Ebene aus dem STEP-AP242-File wird von den CAD-Systemen noch nicht unterstützt.



Attribut	PMI-ID
Linear Dimension (56)	62483
Linear Dimension (52)	62479
Surface Finish (47)	60739
Label (46)	62386
Linear Dimension (43)	62382
Linear Hole and Thread Callout (37)	62471
Linear Hole and Thread Callout (36)	62467
Table (27)	62462
Feature Control Frame (23)	62445
Linear Dimension (19)	62441
Surface Finish (18)	60741
Linear Dimension (16)	62453
Feature Control Frame (15)	62449
Surface Finish (13)	60732
Linear Dimension (12)	62458
NX_MaterialMissingAssignments	Wahr
NX_MaterialMultipleAssigned	Unwahr

FII-Methode:
(vgl. Abschnitt 4.2.3)

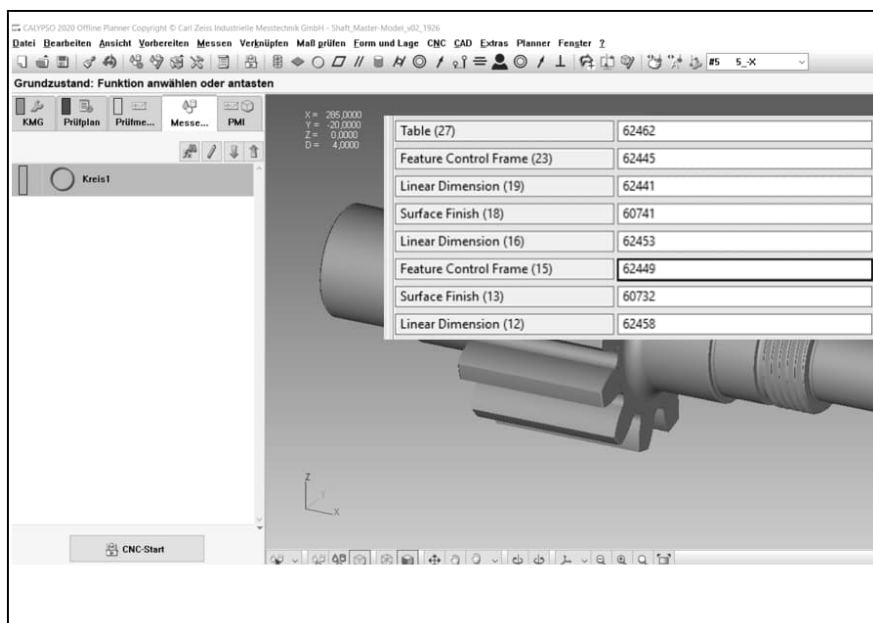
- PMI-ID, z. B. Wert 62449, wird über das STEP-AP242-File nach *CATIA V5* übertragen
- Definition der FII-Attribute auf Part-Ebene im nativen 3D-CAD-Modell vor der Konvertierung in STEP AP242
- FII-Attribute werden in das 3D-CAD-Modell in *CATIA V5* übernommen

Abbildung 55: Erfolgreiche Übertragung der FII-Attribute aus dem CAD-Erzeugersystem *Siemens NX* nach dem Import des STEP-AP242-Files in *CATIA V5*

Computer-Aided-Quality-Assurance-Systeme wie *CALYPSO* (Firma ZEISS) zur Generierung von Messprogrammen für Koordinatenmessgeräte unterstützen den Import nativer und neutraler CAD-Formate (vgl. Abschnitt 5.1). Einige Messsoftwarehersteller ermöglichen zudem die automatische Messprogrammgenerierung anhand nativer 3D-CAD-Dateien basierend auf den PMI im 3D-CAD-Modell. Voraussetzung hierfür sind jedoch semantisch korrekt definierte und maschinenlesbare Produkt- und Fertigungsinformationen im 3D-CAD-Modell (vgl. Abschnitt 2.5.5).

Die Messsoftware *CALYPSO* unterstützt die Kompatibilität zu beiden Formattypen (nativ und neutral). Aus diesem Grund wird zur Validierung der entwickelten FII-Methode nachfolgend die Lesbarkeit der FII-Attribute bei einem Import der nativen und neutralen 3D-CAD-Datei nach *CALYPSO* getestet. Die Lesbarkeit der FII-Attribute wird auf Basis des nativen 3D-CAD-Modells (*.prt) und des neutralen 3D-CAD-Modells (*.stp) als STEP-AP242-File untersucht (vgl. Abschnitt 5.1).

Die Untersuchungen und Tests zeigen, dass die Interpretation bzw. Lesbarkeit der FII-Attribute in der aktuellen Version dieser Software (*ZEISS CALYPSO 2021*) sowohl für das native CAD-Format als auch für das neutrale CAD-Format nicht unterstützt wird, obwohl die FII im 3D-CAD-Modell enthalten sind. Zur vollständigen Validierung der FII-Methode wird eine Entwicklungsversion von *ZEISS CALYPSO* genutzt. In Abbildung 56 ist ein Ausschnitt aus der Software dargestellt.



FII-Methode:
(vgl. Abschnitt 4.2.3)

- PMI-ID, z. B. Wert 62449, wird über das native NX-Part-File und über das STEP-AP242-File nach *ZEISS CALYPSO* (Entwicklungsversion) übertragen
- Definition der FII-Attribute auf Part-Ebene im nativen 3D-CAD-Modell vor der Konvertierung in STEP AP242
- Ermittelte Ist-Werte sind direkt mit den PMI-IDs gekoppelt, z. B. bei der Messprotokollierung

Abbildung 56: Darstellung der FII-Attribute aus dem CAD-Erzeugersystem *Siemens NX* nach dem Import des STEP-AP242-Formats in *ZEISS CALYPSO* (Entwicklungsversion)

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die PMI-IDs aus dem CAD-Erzeugersystem *Siemens NX* mithilfe der FII-Methode erfolgreich ‚eingefroren‘ und somit eindeutig in die unterschiedlichen Neutralformate (*.stp und *.jt) exportiert bzw. übergeben werden können. Zudem können die FII-Attribute unabhängig vom CAD-Modellierkern auch in andere CAx-Systeme, z. B. *CATIA V5* (CAD-System) oder *ZEISS CALYPSO* (CAQ-System, Entwicklungsversion), übertragen, eindeutig interpretiert und

z. B. für die Messwerterfassung und die anschließende Messprotokollierung genutzt werden. Die Eindeutigkeit der PMI-IDs im 3D-CAD-Modell entlang der CAx-Prozesskette ist somit gegeben.

5.3.2 Semantisch korrekte Absicherung der Tolerierungen im 3D-CAD-Modell

Aufgrund der Freiräume des Nutzers bei der Toleranzspezifikation, insbesondere für Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell, resultieren häufig individuelle Falscheingaben oder Fehldefinitionen. Zur Vermeidung dieses Szenarios wird im Rahmen der Dissertation die Methode zur Absicherung der semantisch korrekten Bauteiltolerierung im 3D-CAD-Modell ausgearbeitet (vgl. Abschnitt 4.3.1) und nachfolgend validiert. Die Validierung wird im CAD-System *Siemens NX 1953* anhand des 3D-CAD-Modells aus Abschnitt 5.2 durchgeführt. Zunächst wird die prototypische Implementierung des Überprüfungsmechanismus zur Toleranzspezifikation im CAD-System beschrieben. Anschließend werden die Testfälle erläutert, und das 3D-CAD-Modell wird mithilfe der Überprüfungsalgorithmen aus Abschnitt 4.3.1.3 auf die semantische Korrektheit der Form- und Lagetoleranzen überprüft.

5.3.2.1 Prototypische Implementierung des Überprüfungsalgorithmus

Der Zugriff auf die Informationsfeatures im 3D-CAD-Modell erfolgt über die *NX-Open-API* (vgl. Abschnitt 5.1). Über diese Schnittstelle können die Informationen im 3D-CAD-Modell direkt abgefragt und aktiv Eingriffe im CAD-System vorgenommen werden. Anschließend werden über den entwickelten Algorithmus alle PMI im 3D-CAD-Modell auf ihre semantisch korrekte Tolerierung überprüft. Die Toleranzangabe ist korrekt, wenn ihre Beschreibung gemäß DIN EN ISO 1101 syntaktisch und semantisch korrekt erfolgte. Für alle PMI wird die Toleranzart abgefragt, um die Toleranzangabe den zugehörigen Überprüfungsabfolgen der Toleranzspezifikationsklassen zuzuordnen (vgl. Abschnitt 4.3.1.2 und Abschnitt 4.3.1.3).

Des Weiteren wird unter Verwendung der *SNAP*-Schnittstelle innerhalb des CAD-Systems *Siemens NX* eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) entwickelt, die die festgelegten Kriterien zur optimierten Bedienerfreundlichkeit im CAD-System (vgl. Abschnitt 4.3.1.4) unterstützt. Das GUI ermöglicht eine kompakte und übersichtliche Darstellung der fehlerhaften Toleranzspezifikationen im 3D-CAD-Modell. Dabei wird der Nutzer im CAD-System aktiv aufgefordert, mit dem GUI bzw. den dort aufgeführten Angaben zu interagieren. Geometrieelemente im 3D-CAD-Modell, die in direkter Verbindung mit der Fehlermeldung stehen, werden zur Unterstützung des Konstrukteurs visuell dargestellt.

5.3.2.2 Vorstellung und Beschreibung der zu untersuchenden Testfälle

Der entwickelte Algorithmus (vgl. Abschnitt 4.3.1.3) zur Sicherstellung der semantisch korrekten Toleranzangabe im 3D-CAD-Modell wird anhand ausgewählter Testfälle in der Stirnradwelle aus Abschnitt 5.2 validiert. Hierzu werden vier PMI zur Definition der Form- und Lagetoleranzen im Validierungsbeispiel bewusst fehlerhaft, unvollständig oder widersprüchlich angegeben. Die Tolerierungsfehler im 3D-CAD-Modell sind in

Abbildung 57 dargestellt. Diese werden nachfolgend untersucht und beschrieben, um eine Auswertung und Validierung der entwickelten Methode zur Tolerierungsüberprüfung zu ermöglichen.

Bei der ersten Fehldefinition ist keine Toleranzzone im Toleranzrahmen angegeben (siehe Abbildung 57 – Bereich 1). Zur vollständigen Toleranzspezifikation muss ein positiver Wert eingetragen sein. Im zweiten Testfall soll die Rechtwinkligkeit der referenzierten Absatzfläche zum Bezugsgeometrieelement C ermittelt werden. Die Absatzfläche zur Bezugsfläche C liegt jedoch parallel im 3D-CAD-Modell (siehe Abbildung 57 – Bereich 2). Beim dritten Testfall ist die Kombination aus angegebenem Indikatortyp und definiertem Toleranzsymbol nicht zulässig (siehe Abbildung 57 – Bereich 3). Der angegebene Kollektionsebenenindikator (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) darf nach DIN EN ISO 1101 [89] und DIN EN ISO 2692 [102] nicht in Kombination mit dem Rechtwinkligkeitstoleranzsymbol zur Prüfung der Rechtwinkligkeit verwendet werden. Im vierten Fehlerfall ist das Bezugssymbol Z im Toleranzrahmen der PMI angegeben (siehe Abbildung 57 – Bereich 4). Der Bezug Z ist jedoch im 3D-CAD-Modell nicht definiert, sodass die Angabe ungültig ist und ins Leere führt.

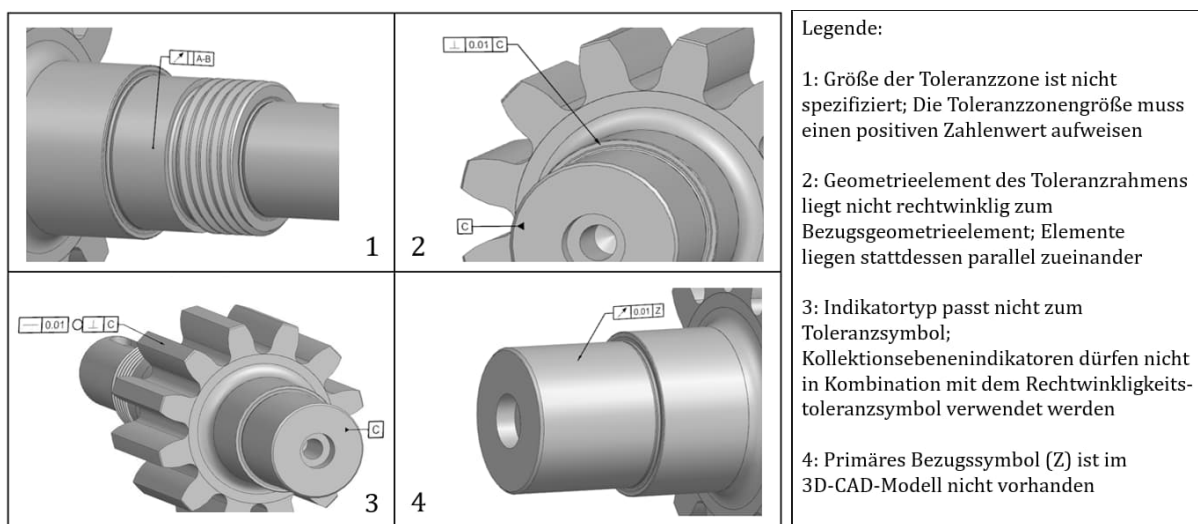
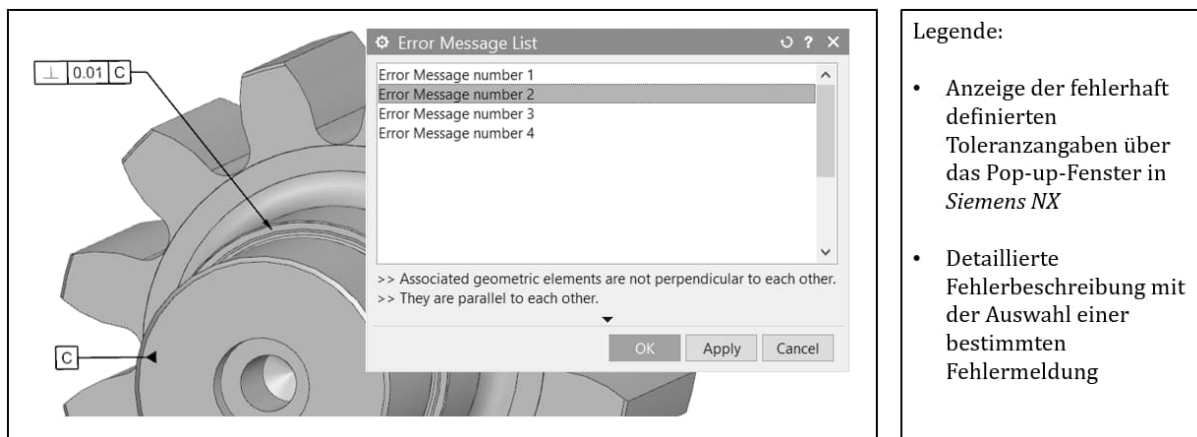


Abbildung 57: Vier Beispiele einer semantisch fehlerhaften und unvollständigen Definition von Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell

5.3.2.3 Überprüfung der semantischen Korrektheit von Toleranzspezifikationen im 3D-CAD-Modell

Mit der Ausführung der DLL (vgl. Abschnitt 5.1) im CAD-System *Siemens NX* werden alle fehlerhaft definierten Toleranzangaben im 3D-CAD-Modell mithilfe des Überprüfungsmechanismus (vgl. Abschnitt 4.3.1.3) erkannt und dem Konstrukteur direkt im CAD-Umfeld über das Pop-up-Fenster *Error Message List* angezeigt (siehe Abbildung 58). Das Pop-up-Fenster listet alle im 3D-CAD-Modell erkannten Fehler auf und weist diesen entsprechende Nummern zu. Mit der Auswahl einer Fehlermeldung wird eine detaillierte Beschreibung des Fehlers ausgegeben.



Legende:

- Anzeige der fehlerhaft definierten Toleranzangaben über das Pop-up-Fenster in *Siemens NX*
- Detaillierte Fehlerbeschreibung mit der Auswahl einer bestimmten Fehlermeldung

Abbildung 58: Darstellung der identifizierten Fehler bei der Toleranzspezifikation im 3D-CAD-Modell

Im Beispiel, das in Abbildung 58 dargestellt ist, wird der Fehlerfall 2 aus Abbildung 57 aufgegriffen. Der Konstrukteur wird über eine Fehlermeldung darauf hingewiesen, dass die assoziierten Geometrieelemente im 3D-CAD-Modell nicht rechtwinklig, sondern parallel zueinander liegen. Unter Berücksichtigung der Regeln nach DIN EN ISO 1101 ist die Überprüfung der Rechtwinkligkeit somit nicht zulässig. In Tabelle 1 sind die Fehlermeldungen zu den fehlerhaften Toleranzspezifikationen aus Abbildung 57 aufgelistet.

Tabelle 1: Fehlermeldungen im CAD-System zu den fehlerhaften Toleranzspezifikationen im Validierungsbeispiel aus Abbildung 57

Fehlerfall	Fehlermeldung im Pop-up-Fenster
1	Die Größe der Toleranzzone ist nicht angegeben. <i>Size of the tolerance zone is not specified.</i>
2	Die assoziierten Geometrieelemente stehen nicht senkrecht zueinander. Sie sind parallel zueinander. <i>Associated geometric elements are not perpendicular to each other. They are parallel to each other.</i>
3	Das angegebene Indikatorsymbol darf nicht in Kombination mit dem Kollektionsebenenindikator verwendet werden. <i>Indicator symbol must not be used with indicator type collection plane.</i>
4	Das primäre Bezugssymbol ist im 3D-CAD-Modell nicht referenziert. <i>Primary Datum Symbol is not referenced within the 3D CAD model.</i>

Die entwickelten Methoden zur Absicherung semantisch korrekt tolerierter 3D-CAD-Modelle (vgl. Abschnitt 4.3.1) können erfolgreich auf die vorliegenden Validierungsbeispiele angewendet werden. Die vier fehlerhaft definierten Toleranzspezifikationen im 3D-CAD-Modell werden eindeutig durch den Überprüfungsalgorithmus erkannt, und dem Konstrukteur wird zusätzlich eine detaillierte Fehlermeldung ausgegeben. Zudem werden alle identifizierten Fehler in der grafischen Oberfläche des CAD-Systems *Siemens NX* dargestellt.

Ergänzend zu den vier exemplarischen Testfällen können mithilfe des entwickelten Algorithmus weitere Fehler bei der Spezifikation von Form- und Lagetoleranzen in Form von PMI im 3D-CAD-Modell erkannt werden (vgl. Abschnitt 4.3.1.3). So können semantische Fehler bei der Spezifikation der Form- und Lagetoleranzen im 3D-CAD-Modell schnell identifiziert und korrigiert werden, bevor das 3D-CAD-Modell an das PDM-System zur weiteren Nutzung im Produktentstehungsprozess übergeben wird.

5.3.3 Prozessplanung auf Basis der Informationen im 3D-CAD-Modell

In diesem Abschnitt erfolgt die Validierung der Methode zur 3D-CAD-basierten Prozessplanung aus Abschnitt 4.3.2. Basierend auf dem Konzept zur Bereitstellung arbeitsvorgangsspezifischer 3D-CAD-Modelle erfolgt zunächst die Validierung der 3D-modellbasierten Vorauswahl von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln (vgl. Abschnitt 4.3.2.3). Im Anschluss wird die Methode zur 3D-Visualisierung von Arbeitsvorgängen für Fertigungs- und Prüfaufträge (vgl. Abschnitt 4.3.2.5) am Validierungsbeispiel (Stirnradwelle) getestet. Für die Validierung der modellbasierten Prozessplanung wird ein AVOM aus dem 3D-CAD-Mastermodell abgeleitet, und die beschriebenen Methoden anhand des AVOMs validiert.

5.3.3.1 Vorstellung des Arbeitsvorgangsmodells

Für die Validierung der Methode zur 3D-modellbasierten Prozessplanung (vgl. Abschnitt 4.3.2) wird das 3D-CAD-Mastermodell der Stirnradwelle (vgl. Abschnitt 5.2) genutzt. Aus dem 3D-CAD-Mastermodell wird ein AVOM (vgl. Abschnitt 4.3.2.4) für den Hartdrehprozess der Stirnradwelle generiert (siehe Abbildung 59). Beide Modelle werden dem Prozessplaner z. B. über ein PDM-System zur Verfügung gestellt. Die arbeitsvorgangsspezifischen Modelle werden in unterschiedlichen Dateiformaten (*.prt, *.stp und *.jt) abgeleitet und im PDM-System gespeichert.

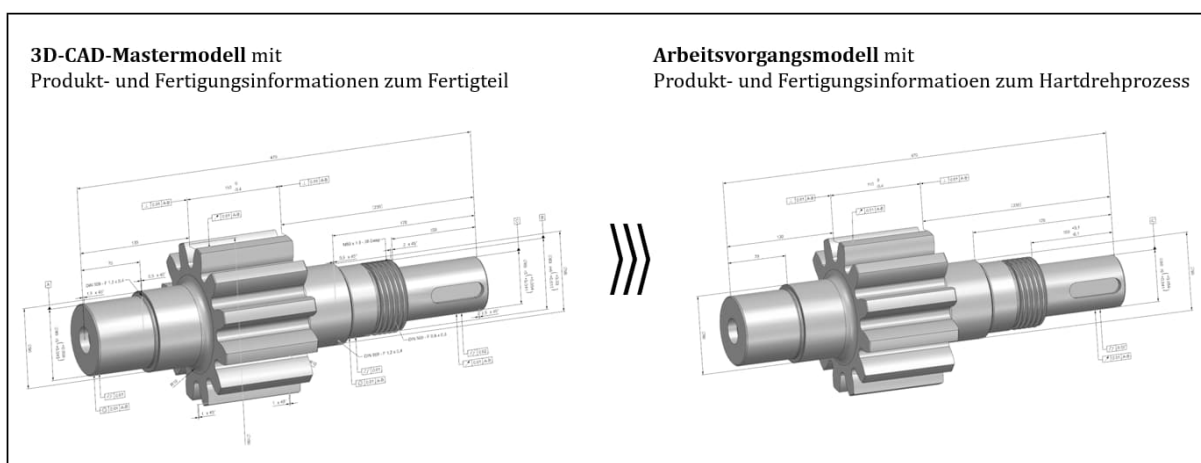


Abbildung 59: Gegenüberstellung des 3D-CAD-Mastermodells und des Arbeitsvorgangsmodells für das Hartdrehen

Im weiteren Verlauf der Validierung werden gezielt nur die PMI des rechten Wellenabsatzes im AVOM für den Hartdrehprozess betrachtet (siehe Abbildung 60).

Dieser Teilbereich des AVOMs genügt, um die Nutzungsmöglichkeit der entwickelten Methode zur 3D-modellbasierten Arbeits- und Prüfplanung zu untersuchen. Neben linearen Längen- und Durchmesserbemaßungen werden Form- und Lagetoleranzen, z. B. die Zylindrizität und der Rundlauf, innerhalb der Validierung betrachtet.

In Abbildung 60 werden die zu untersuchenden PMI dargestellt und mit zusätzlichen Nummern gekennzeichnet. Die Nummerierung dient hier zur besseren Veranschaulichung innerhalb dieser Arbeit. Die maschinenlesbare Eindeutigkeit der PMI wird über die eindeutige PMI-ID gewährleistet. Für den Hartdrehvorgang am dargestellten Wellenabschnitt werden in der Konstruktion insgesamt sechs PMI definiert, die zur Einhaltung der Bauteilanforderungen im AVOM für das Hartdrehen notwendig sind. Insgesamt sind zwei Längenmaße, zwei Durchmessermaße sowie jeweils eine Zylindrizität und ein Rundlauf als Form- und Lagetoleranz im Wellenabschnitt des AVOMs hinterlegt.

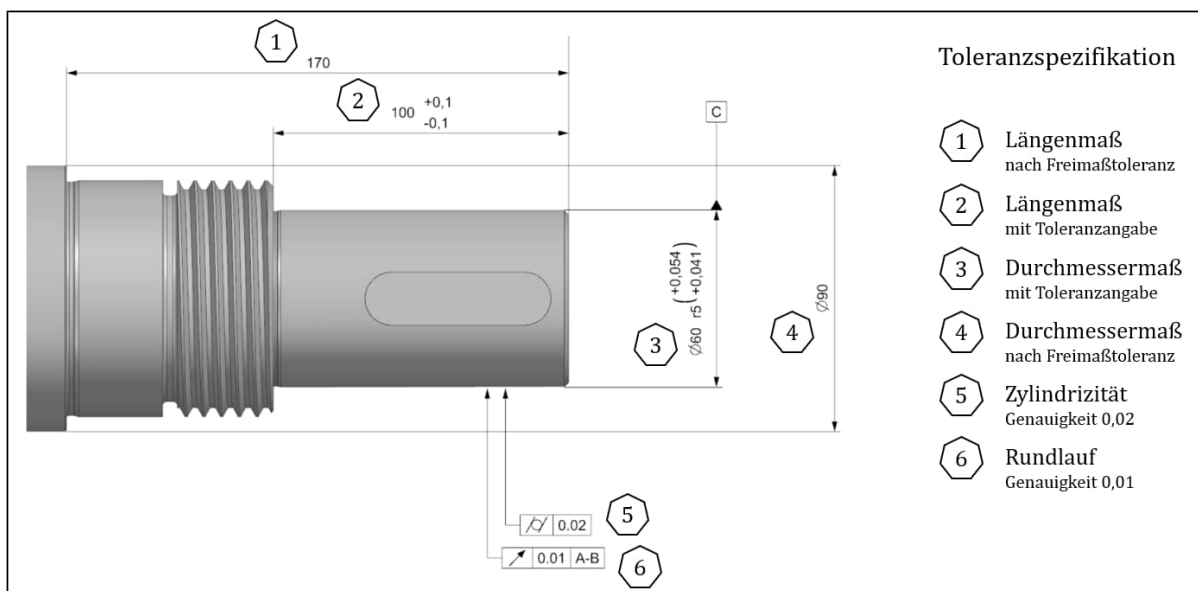


Abbildung 60: Wellenabschnitt aus dem Arbeitsvorgangsmodell für das Hartdrehen mit gekennzeichneten Produkt- und Fertigungsinformationen

Die in Abbildung 60 dargestellten PMI werden nachfolgend zur 3D-CAD-basierten Prüfplanung detailliert betrachtet. Hier spielen die Auswahl der kritischen Prüfmerkmale (CTQ-Merkmale) sowie die Zuweisung fähiger Prüf- und Messmittel auf Basis der Informationen im 3D-CAD-Modell eine wesentliche Rolle.

5.3.3.2 3D-modellbasierte Zuweisung von Mess- und Lehrmitteln

Ausgehend von der Methode zur 3D-CAD-basierten Prozessplanung (vgl. Abschnitt 4.3.2) soll der Prozessplaner bei der Vorauswahl von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln unterstützt werden. Dabei werden dem Prüfplaner auf Basis der geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im 3D-CAD-Modell, fähige Prüfmittel (z. B. Mess- und Lehrmittel) zur Ausführung des Prüfauftrags vorgeschlagen. Insbesondere in frühen Entwicklungsphasen ist diese Vorgehensweise bedeutsam, da so eine belastbare

Prüfplanung und eine rechtzeitige Beschaffung notwendiger Ressourcen erfolgen und die damit verbundenen Investitionen getätigt werden können.

Für die Validierung der Methode zur modellbasierten Vorauswahl von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln werden die sechs PMI in Kombination mit den Geometrieelementen aus Abbildung 60 analysiert. Aus den Anforderungen im 3D-CAD-Modell ergeben sich unterschiedliche Fertigungstechnologien, die zur Herstellung der geforderten Bauteilqualität möglich sind. Die Zuweisung der Fertigungsressourcen für die spanende Bearbeitung des Wellenabsatzes aus Abbildung 60 erfolgt innerhalb der Arbeitsplanung. Nachfolgend wird jedoch der Fokus auf die Auswahl der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel im Bereich der Prüfplanung gelegt. Diese Ressourcen (z. B. Mess- und Lehrmittel) sind zur Ermittlung der geforderten Bauteilqualität notwendig. In Tabelle 2 sind die Prüfmerkmale bzw. PMI aus Abbildung 60 mit den zugehörigen PMI-IDs, den tolerierten Geometrieelementen, den geforderten Nennmaßen sowie den zulässigen Toleranzen im 3D-CAD-Modell des Validierungsbeispiels aufgelistet.

Tabelle 2: Zusammenfassung und Zusammenhänge der PMI für den Wellenabschnitt der Stirnradwelle aus Abbildung 60

Nr.	PMI-ID	Tolerierte Geometrieelemente	Nennmaß/ Toleranzart	zul. Toleranz
1	62441	2 parallele Flächen	170 m	nicht angegeben
2	62382	2 parallele Flächen	100 mm	+ 0,1/-0,1 mm
3	62479	1 Zylinderfläche	60 mm	+0,054/+0,041 mm
4	62483	1 Zylinderfläche	90 mm	nicht angegeben
5	62449	1 Zylinderfläche	Zylindrizität	0,02 mm
6	62445	1 Zylinderfläche	Rundlauf	0,01 mm

Im weiteren Verlauf ist zu ermitteln, welche Prüfmerkmale bzw. PMI für die fertigungsbegleitende Messwerterfassung geeignet sind und welche der fertigungsnachgelagerten Prüfung, z. B. der Prüfung auf Koordinatenmessgeräten (3D-Vermessung), zuzuordnen sind. Diese Unterscheidung ist für die Kennzeichnung der CTQ-Merkmale (vgl. Abschnitt 2.4.2) im jeweiligen Arbeitsvorgang von Bedeutung. Somit wird sichergestellt, dass der Werker an seinem Arbeitsplatz lediglich die Prüfaufgaben zugeteilt bzw. angezeigt bekommt, die für seinen Arbeitsvorgang qualitätsrelevant sind, am jeweiligen Arbeitsplatz ausgeführt werden können und aus dem AVOM hervorgehen.

Sind im AVOM Form- und Lagetoleranzen (z. B. Zylindrizitäten) hinterlegt, ist die Prüfung dieser Toleranzen in der Regel in einem fertigungsnachgelagerten Prüf- bzw. Qualitätssicherungsprozess vorzunehmen. Die CTQ-Merkmale werden daher dem Werker an der Fertigungsmaschine zur fertigungsbegleitenden Prüfung nicht angezeigt, obwohl sie qualitätsrelevant sind. Die Prüfung dieser Merkmale (siehe Abbildung 60 – Bereich 5 und Bereich 6) unterliegt der Prüfanweisung zu einem separaten Arbeitsvorgang wie der Endprüfung auf 3D-Koordinatenmessgeräten (siehe Tabelle 3). Diese Prüfmerkmale werden im AVOM für die 3D-Messung als CTQ-Merkmale markiert und sind entsprechend in diesem Arbeitsvorgang hinterlegt und zu prüfen.

Aufgrund der Anforderungen (z. B. Abmaße und Toleranzspezifikationen) im AVOM für das Hartdrehen ergeben sich die in Tabelle 3 aufgelisteten Betriebs- und Fertigungshilfsmittel für die Qualitätsprüfung am Wellenabsatz (siehe Abbildung 60). Zur fertigungsbegleitenden Prüfung werden hier eine Bügelmessschraube und ein Messchieber als Messmittel eingesetzt. Für die 3D-Messung auf dem Koordinatenmessgerät sind entsprechende Messtaster notwendig. Die Vorauswahl fähiger Mess- und Lehrmittel ergibt sich aus dem Mapping zwischen den PMI im 3D-CAD-Modell und den beschreibenden Sachmerkmalen. In Tabelle 3 sind neben der Art der Prüfung (fertigungsbegleitend oder fertigungsnachgelagert) und der Prüfrelevanz (CTQ) auch die benötigten Mess- und Lehrmittel gelistet, die zur Ausführung der Prüfaufgabe relevant sind (vgl. Abschnitt 4.3.2.3).

Tabelle 3: Übersicht zu den prüfschrittrelevanten Informationen zur Ausführung der geforderten Prüfaufgabe

Nr.	PMI-ID	Art der Prüfung	CTQ	Mess- und Lehrmittel
1	62441	fertigungsbegleitend	✓	Messchieber 1
2	62382	fertigungsbegleitend	✓	Messchieber 3
3	62479	fertigungsbegleitend	✓	Bügelmessschraube 1
4	62483	fertigungsbegleitend	✓	Bügelmessschraube 2
5	62449	fertigungsnachgelagert	✗	Messtaster 4
6	62445	fertigungsnachgelagert	✗	Messtaster 4

Die Eigenschaften und Sachmerkmale (Fähigkeiten) der zur Prüfung benötigten Mess- und Lehrmittel (vgl. Abschnitt 2.4.3) können dem FDM-System (z. B. *Teamcenter MRL*) entnommen werden. Dort können die Sachmerkmale nach den Vorgaben aus DIN 4000 klassifiziert und mit den Anforderungen aus dem 3D-CAD-Modell ‚gemappt‘ bzw. abgeglichen werden (vgl. Abschnitt 4.3.2.3). Eine sorgfältige und vollständige Pflege der Sachmerkmale zu den im Unternehmen vorhandenen Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln ist hierfür elementar. Zur Sicherstellung einer vollständigen und fehlerfreien Pflege der Sachmerkmalsdaten unterstützt die entwickelte Methode zum elektronischen Sachmerkmal austausch für Betriebs- und Fertigungshilfsmittel aus Abschnitt 4.3.2.2.

Zur Prüfung der Zylindrizität am Wellenabsatz (siehe Abbildung 61 – Bereich 5) sind neben dem Messmittel (dem Messtaster 4 aus Tabelle 3) auch ein Koordinatenmessgerät und eine Vorrichtung zur Spannung der Stirnradwelle erforderlich. Neben den zu berücksichtigenden Bauteilanforderungen sind beim Aufbau der Messeinrichtung zudem die Trennstellen zwischen Messgerät, Messtaster und Vorrichtung zu beachten, um eine ordnungsgemäße und sinnvolle Konfiguration der Messeinrichtung sicherzustellen. Die Informationen hierzu können ebenfalls den Sachmerkmallisten der entsprechenden DIN 4000-Normreihe entnommen werden.

In Abbildung 61 sind die Zusammenhänge zwischen der Bauteilgeometrie und der zugehörigen Ressourcenauswahl zur Planung der Messeinrichtung dargestellt. Neben

Messmittel 4 werden Messgerät 2 (z. B. Koordinatenmessgerät) und Vorrichtung 1 (z. B. Spannfutter) für die auszuführende Prüfaufgabe ausgewählt bzw. vorkonfiguriert.

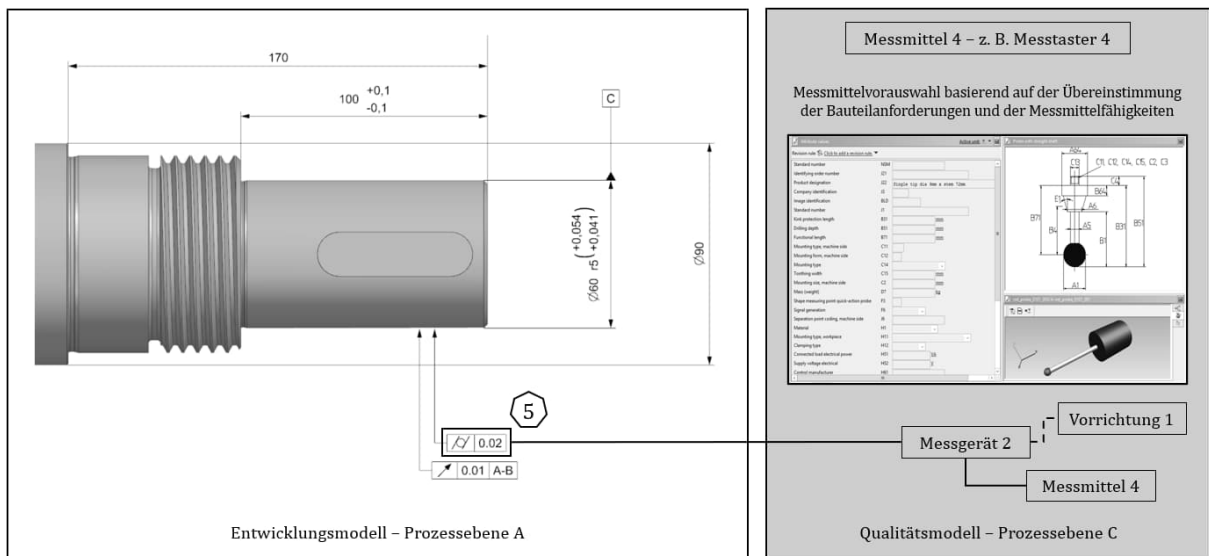


Abbildung 61: Exemplarische Darstellung der 3D-modellbasierten Planung einer Messeinrichtung zur Zylindrizitätsmessung am Wellenabsatz

Neben den in Tabelle 3 gelisteten Mess- und Lehrmitteln existieren je nach Umfang des Bestands der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel in einem Unternehmen weitere Ressourcen, die den Anforderungen zur korrekten Ausführung der Messaufgabe entsprechen und folglich eingesetzt werden können. Sind z. B. mehrere Werke an ein FDM-System angebunden, kann eine standortübergreifende Prozess- bzw. Ressourcenplanung erfolgen (vgl. Abschnitt 4.3.2.1). Fertigungs- oder Prüfaufträge können somit ausgelagert und auf andere Werke verteilt bzw. umdisponiert werden.

5.3.3.3 Direkte Messwerterfassung auf Basis der eindeutig gekennzeichneten Produkt- und Fertigungsinformationen

Für die Umsetzung der in Abschnitt 4.3.2.5 beschriebenen Methode zur Messwerterfassung wird eine Qualitätsapplikation (Q-App) auf Basis der Low-Code-Plattform *Mendix* entwickelt, die zur Unterstützung bei den Abläufen im Bereich Prüfplanung und Prüfabwicklung dient. Diese Q-App bildet die Schnittstelle zwischen den CAD- und CAQ-Systemen und kann zusätzlich an das ERP-System angebunden werden. Ziel der Q-App ist die vereinfachte und flexible Erstellung von Prüfplänen und die direkte Zuweisung der ermittelten Messergebnisse im Bereich der Qualitätssicherung sowie deren Nutzung in einer bestehenden IT-Infrastruktur.

Die Q-App ermöglicht dem Prüfplaner die 3D-CAD-Modelle zu visualisieren und Prüfpläne auf Basis der geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im 3D-CAD-Modell zu erstellen, um die Prüfabwicklung intuitiver und einfacher zu gestalten. Die innerhalb der App gelisteten Prüfmerkmale sind assoziativ zu den PMI und deren eindeutigen IDs im 3D-CAD-Modell (vgl. Abschnitt 4.2). Das 3D-CAD-Modell des zu prüfenden Bauteils

inklusive seiner PMI wird innerhalb der Q-App mithilfe eines 3D-Viewer visualisiert. Die Visualisierung erfolgt z. B. über das neutrale Austauschformat JT (vgl. Abschnitt 2.6.3).

Die Q-App bietet die Möglichkeit zur direkten Eingabe ermittelter Messwerte und Lehrdaten, die mit der Visualisierung der 3D-CAD-Modelle in einer benutzerfreundlichen Oberfläche integriert sind. Zur eindeutigen Zuweisung der Messwerte zu den PMI im 3D-CAD-Modell wird die Methode aus Abschnitt 4.2.2 angewendet, bei der die eindeutige Kennzeichnung der PMI vom CAD-Erzeugersystem ins neutrale Austauschformat (z. B. JT-Format) übertragen wird. Diese Funktionalität ist notwendig, um die eindeutige Identifikation der PMI und den zugehörigen Messwerten miteinander verknüpfen zu können. Nachfolgend werden zwei Szenarien unterschieden: Zum einen wird der app-basierte Ablauf der Prüfplanung erläutert und zum anderen werden die app-basierten Prozesse der Prüferfassung beschrieben.

Zur Realisierung der Prüfplanung nutzt die entwickelte Q-App die PMI im 3D-CAD-Modell. Zum Beispiel werden die im 3D-CAD-Modell (z. B. das AVOM für den Hartdrehprozess) enthaltenen PMI dem Prüfplaner als definierte Vorauswahl der zu prüfenden Qualitätsmerkmale aus Abschnitt 5.3.3.1 angezeigt. Der Prüfplaner kann die PMI mithilfe der Prüfplanungsfunktion in der Q-App als kritisch kennzeichnen (siehe Abbildung 62). Zusätzlich können dem Prüfvorgang notwendige Mess- und Lehrmittel durch den Prüfplaner zugewiesen werden. Die Methode zur 3D-CAD-basierten Vorauswahl der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel aus Abschnitt 4.3.2.3 kann hierzu unterstützend eingesetzt werden.

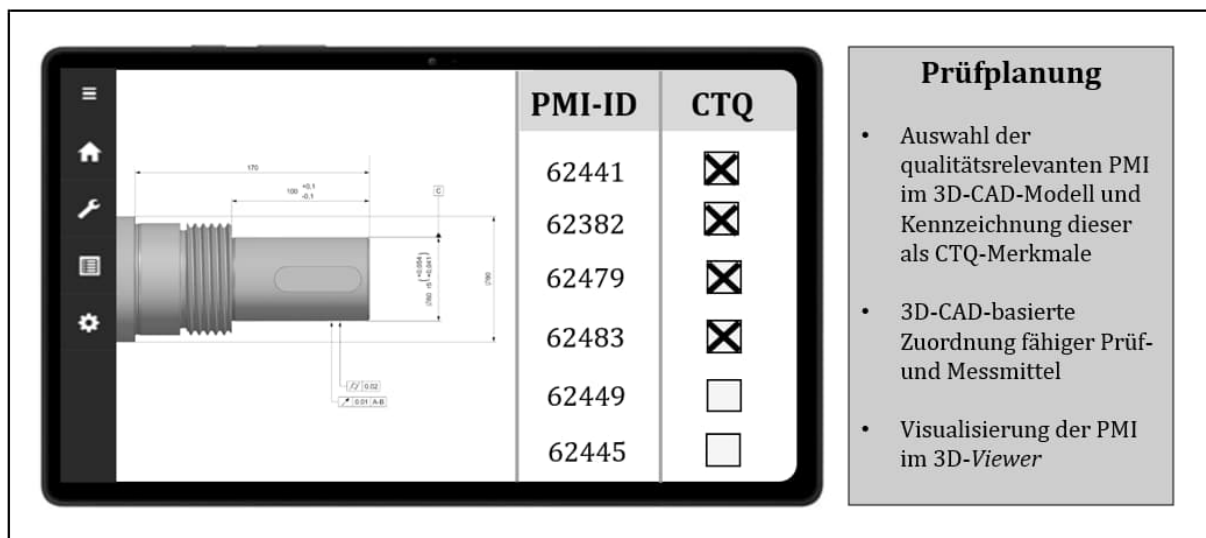


Abbildung 62: Benutzeroberfläche der Q-App zur Kennzeichnung der qualitätskritischen Merkmale im 3D-CAD-Modell auf Basis der PMI-ID

Die als kritisch bzw. als CTQ gekennzeichneten Merkmale werden dem Prüfer direkt am 3D-CAD-Modell im Viewer angezeigt. Durch die zusätzlich visuelle Darstellung der prüfrelevanten Informationen im 3D-CAD-Modell wird der Werker schrittweise bei der Durchführung der Prüfaufgabe unterstützt. Die ermittelten Messwerte können direkt zum jeweiligen Prüfschritt und zu den definierten Merkmalen abgespeichert werden. Bei

dieser Qualitätsprüfung wird der Werker über die Q-App aufgefordert, die ermittelten Messwerte direkt nach der Bearbeitung in die Benutzeroberfläche der Q-App einzutragen. Zusätzlich bekommt der Anwender im *Viewer* direkt angezeigt, welche Ressourcen (z. B. Mess- und Lehrmittel) für den jeweiligen Prüfschritt benötigt werden (siehe Abbildung 63).

Die Messergebnisse werden den Features und Geometrieelementen im 3D-CAD-Modell über die PMI-IDs eindeutig zugewiesen und entsprechend im QMS-System abgespeichert (vgl. Abschnitt 4.3.2.1). Mit dem Start des Fertigungsauftrags, z. B. über den Scan des QR-Codes auf der Laufkarte, wird dem Werker der Arbeits- und Prüfplan visualisiert. Mit Eingabe der entsprechenden Materialnummer des zu prüfenden Bauteils bzw. des auszuführenden Arbeitsschritts werden dem Werker die entsprechenden Informationen ausgegeben. Abbildung 63 zeigt die Benutzeroberfläche der Q-App mit den notwendigen Informationen für den auszuführenden Prüfschritt.

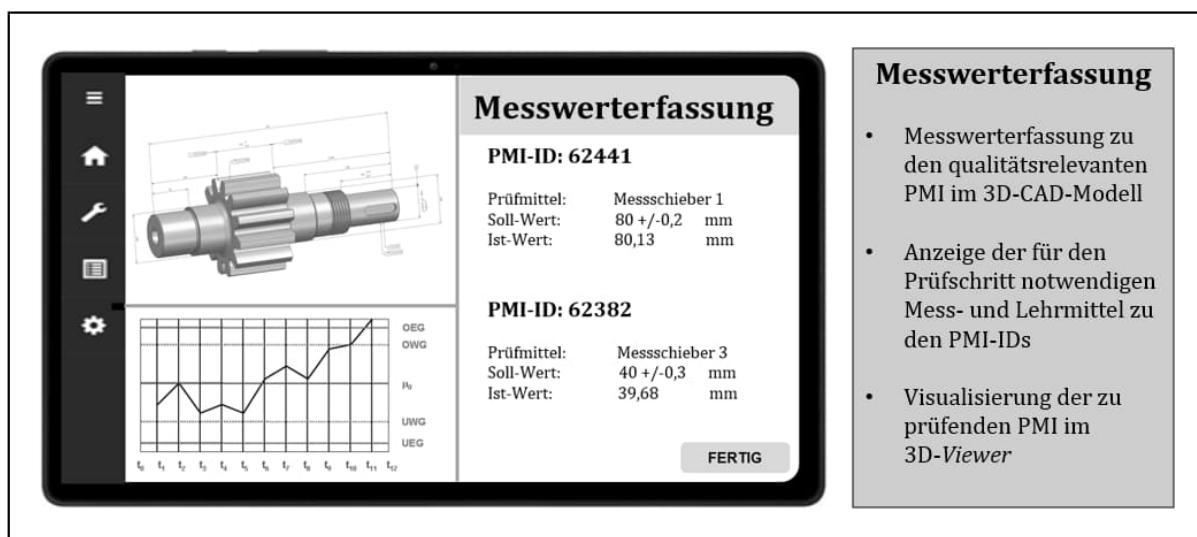


Abbildung 63: Benutzeroberfläche der Q-App zur direkten Messwernerfassung zu den definierten CTQ-Merkmalen im 3D-CAD-Modell

Anders gestaltet sich der Ablauf der automatisierten 3D-Messung auf einem 3D-Messgerät im Messraum. In der Prüfplanung werden die qualitätskritischen Merkmale über die Erfahrung des Prüfplaners oder über ein Regelwerk festgelegt. Das 3D-CAD-Mastermodell wird um die Anzahl der PMI reduziert, die für das AVOM der 3D-Messung notwendig sind. Mithilfe der CAQ-Software des 3D-Messgeräts werden die Ist-Daten zum Bauteil gemäß Prüfplan erfasst. Auch hier werden die hinterlegten PMI-IDs für die eindeutige Zuordnung der Messergebnisse zum 3D-CAD-Modell genutzt.

6 Diskussion und Fazit zu den Ergebnissen im Bereich der 3D-modellbasierten Arbeitsweise

Die im Mittelpunkt dieser Arbeit stehende Entwicklung einer Methode zur durchgängigen und eindeutigen Rückverfolgbarkeit der produkt- und fertigungsrelevanten 3D-CAD-Modellinformationen im Produktentstehungsprozess (vgl. Abschnitt 4.2) wurde innerhalb der Validierung erfolgreich auf die Stirnradwelle (vgl. Abschnitt 5.2) angewendet. Prototypische Softwarelösungen und Schnittstellen belegen die Realisierbarkeit und Produktfähigkeit der entwickelten FII-Methode. Die Eindeutigkeit der Informationen im 3D-CAD-Modell wird über den CAD-nativen sowie über den CAD-systemneutralen Ansatz beim 3D-Datenaustausch gewährleistet. Die nativen IDs der 3D-CAD-Modellinformationen aus dem CAD-Erzeugersystem können somit als führendes und maschinenlesbares Kommunikationsmittel (z. B. für die Ermittlung von Fertigungsfehlern) entlang der CAx-Prozesskette genutzt werden.

Die FII-Methode über neu generierte FII-Attribute im 3D-CAD-Modell (vgl. Abschnitt 4.2.2.3) bietet das derzeit größte Potenzial bzgl. ihrer Umsetzung. Die PMI-IDs aus dem CAD-Erzeugersystem werden dabei als Wert in den FII-Attributen im 3D-CAD-Modell gespeichert und für den Datenaustausch ‚eingefroren‘. Die FII-Attribute inkl. ihrer ID-Werte sind abhängig vom Datenformat entweder auf PMI-Ebene oder auf Part-Ebene im 3D-CAD-Modell zu generieren bzw. abzuspeichern, um für prozessbegleitende CAx-Anwendungen lesbar und verarbeitbar zu sein (vgl. Abschnitt 4.2.2.1 und Abschnitt 5.3.1). Im Validierungsbeispiel wurde zur Generierung der eindeutigen PMI-ID der FII-Ansatz mit *User-Defined Attributes* (UDAs) umgesetzt. Der FII-Ansatz mit der Anwendung von FII-Informationfeatures erzeugt derzeit noch zu viele Anforderungen an die Funktionen der neutralen CAD-Austauschformate (z. B. STEP AP242 oder JT) und an die CAx-Systemhersteller, die die Funktionen zur Erfüllung der Anforderungen noch entwickeln müssen.

Die Schaffung der Eindeutigkeit über FII-Attribute auf PMI-Ebene (vgl. Abschnitt 4.2.2.3) im 3D-CAD-Modell ist mit den Funktionalitäten existierender CAD-Systeme derzeit nur begrenzt möglich. Darüber hinaus zeigt sich, dass auch die Konvertierung der Identifikationsinformationen in das STEP-AP242-Format über die FII-Attribute auf PMI-Ebene heute noch nicht möglich ist. Eine Manipulation der STEP-Datei ist erforderlich, um die FII auf PMI-Ebene ins CAD-neutrale Austauschformat zu übertragen (vgl. Abschnitt 4.2.3). Sind die FII-Attribute im STEP-AP242-File enthalten, bestehen weitere Herausforderungen und Kompatibilitätsprobleme bei der Rückkonvertierung einer STEP-Datei in ein natives CAD-Format. Die CAD-Systeme können derzeit nicht auf die FII im STEP-File zugreifen. Der FII-Ansatz über FII-Attribute auf PMI-Ebene im 3D-CAD-Modell (vgl. Abschnitt 4.2.2.3) erfordert daher zusätzlichen Entwicklungsaufwand bei den Herstellern und Entwicklern der CAD-Systeme sowie des CAD-neutralen Austauschformats STEP AP242. Hingegen zeigt sich, dass die FII-Attribute auf PMI-Ebene im JT-Format lesbar sind und die IT-Systeme ohne Manipulationsaufwand auf die PMI-IDs im JT-File zugreifen können (vgl. Abschnitt 5.3.1.2).

Die Validierungsergebnisse aus Abschnitt 5.3.1.3 zeigen, dass die FII-Methode über FII-Attribute auf Part-Ebene bereits von einigen CAD-Systemen (z. B. *Siemens NX* oder *CATIA V5*) unterstützt wird. Mit der Erweiterung des STEP-AP242-Formats um die FII-Attribute auf Part-Ebene (vgl. Abschnitt 4.2.3 und Abschnitt 5.3.1.2), können die PMI-IDs systemneutral transportiert und von den CAX-Systemen eindeutig interpretiert werden. Weiterführende Analysen zeigen, dass derzeit nicht alle CAX-Systeme die FII-Attribute lesen und interpretieren können. Die Umsetzbarkeit der FII-Methode über FII-Attribute in den CAD-Systemen *Siemens NX 1953* und *CATIA V5* sollte die Hersteller anderer CAD-Systeme daher motivieren, diese Funktionalität auch in ihren CAD-Systemen zu implementieren. Auch im STEP-AP242-Format sollte diese Funktionalität angepasst und erweitert werden, sodass nicht nur über individuell entwickelte Konverter der CAD-Systeme auf die PMI-IDs im 3D-CAD-Modell zugegriffen werden kann.

Zur Absicherung der semantisch korrekten Bauteiltolerierung nach den Regeln aus DIN EN ISO 1101 wurde im Rahmen dieser Dissertation eine Methode entwickelt, die das 3D-CAD-Modell im CAD-Erzeugersystem überprüft (vgl. Abschnitt 4.3.1). Damit können fehlerhaft oder unvollständig definierte Toleranzangaben im 3D-CAD-Modell noch vor dem Datenaustausch identifiziert werden, und es kann eine Korrektur vorgeschlagen werden. Die entwickelte Methode zum Toleranz-Check wurde in Abschnitt 5.3.2 beispielhaft auf die Stirnradwelle angewendet. Die bewusst fehlerhaft definierten Toleranzspezifikationen im 3D-CAD-Modell wurden eindeutig durch den Überprüfungsalgorithmus erkannt, sodass entsprechende Fehlermeldungen zur interaktiven Anwendung im CAD-System ausgegeben wurden.

Die entwickelte Methode zur semantisch korrekten Toleranzspezifikation ist derzeit nur für den Bereich der Einzelteilkonstruktion ausgelegt. Sie ist für den Montagebereich zu erweitern. Hierbei ist eine automatische Zuweisung bestimmter Toleranzangaben auf Bauteiloberflächen denkbar, die auf Kontaktbedingungen innerhalb einer Baugruppe basieren. Im Hinblick auf die derzeit noch überwiegend manuell ausgeführte Toleranzspezifikation im 3D-CAD-Modell oder auf der 2D-Zeichnung könnte somit in Zukunft Abhilfe geleistet werden.

Auch die Methode zur 3D-modellbasierten Prozessplanung (vgl. Abschnitt 4.3.2) zeigte in der Validierung (vgl. Abschnitt 5.3.3) vielversprechende Ergebnisse. Die Informationen im 3D-CAD-Modell können zur Planung notwendiger Betriebs- und Fertigungshilfsmittel genutzt werden und den Arbeits- bzw. Prüfplaner bei der Ressourcenzuweisung unterstützen. Die Anwendung dieser Methode in einem Brownfield-Szenario ist jedoch stark von der Datenpflege bzgl. der im Unternehmen vorhandenen Betriebs- und Fertigungshilfsmittel abhängig (vgl. Abschnitt 5.3.3.2). Der elektronische Sachmerkmal austausch für Betriebs- und Fertigungshilfsmittel (vgl. Abschnitt 4.3.2.2) zur automatisierten Anlage der Objektdaten kann hier wertvolle Unterstützung leisten.

Die Methode zur 3D-modellbasierten Prozessplanung ist zudem von der Vollständigkeit und Logik der 3D-CAD-Modellinformationen abhängig. Eine logische Kombination der geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im 3D-CAD-Modell erfordert detailliert ausgearbeitete Regelwerke, die einem separaten Forschungsthema

unterliegen. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode soll in erster Hinsicht ein Konzept liefern, durch das der Entscheidungsspielraum bei der Auswahl der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel eingegrenzt wird (vgl. Abschnitt 4.3.2.3). Bei der automatisierten Messprogrammgenerierung innerhalb der CAx-Systeme (z. B. CAQ-System) soll es in Zukunft möglich sein, direkt auf die FDM-Daten der erforderlichen Ressourcen (z. B. Sachmerkmallisten) zuzugreifen. Mithilfe des Mapping-Ansatzes zwischen den FDM-Daten und den 3D-CAD-Modellinformationen (vgl. Abschnitt 4.3.2.3) werden so die benötigten Ressourcen (z. B. Messmittel) direkt der auszuführenden Mess- oder Prüfaufgabe zugewiesen (vgl. Abschnitt 5.3.3.2).

Die gezielte Informationsbereitstellung in Form von Arbeitsvorgangsmodellen (vgl. Abschnitt 4.3.2.4) reduziert individuelle Fehlinterpretationen und Fehleingaben, z. B. bei der fertigungsbegleitenden Messwerterfassung in der Werkstatt. Arbeitsvorgangsmodelle in Kombination mit einer direkten Anzeige der zu bearbeitenden oder zu prüfenden Informationen und Elemente im 3D-CAD-Modell sowie die Möglichkeit zur direkten Zuweisung der ermittelten Ist-Werte zum geforderten Soll-Wert mit zusätzlichem Hinweis zur einzusetzenden Ressource tragen zur Förderung der 3D-CAD-basierten Arbeitsweise bei. Dies wurde in Abschnitt 5.3.3.3 belegt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem letzten Kapitel werden abschließend die grundlegenden Problemstellungen, die entwickelten Methoden und die erreichten Ziele dieser Arbeit zusammengefasst. Darüber hinaus werden mögliche Weiterentwicklungspotenziale für zukünftige Forschungstätigkeiten im Bereich der 3D-modellbasierten Fertigung und Qualitätssicherung aufgezeigt.

7.1 Zusammenfassung

Innerhalb dieser Dissertation wurde das 3D-CAD-Modell zu einem funktionalen Informationsträger erweitert, der als führende Informationsquelle die Informationen der 2D-Zeichnung in Form von Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) aufnimmt und so die bestehenden Lücken im Produktentstehungsprozess schließt (vgl. Abschnitt 4.1).

Nach der Beschreibung der Motivation zur Entstehung dieser Arbeit (vgl. Kapitel 1) wurde der Stand der Technik (vgl. Kapitel 2) zur Erkennung bestehender Optimierungspotenziale analysiert. Diese wurden anschließend mit dem Anforderungsprofil an die Methodenentwicklung (vgl. Kapitel 3) belegt. Es zeigten sich unterschiedliche Problemstellen im Bereich des 3D-CAD-Datenaustauschs, die als mögliche Ansatzpunkte für verschiedene Lösungsstrategien dienen. System- und softwareabhängige Veränderungen der ursprünglichen IDs der geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im 3D-CAD-Modell (vgl. Abschnitt 2.5.6) sind die Ursache für die Beeinträchtigung der eindeutigen Kommunikation auf informationstechnischer Ebene in den IT-Systemen im Produktentstehungsprozess. Weiterhin zeigte sich, dass semantische Fehler bei der Bauteiltolerierung im 3D-CAD-Modell zu Informationsverlusten beim Datentransfer der CAD-Files in andere CAx-Systeme führen.

Die Methodenentwicklung (vgl. Kapitel 4) wurde in zwei wesentliche Bereiche gegliedert: Zum einen wurde die FII-Methode (*Functional Identification Information*) zur eindeutigen Identifikation der Informationen im 3D-CAD-Modell erarbeitet, um Informations- und Prozessparameter von der Konstruktion über die Planung bis zur Fertigung und Qualitätssicherung eindeutig transportieren zu können. Hierzu wurde die vom CAD-Erzeugersystem generierte Identifikationsnummer (ID) der PMI ‚eingefroren‘ und im 3D-CAD-Modell gespeichert, sodass sich die ID beim Transfer des 3D-CAD-Modells in die prozessbegleitenden CAx-Systeme nicht verändert und die eindeutige Identifikation auch über IT-Systemgrenzen hinweg bestehen bleibt (vgl. Abschnitt 4.2). Die entwickelte FII-Methode über FII-Attribute (vgl. Abschnitt 4.2.2.3) unterstützt die Eindeutigkeit der 3D-CAD-Modellinformationen über systemneutrale CAD-Austauschformate wie STEP AP242 oder JT. Beim Export der nativen CAD-Datei in die genannten Dateiformate bleibt die eindeutige Kennzeichnung der 3D-CAD-Modellinformationen bestehen (vgl. Abschnitt 4.2.3). Auf Basis der eindeutigen ID der Produkt- und Fertigungsinformationen im 3D-CAD-Modell können so beispielsweise die ermittelten Messwerte aus der Qualitätssicherung den Anforderungen aus der Produktentwicklung eindeutig und

maschinenlesbar zugeordnet werden und bei der Erkennung möglicher Entwicklungs- oder Fertigungsfehler unterstützen.

Zum anderen wurden Methoden entwickelt, die störende Medienbrüche und individuelle Fehlerquellen beim Informationsaustausch reduzieren (vgl. Abschnitt 4.3). Hierzu gehören methodische Ansätze zur Sicherstellung der semantisch korrekten Toleranzspezifikation (vgl. Abschnitt 4.3.1) und neue Vorgehensweisen im Bereich der Prozessplanung (vgl. Abschnitt 4.3.2). Zur Sicherstellung der semantisch korrekten Toleranzspezifikation wurden Toleranzspezifikationsklassen definiert (vgl. Abschnitt 4.3.1.2). Hier wurde die Zulässigkeit der Kombination aus Toleranzsymbol und Geometrieelement nach den Vorgaben in DIN EN ISO 1101 informationstechnisch abgesichert (vgl. Abschnitt 4.3.1.3). Dies ermöglicht eine automatisierte Verarbeitung der Daten in Folgeprozessen, z. B. bei der automatischen Messprogrammgenerierung auf 3D-Koordinatenmessgeräten. Informationsverluste und Kommunikationsprobleme beim 3D-Datenaustausch und zeitintensive Rückfragen entlang der CAx-Prozesskette wurden aufgrund semantisch korrekter 3D-CAD-Modelle minimiert, sodass der Konstrukteur bei der 3D-CAD-Bauteiltolerierung unterstützt wird.

Zur optimierten Prozessplanung (vgl. Abschnitt 4.3.2) wurden methodische Ansätze entwickelt, die eine automatisierte Ressourcenvorauswahl (z. B. Mess- und Lehrmittel) auf Basis der geometrischen und nichtgeometrischen Informationen im 3D-CAD-Modell ermöglichen. Darüber hinaus wurden neue Vorgehensweisen beschrieben, die die gezielte Informationsbereitstellung von Fertigungsinformationen ermöglichen und den Prozessplaner sowie den Werker bei der Teilefertigung und der anschließenden Qualitätssicherung entlasten. Die feature-basierte Zuweisung der Betriebs- und Fertigungshilfsmittel konnte erfolgreich umgesetzt und auf industrielle Anwendungsfälle übertragen werden. Auch die gezielte Informationsbereitstellung (vgl. Abschnitt 4.3.24) in der Fertigung und Qualitätssicherung, z. B. bei der 3D-Visualisierung von Arbeitsvorgängen (u. a. Messwertermittlung), stellten sich als vielsprechend heraus.

Die entwickelten Methoden wurden anhand einer Stirnradwelle als 3D-CAD-Testmodell validiert (vgl. Kapitel 5). Dabei zeigte sich, dass die Methoden erfolgreich in den Konstruktionsprozess eingebunden und genutzt werden können. Die Tragfähigkeit und die Nutzungsmöglichkeit der erzielten Ergebnisse wurden anschließend diskutiert (vgl. Kapitel 6).

Zusammengefasst konnte die Tragfähigkeit der methodischen Ansätze in Bezug auf industrielle Anwendungsfälle mit der prototypischen Implementierung und der technischen Umsetzung des entwickelten Konzepts belegt werden. Die neuen Methoden (vgl. Kapitel 4) und die eingesetzten Werkzeuge konnten erfolgreich auf die Stirnradwelle als Validierungsbeispiel (vgl. Abschnitt 5.2) angewendet werden. Die Aufwände beim Austausch prozessrelevanter Informationen innerhalb der CAx-Prozesskette wurden folglich reduziert, da mithilfe der neuen 3D-CAD-basierten Methoden unnötige Medienbrüche entlang der Prozesskette vermieden werden. Darüber hinaus kann das neue Konzept in die bereits bestehenden Methoden der virtuellen Produktentstehung eingebunden werden, sodass sich der Arbeits- bzw. Modellierungsaufwand für den

Anwender (z. B. Konstrukteur) nicht erhöht. Unabhängig von der geometrischen Ausprägung der Bauteile (z. B. rotationssymmetrisch oder kubisch) wird der Anwender bei der Ausführung seiner täglichen Aufgaben unterstützt.

7.2 Ausblick

Die Unterstützung des Produktentstehungsprozesses auf Basis des 3D-CAD-Modells und die Ablösung der 2D-Zeichnung ist ohne hohen Entwicklungs- und Einführungsaufwand möglich (vgl. Kapitel 4 und Kapitel 5). Die in dieser Arbeit entwickelten Methoden zur eindeutigen Rückverfolgbarkeit der produkt- und fertigungsrelevanten 3D-CAD-Modellinformationen sowie zur Sicherstellung semantisch korrekt definierter 3D-CAD-Modelle ermöglichen einen fehlerfreien Datenaustauschprozess innerhalb heterogener IT-Systemlandschaften.

Allerdings besteht auch hier noch Optimierungspotenzial. Zu den in Abschnitt 4.3.1.3 ausgearbeiteten Überprüfungsalgorithmen für die Toleranzangaben im 3D-CAD-Modell nach DIN EN ISO 1101 könnten fehlerabhängige Korrekturvorschläge bei der Bauteiltolerierung im CAD-System implementiert und weiterentwickelt werden. Des Weiteren könnten im CAD-System durch weitere Entwicklungen bereits während der 3D-Bauteiltolerierung Vorschläge für mögliche Toleranzangaben unterbreitet werden. Dies ist beispielsweise auf Basis entsprechender Kontaktbedingungen auch auf die CAD-Baugruppe übertragbar. Zur Förderung der Akzeptanz der 3D-CAD-basierten Methoden könnten die Normen und Regelwerke in Zukunft direkt in die CAx-Systeme implementiert werden. Somit kann die Normkonformität digital geprüft und stets die aktuelle Version einer Norm in den IT-Systemen der Fertigung abgerufen werden.

Das Ergebnis der Validierung (vgl. Kapitel 5) zeigt, dass die erfolgreiche Implementierung der Methoden zur eindeutigen Identifikation der 3D-CAD-Modellinformationen (vgl. Abschnitt 4.2.2.3) in den IT-Systemen der Fertigung und Qualitätssicherung informationstechnisch umsetzbar ist. Für die erfolgreiche und durchgängige Anwendung in den CAx-Systemen sind jedoch Anforderungen an die CAx-Hersteller und an die Entwickler der neutralen CAD-Austauschformate zu stellen. Die IT-Systeme müssen befähigt werden, FII-Attribute zunächst im CAD-System zu erstellen, um diese in den prozessbeteiligten CAx-Systemen (z. B. CAQ-System) interpretieren zu können. In Bezug auf die parametrisierte Prozessplanung ist die Normungstätigkeit zur Beschreibung von Betriebs- und Fertigungshilfsmitteln im Bereich der spanenden Fertigung fortzusetzen und weiter auszubauen. So kann die lückenlose Vernetzung der 3D-CAD-Modelle mit den Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozessen innerhalb der spanenden Fertigung gewährleistet und die Produktentwicklung flexibler, effizienter und wettbewerbsfähiger gestaltet werden.

Die stetige Forderung nach höherer Agilität und Flexibilität in der Fertigung erfordert den Aufbau neuer sowie den Ausbau bestehender Regelwerke in der Arbeits- und Prüfplanung (vgl. Abschnitt 4.3.2). Innerhalb der Fertigung könnten dadurch fähige Fertigungstechnologien zur Realisierung der im 3D-CAD-Modell definierten

Anforderungen aufgezeigt und substituierbare Technologien (z. B. im Störfall) ermittelt werden (vgl. Abschnitt 4.3.2.4 und Abschnitt 4.3.2.5). Aufbauend auf den entsprechenden Fertigungstechnologien könnten zudem Maschinenfähigkeiten und Fertigungsreihenfolgen in einen 3D-CAD-basierten-Arbeitsplan übertragen werden.

Die echtzeit-gestützte Maschinenauswahl zur Terminierung der Fertigungsaufträge ermöglicht eine Erweiterung des beschriebenen Ansatzes zur 3D-Arbeitsplanerstellung (vgl. Abschnitt 4.3.2.4). Hierauf aufbauend könnten mit KI-Methoden weitere Schritte zur modellbasierten und logischen Interpretation der 3D-CAD-Modellinformationen erfolgen.

Die in dieser Arbeit entwickelten Methoden sorgen für eine stärkere Verzahnung der Produkt- und Prozessdaten im Produktentstehungsprozess und tragen zur fortschreitenden Etablierung der 3D-modellbasierten Arbeitsweise innerhalb der Fertigung und Qualitätssicherung bei. Sie bieten eine Grundlage zur Reduzierung individueller Fehlerquellen und zur Steigerung der Effizienz und Qualität innerhalb der digitalen Fertigung.

Literaturverzeichnis

- [1] Hildebrandt, A.; Landhäußer, W. : CSR und Digitalisierung - Der digitale Wandel als Chance und Herausforderung für Wirtschaft und Gesellschaft, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2017; ISBN: 978-3-662-53201-0.
- [2] Anderl, R.; Fleischer, J. : Leitfaden Industrie 4.0 - Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand, Frankfurt am Main, VDMA-Verl., 2015; ISBN: 978-3-8163-0677-1.
- [3] Apt, W.; Bovenschulte, M.; Hartmann, E. A.; Wischmann, S. : Forschungsbericht - Foresight-Studie "Digitale Arbeitswelt", 2016; ISSN: 0174-4992.
- [4] Kroker, M., WirtschaftsWoche WiWo : In knapp der Hälfte der deutschen Firmen fehlt Know-how für digitale Transformation, 2020; Online verfügbar unter: <https://blog.wiwo.de/look-at-it/2020/04/07/in-knapp-der-haelfte-der-deutschen-firmen-fehlt-know-how-fuer-digitale-transformation/>, Zuletzt geprüft am 19.11.2020.
- [5] Nagl, W.; Titelbach, G.; Valkova, K. : Digitalisierung der Arbeit - Substituierbarkeit von Berufen im Zuge der Automatisierung durch Industrie 4.0, 2017.
- [6] Kaubisch, F. : 3D-CAD- und NCM-Daten zur Steuerung von Messgeräten - Use of 3D-CAD and NCM-dates for open loop control of gauges, Grafenau, Morsak Verlag GmbH, 2015; ISBN: 978-3-86512-119-6.
- [7] Neubert, S.; Robl, P. : 3D-CAD-Modelle lenken die Fertigung, Verein Deutscher Ingenieure, 2018; Online verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/vdi-z/industrie-4-0/3d-cad-modelle-lenken-die-fertigung>, Zuletzt geprüft am 22.02.2022.
- [8] Zhu, W.; Bricogne, M.; Durupt, A.; Remy, S. et al. : Implementations of Model Based Definition and Product Lifecycle Management Technologies: a Case Study in Chinese Aeronautical Industry, 49, 2016, S.485–490; DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.664.
- [9] Saal, C.; Lipp, C.; Lohse, O.; Krause, S. : 3D Model-Based Product Definition and Production – a Mind Change with Technical Hurdles, 2020, S.1–4; DOI: 10.1109/SIMS49386.2020.9121460.

- [10] Blaeser-Benfer Andreas; Schröter Wolfgang; Vollborth Tim : Produktivität für kleine und mittelständische Unternehmen - Teil I: Handlungsleitfaden für den industriellen Mittelstand, 2012.
- [11] Saal, C. : Durchgängige Feature-ID von der 3D-CAD Konstruktion bis zur Qualitätssicherung, in: Proceedings of the 30th Symposium Design for X, 2019; DOI: 10.35199/dfx2019.19
- [12] Kitsios, V.; Haslauer, R. : 3D-Master - Zeichnungslose Produktbeschreibung mit CATIA V5, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014; ISBN: 978-3-658-05844-9.
- [13] Koll, S., Strehlitz, M., Quality Engineering, Quality Engineering : Viele Chancen und noch mehr Arbeit - Roundtable zur Digitalisierung in der Messtechnik, 2019; Online verfügbar unter: <https://quality-engineering.industrie.de/termine-veranstaltungen/messe-control/viele-chancen-und-noch-mehr-arbeit/>, Zuletzt geprüft am 03.12.2020.
- [14] Boos, W.; Arntz, K.; Prümmer, M.; Wollbrink, M. et al. : Erfolgreich CAx-Prozessketten gestalten im Werkzeugbau, Aachen, WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, 2018; ISBN: 978-3-946612-31-5.
- [15] Annalise, S.; Jennifer, H. : CADValidator: A Critical Aid for the Model-Based Enterprise, 2016; Online verfügbar unter: https://hobbydocbox.com/Drawing_and_Sketching/78412480-Cadvalidator-a-critical-aid-for-the-model-based-enterprise.html, Zuletzt geprüft am 21.02.2022.
- [16] Fusch, T. : Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie, Technische Universität München, Dissertation, 2004.
- [17] Quix, C. J. : Metadatenverwaltung zur qualitätsorientierten Informationslogistik in Data-Warehouse-Systemen, RWTH Aachen, Dissertation, 2003.
- [18] Mahmoud, H.; Dhokia, V.; Nassehi, A. : STEP-based Conceptual Framework for Measurement Planning Integration. Procedia CIRP, 43, 2016, S.315–320; DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.037.
- [19] Gembrys, S.-N.; Herrmann, J. : Qualitätsmanagement, Planegg/München, Haufe, 2009; ISBN: 3448091251.

- [20] Töpfer, A. : Betriebswirtschaftslehre - Anwendungs- und prozessorientierte Grundlagen, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2007; ISBN: 978-3-540-49395-2.
- [21] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik : Durchgängiges Engineering in Industrie 4.0 Wertschöpfungsketten - Statusreport, 2016.
- [22] Ehrich, H.-D. : Fachgespräche auf der 14. GI-Jahrestagung, Berlin, Heidelberg, Springer, 1984; ISBN: 978-3-642-70087-3.
- [23] Benjamin Talin, MoreThanDigital : Herausforderung Industrie 4.0 – Digitalisierung In Der Industrie Am Beispiel Von Joachim Richter Systeme Und Maschinen, 2020; Online verfügbar unter: <https://morethandigital.info/herausforderung-industrie-4-0-digitalisierung-der-industrie-beispiel-von-joachim-richter-systeme-und-maschinen/>, Zuletzt geprüft am 09.02.2021.
- [24] Diedrich, C., Hadlich, T. et al. : Semantik durch Merkmale für Industrie 4.0, in: Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T., Hompel, M. ten (Eds.), Handbuch Industrie 4.0, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2016, S.1–16; DOI: 10.1007/978-3-662-45537-1_69-1.
- [25] Hirsch-Kreinsen, H.; Minssen, H. : Lexikon der Arbeits- und Industriesoziologie, Baden-Baden, Nomos Edition Sigma, 2017; ISBN: 9783848732548.
- [26] Mücke, T. : Wenn die virtuelle und die reale Welt verschmelzen, 2017; Online verfügbar unter: <https://www.it-production.com/allgemein/wenn-die-virtuelle-und-die-reale-welt-verschmelzen/>, Zuletzt geprüft am 08.01.2021.
- [27] BITKOM; VDMA; ZVEI : Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 - Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0, 2015.
- [28] Robl, P.; Saal, C.; Dellert, S.; Fischer, P. : Standardisierte Beschreibung von Spannvorrichtungen und Spannelementen für den digitalen Datenaustausch - Neue Methoden mittels Sachmerkmalen und 3D-CAD-Modellen, Grafenau, Morsak, 2020; ISBN: 978-3865121738.
- [29] Weichert, D.; Link, P.; Stoll, A.; Rüping, S. et al. : A review of machine learning for the optimization of production processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104, 2019, S.1889–1902; DOI: 10.1007/s00170-019-03988-5.

- [30] Vajna, S.; Weber, C.; Zeman, K.; Hehenberger, P. et al. : CAx für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2018; ISBN: 978-3-662-54623-9.
- [31] Pang, T. Y.; Pelaez Restrepo, J. D.; Cheng, C.-T.; Yasin, A. et al. : Developing a Digital Twin and Digital Thread Framework for an 'Industry 4.0' Shipyard. *Applied Sciences*, 11, 2021, S.1097; DOI: 10.3390/app11031097.
- [32] Stark, R.; Anderl, R.; Thoben, K.-D.; Wartzack, S. : WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. *ZWF*, 115, 2020, S.47–50; DOI: 10.3139/104.112311.
- [33] Fraunhofer IPK, Industrie 4.0 & IIoT : Virtuelles Abbild einer realen Fabrik, 2017; Online verfügbar unter: <https://www.i40-magazin.de/allgemein/digitaler-zwilling-virtuelles-abbild-einer-realen-fabrik/>, Zuletzt geprüft am 16.03.2021.
- [34] Miskinis, C., Challenge Advisory : What does a digital thread mean and how it differs from digital twin, 2018; Online verfügbar unter: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-and-digital-thread/>, Zuletzt geprüft am 08.01.2021.
- [35] Schleich, B.; Anwer, N.; Mathieu, L.; Wartzack, S. : Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66, 2017, S.141–144; DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
- [36] Zwettler, M. : Was ist ein Digital Thread?, 2020; Online verfügbar unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/was-ist-ein-digital-thread-a-960755/>, Zuletzt geprüft am 08.01.2021.
- [37] Cadenas, Manuel, Siemens AG : Robotics in Agri-Food, 2018; Online verfügbar unter: <https://www.slideshare.net/DatAgri1/manuel-cadenas-siemens>, Zuletzt geprüft am 06.02.2021.
- [38] Hedberg, T.; Lubell, J.; Fischer, L.; Maggiano, L. et al. : Testing the Digital Thread in Support of Model-Based Manufacturing and Inspection. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 16, 2016; DOI: 10.1115/1.4032697.
- [39] Singh, V. : Towards a Feedback Design Process Using Digital Thread, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation, 2019.
- [40] Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. : Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, Berlin, Springer Vieweg, 2014; ISBN: 978-3-662-43816-9.

- [41] Hehenberger, P. : Computerunterstützte Fertigung, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2011; ISBN: 978-3-642-13474-6.
- [42] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. : Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, München, Carl Hanser Fachbuchverlag, 2009; ISBN: 978-3-446-44908-4.
- [43] Sandler, U. : Das PLM-Kompendium - Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Managements, Berlin, Springer, 2009; ISBN: 978-3-540-87897-1.
- [44] Eversheim, W. : Organisation in der Produktionstechnik, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1996; ISBN: 978-3-642-87738-4.
- [45] Kief, H. B.; Roschiwal, H. A.; Schwarz, K. : CNC-Handbuch - CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Energieeffizienz, Werkzeuge, Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen, Simulation, Fachwortverzeichnis, München, Hanser, 2017; ISBN: 978-3-446-45265-7.
- [46] Scheer, A.-W.; Cocchi, A. : Prozessorientiertes Product Lifecycle Management, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006; ISBN: 978-3-540-28442-0.
- [47] Imkamp, D., Carl Zeiss IMT GmbH : Digitalisierung und Virtualisierung für die Dimensionelle Messtechnik, 2018; Online verfügbar unter: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/PSt/pst1/Vortraege_VirtMess2018/VirtMess2018_Digitalisierung_Dimensionelle_Messtechnik_Fa_Zeiss.pdf, Zuletzt geprüft am 10.12.2020.
- [48] Eigner, M. : Product Lifecycle Management (PLM), in: Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung, S.267–300; DOI: 10.1007/978-3-662-45874-7_12.
- [49] Hughes, N. : CAD for the Workshop, New York, Crowood, 2013; ISBN: 978-1847975669.
- [50] Bossmann, M. : Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung - Dissertation, Saarbrücken, Univ. des Saarlandes Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM, 2007; ISBN: 9783930429677.
- [51] REFA - Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung : Ausgewählte Methoden der Planung und Steuerung, München, Hanser, 1993; ISBN: 3-446-17704-3.

- [52] Wieneke, F.; Schmidt, J. : Produktionsmanagement - Produktionsplanung und Auftragsabwicklung am Beispiel einer virtuellen Firma ; mit den Übungsversionen der Anwendungsprogramme ERP-Software "PMS-ERM", Simulationssoftware "DOSIMIS-3", Haan-Gruiten, Europa-Lehrmittel, 2012; ISBN: 978-3-8085-5314-5.
- [53] DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [54] Westkämper, E.; Decker, M. : Einführung in die Organisation der Produktion, Berlin, Springer, 2006; ISBN: 3540260390.
- [55] Eversheim, W. : Organisation in der Produktionstechnik, Berlin, Springer, 2002; ISBN: 3-540-42016-9.
- [56] Pfeifer, T. : Fertigungsmeßtechnik, München, Oldenbourg, 2001; ISBN: 978-3486257120.
- [57] Kamrani, A. K.; Sferro, P.; Handelman, J. : Critical issues in design and evaluation of computer aided process planing systems. Computers & Industrial Engineering, 29, 1995, S.619–623; DOI: 10.1016/0360-8352(95)00144-P.
- [58] Picard, A. C. R. : Integriertes Werkstückinformationsmodell zur Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände, Shaker Verlag GmbH, Dissertation, 2015.
- [59] Simus Systems : Anwenderbericht Hans Weber Maschinenfabrik: Zeit ist Geld, 2019; Online verfügbar unter: <https://www.simus-systems.com/2019/07/anwenderbericht-hans-weber-maschinenfabrik/>, Zuletzt geprüft am 27.01.2021.
- [60] Österreichische Forschungsfördergesellschaft FFG : Automatische CAD-feature-basierte Berechnung des Arbeitsplans, 2016; Online verfügbar unter: https://www.ffg.at/sites/default/files/allgemeine_downloads/strukturprogramme/20161214_aeda_successstory_de_automatische_cad-feature-basierte_berechnung_des_arbeitsplans.pdf, Zuletzt geprüft am 27.01.2021.
- [61] Humpa, M. W. : CAD-Methodik zur Produktivitätssteigerung in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2016.
- [62] Pfeifer, T. : Qualitätsmanagement - Strategien, Methoden, Techniken, München, Hanser, 2001; ISBN: 9783446215153.

- [63] Weckenmann, A. : Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen, München, Hanser, 2012; ISBN: 978-3-446-40739-8.
- [64] Pfeifer, T.; Imkamp, D. : Koordinatenmesstechnik und CAx-Anwendungen in der Produktion - Grundlagen, Schnittstellen und Integration, München, Hanser, 2004; ISBN: 3-446-22733-4.
- [65] Pfeifer, T.; Schmitt, R. : Masing Handbuch Qualitätsmanagement, München, Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014; ISBN: 9783446434318.
- [66] Bernards, M. : Modulare Prüfplanung, RWTH Aachen, Dissertation, 2005.
- [67] BCT Technology AG : Große Optimierungseffekte durch kleine Massnahmen, 2017; Online verfügbar unter:
https://f.hubspotusercontent00.net/hubfs/8017253/docs/use_cases/bct_usecase_schneider_kreuznach_2017.pdf?hsCtaTracking=286719b0-a297-4b81-a40d-9b8c60aae48f%7C4feffa143-7f4b-4250-95b6-b94840f83223, Zuletzt geprüft am 21.02.2022.
- [68] DIN 4000-1:2019-03, Sachmerkmal-Listen - Teil 1: Begriffe und Grundsätze, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2019.
- [69] DIN 4003-1:2017-10, Konzept für den Aufbau von 3D-Modellen auf Grundlage von Merkmalen nach DIN 4000 - Teil 1: Übersicht und Grundlagen, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [70] DIN 4000-178:2016-12, Sachmerkmal-Listen - Teil 178: Messkopfsysteme, Tastersysteme und Taster, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [71] Kletti, J. : MES - Manufacturing Execution System - Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung, Berlin u.a., Springer, 2006; ISBN: 978-3-540-28010-1.
- [72] Benes, G.; Groh, P. E. : Grundlagen des Qualitätsmanagements, München, Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2014; ISBN: 978-3-446-44223-8.
- [73] Ciesla, M. : Feature-basierte Messplanung für Koordinatenmessmaschinen, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1997.

- [74] Imkamp, D. : Prüfplanung; Online verfügbar unter: <https://www.qm-aktuell.de/wp-content/uploads/2016/07/Pr%C3%BCfplanung.pdf>, Zuletzt geprüft am 20.02.2021.
- [75] Fetzer, J. : Industrie 4.0 braucht eine neue Generation von 3D-Tools - "Digitale Fabrik"-Lösungen - Wegbereiter für neue Fertigungstechnologien und Produktionskonzepte; Online verfügbar unter: https://www.industr.com/de/_storage/asset/2278509/storage/master/file/15481142/Industrie_4.0_Artikel_J.Fetzer_Web.pdf, Zuletzt geprüft am 15.12.2020.
- [76] Robl, P. : Integratives NC-Modell für die Vereinfachung der werksübergreifenden Produktion auf der Basis einer Feature-Skelett-Methode, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2013.
- [77] Siemens AG : Mit intelligenten 3D-Modellen zu mehr Produktivität; Online verfügbar unter: <https://new.siemens.com/de/de/unternehmen/stories/forschungstechnologien/digitaler-zwilling/3d-cad-models-boost-productivity.html>, Zuletzt geprüft am 03.12.2020.
- [78] Ruemler, S.; Zimmerman, K.; Hartman, N.; Hedberg Jr., T. et al. : Promoting Model-Based Definition to Establish a Complete Product Definition. Proceedings of the ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2016; DOI: 10.1115/MSEC2016-8702.
- [79] Quintana, V.; Rivest, L.; Pellerin, R.; Venne, F. et al. : Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry. Computers in Industry, 61, 2010, S.497–508; DOI: 10.1016/j.compind.2010.01.005.
- [80] Sharma, G.; Goyal, R.; Liu, D.; Kalogerakis, E. et al. : Neural Shape Parsers for Constructive Solid Geometry, 2019; DOI: 1912.11393v1.
- [81] Baumann, R. A. : Structure-Oriented Exchange of Product Model Data, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2004.
- [82] Hoffmann, C. M. : Geometric and solid modeling - An introduction, San Mateo, Calif., Morgan Kaufmann, 1993; ISBN: 9781558600676.
- [83] Lee, K. : Principles of CAD/CAM/CAE systems, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1999; ISBN: 978-0201380361.

- [84] Troll, A. : CAx-Datenaustausch mit neutralen Datenformaten - Prozessgetriebene Konzeption eines Assistenzsystems für die Produktentwicklung, Universität Bayreuth, Dissertation, 2011.
- [85] Huang, R.; Zhang, S.; Bai, X.; Xu, C. : Multi-level structuralized model-based definition model based on machining features for manufacturing reuse of mechanical parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 2014, S.1035–1048; DOI: 10.1007/s00170-014-6183-y.
- [86] Adamski, W. : Adjustment and implementation of CAD/CAM systems being used in polish aviation industry. *Journal of Machine Engineering*, 2010; ISSN: 1895-7595.
- [87] Verein Deutscher Ingenieure : VDI 2218 - Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Feature-Technologie, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [88] Rieger, E. : Semantikorientierte Features zur kontinuierlichen Unterstützung der Produktgestaltung, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1994.
- [89] DIN EN ISO 1101:2017-09, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [90] Verein Deutscher Ingenieure : VDI 2209 - 3-D-Produktmodellierung - Technische und organisatorische Voraussetzungen - Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen - Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2009.
- [91] Vajna, S.; Podehl, G. : Durchgängige Produktmodellierung mit Features. CAD-CAM REPORT, 1998.
- [92] Harrich, A. : CAD-basierte Methoden zur Unterstützung der Karosseriekonstruktion in der Konzeptphase, Technische Universität Graz, Dissertation, 2015.
- [93] Feeney, A. B.; Frechette, S. P.; Srinivasan, V. : A Portrait of an ISO STEP Tolerancing Standard as an Enabler of Smart Manufacturing Systems. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 15, 2015; DOI: 10.1115/1.4029050.

- [94] Fang, F. Z.; Li, Z.; Arokiam, A.; Gorman, T. : Closed Loop PMI Driven Dimensional Quality Lifecycle Management Approach for Smart Manufacturing System. *Procedia CIRP*, 56, 2016, S.614–619; DOI: 10.1016/j.procir.2016.10.121.
- [95] Urbas, U.; Vrabič, R.; Vukašinović, N. : Displaying Product Manufacturing Information in Augmented Reality for Inspection. *Procedia CIRP*, 81, 2019, S.832–837; DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.208.
- [96] Lipman, R.; Lubell, J. : Conformance checking of PMI representation in CAD model STEP data exchange files. *Computer-Aided Design*, 66, 2015, S.14–23; DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.002.
- [97] Frechette, S. P.; Jones, A. T.; Fischer, B. R. : Strategy for Testing Conformance to Geometric Dimensioning & Tolerancing Standards. *Procedia CIRP*, 10, 2013, S.211–215; DOI: 10.1016/j.procir.2013.08.033.
- [98] ISO 16792:2015 - Technical product documentation - Digital product definition data practices, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2015.
- [99] ASME Y14.41:2019 - Verfahren für digitale Produktdefinitionsdaten, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2019.
- [100] Jordan, W.; Schütte, W. : Form- und Lagetoleranzen - Handbuch für Studium und Praxis, München, Hanser, 2017; ISBN: 978-3446446267.
- [101] Bohn, M.; Hetsch, K. : Funktionsorientiertes Toleranzdesign - Angewandte Form- und Lagetolerierung im Maschinen-, Fahrzeug- und Gerätebau, 2020; ISBN: 978-3446460027.
- [102] DIN : DIN EN ISO 2692:2015-12: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Maximum-Material-Bedingung (MMR), Minimum-Material-Bedingung (LMR) und Reziprozitätsbedingung (RPR), Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2015.
- [103] Lipman, R.; Filliben, J. : Testing Implementations of Geometric Dimensioning and Tolerancing in CAD Software. *Computer-Aided Design and Applications*, 17, 2020, S.1241–1265; DOI: 10.14733/cadaps.2020.1241-1265.
- [104] Humienny, Z.; Berta, M. : New Multimedia Geometrical Tolerancing Course. *Procedia CIRP*, 10, 2013, S.312–316; DOI: 10.1016/j.procir.2013.08.048.

- [105] Humienny, Z.; Berta, M. : A Digital Application for Geometrical Tolerancing Concepts Understanding. *Procedia CIRP*, 27, 2015, S.264–269; DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.076.
- [106] Yip-Hoi, D.; Gill, D. : Use of Model-Based Definition to Support Learning of GD&T in a Manufacturing Engineering Curriculum. 2017 ASEE Annual Conference & Exposition, 2017; DOI: 10.18260/1-2--29066.
- [107] Fengxia, Z.; Kunpeng, Z.; Linna, Z.; Peng, Z. : Research on the Intelligent Annotation Technology of Geometrical Tolerance Based on Geometrical Product Specification (GPS). *Procedia CIRP*, 27, 2015, S.254–259; DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.074.
- [108] Tessier, S.; Wang, Y. : Ontology-based feature mapping and verification between CAD systems. *Advanced Engineering Informatics*, 27, 2013, S.76–92; DOI: 10.1016/j.aei.2012.11.008.
- [109] Farjana, S. H.; Han, S.; Mun, D. : Implementation of persistent identification of topological entities based on macro-parametrics approach. *Journal of Computational Design and Engineering*, 3, 2016, S.161–177; DOI: 10.1016/j.jcde.2016.01.001.
- [110] Safdar, M.; Jauhar, T. A.; Kim, Y.; Lee, H. et al. : Feature-based translation of CAD models with macro-parametric approach: issues of feature mapping, persistent naming, and constraint translation. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7, 2020, S.603–614; DOI: 10.1093/jcde/qwaa043.
- [111] Morse, E.; Heysiattalab, S.; Barnard-Feeney, A.; Hedberg, T. : Interoperability: linking design and tolerancing with metrology. *Procedia CIRP*, 43, 2016, S.13–16; DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.106.
- [112] Hermes, H.-J.; Schwarz, G. : Outsourcing - Chancen und Risiken, Erfolgsfaktoren, rechtssichere Umsetzung ; Best Practice: Erfahrungen renommierter Unternehmen, Shared Service Center: die interne Alternative zum Outsourcing ; Ergebnisse der Deloitte Outsourcing- Studien, Freiburg im Breisgau, Haufe, 2005; ISBN: 3-448-06560-9.
- [113] Hummel, T.; Malorny, C. : Total Quality Management - Tipps für die Einführung, s.l., Carl Hanser Fachbuchverlag, 2011; ISBN: 978-3-446-42813-3.

- [114] DIN 26100:2017-11, Container-Datei - Zusammenfassung verschiedener Produktdateien für den Datenaustausch, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [115] DIN 4000-102:2020-08, Sachmerkmal-Listen - Teil 102: Datenaustausch für Sachmerkmallisten mittels XML-Schema, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2020.
- [116] Saal, C., IndustryArena eMagazine : Ein Standard automatisiert den Datenaustausch, 2021; Online verfügbar unter:
<https://de.industryarena.com/emagazine/01-2021/ein-standard-automatisiert-den-datenaustausch.html>, Zuletzt geprüft am 30.07.2021.
- [117] Klier, M. : Metriken zur Bewertung der Datenqualität – Konzeption und praktischer Nutzen. Informatik Spektrum, 31, 2008, S.223–236;
DOI: 10.1007/s00287-007-0206-0.
- [118] Hildebrand, K.; Gebauer, M.; Hinrichs, H.; Mielke, M. : Daten- und Informationsqualität - Auf dem Weg zur Information Excellence, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2015; ISBN: 978-3-658-09214-6.
- [119] Helmig, S.; Hollmann, R. : Webbasierte Datenintegration - Ansätze zur Messung und Sicherung der Informationsqualität in heterogenen Datenbeständen unter Verwendung eines vollständig webbasierten Werkzeuges, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009;
ISBN: 978-3-8348-9280-5.
- [120] Strong, D. M.; Lee, Y. W.; Wang, R. Y. : Data quality in context. Commun. ACM, 40, 1997, S.103–110; DOI: 10.1145/253769.253804.
- [121] Kleiner, S.; Neumann Jens : Herausforderungen bei der Datenaufbereitung für den NX/JT-Datenaustausch mit Daimler aus Lieferantensicht. engineering methods AG, 2016.
- [122] Verband der Automobilindustrie : VDA 4950 - Vereinbarungen zum CAD/CAM-Datenaustausch, Version 2.0, 2011.
- [123] Verband der Automobilindustrie : VDA 4955 - Umfang und Qualität von CAD/CAM-Daten, Version 4.1, 2006.
- [124] Kleinschrodt, C. : Analyse und Optimierung des Datenaustauschs von 3D-Modellen - Übertragung von CAD-Werkzeugmodellen mittels STEP, Universität Bayreuth, Dissertation, 2019.

- [125] Kleinschrodt, C.; Hackenschmidt, R.; Rieg, F. : Strategies for improving the quality of transferred 3D models in the context of the tool industry, 2017.
- [126] Wardhani, R.; Xu, X. : Model-based manufacturing based on STEP AP242, 2016; DOI: 10.1109/MESA.2016.7587187.
- [127] Christ, A.; Anderl, R. : CAD-neutrale 3D-Mastermodelle als zentrale Informationsträger in verteilten Entwicklungsprojekten, 2014; ISBN 978-3-00-046544-4.
- [128] ISO 10303-203 : Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange - Part 203: Application Protocol: Configuration Controlled 3D Design of Mechanical Parts and Assemblies, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2011.
- [129] ISO 10303-214 : Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange - Part 214: Application Protocol: Core Data for Automotive Mechanical Design Process, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2010.
- [130] ISO 10303-242 : Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange - AP242 managed model based 3D engineering for Standardization, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2014.
- [131] Sellentin, J. : Konzepte und Techniken der Datenversorgung für Informationssysteme, 15, 2000, S.92–109; DOI: 10.1007/PL00009131.
- [132] ISO 14306 : Industrial automation systems and integration - JT file format specification for 3D visualization, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2017.
- [133] ProSTEP iViP/VDA : JT Translator Benchmark - Short Report, Edition 1, 2010; Online verfügbar unter: https://www.prostep.org/fileadmin/downloads/ProSTEP-iViP-VDA_%20JT-Translator-Benchmark_Ed1_Short-Report.pdf, Zuletzt geprüft am 22.02.2022.
- [134] Vonhoegen, H. : XML - Einstieg, Praxis, Referenz, Bonn, Rheinwerk Verlag, 2018; ISBN: 9783836265379.
- [135] Friesen, J. : Java XML and JSON - Document Processing for Java SE, Berkeley, CA, Apress, 2019; ISBN: 978-1-4842-4330-5.

- [136] ISO 23952 : Automation systems and integration - Quality information framework (QIF) - An integrated model for manufacturing quality information, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2020.
- [137] Bauer, T.; Cewe, C.; Fazli, F.; Kirchner, K. et al. : Digitalisierung im Geschäftsprozessmanagement - Potentiale und Herausforderungen. Proceedings Informatik 2018, 2018, S.280–293; ISBN: 978-3-88579-679-4.
- [138] Mücke, T. : Informationssystematik zur Optimierung von Konstruktions- und NC-Prozessen - Ganzheitliche Optimierung durch Vernetzung von PLM-, ERP- und MES geprägten Prozessen unter Berücksichtigung von Betriebsmittelinformationen aus der Fertigung, Technische Universität Sofia, Dissertation, 2016.
- [139] Stark, J. : Product Lifecycle Management - 21st Century Paradigm for Product Realisation, Cham, Springer International Publishing, 2020; ISBN: 3030288633.
- [140] Arnold, V.; Dettmering, H.; Engel, T.; Karcher, A. : Product Lifecycle Management beherrschen, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2011; ISBN: 978-3-642-21812-5.
- [141] IEC : Enterprise-control system integration - Part 1: Models and terminology - International Standard, Genf, IEC, 2013; ISBN: 978-2-83220-734-5.
- [142] Ray, R. : Enterprise resource planning - Text and Cases, Tata McGraw-Hill Education Pvt. Ltd., 2011; ISBN: 9780070700888.
- [143] Eigner, M.; Stelzer, R. : Product-lifecycle-Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management, Berlin, Heidelberg, Springer, 2009; ISBN: 9783540443735.
- [144] Westkämper, E.; Spath, D.; Constantinescu, C.; Lentjes, J. : Digitale Produktion, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2013; ISBN: 978-3-642-20258-2.
- [145] Schaupp, E.; Abele, E.; Metternich, J. : Potentials of Digitalization in Tool Management. Procedia CIRP, 63, 2017; DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.172.
- [146] Lohse, O.; Krause, S.; Saal, C.; Lipp, C. : Real Time Reaction Concept for Cyber Physical Production Systems, 2020; DOI: 10.1109/SIMS49386.2020.9121473.

- [147] Meyer-Hentschel, M.; Lohse, O.; Rao, S.; Lepratti, R. : Manufacturing Operations Management for Smart Manufacturing – A Case Study, 591, 2020, S.91–98; DOI: 10.1007/978-3-030-57993-7_11.
- [148] VDI-Fachbereich Informationstechnik : Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems - MES) - VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1, Berlin, Verein Deutscher Ingenieure, 2007.
- [149] MES - Manufacturing Execution System - Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung, Berlin, Springer, 2005; ISBN: 978-3-540-28010-1.
- [150] Gerber, A. : Konzeption eines unternehmensspezifischen Qualitätsinformationssystems, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2008.
- [151] Berente, N.; Vandenbosch, B.; Aubert, B. : Information flows and business process integration, 15, 2009, S.119–141; DOI: 10.1108/14637150910931505.
- [152] Culnan, M. J. : The dimensions of accessibility to online information: implications for implementing office information systems. *ACM Trans. Inf. Syst.*, 2, 1984, S.141–150; DOI: 10.1145/521.523.
- [153] Carlile, P. R. : Transferring, Translating, and Transforming: An Integrative Framework for Managing Knowledge Across Boundaries, 2004; DOI: 10.1287/orsc.1040.0094.
- [154] Volkoff, O., Strong, D. M. et al. : Understanding enterprise systems-enabled integration, 2005; DOI: 10.1057/palgrave.ejis.3000528.
- [155] Browning, T. R. : The many views of a process: Toward a process architecture framework for product development processes, 12, 2009, S.69–90; DOI: 10.1002/sys.20109.
- [156] Saal, C.; Lipp, C.; Metrich, R.; Brionne, P. : New Methods for Continuous Communication within the 3D-Model-Based Process Chain, 2021, S.1–7; DOI: 10.1109/ISSE51541.2021.9582500.
- [157] Nowitschkow, A.; Saal, C.; Lohse, O. : Factory data management: Definition and differentiation from manufacturing operations management, 2021, S.718–721; DOI: 10.1109/ICIT46573.2021.9453563.

-
- [158] Sahay, A.; Indamutsa, A.; Di Ruscio, D.; Pierantonio, A. : Supporting the understanding and comparison of low-code development platforms, 2020; DOI: 10.1109/SEAA51224.2020.00036.

Anhang A

Tabelle A1: Zulässige Kombinationen aus Toleranzsymbol und referenzierter Geometrielemente nach DIN EN ISO 1101

Toleranzspezifikation nach DIN EN ISO 1101		zulässiger Flächentyp referenzierter Geometriefeatures					
Bezeichnung	Symbol	eben	zylindrisch	konisch	kugelförmig	torusförmig	parametrisch
Geradheit	—	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Ebenheit		✓	✗	✗	✗	✗	✗
Rundheit	○	✗	✓	✓	✗	✓	✗
Zylindrizität		✗	✓	✗	✗	✗	✗
Linienprofil		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Flächenprofil		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Parallelität	//	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Rechtwinkligkeit	⊥	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Neigung	∠	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Position	⊕	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Konzentrität/ Koaxialität	◎	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Symmetrie	≡	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Axialer/radialer Rundlauf		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Axialer/radialer Gesamtrundlauf		✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabelle A2: Zulässige Kombination aus Indikatorotyp und Toleranzsymbol nach DIN EN ISO 1101

Indikatortyp nach DIN EN ISO 1101	zulässige Toleranzsymbole			
Schnittebene	//	⊥	∠	≡
Orientierungsebene	//	⊥	∠	
Richtungselement	//	⊥	∠	↗
Kollektionsebene	//			

Tabelle A3: Vektororientierung in Abhängigkeit von Toleranzsymbol und referenzierter Geometrieelemente

Toleranzspezifikation nach DIN EN ISO 1101		referenzierte Geometrieelemente	zulässige Orientierung der Vektoren zueinander
Bezeichnung	Symbol		
Parallelität	//	eben und eben	parallel
		eben und zylindrisch/konisch	rechtwinklig
		zylindrisch/konisch und zylindrisch/konisch	parallel
Rechtwinkligkeit	⊥	eben und eben	rechtwinklig
		eben und zylindrisch/konisch	parallel
		zylindrisch/konisch und zylindrisch/konisch	rechtwinklig