

Der Mixed Mock-Up im Toleranzmanagement in der Automobilindustrie

Von der Fakultät 4: Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung.

Vorgelegt von:

Tim Küstner

aus Freiburg i. Br.

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr. h.c. Prof. E.h. Michael M. Resch

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende

Tag der mündlichen Prüfung: 29.10.2019

INSTITUT IHR DER UNIVERSITÄT STUTTGART

Erscheinungsjahr 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele der Arbeit	2
1.3	Rahmenbedingungen & Abgrenzung des Themengebiets	2
1.4	Struktur der Thesis	3
2	Automobilindustrie	4
2.1	Aktueller Stand & Perspektiven	4
2.2	Entwicklungsprozess & -plattformen	5
3	Toleranzmanagement	8
3.1	Einführung	8
3.1.1	Historische Entwicklung	8
3.1.2	Motivation	9
3.2	Grundlagen & Methoden des Toleranzmanagements	9
3.2.1	Toleranzen	9
3.2.2	Toleranzmanagement	10
3.2.3	Methoden des Toleranzmanagements	12
3.2.4	Messtechnische Grundlagen	17
3.3	Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess	19
3.3.1	Digitale & physische Objekte im Toleranzmanagement	21
3.4	Zusammenfassung	27
4	Virtual Reality, Mixed Reality und der Mixed Mock-Up	29
4.1	Einführung	29
4.2	Virtual Reality	29
4.3	Mixed Reality	31
4.3.1	Systemkomponenten & -setup	33
4.3.2	Methodik	38
4.4	Der Mixed Mock-Up in der Automobilindustrie	42

4.5	Zusammenfassung	45
5	Arbeitshypothesen	46
5.1	Zusammenfassung Voraussetzungen & industrielle Anforderungen	46
5.2	Formulierung der Arbeitshypothesen	47
6	Mixed Mock-Up im Toleranzmanagement	50
6.1	Ontologie des Mixed Mock-Ups in der Produktentwicklung	50
6.1.1	Ausgestaltung von MMU Methoden	54
6.1.2	Visualisierungsmethoden und Darstellungsarten	57
6.2	Die Ontologie des MMU im Toleranzmanagement	59
6.2.1	Untersuchungsobjekte des MMU im Toleranzmanagement	59
6.2.2	Untersuchungsphasen: Verankerung im Prozess	62
6.2.3	Zielsetzung des MMU im Toleranzmanagement	67
6.2.4	Ausgestaltung von MMU Methoden im Toleranzmanagement	70
6.2.5	Visualisierungsformen des MMU im Toleranzmanagement	74
6.2.6	Anwendungsfelder des MMU im Toleranzmanagement	77
6.3	Herausforderungen & Lösungsvorschläge im praktischen Umfeld	78
6.3.1	Herausforderungen im Toleranzmanagement	78
6.3.2	Messtechnische Anforderungen	85
6.3.3	Bedeutung der Kalibrierung, der Registrierung & der Systemgenauigkeit	88
6.4	Bewertungskriterien	97
6.5	Zusammenfassung	99
7	Bewertung in der praktischen Anwendung	101
7.1	Bauteiltoleranzen	101
7.1.1	Toleranzaspekte in der Hardwareabnahme am Beispiel Schweißpunktposition	101
7.1.2	Toleranzaspekte in der Problempunktanalyse am Beispiel Toleranzkonzept Kühlermodul	109
7.2	Einfluss von Toleranzen auf das Montagekonzept der A-Säulenverkleidung	113
7.3	Gezielte Mixed Mock-Up Methoden für Toleranzthemen am Beispiel Funktionsmaßkatalog	115
7.4	Fotorealistische Mixed Reality zur Bewertung der Anmutung am Beispiel Fugenzbewertung	122
7.5	Weitere Erkenntnisse aus der Praxis	129

8 Zusammenfassung und Ausblick	131
8.1 Zusammenfassung	131
8.2 Ausblick	134
Literaturverzeichnis	141

Bildverzeichnis

2.1	Der Produktentstehungsprozess nach [VDI02, S.4]	6
2.2	Virtueller Prototyp und Digital Mock-Up nach [Gau11, S.4]	7
3.1	Aufgabenstellung des Toleranzmanagements [BH13a, S.4]	11
3.2	Tolerierungsprozess nach [Sto10] im Vergleich zu technischem Lösungsverfahren nach Bathe [vP02]	13
3.3	Toleranzanalyse und Toleranzsynthese nach [vP02, S.27] und [BH13a, S.97]	14
3.4	Beitragsleister zur Toleranzstreuung [Sto10, S.66] nach Söderberg et al. .	15
3.5	Einflüsse auf den Prüfprozess [VDA06, S.23] nach T. Pfeifer	18
3.6	Überlagerung von Fertigungs- und Messunsicherheit (nicht maßstabsgetreu) [VDA06, S.24]	19
3.7	Toleranzinformationsnutzung und -transfer (CAPP=Computer Aided Production Planning) [Sto10, S.15]	20
3.8	Zeitliche Einordnung der Toleranzschwerpunkte im Entwicklungsprozess [BH13a, S.91]	21
3.9	Methodik zur Erstellung des Toleranzkonzepts nach [BH13a, S.106] . . .	22
3.10	Auszug aus einer Fügefolge bei Mercedes-Benz: Heckdeckel des CLS (C218) (Quelle: Daimler AG)	25
3.11	Einfluss der Wahl des Ausrichtkonzepts auf die Toleranzen [BH13a, S.70]	25
3.12	Methodik des Toleranzkonzepts nach [BH13a, S.106] erweitert um digitale & physische Objekte	27
4.1	Das Virtuality Continuum nach [MK94] bezogen auf die Fahrzeugentwicklung (Quelle: Daimler AG)	32
4.2	Schematische Darstellung des Informationsflusses und der Systemkomponenten verschiedener video-see-through MR Systeme	35
4.3	Strategische Eckpunkte mobiler AR Anwendungen [LG11]	36
4.4	Stilisierte Darstellung der Schwimmeffekte durch Registrierungsfehler und die Notwendigkeit der lotrechten Betrachtung von Beurteilungskriterien .	42

4.5	Der Mixed Mock-Up als Verzahnung von Mixed Reality (MR) und Reverse Engineering (RE) nach [Gei12, S.62]	43
4.6	Mixed Reality Anwendungsbeispiele aus der Automobilindustrie [LG11, LG13]	44
6.1	Ontologie des MMU in der Produktentwicklung	53
6.2	Die Klasse der Untersuchungsobjekte des MMU im Toleranzmanagement	61
6.3	Toleranzmanagement als bereichsübergreifender Informationsfluss [vP02, S.114]	62
6.4	Standardisierter Tolerierungsprozess nach [VDA06, S.41] ergänzt um die MMU Einsatzgebiete (gelb).	64
6.5	Gegenüberstellung der VDA Prozessschritte aus [VDA06, S.41] mit den Aufgaben des Toleranzmanagements	65
6.6	Prozessanalyse nach [BH13a, S.96,99] (hellblau) erweitert, um den Mixed Mock-Up (dunkelblau)	67
6.7	Methodenspektrum des Mixed Mock-Up im Toleranzmanagement	68
6.8	Schema unterschiedlicher Darstellungsarten	75
6.9	Zuordnung der Visualisierungsformen (dunkelblau) zu den Funktionsarten nach [BH13a, S.49] (Hellblau)	77
6.10	Versuchsaufbau Praxistest Markergenauigkeit	92
6.11	Einfluss von Kalibrierung und Kamera auf Trackinggenauigkeit verglichen für verschiedene Markerpositionen innerhalb eines Bildes (Farbschema jeweils bezogen auf einzelne Testreihe)	92
6.12	Durchschnittliche Genauigkeit und Standardabweichung in Markertracking-Testreihen mit unterschiedlichen Bildausschnitten und Kameras	95
6.13	Bewertungskriterien zu den Arbeitshypothesen	99
7.1	Mixed Reality Darstellung eines Schweißpunktes ohne und mit Toleranzzone	104
7.2	Ergebnisse der Schweißpunktuntersuchung mit Mixed Reality: Soll-Ist-Ableich der Aufnahmevorrichtung (oben links), spiegelbildlich verwendete Schablone (oben rechts), fehlerhafte Schweißpunktposition (unten links) und fehlerhafte Schweißschablone (unten rechts)	105
7.3	Virtuelle Lehre zur Beurteilung der Toleranzzone des Absteckers für den Kühler am Modulträger	111
7.4	Spezifikation der Funktionsmaße (Quelle: Daimler AG)	117
7.5	Konstruiertes Funktionsmaß als virtuelles Objekt; Spezifikation der virtuellen Lehre; Bewertungsmethodik	118

7.6	Visuelle Überprüfung der Referenzierung des Bezugs eines Funktionsmaßes durch eine Translation	118
7.7	MMU Absicherung der Funktionsmaße	120
7.8	Beurteilung des digitalen Fugenkonzepts mit realistischer MR am Tablet-computer	123
7.9	Darstellung der Toleranzwerte an zwei Messstellen als Flags auf iPad und Bildschirm	124
7.10	Taktiler Vermessen der Marker am Fahrzeug	124

Tabellenverzeichnis

3.1	Beurteilungskriterien nach [BH13a]	23
6.1	Objekttypen des MMU	51

Abkürzungen, Akronyme & Begriffe

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
AG	Aktiengesellschaft
AR	Augmented Reality (dt. erweiterte Realität)
ATG	Aggregateträger Gesamtfahrzeug (Prototypenphase)
AV	Augmented Virtuality (dt. erweiterte Virtualität)
B-Fzg.	Bestätigungsfahrzeug (Prototypenphase)
CAE	Computer-aided Engineering (dt. rechnergestützte Entwicklung)
CAD	Computer-aided Design (dt. rechnergestützte Konstruktion)
CAPP	Computer-aided Production Planung (dt. rechnergestützte Produktionsplanung)
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment (mehreseitige Stereoprojektion)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Strömungsrechnung)
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
DKM	Datenkontrollmodell (ein früher Prototyp)
DMU	Digital Mock-Up (digitaler Prototyp)
DIN	Deutsches Institut für Normung
dig.	digital
dyn.	dynamisch
E-Fzg.	Entwicklungsfahrzeug (Prototypenphase)
EN	Europäische Norm
FEM/FEA	Finite Elemente Methode / Analyse
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (Zuverlässigkeitsprüfung)
FKM	Funktionsmaß
Flag	räumlich orientierte Annotation (dt. Fahne)
ggf.	gegebenenfalls
GOM	Gesellschaft für optische Messtechnik
GPS	Geometrische Produktspezifikation
HMD	Headmounted Display (dt. am Kopf fixierte Bildschirme)
i.O.	in Ordnung

IT	Informationstechnologie
ISO	Internationale Organisation für Normung
inkl.	inklusive
JT	Jupiter Tessilation (Datenformat)
Kap.	Kapitel
math.	mathematisch
MBS	Multi Body Simulation (numerische Mehrkörpersimulation)
min.	mindestens
MMU	Mixed Mock-Up (hybrider Prototyp)
MR	Mixed Reality (dt. gemischte Realität)
n.i.O.	nicht in Ordnung
o.Ä.	oder Ähnliche(s)
OEM	Original Equipment Hersteller (dt. Erstausrüster)
PDA	Personal Digital Assistant (kleiner, tragbarer Computer)
PDM	Produktdatenmanagement
PDF	Portable Document Format (Datenformat)
PEP	Produktentstehungsprozess
PMU	Physikal Mock-Up (phys. Prototyp)
RE	Reverse Engineering (Rückführende Maßnahmen)
S.	Seite
SIFT	Scale-invariant feature transform (dt. skaleninvariante Merkmalstransformation)
SECI	Socialization, Externalization, Combination and Internalization (Wissensmodell)
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping (dt. Simultane Lokalisierung und Kartenerstellung)
STRAK	geometrische Darstellung aller kundensichtbaren Oberflächen (leitet sich vom engl. „strake“ ab)
SURF	Speeded Up Robust Features (dt. beschleunigte, robuste Merkmale)
Tab.	Tabelle
USB	Universal Serial Bus (serielles Bussystem)
v.a.	vor allem
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality (dt. virtuelle Realität)
WLAN	Wireless Local Area Network (Funknetzwerk)
xml	Extensible Markup Language (Dokumentenformat)
z.B.	zum Beispiel

Inhaltsübersicht

Die Bedeutung von Augmented Reality hat in den letzten Jahren im Rahmen der Digitalisierung einen deutlichen Anstieg verzeichnet. In der Öffentlichkeit findet diese innovative Technologie große Aufmerksamkeit als Anwendung in Consumer Produkten. Ein zu Unrecht viel weniger betrachteter Aspekt ist hingegen das riesige Potential der Technologie bei Anwendungen in Entwicklungs- und Produktionsprozessen. Genau in diesem Anwendungsbereich entsteht durch Einsatz von Augmented Reality neben PMU und DMU eine neue, dritte Entwicklungsplattform, der Mixed-Mock Up (MMU).

Bei der Entwicklung neuer MMU-Prozesse sowie der Integration noch unbeteiligter Entwicklungsbereiche in den MMU, müssen zahlreiche Herausforderungen gemeistert werden. In dieser Arbeit wird dieser Vorgang exemplarisch am Toleranzmanagement aufgezeigt. Die Herausforderungen bestehen hierbei zum einen in der Komplexität der Entwicklungswelt, in welcher der MMU als Schnittstelle zwischen DMU und PMU eingesetzt wird. Zum anderen muss die schnelle technologische Entwicklung der Augmented-Reality-Komponenten bei der Entwicklung berücksichtigt werden, um nachhaltig erfolgreiche Prozesse und Methoden im MMU zu implementieren.

Bei der Konzeption neuer MMU-Prozesse müssen daher eine Vielzahl an technologischen und methodischen Fragestellungen erfasst und beantwortet werden. Um dieses Vorgehen zu unterstützen, stellt die vorliegende Arbeit ein Klassifikationsschema vor, mit welchem die Bestandteile und Methoden des MMU diesen Fragestellungen gegenüber gestellt werden. Am Beispiel des Toleranzmanagement wird dargestellt, wie ein MMU-Konzept für einen neuen Teilbereich des Entwicklungsprozesses erarbeitet werden kann.

Dieses MMU-Konzept für den Einsatz im Toleranzmanagement besteht hierbei zu gleichen Teilen aus der Erweiterung bestehender Prozesse und Methoden durch MMU-Bestandteile als auch der Entwicklung neuer Methoden auf Grundlage der neuen MMU Möglichkeiten. An exemplarischen Beispielen entlang des Entwicklungsprozesses eines Automobilkonzerns wurde das hier erarbeitete Konzept in der Praxis ergiebig überprüft und bewertet.

Abstract

Due to the digitalisation the significance of augmented reality is rapidly increasing during the last years. While the public attention to this inovative technology focuses on consumer products, another important but mostly neglected aspect of augmented reality is the huge potential in the processes of research and development. The application of augmented reality within this area creates a new, third development plattform, the mixed mock-up (MMU) in addition to PMU and DMU.

The development of new MMU processes as well as the integration of new fields of development into the MMU create numerous new challenges. This thesis presents how to adrese these challenges in the field of tolerance management: On the one hand the complexity of the development process in which the MMU is integrated as an interface between DMU and PMU has to be dealt with. On the other hand the rapid evolution of augmented reality components needs to be considered to create and implement soustaining succesfull MMU methods.

During the design of such new MMU processes numerous technological and methodolocial problems need to be registered and adressed. This thesis presents a classification scheme in which the components and methods of the MMU are cathegorized and paired with this identified problems. This approach is presented as the design of a new MMU concept for the tolerance management.

This new MMU concept contains the integration of MMU components into existing tolerance management methods as well as the development of new methods for the tolerance management using MMU components. This new concept has been pracically examined in the development process of an automotive manufacturer. The findings and a critical evaluation are presented.

1 Einleitung

The two primary forces which power the digital world are people and ideas. [Rau12]

1.1 Motivation

Den aktuellen Herausforderungen aus Globalisierung, zyklisch auftretenden Wirtschaftskrisen und dem politischen wie gesellschaftlichen Streben nach umweltfreundlichen und nachhaltigen Produkten begegnet die Automobilindustrie durch Internationalisierung, Individualisierung, Innovation, Modulstrategie und Konzentration der Wertschöpfung. Innerhalb dieser Strategien erfahren virtuelle/digitale Entwicklungsaktivitäten einen kontinuierlichen Bedeutungszuwachs (Kap. 2). Um eine reibungslose und schnelle Produktentwicklung zu erreichen, gilt es dabei die Synchronisation am Übergang zwischen digitalen und physischen Entwicklungsschritten zu garantieren. Die Technologie *Mixed Reality* (MR) bietet hierbei einen vielversprechenden technologischen Ansatz (Kap. 4).

Im Entwicklungs- und Produktionsprozess stellt die Tolerierung einen wichtigen Stellhebel dar, um Kosten und Qualität eines Produktes zu beeinflussen. Der Verband der Automobilindustrie (VDA) schreibt dazu: *Die erhöhte Komplexität unserer Produkte und neue Funktions- und Prozesstechnologien erfordern eine größere Sensibilität bei der Festlegung von Toleranzen zur Realisierung von Qualitätsmerkmalen an Teilen und Systemen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten [VDA06, S.3]*. Ein durchgängiger, moderner Produktentwicklungsprozess bündelt daher die Festlegung, Sicherstellung und Kontrolle der Toleranzen über den gesamten Produktentwicklungsprozess in einem übergreifenden Toleranzmanagement (Kap. 3).

Ein durchgängiges Toleranzmanagement über den gesamten Produktentwicklungsprozess umfasst damit sowohl digitale als auch physische Entwicklungsmethoden. Diese Facette verdeutlicht das hohe Potential für den MR Einsatz am Übergang zwischen digitalen und physischen Entwicklungsschritten im Toleranzmanagement. Einen besonderen Anreiz bildet dabei die Adressierung der kommunikativen Aufgabe des Toleranzmanagements durch kommunikationsfördernde Aspekte von MR.

1.2 Ziele der Arbeit

Die erste Aufgabe dieser Arbeit ist die vollständige Analyse der Ausgangssituation und die Identifizierung von Schnittstellen zwischen digitalen und physischen Arbeitsschritten im Toleranzmanagement sowie den damit verbundenen Herausforderungen. Die zentrale Fragestellung ist dabei:

Kann ein Einsatz von Mixed Reality im Toleranzmanagement eine Steigerung von Prozessqualität und Prozesssicherheit gewährleisten und somit einen Mehrwert bezüglich Qualität, Kosten und Zeit innerhalb des Prozesses sowie in direktem Bezug zum begleiteten Produkt generieren?

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Tragweite von MR als Lösungsansatz für offenen Fragestellungen im Toleranzmanagement zu analysieren und daraus Konzepte und Methoden zur Erweiterung des Analysespektrums und zur Absicherung der Qualität im Toleranzmanagement zu erarbeiten. Dafür sollen die technischen und methodischen Möglichkeiten von MR analysiert und in einem Klassifizierungsschema den Aufgaben und Herausforderungen des Toleranzmanagements zugeordnet werden. An ausgewählten Praxisbeispielen soll die Wirksamkeit dieser Vorgehensweise verifiziert werden.

1.3 Rahmenbedingungen & Abgrenzung des Themengebiets

Grundsätzlich bewegt sich die vorliegende Arbeit im Themenfeld *Toleranzmanagement in der Automobilindustrie*. Die Erkenntnisse sind vielfach übertragbar, sowohl auf Toleranzfragestellungen anderer Industriezweige als auch auf weitere rechenbasierte Disziplinen. Wie in der Autoindustrie üblich, beschränkt sich der Toleranzbegriff auf geometrische Toleranzen (Kap. 3.2). Es sei darauf hingewiesen, dass der Begriff *Durchgängigkeit* im Toleranzmanagement gewöhnlich auf ein durchgängiges Bezugssystem angewandt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff *Durchgängigkeit* meist im Sinne einer durchgängigen, interdisziplinären Kommunikation verwendet.

Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Integration von Mixed Mock-Up Methoden in das Toleranzmanagement. Systematische und technische Aspekte werden in dieser Arbeit nur insofern behandelt, wie sie diesem Ziel dienen. Bisherige Arbeiten zum Thema Mixed Reality im Automobilbau haben sich eher mit den technischen Möglichkeiten [Noe06] oder der Eingliederung in den Konstruktions- & Produktionsprozess [Gei12]

beschäftigt. Der Einsatz in produktorientierten Disziplinen wurde dabei vor allem an den Faktoren *Kosten* und *Zeit* gemessen.

Simulations- und Berechnungsbereiche wie das Toleranzmanagement sind prozessorientierte Disziplinen. Daher liegt das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit auf der Prozessqualität. Ein optimaler Prozess resultiert auch in niedrigeren Kosten und kürzeren Arbeits-, Iterations- und Wartezeiten. Diese sind in einem komplexen Industrieumfeld aber nicht immer eindeutig einer einzelnen Prozesskomponente zuzuordnen.

1.4 Struktur der Thesis

Die vorliegende Arbeit beginnt mit der Vorstellung der benötigten wissenschaftlichen Grundlagen sowie einer Beschreibung des Stands der Technik in den drei Themenfeldern Automobilbau/-industrie (Kap. 2), Toleranzmanagement (Kap. 3) sowie Virtual / Mixed Reality und Mixed Mock-Up (Kap. 4). In Kapitel 5 werden die Erkenntnisse aus den ersten drei Kapiteln noch einmal zusammengefasst und daraus die Arbeitshypothesen dieser Dissertation abgeleitet. Das Kapitel 6 stellt die entwickelten Ideen zum Mixed Mock-Up im Toleranzmanagement in einem wissenschaftlichen Kontext vor. Die Konzeption neuer MMU Methoden ist eine komplexe Herausforderung bei der es eine Vielzahl an technologischen und methodischen Fragestellungen zu berücksichtigen gilt. Um dieser Herausforderung strukturiert zu begegnen wird in Kapitel 6.1 ein Klassifizierungsschema entwickelt, welches ermöglicht die elementaren Bestandteile des MMU im Produktentwicklungsprozess mit den wichtigen Fragen bei der Konzeption neuer MMU Anwendungen zu verknüpfen. Anschließend wird dieses Verfahren auf das konkrete Anwendungsfeld *Toleranzmanagement* angewandt (Kap. 6.2) und somit ein vollständiges theoretisches Konzept des MMU im Toleranzmanagement erarbeitet. Dieses theoretische Konzept wird in Kapitel 6.3 mit den Anforderungen und Herausforderungen aus Theorie und Praxis abgeglichen und daraus Lösungsvorschläge und Bewertungskriterien für eine praktische Verifizierung der Methoden und Arbeitshypothesen abgeleitet. Kapitel 7 präsentiert ausgewählte Einsätze der vorgestellten Methoden in der Praxis, bewertet diese entsprechend den vorgestellten Kriterien und fasst die Ergebnisse im Lichte dieser Dissertation noch einmal zusammen. Kapitel 8 bietet eine Zusammenfassung der vorliegenden Dissertation und einen Ausblick auf offene Punkte und weitere Forschungsfelder.

2 Automobilindustrie

2.1 Aktueller Stand & Perspektiven

Dieses Kapitel leitet her, wie sich die Herausforderungen und Chancen der Automobilindustrie, unter dem Einfluss der Globalisierung, zyklisch auftretender Wirtschaftskrisen und dem politischen wie gesellschaftlichen Streben nach umweltfreundlichen und nachhaltigen Produkten, zusammenfassen lassen: Die Globalisierung stellt die Industrie in einen internationalen, d.h. direkteren Wettbewerb und bietet einen breiteren Absatzmarkt. Daraus resultieren nicht nur ein erhöhter Kostendruck und ein globales Produktions- und Vertriebsmodell, sondern auch die Forderung nach einer breiten Produktpalette und schnellen Produktzyklen. Anpassungsfähige Bauweisen bei wettbewerbsfähigen Produktionskosten erlauben es, global variierenden Kunden- und Individualisierungsansprüchen gerecht zu werden. Darüber hinaus gilt es optimale Antworten auf unterschiedliche regionale Normen und Gesetzgebungen zu finden. Um diesen wachsenden Entwicklungsaufwand wettbewerbsfähig zu gestalten, müssen schnelle und effiziente Entwicklungs- und Produktionsprozesse geschaffen werden. Aktuelle Entwicklungen und Zukunftsprognosen lassen sich wie folgt entlang der zehn Thesen zur dritten Revolution in der Autoindustrie [HB08] zusammenfassen:

Internationalisierung: (These 1) Um internationale Kundenwünsche und politische Forderungen zu erfüllen, wird sich die Wertschöpfungskette im Automobilbau weiter internationalisieren [Brü13d]. Dabei erhöhen die unterschiedlichen lokalen Anforderungen die Komplexität des Produkts [Bar12] und die Lokalisierungsstrategien [Brü13c] die Komplexität des Produktionsprozesses sowie den Bedarf an internationaler Abstimmung.

Individualisierung: (These 2, 8 & 9) Der Trend zur Individualisierung verlangt neue, flexiblere und somit komplexere Produkte [FAD⁺13] sowie Kundenbindungs- [Bre12] und Mobilitätsmodelle [Car13, Dri13]. Unter dem Betrachtungswinkel Zeit- und Kostendruck wird dem eine Digitalisierung von Produkt und Prozessen entgegengesetzt [Gor11, WV11].

Innovationsdruck: (These 3 & 10) In den beschleunigten Technologiezyklen einer globalisierten Wissenschafts- und Entwicklungswelt wächst der Innovationsdruck auf die Auto-

bilhersteller. Dies führt zu einer Kompetenzverlagerung in neue, teils maschinenbau-ferne Themenfelder und zu einer höheren Entwicklungskomplexität. So gewinnt beispielsweise der Kundenwunsch nach Fahrzeug- [KAAR12, Lau13, Vol12] und Unterhaltungselektronik [Brü13b, KS12] zunehmend an Bedeutung. Dabei müssen oft neue Technologien mit ganz unterschiedlichen Produktlebenszyklen kombiniert werden. Auch der politische Druck zu nachhaltigen Produkten und Produktionsprozessen führt zu neuen technischen Lösungen und einer wachsenden Kompetenzvielfalt. Zur Steigerung der Nachhaltigkeit kommen neue Materialien [Sch12b, Pud13] sowie neue Entwicklungs- und Produktionsmethoden [Bur13] zum Einsatz. Die Entwicklung alternativer Antriebsformen [Bur12] wird von einer kontroversen technischen und politischen Debatte begleitet [Brü13a, Bac13, EGR⁺12]. Dies zwingt die Hersteller mehrgleisige Entwicklungsstrategien zu fahren und führt zu einer höheren Produktvarianz.

Modulbaustrategie: (These 4 & 5) Internationalisierung, Individualisierung und Innovationsdruck führen dazu, dass die Balance zwischen Effizienz und Vielfalt zum entscheidenden Erfolgsfaktor für die Automobilindustrie wird [HB08]. Dieser Herausforderung begegnet die Automobil- und Zulieferindustrie mit einer zunehmenden baureihen- und herstellerübergreifenden Modularisierung [PPSC09].

Fokussierung der Wertschöpfung: (These 6 & 7) Ein weiterer Schritt, um die Balance zwischen Effizienz und Vielfalt zu meistern, ist die Konzentration der Wertschöpfung auf *markenprägende Module* [Sch12a, HB08]. Dadurch erhöht sich jedoch der Kommunikations- und Abstimmungsbedarf mit global aufgestellten Zulieferfirmen, auch oder gerade während des Entwicklungsprozesses.

2.2 Entwicklungsprozess & -plattformen

Der *Verein Deutscher Ingenieure (VDI)* hat die gelebte Praxis in einem abstrahierten Produktentstehungsprozess (PEP) in der VDI Richtlinie 2234 wie folgt zusammengefasst (Abb. 2.1). Der Entwicklungsprozess wird in eine Strategie-, eine Vor- und eine Serienentwicklungsphase, gefolgt vom Serienanlauf, unterteilt. Ein Meilensteinplan definiert die entscheidenden Zwischenziele des Projekts und dient der Verfolgung und Dokumentation des Entwicklungsfortschritts. Die Vor- und die Serienentwicklung bestehen ihrerseits aus einem virtuellen und einem physischen Entwicklungsanteil, die teilweise simultan verlaufen. Prozessübergreifende Arbeitsweisen und Engineeringmethoden sowie ein durchgängiges Produktdatenmanagement (PDM) stellen die erfolgreiche Verzahnung der einzelnen Bausteine sicher. Im Sinne der vorliegenden Dissertation ist noch besonders hervorzuheben,

dass der VDI der Kommunikation einen hervorgehobenen und übergreifenden Platz im PEP einräumt.

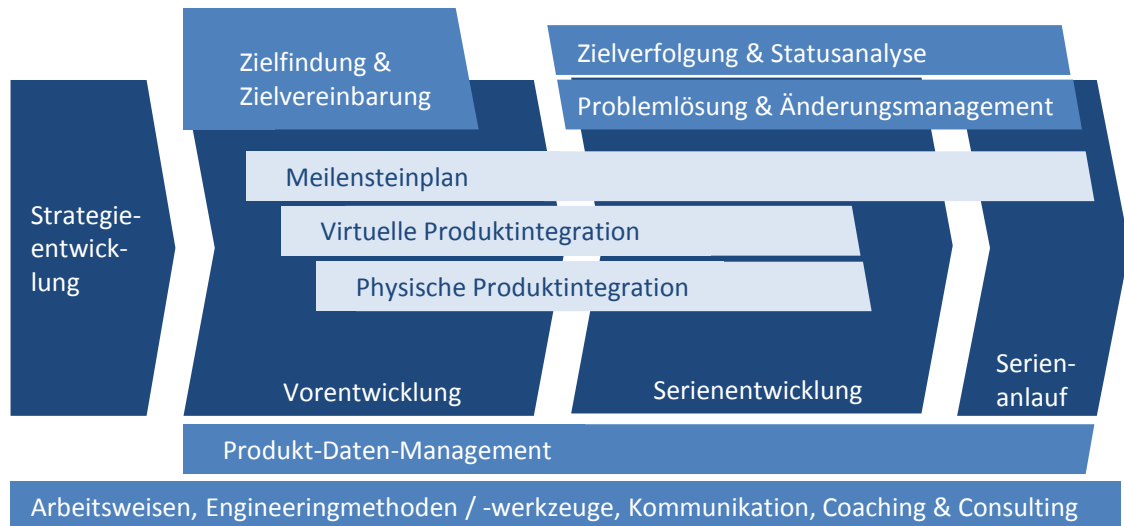


Bild 2.1: Der Produktentstehungsprozess nach [VDI02, S.4]

[Gei12] definiert eine Entwicklungsplattform als „*gemeinsame Ausgangsbasis*“, die den Aktivitäten aller Entwicklungsbeteiligten zu Grunde liegt. In Abgrenzung zu speziellen, anwendungsspezifischen Teilumfängen, werden die zentralen Entwicklungsplattformen in der Automobilindustrie dabei durch ihre gesamtheitliche Repräsentation des zu entwickelnden Produktes und die Abdeckung aller Entwicklungsschritte definiert. Die zentralen Entwicklungsplattformen spiegeln damit den Reifegrad und Entwicklungsfortschritt wider, fassen alle vorangegangenen Entwicklungsschritte zusammen und bilden die Basis für alle kommenden Entwicklungsaktivitäten. [Gei12, S.28] hebt dabei gesondert hervor, dass die Entwicklungsplattformen damit auch eine eigenständige Wissensbasis darstellen und einen entscheidenden Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens haben. Der sich stetig vergrößernden Diskrepanz zwischen dem Wissen des Einzelnen und dem Gesamtwissen kann durch kontextgerechte Darstellungen mittels IT Tools entgegengetreten werden [ASWZ11, S.7].

Der Physical Mock-Up: In der Fahrzeugentwicklung umfasst die zentrale Entwicklungsplattform Physical Mock-Up (PMU) alle Hardwareaufbauten, die der Festlegung dienen und die Absicherung des Produktes sicherstellen. In der folgenden Arbeit werden diese Umfänge im Gegensatz zu digitalen Objekten auch als physische Objekte oder Hardware bezeichnet. Von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit sind:

- *Datenkontrollmodel (DKM)*: gefrästes, hochpräzises Referenzmodell, abgeleitet von Designmodellen, Grundlage zur Abstimmung der Oberflächendaten (STRAK)
- *Festlegungsattrappe*: 1:1 Modell des Fahrzeugrohbaus, in der Regel funktionsuntüchtig, Grundlage der Festlegungsaktivitäten
- *Aggregateträger*: Fahrzeugplattform (meist beruhend auf Vorgängerbaureihe) zur praktischen Erprobung des Antriebstrangs
- *Bestätigungsfahrzeug (B-Fzg.)*: Erster Prototyp aus serienwerkzeugfallenden Teilen, Grundlage zur Bestätigung der im PEP definierten Funktionen und Ziele

Der Digital Mock-Up: Durch den erhöhten Einsatz von computergestützten Entwicklungs- (Computer-aided Engineering, CAE) und Konstruktionsmethoden (Computer-aided Design, CAD) gewinnt die zentrale Entwicklungsplattform Digital Mock-Up (DMU) verstärkt an Bedeutung. Dabei definiert [Cug96, S.7] den DMU in Anlehnung an das Projekt *Advanced Information Technology* folgendermaßen: „A realistic computer simulation of a product with the capability of all required functionalities from design/engineering, manufacturing and product service environment which is used as a platform for product and process development, for communication and decision from a first conceptual layout up to maintenance and product recycling.“

Der DMU ermöglicht damit digitale Fahrzeugstrukturen vollständig darzustellen, virtuell zusammenzubauen und zu testen. Er bildet die Grundlage für die Absicherung hinsichtlich Bauraum- (Packaging) und Kollisionsuntersuchungen sowie allen Simulationen (FEM, Crash, Baubarkeit, Montagefähigkeit, etc...). Dazu muss das PDM System 3D-Daten, Strukturinformationen, Kinematiken, Materialeigenschaften und weiterführende Informationen (z.B. Versionierung, Berechtigung) verwalten und verknüpfen [Gei12, S.32].

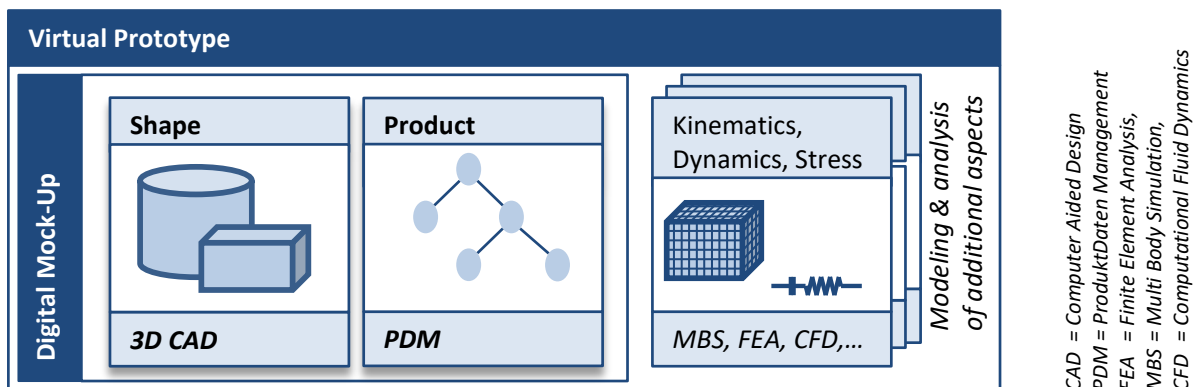


Bild 2.2: Virtueller Prototyp und Digital Mock-Up nach [Gau11, S.4]

3 Toleranzmanagement

3.1 Einführung

Dieses Kapitel legt die theoretische Grundlage zum Thema Toleranzen und Toleranzmanagement. Abschnitt 3.1.1 erläutert die Entstehung des Toleranzbegriffs und Abschnitt 3.1.2 die Notwendigkeit eines Toleranzmanagements. Kapitel 3.2 enthält eine kurze Vorstellung der verwendeten Methoden und Prozesse sowie eine Auflistung der Anforderungen und Aufgaben des Toleranzmanagements. Kapitel 3.3 setzt die vorgestellten Methoden in Bezug zum Entwicklungsprozess und stellt die virtuellen und physischen Umfänge des Toleranzmanagements vor. Kapitel 3.4 fasst das theoretische Fundament dieses Kapitels zusammen und bildet damit die Grundlage der Arbeitshypothesen dieser Arbeit (Kap.5).

3.1.1 Historische Entwicklung

Historisch gesehen liegt die Wiege der Toleranzrechnung in der Geburtsstunde der Geometrie: Die Erkenntnis, dass sich die reale Welt nicht algebraisch durch Verhältnisse ganzer Zahlen beschreiben lässt, führte zu einer zeichnerischen Beschreibung von mathematischen Problemen. Der Erfolg dieser geometrischen Theorien sowie die Diskrepanz zur real erlebten Welt führten dazu, „*dass man hinter der Geometrie eine Wirklichkeit zu vermuten begann, deren unvollkommener Schatten unsere wahrgenommene Welt ist (vgl. Platon)*“ [Böh13]. Platon hatte damit den philosophischen Grundstein gelegt, der in der technisch-naturwissenschaftlichen Überlegung zum Toleranzbegriff führte.

Am Beginn eines Fertigungsprozesses steht zunächst stets eine Idee, ein virtuelles Objekt. Schon von frühen Hochkulturen wurde diese Idee in Form einer (technischen) Zeichnung zu Zwecken der Planung und Reproduzierbarkeit festgehalten. Die Differenzen zwischen zeichnerischer Spezifikation und dem real gefertigten Objekt hingen in der manuellen Einzelfertigung vom Geschick des Handwerkers ab. Die maximal zulässigen Grenzwerte dieser Differenz werden heute als Toleranz bezeichnet (Kap. 3.2). Man spricht hierbei von *produktorientierter Tolerierung* [CHZ04].

Bei hochtechnologischen Produkten muss die Fertigungstoleranz bereits in der Planungsphase, d.h. am virtuellen Objekt, berücksichtigt werden, um die präzise Produktion und die fein abgestimmte Funktionsweise und Qualität des Werkstücks gewährleisten zu können. Dadurch findet eine Verschiebung von der fertigungsbestimmten Toleranz zur virtuellen Toleranzspezifikation statt. Der Toleranzwert folgt in den meisten Fällen nicht länger den technischen Fertigungsmöglichkeiten, sondern die Fertigungsprozesse werden den Genauigkeitsanforderungen der Produktqualität angepasst. Man spricht hierbei von *prozessorientierter Tolerierung* [CHZ04, S.16]. Dabei folgen höheren Präzisionsanforderungen aufwendigere und damit kostenintensivere Fertigungsprozesse. Die Toleranzspezifikation befindet sich somit im dreipoligen Spannungsfeld zwischen technischer Machbarkeit, Produktqualität und -funktionalität sowie den Produktionskosten. Daraus leitet sich die in der Praxis gelebte Faustregel zur Vergabe von Toleranzen ab: *So klein wie nötig, aber so groß wie möglich.*

3.1.2 Motivation

Moderne Produkte und ihre Entstehungsprozesse weisen einen zunehmenden Komplexitätsgrad auf (Kap. 2). Dabei hat das Zusammenspiel der Einzel- und Baugruppentoleranzen einen großen Einfluss auf Funktionsfähigkeit und Qualität des Endprodukts. Der Toleranzspezifikation muss daher eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung in Form einer Simulation dieses Zusammenspiels folgen, um die Tragweite der Toleranzentscheidungen auf den gesamten Produktlebenszyklus zu erfassen. Es wurde berichtet, dass bis zu 70% aller Geometrieänderungen im Automobil- und Flugzeugbau auf toleranzbedingte Ursachen zurückzuführen sind [CHZ04, S.14, Zusammenfassung externe Quellen]. Es ist daher notwendig einen durchgängigen Informationsfluss und eine einheitliche Einhaltung der getroffenen Toleranzentscheidungen durch den gesamten Produktlebenszyklus sicherzustellen. Darüber hinaus ist es zielführend, die gewonnenen Erkenntnisse dieses Prozesses in der Entstehungsphase von Folgeprodukten möglichst frühzeitig zu berücksichtigen. Dies sind die Aufgaben des Toleranzmanagements.

3.2 Grundlagen & Methoden des Toleranzmanagements

3.2.1 Toleranzen

Die DIN-Norm EN ISO 283-1 definiert den Begriff Toleranz als den zulässigen Bereich zwischen den Toleranzgrenzen. Dabei lassen sich diese Toleranzgrenzen aus dem Anspruch

herleiten, dass die Funktionserfüllung des Bauteils bzw. des gesamten Zusammenbaus im durch die Grenzen definierten Bereich gewährleistet ist [BH13a, S.15]. Diese Definition beschränkt sich nicht auf geometrische Kriterien [GF03, S.2]. In der Automobilindustrie behandelt das Toleranzmanagement jedoch nur geometrische Toleranzen. Andere Einflüsse werden über die Funktionsdefinition und gesetzliche Richtlinien auf geometrische Bedingungen in der Toleranzspezifikation zurückgeführt. Die Normen der Geometrische Produktspezifikation (GPS)¹ legen dabei fest, wie eine Toleranzangabe in der Konstruktionszeichnung zu erfolgen hat.

Störgrößen im Herstellungsprozess wie statische und dynamische Kräfte, thermische Einflüsse, Werkzeugverschleiß, Materialeigenschaften/-inhomogenität und Werkzeug-/Betriebsmitteltoleranzen führen zu fertigungsbedingten Abweichungen, welche durch die Tolerierung bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Dabei gilt es statische und dynamische sowie deterministische und nicht-deterministische Einflüsse zu unterscheiden und entsprechend zu handhaben [Sto10, S.72]. Es ist die Herausforderung des Toleranzmanagements den Qualitätsanspruch „Funktionserfüllung“ im gesamten Produktlebenszyklus zu gewährleisten. Die Komplexität der Problemstellung und die erforderliche Prognose der Betriebsphase erfordern eine durchgängige Herangehensweise. Diese lassen sich in präventive Maßnahmen (hohe Material-/Prozessqualität, toleranzgerechte Konstruktion, Robustheit, ...) und korrigierende Maßnahmen (Einstell-/Kalibriermöglichkeiten, ...) unterteilen, zwischen denen jeweils abgewogen werden muss.

3.2.2 Toleranzmanagement

Um die geforderte Durchgängigkeit der Toleranzbetrachtung im vielschichtigen Interessensgebilde des Produktlebenszyklus effizient sicher zu stellen, scheint eine Gewährleistung der folgenden drei Aspekte unerlässlich: des analytischen, des kommunikativen und des integrierenden Auftrags des Toleranzmanagements.

Die *analytischen Methoden* müssen sicherstellen, dass eine Problemstellung in ihrer Ganzheit und Komplexität erfasst und auf eine handhabbare Form reduziert werden kann. Die mathematischen und betriebswirtschaftlichen Mittel zur analytischen Beschreibung des Tolerierungsprozesses werden ausführlich in [BH13a] erläutert.

Kommunikative Methoden ermöglichen die einheitliche Interpretation der Beschlüsse und damit die Überwachung der Einhaltung. Alle Beteiligten müssen bei der Toleranzspezifikation die gleiche Sprache sprechen. In Analogie zur Sprachwissenschaft kann diese Sprache zerlegt werden in die Toleranzsymbolik (Vokabular), die Normung (Grammatik) und die

¹z.B. die DIN-Normen ISO 8015, ISO 1101, ISO 5450 und ISO 5459

Illustration (Semantik) (in Anlehnung an [Sto10, S.32]). Dabei ist es erforderlich eine parallele Bewertung verschiedener Konstruktions- und Prozessvarianten zu ermöglichen und den Informationsfluss, sowohl innerhalb des Entwicklungsprozesses einer einzelnen Baureihe als auch baureihen- und modellübergreifend, zu gewährleisten.

Diese beiden ersten Faktoren können aber nur zur Entfaltung gebracht werden, wenn sichergestellt ist, dass sie in die Entscheidungsfindung und die Folgeprozesse integriert werden. Diese Integration beinhaltet die Berücksichtigung während der Konzeption, die qualitative und quantitative Kontrolle und Analyse während der Entstehungsphase (Entwicklung und Produktion) sowie das Sicherstellen des Informations(rück)flusses zwischen den einzelnen Prozessphasen und -beteiligten. Auch diese *integrativen Methoden* sind Aufgabe des Toleranzmanagements.

In [BH13a] werden die fünf Funktionen des Managements (Abb. 3.1) den Aufgaben des Toleranzmanagements gegenübergestellt. Daraus wird die Definition des Toleranzmanagements wie folgt abgeleitet:

Das Toleranzmanagement ist ein Teilprozess des Entwicklungsprozesses, mit dem Ziel die Funktionserfüllung eines Produkts mittels Managementmethoden bei möglichst geringen Herstellkosten durch ein optimales Toleranzkonzept sicherzustellen. [BH13a, S.4]

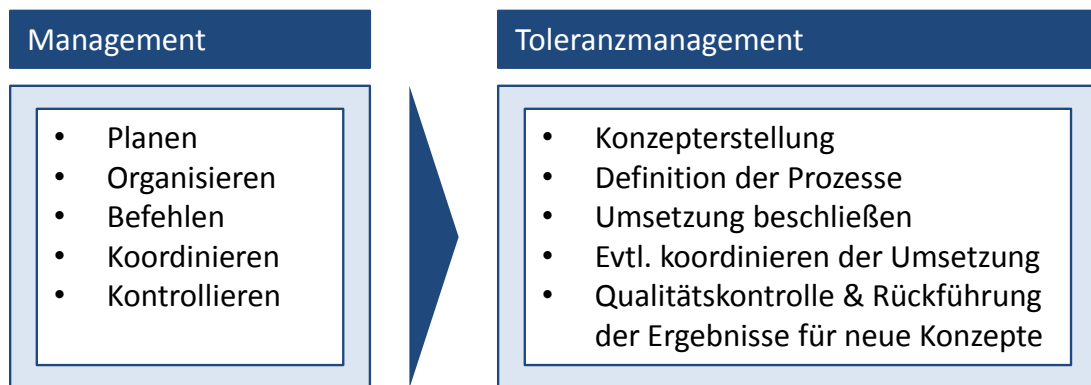


Bild 3.1: Aufgabenstellung des Toleranzmanagements [BH13a, S.4]

Qualitätsbezogene Kosten tragen mit 5-15% zu den gesamten Herstellungskosten bei [Mer04, S.30]. Der Schwerpunkt der meisten Studien zum Thema Toleranzmanagement liegt daher auf der Kostenkontrolle. Diese Ansätze folgen meist den drei Schritten Identifikation der Ursachen, Beurteilung/Prüfung und Verringerung der Abweichungsrisiken [Sto10, S.11]. Es handelt sich dabei also um eine rein präventive Absicherung.

Martin Bohn weist in seiner Arbeit [Boh98, S.22] bereits 1998 darauf hin, dass zur

Erfüllung dieser Aufgabe die Teilbereiche Toleranzpolitik, Toleranzverbesserung, Toleranzplanung, Toleranzlenkung und Toleranzsicherung unter der Führung eines Toleranzmanagements durchgängig in den Entwicklungs- und Produktionsprozess eingegliedert werden müssen [vP02, S.99]. Aus diesem Ansatz erweitert sich die Definition des Toleranzmanagements um eine prozessgebundene Aufgabe:

Die Aufgabenstellung im Sinne eines ganzheitlichen Toleranzmanagements ist es zu robusten Produkten zu gelangen. [Sto10, S.2]

Robustheit definiert sich hierbei als akzeptable Balance zwischen der Streuung der Eingangs- und Ausgangswerte [Reu00]. Die Prozesse müssen also um korrigierende Elemente erweitert werden, die es ermöglichen, eine anfängliche oder zwischenzeitliche Streuung zu reduzieren, um die definierte Robustheit zu gewährleisten.

Ein ganzheitliches Toleranzmanagement verfolgt einen durchgängigen Ansatz mit präventiven und korrigierenden Maßnahmen. Dazu sind nach [BH13a, S.3] folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Vergabe von Aufnahmen, Ausrichtung und Bezügen zur Ausweisung der Funktion
- funktionsorientierte Tolerierung
- Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit
- Vergabe geeigneter Prüfkriterien
- Garantie der Analysefähigkeit
- Ausweisen von Prozesskennwerten
- Aufzeigen von Maßnahmen zur Verbesserung
- Absicherung während der Fahrzeugentwicklung
- Bewertung neuer Konzepte

3.2.3 Methoden des Toleranzmanagements

[vP02, S.30] zitiert im Zusammenhang mit Tolerierungsmethoden die vier Schritte der Berechnung technischer Systeme nach Bathe. Zuerst ist das komplexe System zu idealisieren, um eine Berechnungsgrundlage zu schaffen. Dieses idealisierte System kann dann durch ein Gleichungssystem beschrieben werden. Danach wird die Lösung dieses Gleichungssystems erarbeitet und anschließend das Ergebnis interpretiert. Der Tolerierungsprozess nach [Sto10] beinhaltet die Toleranzspezifikation, das Toleranzmodell, die Toleranzrechnung,

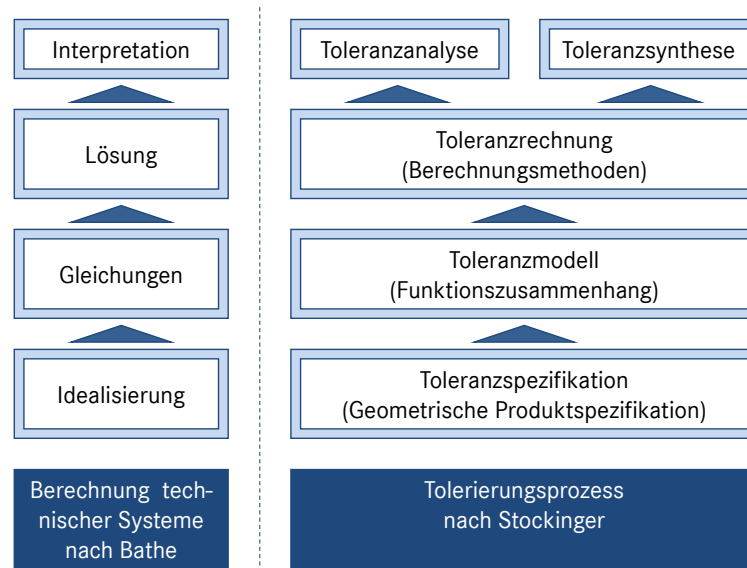


Bild 3.2: Tolerierungsprozess nach [Sto10] im Vergleich zu technischem Lösungsverfahren nach Bathe [vP02]

die Toleranzanalyse und die Toleranzsynthese. Dieser Prozess lässt sich der theoretischen Betrachtung technischer Systeme nach Bathe gegenüberstellen (Abb. 3.2).

Methoden

In [Bro06] werden die Begriffe Analyse und Synthese wie folgt definiert:

- *Analyse:* Zergliederung, Zerlegung, Trennung eines Ganzen in seine Teile, Untersuchung eines Sachverhalts unter Berücksichtigung seiner Teilaspekte.
- *Synthese:* Zusammenfügung, gedankliche Verknüpfung einzelner Teile zu einem Ganzen.

Bei der *Toleranzanalyse* wird die Auswirkung der Einzeltoleranzen auf das Gesamtgefüge untersucht. Man spricht von einem Bottom-Up Ansatz. Bei der *Toleranzsynthese* werden die zulässigen Einzeltoleranzen ausgehend von einer funktionsorientiert definierten Gesamttoleranz abgeleitet. In diesem Fall spricht man von einem Top-Down Ansatz. Die Berechnungsergebnisse werden so in iterativen Schritten abwechselnd aus unterschiedlichen Blickwinkeln interpretiert (Abb. 3.3). Ziel ist eine Vorhersage der zu erwartenden Baugruppenabweichungen und die Identifikation der Beitragsleister [Sto10, S.18ff]. Eine große Bedeutung wird in der Literatur hierbei der Visualisierung und Interpretationstauglichkeit der Ergebnisse beigemessen [BH13a, Sto10]. Es sei hier noch angemerkt, dass der Begriff Toleranzanalyse in der industriellen Praxis in der Regel synonym für den gesamten

Prozess verwendet wird. Um zwischen den beiden Teilprozessen zu unterscheiden, werden hier die Begriffe Top-Down und Bottom-Up verwendet.

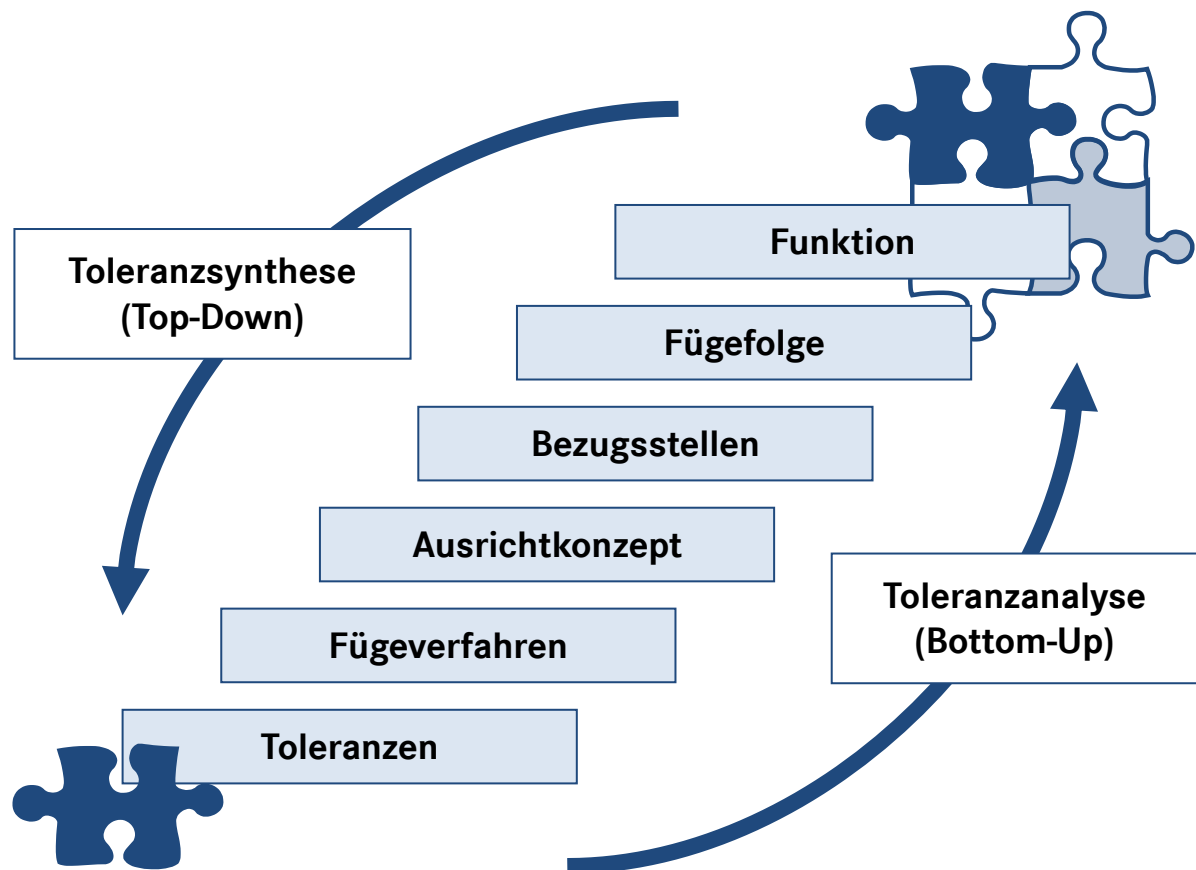


Bild 3.3: Toleranzanalyse und Toleranzsynthese nach [vP02, S.27] und [BH13a, S.97]

Die Ziele der *Toleranzanalyse* definieren sich nach [Sto10, S.18] in der Ermittlung von Maßwirkketten, Funktionsmaßen und Qualitätskriterien (Schließmaßen). Darüber hinaus findet eine systematische Prozessabsicherung statt. Die Ergebnisse werden durch Visualisierung sowie Sensitivitäts- und Beitragsleisteranalysen interpretierbar. Die Komplexität und Vielzahl der Beitragsleister wird in Abbildung 3.4 dargestellt.

Damit ein Toleranzkonzept analysefähig ist, muss es folgende Bestandteile enthalten [BH13a, S.91]:

- Vollständige Beschreibung der Funktionen
- Vollständige geometrische Beschreibung des Produktes

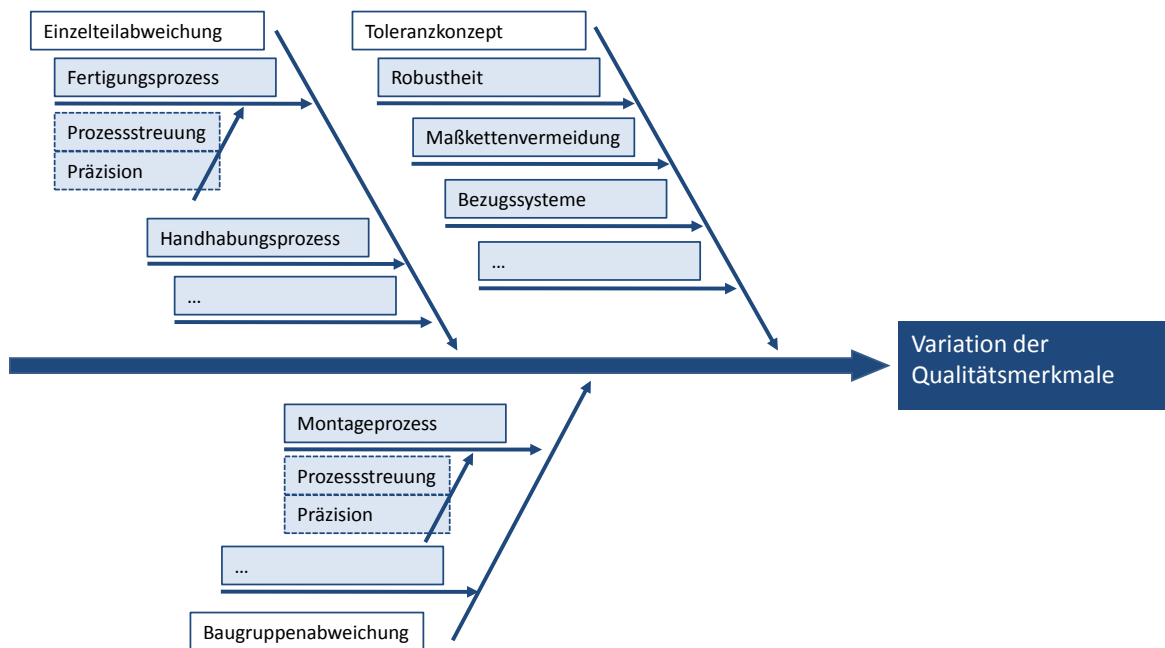


Bild 3.4: Beitragsleister zur Toleranzsteuerung [Sto10, S.66] nach Söderberg et al.

- Vollständige Prozessbeschreibung: Fügefolge, Spann-/Fixierkonzept, Produktionsverfahren
- Messbarkeit aller Prüfkriterien (Funktionen, Toleranzen, Bezüge)
- Fähigkeit der Messmittel (erforderliche Genauigkeit)
- Durchgängigkeit der Bezugsstellen (Vergleichbarkeit der Messberichte, v.a. bei Zulieferern)

Aus diesen Anforderungen kann, in Anlehnung an [Sto10, vP02] (Abb.3.2) ein standardisierter, vierstufiger Analyseprozess abgeleitet werden:

- | | | |
|----------------|-----------------------|---|
| Phase 1 | Toleranzvergabe: | Vergabe der Einzeltoleranzen |
| Phase 2 | Modellierung: | Nachbildung von Toleranzen, Produktgeometrie, Prozessparameter/-abfolge, Wirkketten und Messstellen im math. Modell |
| Phase 3 | Rechnung: | Lösung nach ausgewähltem math. Verfahren |
| Phase 4 | Ergebnispräsentation: | Ergebnisdarstellung und Interpretation, Ableitung von Handlungsanweisungen und Empfehlungen |

Ziel der *Toleranzsynthese* ist es, die Einzeltoleranzvergabe mit Blick auf alle gestellten Anforderungen zu steuern. Die funktionale Maßanforderung zu gewährleisten hat dabei

die höchste Priorität [Sto10, S.38]. Andere Anforderung wie Kostenoptimierung, Material- und Prozessanforderungen sollten aber ebenfalls Beachtung finden.

Das Ergebnis der Toleranzsynthese ist eine Einzeltoleranzvergabe in Einklang mit den Anforderungen an die gesamte Baugruppe. Diese Anforderungen werden je nach Bauteil und Produkt von einer Vielzahl an Interessensvertretern aufgestellt und kontrolliert. Dadurch beinhaltet die Toleranzsynthese eine ausgeprägte kommunikative Komponente. Bei der Ergebnispräsentation ist eine solide Diskussions- und Interpretationsgrundlage von großer Bedeutung.

Wie Abb. 3.3 verdeutlicht, durchläuft das Toleranzmanagement die Analyse und Synthese in iterativen Prozessschleifen. Mathematische Verfahren der Toleranzanalyse und -synthese stützen sich auf verschiedenste Lösungsstrategien, die sich durch den Arbeitsaufwand und mögliche sensitive Kriterien unterscheiden. Sie sind jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit. Eine ausführlichere Erklärung findet sich in [Sto10].

Prozesskennzahlen

Das entscheidende Kriterium zur Beherrschbarkeit von komplexen Prozessen ist die Reduktion der Informationsmenge ohne Verlust der kausalen Zusammenhänge durch Abstraktion. Die Reduktion wird durch Einführung von Kennzahlen und Indikatoren erreicht, welche die Entscheidungsfindung und die Kontrolle der Prozesse ermöglichen. Um die kausalen Zusammenhänge nicht zu verlieren, ist es meistens nötig das Zusammenspiel verschiedener Kennzahlen zu betrachten. Die Interpretation der Kennzahlen und damit die Bewertung des Prozesses verlangt zu jeder Kennzahl Ziel- und Grenzwerte.

Ein Beispiel für solche Indikatoren im Toleranzmanagement sind die Key Characteristica. Das sind Qualitätsmerkmale die eine Funktion definieren. So reduziert zum Beispiel ein Schließmaß eine große Zahl von Einzeltoleranzen auf einen einzigen verständlichen und prüfbaren Wert. Über die zugehörige mathematische Beschreibung der Toleranzkette bleiben die kausalen Zusammenhänge trotzdem im Hintergrund bestehen und können im Zweifelsfall nachvollzogen werden. Die Key Characteristica ermöglichen in der Planungsphase die Interpretation geometrischer Änderungen und in der Produktion die Qualitätskontrolle. Sie beziehen sich jedoch nur auf ein einzelnes Bauteil oder eine Baugruppe und sagen nichts über den Produktionsprozess aus.

Zwei weitere Prozesskennzahlen erlauben es, die Eigenschaften der Produktionsprozesse bereits in der Planungsphase berücksichtigen zu können: das *Prozesspotential* bewertet, ob ein Prozess die geforderten Qualitätsansprüche überhaupt liefern kann und die *Prozessfähigkeit* wie viel Ausschuss ein Prozess erzeugen wird. Beide Kennzahlen werden

auch zur kontinuierlichen Prozesskontrolle in der späteren Produktionsphase eingesetzt². Eine anschauliche Erklärung liefert das Kapitel Qualitätskenngrößen in [BH13a, S.27ff].

Prozess

Das Thema Toleranzmanagement ist ein relativ junges Forschungsthema. [Boh98] aus dem Jahr 1998 ist die erste Arbeit, die einen durchgängigen Ansatz untersucht. Seitdem sind nur wenige Arbeiten veröffentlicht worden, die sich mit dem Prozessschema des Toleranzmanagements auseinandersetzen. Eine sehr ausführliche Zusammenfassung dieser Arbeiten findet sich in [Sto10] aus dem Jahr 2010. Aufgrund der unterschiedlichen Schwerpunkte der Arbeiten (Durchgängigkeit, Robustheit, Qualitätskriterien,...) variieren auch die vorgeschlagenen Prozessschemata. Die vorliegende Arbeit orientiert sich an dem Prozess des Verbands der Automobilindustrie (VDA) (Abb. 6.4), da dieser nach Meinung des Autors den allgemeingültigsten Ansatz darstellt und gleichzeitig die beste Übertragbarkeit auf die erlebte Praxis ermöglicht.

3.2.4 Messtechnische Grundlagen

Die Grundlage für den Vergleich zwischen den theoretischen Überlegungen der Toleranzvergabe und den Produktionsprozessen mit Hilfe der Prozesskennzahlen bilden stichprobenartige Messungen von Prototypen- und Serienbauteilen. Dieses Kapitel bietet einen kurzen Einblick in die für das Toleranzmanagement relevanten Aspekte der Messtechnik. Es erhebt dabei bezogen auf die Messtechnik keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für eine Vertiefung wird z.B. [CHTF08] empfohlen.

Durch Vergleich mit der Aufzählung der Aufgaben des Toleranzmanagements in Kapitel 3.2.2 lassen sich die Schnittstellen zwischen Messtechnik und Toleranzmanagement wie folgt definieren:

- Ausweisung der Bezugsstellen
- Vergabe geeigneter Prüfkriterien
- Garantie der Analysefähigkeit

Aus mathematischer Sicht liegt bei der Vergabe der Bezugsstellen das Hauptaugenmerk auf einer durchgängigen Vergabe der Bezugs- und Ausrichtungsstellen, um eine einheitliche und durchgängige Analyse zu ermöglichen. Aus Sicht der Messtechnik sind die Kriterien zur Wahl der Messstellen die Erreichbarkeit sowie die Wiederholbarkeit der

²Eine Neudefinition der Prozesskenngrößen und deren statistischer Aussagekraft wird aktuell diskutiert (S. 19).

Messgenauigkeit. Um die Analysefähigkeit zu garantieren, ist die Lage der Bezugsstellen nur in durchgängiger Abstimmung zwischen Toleranzmanagement und Messtechnik zu erreichen. Es ist daher notwendig, dass Beteiligte beider Disziplinen früh und regelmäßig in den Dialog treten.

Die Vergabe geeigneter Prüfkriterien beinhaltet auch die Vorgabe geeigneter Prüfmittel und -prozesse. Dabei stehen verschiedene Messverfahren zu Verfügung, deren Messgenauigkeit unter einer Vielzahl äußerer Einflüsse beurteilt werden muss (Abb. 3.5).

Der VDA formuliert aus Industrie- und Verbandsnormen die Forderung jedem Messergebnis eine Messgenauigkeit zuzuordnen. Dabei kann jedoch im Falle einer Serienmessung auch eine Fähigkeitsuntersuchung des Messprozesses durchgeführt werden, um einer unwirtschaftlichen Kontrolle jeder Einzelmessung vorzubeugen [VDA06, S.5].

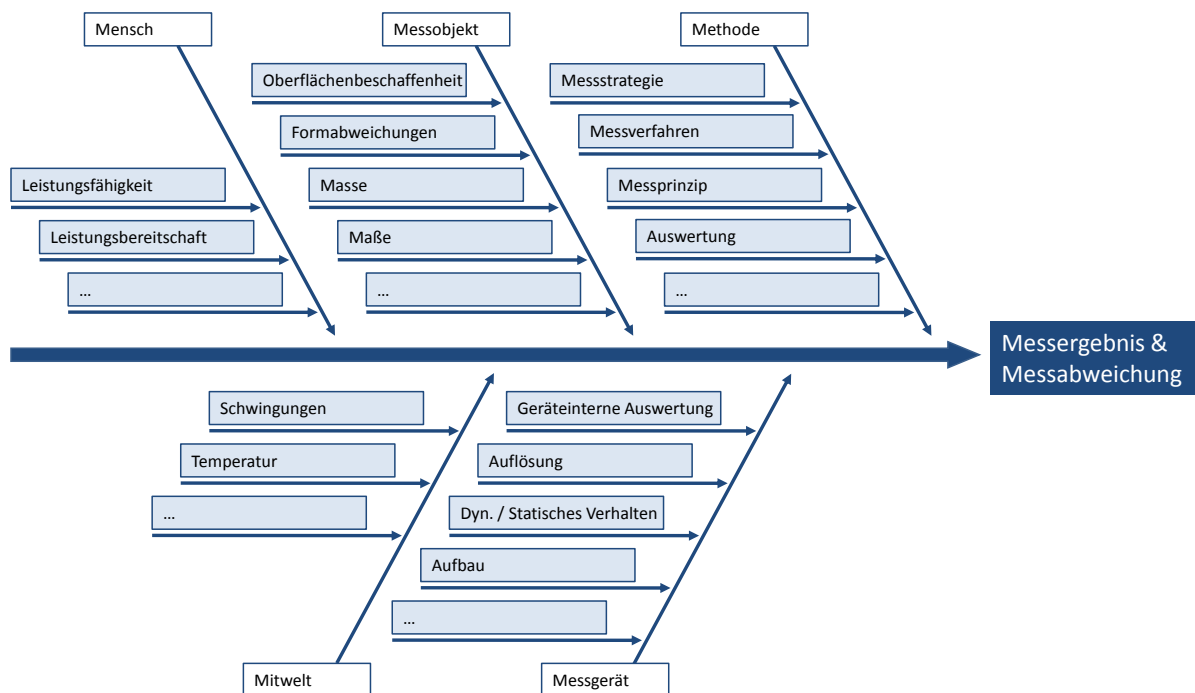


Bild 3.5: Einflüsse auf den Prüfprozess [VDA06, S.23] nach T. Pfeifer

Bestandteil der Analysefähigkeit ist die Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen theoretischer Toleranzmethoden und dem realen Produktionsprozess durch Prozesskennzahlen (Kap. 3.2.3). Dabei setzt sich die gemessene Prozessstreuung σ aus der Fertigungsstreuung σ_f und der Streuung der Messung σ_m zusammen: $\sigma = \sigma_f + \sigma_m$. Diese Überlagerung ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

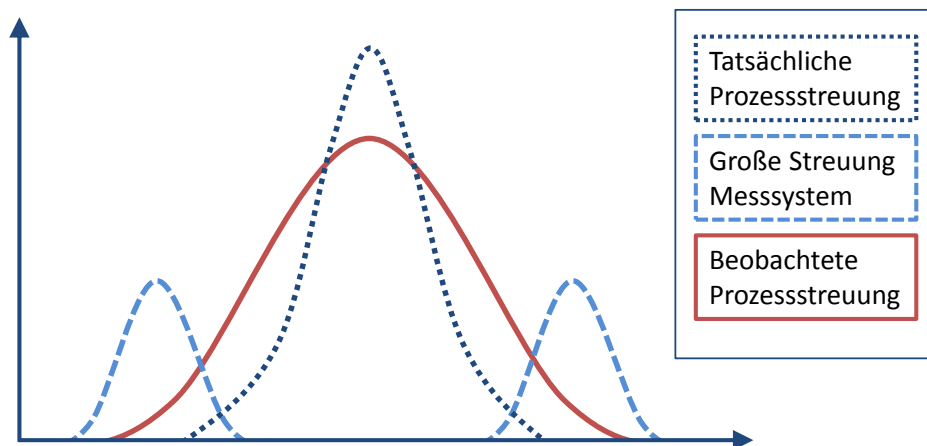


Bild 3.6: Überlagerung von Fertigungs- und Messunsicherheit (nicht maßstabsgetreu) [VDA06, S.24]

Da die Streuung in die Berechnung der Prozesskenngrößen einfließt, hat die Messunsicherheit direkten Einfluss auf die Analysefähigkeit des Toleranzkonzeptes. Da im Moment eine Neudefinition der Prozesskenngrößen und deren statistischer Aussagekraft diskutiert wird, soll in dieser Arbeit darauf nicht weiter eingegangen werden. Detaillierte Ausführungen zum aktuellen Definitionsstatus finden sich in [MSA02] und [VDA06].

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass sich die Messunsicherheit an verschiedenen Stellen im Entwicklungsprozess unterschiedlich auswirkt. So muss zum Beispiel ein Lieferant den Toleranzbereich um die Messgenauigkeit seiner Messmittel einschränken, um die Einhaltung der Toleranzen zu garantieren. Der OEM muss bei der Abnahme der Lieferung hingegen den Toleranzbereich entsprechend erweitern [VDA06, S.29].

3.3 Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess

In den vorausgegangenen Unterkapiteln wurde die Komplexität des Themenbereichs *Toleranzen im Automobilbau* aufgezeigt. Diese beruht zum einen auf der inhärenten Komplexität des Produkts Automobil selbst, wie auch auf dem hohen Vernetzungs- und Kommunikationsbedarf der Verantwortlichen im Unternehmen untereinander und mit externen Parteien. Abbildung 3.7 zeigt den schematischen Informationsfluss innerhalb des Toleranzprozesses. Es wird verdeutlicht wie eng die Teilprozesse des Toleranzmanagements miteinander und mit den Iterationsschleifen des Entwicklungsprozesses vernetzt sind.

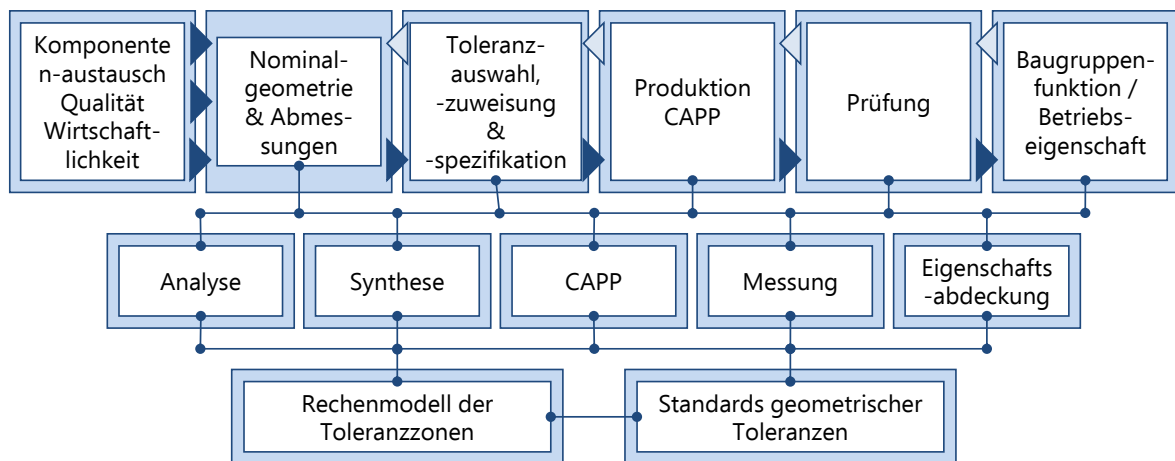


Bild 3.7: Toleranzinformationsnutzung und -transfer (CAPP=Computer Aided Production Planning) [Sto10, S.15]

Es ist daher wichtig, dass das Toleranzmanagement und seine Ergebnisse einen definierten Platz im Entwicklungsprozess zugewiesen bekommen. Dies schließt insbesondere eine Berücksichtigung der Toleranzergebnisse bei der Definition der entsprechenden Meilensteine mit ein. Der hohe Vernetzungsgrad des Toleranzmanagements bei der gleichzeitig hohen Dynamik des Entwicklungsprozesses macht hier ein strukturiertes Vorgehen notwendig. Die Informationsgrundlage muss oft von vielen beteiligten Parteien zusammengetragen werden, bevor eine Toleranzbetrachtung vorgenommen werden kann. Ohne abgestimmtes Vorgehen besteht die Gefahr, dass zum Zeitpunkt vorliegender Ergebnisse der teilweise zeitintensive Toleranzrechnung die Informationsgrundlage bereits veraltet ist. Mit zunehmendem Fortschritt im Entwicklungsprozess sinkt der Gestaltungsspielraum, da die Kosten einer potentiellen Änderung steigen (Abb. 3.8). Gerade deshalb sind für interdisziplinäre Prozesse wie das Toleranzmanagement ein definierter Informationsfluss und eine synchronisierte Datengrundlage besonders wichtig.

Eine wichtige Aufgabe des Toleranzmanagements besteht darin, ein interdisziplinäres Bewusstsein für toleranzkritische Aspekte zu schaffen [Sto10, S.95]. Der beschriebene Informationsfluss und der daraus wachsende Abstimmungsbedarf des Toleranzmanagements müssen sich hierfür in der Unternehmensstruktur widerspiegeln. Im Entwicklungsprozess müssen die zeitlichen und personellen Kapazitäten für die Kommunikation und Abstimmung bereitgestellt werden:

Eine Einordnung der Methoden und Vorgehensweisen in den Entwicklungsprozess ist [...] unerlässlich, da nur somit eine Effizienzsteigerung der Produktentwicklung und -

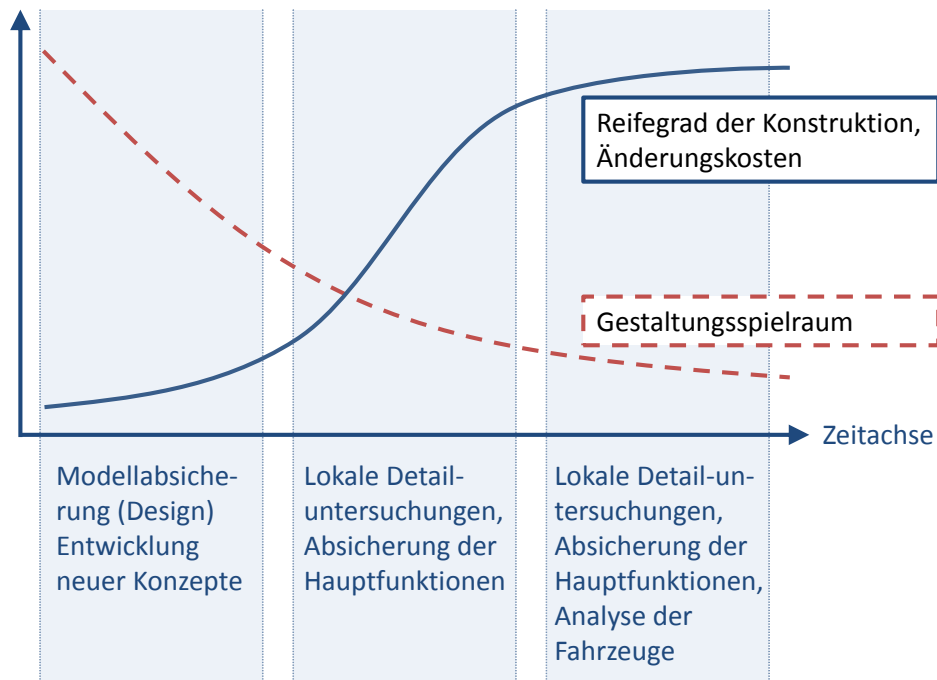


Bild 3.8: Zeitliche Einordnung der Toleranzschwerpunkte im Entwicklungsprozess [BH13a, S.91]

entstehung herbeigeführt werden kann. Dies geht mit der Bereitstellung von transparenten, handhabbaren Methoden und Vorgehensweisen einher - und zwar nicht nur für die Ausarbeitung sondern bereits für die toleranzgerechte Produktkonzeption und vor allem für die produktentstehungsphasen-übergreifende Kommunikation der dimensionalen Forderungen im Sinne eines durchgängigen, integrierten Toleranz- und Variationsmanagements. [Sto10, S.96]

3.3.1 Digitale & physische Objekte im Toleranzmanagement

Ziel des Toleranzmanagements ist eine frühzeitige Absicherung der Toleranzkonzepte in der digitalen Entwicklungsphase (Abb. 3.8). Die Methodik zur Erstellung des Toleranzkonzepts (Abb. 3.9) erfolgt auf Grundlage von DMU und PMU. Entsprechende Methoden sind in der Entwicklungslandschaft der OEMs abgebildet. Die in Abbildung 3.9 gezeigte Vorgehensweise wird in mehreren iterativen Schleifen durchlaufen. Im Folgenden wird auf die Punkte dieser Methodik und die damit verknüpften, digitalen und physischen Objekte eingegangen (Abb. 3.12).

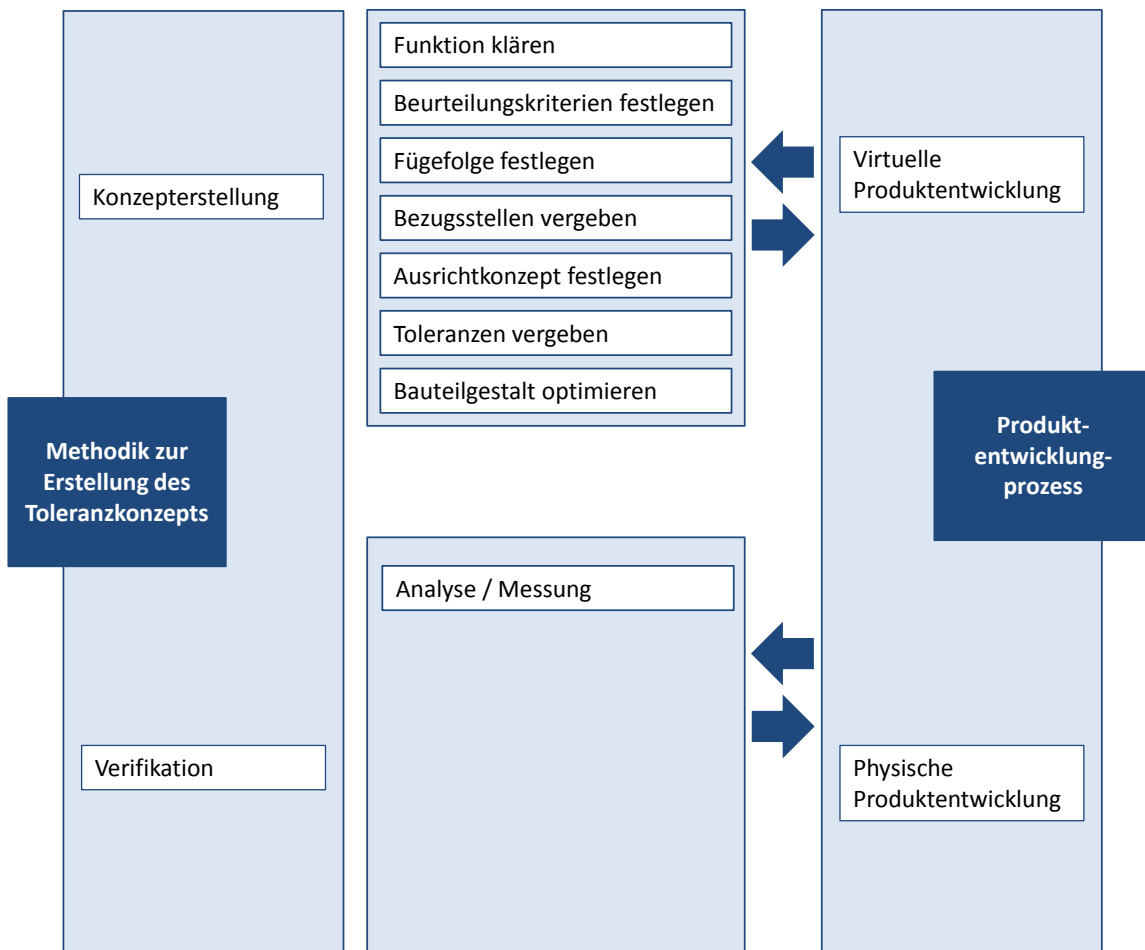


Bild 3.9: Methodik zur Erstellung des Toleranzkonzepts nach [BH13a, S.106]

i) Funktion

Der Sinn der festzulegenden Toleranzgrenzen ist die Funktionalität des Endprodukts zu garantieren. Die vollständige Erfassung aller zu erfüllenden Funktionen des Produkts ist der erste Schritt jedes Tolerierungsprozesses. Die Liste der geforderten Funktionen legt den Rahmen für die geometrische Spezifikation des Produktes fest.

Die Funktion, in der Literatur auch Merkmal genannt, wird in der DIN EN ISO 9000:2000-12 als *kennzeichnende Eigenschaft einer betrachteten Einheit* definiert [VDA06, S.3]. Eine Funktion kann sich auf ein spezifisches Bauteil (z.B. Tür muss schließen) oder auf das vollständig Produkt beziehen (z.B. Geräuscharmheit, Treibstoffverbrauch). Im letzteren Fall muss der Produktanspruch auf verschiedene Beitragsleister in den Baugruppen aufgeteilt und deren Zusammenspiel immer wieder überprüft werden. Die Liste der geforderten Funktionen wird am Anfang des Entwicklungsprozesses digital festgehalten.

ii) Beurteilungskriterium

Um die Analysefähigkeit zu erfüllen müssen im Toleranzkonzept die geforderten Funktionen mit geeigneten Prüfkriterien und Grenzwerten verknüpft werden [BH13a, S.80]. Dabei kann eine Funktion mehrere Kriterien beinhalten. In der Automobilindustrie werden die Funktionen durch rein geometrische Kriterien beurteilt (Tab. 3.1). Kriterien sind so zu wählen, dass sie nachvollziehbar, wiederholgenau und analysefähig sind. Dafür muss der eindeutige Bezug der Kriterien zu der Funktion aufgezeigt und jedem Kriterium ein geeignetes Prüf-/Messmittel zugeordnet werden [BH13a, S.40].

Digital werden die Beurteilungskriterien im *Fugen- und Radienplan* sowie im *Funktionsmaßkatalog* dokumentiert. Der Fugen- und Radienplan beinhaltet alle Sollmaße und Toleranzen der Fugen und Kanten am Fahrzeug. Damit werden vor allem ästhetische und aerodynamische Funktionen abgedeckt. Der Funktionsmaßkatalog enthält die tolerierten Relativmaße der montagerelevanten Teile (Bohrungen, Bolzen ...) zu den Bezugspunkten und zueinander. Damit werden die Montagefähigkeit und die Funktionalität der Anbauteile sowie deren Schließmaße sichergestellt.

Bei den definierten Kriterien muss auf generelle Prüfbarkeit geachtet werden. Die theoretisch geforderte Zuordnung einzelner Prüfmittel erfolgt in der Praxis jedoch nicht durch das Toleranzmanagement. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass prüffähige Messmittel vorhanden sind. Das geeignete Messmittel wird dann in Übereinstimmung mit dem Entwicklungs- und Produktionsprozess von der Abteilung Qualitätsmanagement oder Messtechnik gewählt.

iii) Fügefolge

Um ein durchgängiges Bezugs- und Ausrichtkonzept sicherstellen zu können, muss zuvor die Folge der einzelnen Fügeschritte im Fertigungsprozess definiert werden. Wie in Kapitel 2 dargestellt, wird das Automobil in unterschiedliche Baugruppen und An-

Funktion	Kriterien
Optik	Fuge: Fugenmaß, Versatz, Verlauf Fläche: Strukturkanten, Linien, Lichtspiegelverläufe
Anbindung	Lage, Ausrichtung, Oberfläche
Kinematik	Lage und Ausrichtung in geschlossener Position, Engstellenlage
Dichtung	Lage, Maß der Überdrückung

Tabelle 3.1: Beurteilungskriterien nach [BH13a]

bauteile gegliedert. Die Reihenfolge der Fügeschritte wirkt sich im Zusammenspiel mit den Aufnahme- und Bezugspunkten dabei auf die erreichbaren Toleranzwerte aus. Die Fügefolge kann daher nicht getrennt vom Toleranzkonzept betrachtet werden sondern entsteht im Zusammenspiel mit diesem. Der *Fügeplan* wird ebenfalls als wohldefiniertes Dokument digital im Entwicklungsprozess spezifiziert. Abbildung 3.10 zeigt exemplarisch die Fügefolge für den Zusammenbau des Heckdeckels eines CLS bei Mercedes-Benz.

iv) Bezugsstellen & Ausrichtkonzept

Lage- und Richtungstoleranzen müssen immer respektive einer Bezugsstelle definiert werden. Die Bezüge werden digital in den Toleranzangaben spezifiziert. Die Bezugsstelle selbst stellt in Hinsicht der Tolerierung die absolute Nulllage dar. Die Toleranzen müssen so gewählt werden, dass die erlaubte Abweichung gegen den Bezug die volle Funktionsfähigkeit des Bauteils garantiert. Gleichzeitig ist die Bezugsstelle später maßgeblich für eine messtechnische Prüfung der definierten Toleranzkriterien.

Im späteren Montageprozess müssen die Bauteile vor dem eigentlichen Fügeprozess zueinander positioniert werden. Zu diesem Zweck werden an den zu fügenden Bauteilen Bezugspunkte definiert, welche in einer oder mehreren Koordinatenrichtungen beim Fügen deckungsgleich sein müssen. Diese Ausrichtung der Bauteile aneinander wird im Ausrichtkonzept festgelegt.

Ausrichtung und Bezug beeinflussen die Tolerierung (Abb. 3.11). Für eine schlüssige Toleranzbetrachtung ist es daher notwendig, ein durchgängiges Ausrichtkonzept zu erstellen, welches Montierbarkeit und Tolerierung beachtet. Ein Bauteil hat im Raum sechs Freiheitsgrade. Um ein Bauteil eindeutig im Raum zu definieren, müssen sechs Koordinatenbedingungen im Ausrichtkonzept festgelegt werden (3-2-1 Regel). Beim Fügeprozess existieren im Anfangsstadium zwei freie Bauteile mit insgesamt zwölf Ausrichtbedingungen. Nach dem Fügeprozess sind die Bauteile zu einem einzelnen Bauteil geworden. Damit sind sechs Ausrichtbedingungen für den weiteren Prozess überflüssig und entfallen.

Um ein durchgängiges Toleranzkonzept zu erhalten sollten die Bezugsstellen identisch mit den Ausrichtkoordinaten gewählt werden. Die Ausrichtstellen sollten mit den Aufnahmepunkten der Füge- und Montagevorrichtungen identisch sein. In der Praxis muss in verschiedenen Fällen von diesem Idealprozess abgewichen werden. Die Analysefähigkeit fordert die Erreichbarkeit der Bezugsstellen durch messtechnische Mittel. Im Fügeprozess kann der Ausrichtpunkt jedoch nach dem Fügen unzugänglich sein. Flexible Bauteile erfordern oft eine überbestimmte Aufnahme an mehr als sechs Bezugsstellen, um eine Verformung während des Montageprozesses zu verhindern. Durch historisch vorhandene

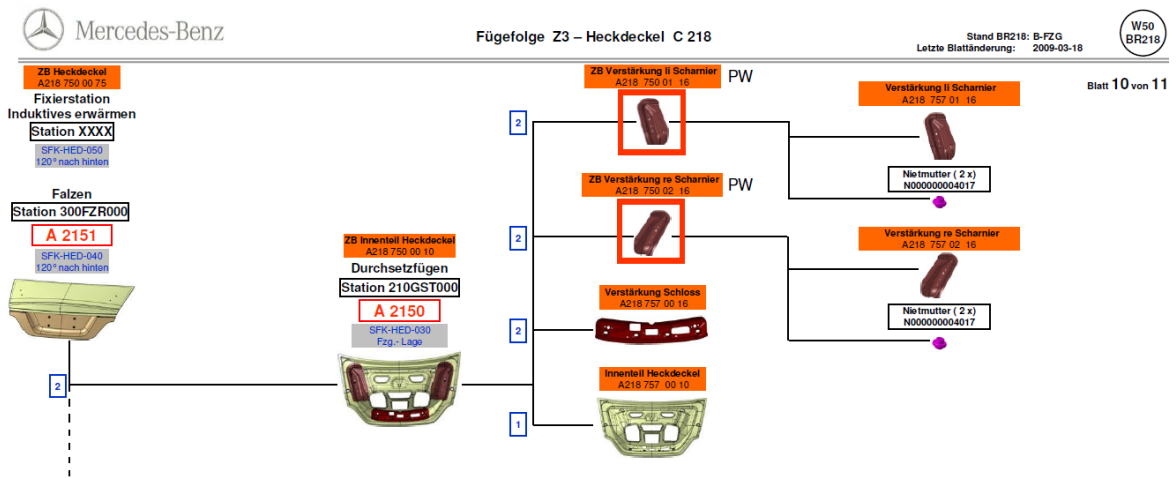


Bild 3.10: Auszug aus einer Fügefolge bei Mercedes-Benz: Heckdeckel des CLS (C218) (Quelle: Daimler AG)

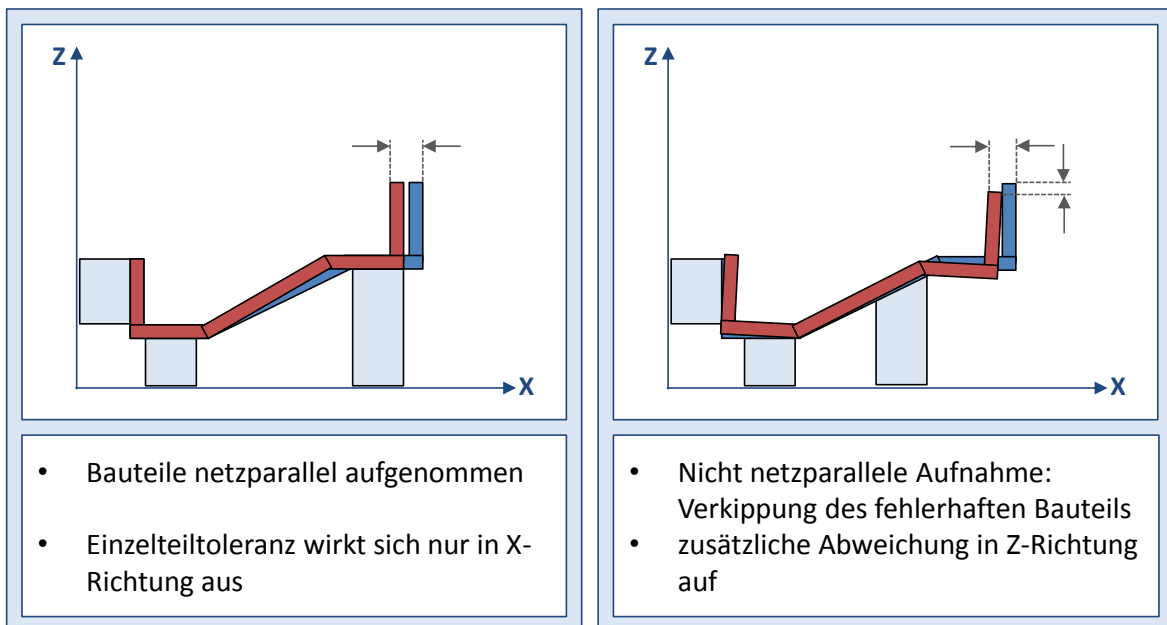


Bild 3.11: Einfluss der Wahl des Ausrichtkonzepts auf die Toleranzen [BH13a, S.70]

Aufnahmevorrichtungen und Montageanlagen kann eine Abweichung zwischen Aufnahme und Bezug entstehen.

Digital spiegeln sich die Bezüge und das Ausrichtungskonzept im *Funktionsmaßkatalog* und im *Fügeplan* wider. Für die Einhaltung während der Montage wird ein eigenes *Spann- und Fixierkonzept* erstellt. Darüber hinaus legen Bezugsstellen und Ausrichtkonzept fest in welchem Maße sich einzelne Toleranzen zu Baugruppentoleranzen aufsummieren. Diese Verkettung muss der mathematischen Formulierung der Toleranzberechnung zugrunde gelegt werden. Diese *Toleranzketten* sind ebenfalls ein digitales Objekt im Toleranzmanagement.

v) Toleranzvergabe

Unter Berücksichtigung aller aufgezählten Punkte und in Abstimmung mit Produktion bzw. Zulieferer und den bauteilverantwortlichen Konstrukteuren werden die Toleranzgrenzen festgelegt. Die *Toleranzspezifikation* der einzelnen Bauteile sowie der Baugruppen findet digital direkt in der *Konstruktionszeichnung* (CAD-Daten) statt.

vi) Bauteilgestalt optimieren

Die digitale Konstruktionszeichnung (CAD-Daten) bildet die Grundlage für den gesamten Entwicklungsprozess einschließlich der Tolerierung (Kap.2.2). Die Erkenntnisse der Toleranzanalyse können Konstruktionsänderungen nach sich ziehen. Daher sind auch die CAD-Daten sowie der Konstruktionsprozess digitale Objekte des Toleranzmanagements.

vii) Analyse & Messung

Das Toleranzmanagement muss sich mit zwei verschiedenen Arten physischer Objekte beschäftigen: Dem Produkt selbst sowie den Betriebsmitteln, die zur Produktion benötigt werden. Durch die Konzentration auf toleranzspezifische Aspekte wird die Komplexität des technischen Produkts Automobil stark reduziert [BH13a, S.40]. Diese Abstraktion geht über die konstruktive Unterteilung in Baugruppen hinaus.

Auf Produktseite liegt dabei ein besonderes Augenmerk auf dem Zusammenspiel verschiedener Bauteiltoleranzen. Dabei muss zum einen die Montagefähigkeit der *toleranzbehafteten Bauteile* über die Schnittstelle zwischen *Rohbau und Anbauteil* sichergestellt werden [BH13a, S.42]. Zum anderen spiegeln die *Fugen-/Spaltmaße und Radian* die Funktionalität und Anmutung durch die Positionierung der Bauteile zueinander wider. Diese Betrachtung beginnt bereits bei frühen Prototypen und zieht sich über Entwicklungs- und Bestätigungsfahrzeuge bis in den Produktionsanlauf.

Zum Verständnis des Einflusses der Betriebsmittel auf die Tolerierung müssen vor allem die *spann- und fixierrelevanten Teile* betrachtet werden: Aufnahmevorrichtungen,

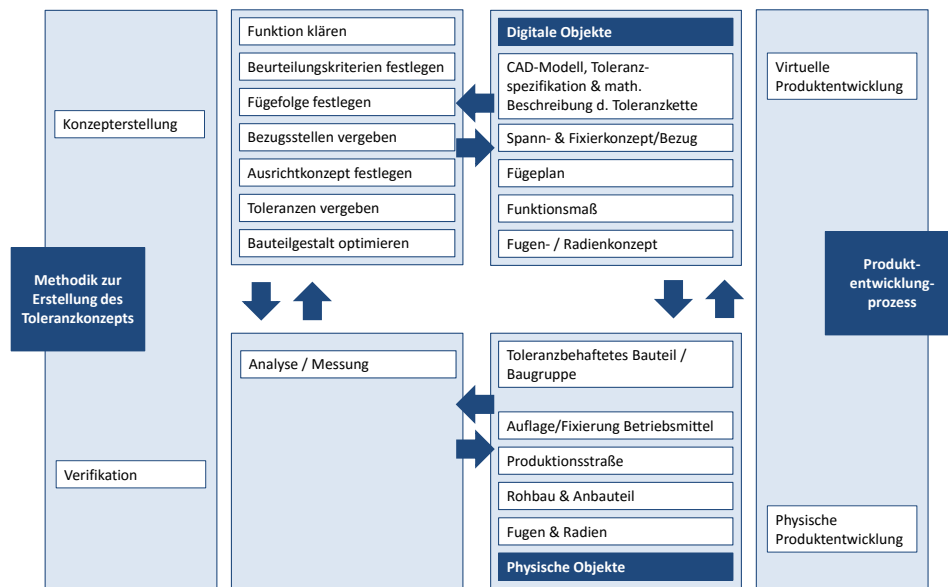


Bild 3.12: Methodik des Toleranzkonzepts nach [BH13a, S.106] erweitert um digitale & physische Objekte

Handlingsgeräte, Auflagen, Spanner, o.Ä. Darüber hinaus gilt es das Zusammenspiel der einzelnen Betriebsmittel in der *Produktionsstraße* zu betrachten. Eine weitere, wichtige physische Komponente des Toleranzmanagements sind die messtechnischen Betriebsmittel. Dazu zählen Messeinrichtungen und Lehren.

3.4 Zusammenfassung

Der Produktionsprozess der Automobilindustrie, wie in Kapitel 2 geschildert, ist als komplexes Zusammenspiel einer Vielzahl beteiligter Interessensparteien im Konzern und bei Zulieferern gestaltet. In diesem Kapitel wurde vorgestellt, wie die moderne Produktion dabei auf einer prozessorientierten Tolerierung aufbaut. Dabei stellt die Tolerierung einen wichtigen Stellhebel bezüglich Kosten und Qualitätssicherung dar. In dem komplexen und internationalen Produktionsprozess heutiger Automobilkonzerne ist zum Erreichen dieser Ziele ein durchgängiges Toleranzmanagement notwendig.

Aufgabe des Toleranzmanagements ist dabei die Begleitung des Fertigungsprozesses mit Blick auf die Einhaltung und Konsequenzen der Tolerierung von der Konzepterstellung bis zur Qualitätskontrolle. Anschließend garantiert ein durchgängiges Toleranzmanagement die Rückführung der Erkenntnisse in neue Konzepte. Dabei hat das Toleranzmanagement wie vorgestellt einen analytischen, einen kommunikativen und einen integrativen Auftrag.

Dieses Kapitel hat die Methoden vorgestellt, die zur Erfüllung dieser Aufgaben angewandt werden: die Toleranzanalyse und -synthese sowie ihre Einordnung in den Entwicklungsprozess. Besonderes Augenmerk im Sinne der vorliegenden Dissertation lag dabei auf der Identifikation der digitalen und physischen Umfänge, die den Arbeitsauftrag des Toleranzmanagements betreffen. Diese sind in Abbildung 3.12 zusammengefasst. In Kapitel 6 werden daraus die Schnittstellen zwischen DMU und PMU sowie damit verbundene Herausforderungen abgeleitet.

4 Virtual Reality, Mixed Reality und der Mixed Mock-Up

4.1 Einführung

In Kapitel 2.2 wurde der DMU als wichtige Plattform der Produktentwicklung eingeführt. In diesem Kapitel werden wichtige DMU-basierte Methoden und Technologien vorgestellt: In Kapitel 4.2 die Virtual Reality (VR, dt. virtuelle Realität) und ihre Bedeutung für das Toleranzmanagement, in Kapitel 4.3 die Technologie Mixed Reality (MR, dt. gemischte Realität), welche die Verzahnung von DMU und PMU erlaubt und in Kapitel 4.4 wie diese neue Technologie zur Einführung einer neuen Entwicklungsplattform in der Autoindustrie geführt hat: dem Mixed Mock-Up (MMU).

Die konstante Anwendung digitaler Methoden wie VR oder MR ist ein bedeutender Faktor in der industriellen Entwicklung [Jia11]. [Azu97, S.3] zeigt in Anlehnung an den Begriff der Intelligence Amplification (dt. Verstärkung der Intelligenz), dass MR (und Gleiches trifft auf VR zu) nur dort sinnvoll einzusetzen ist, wo die Technologie dem Menschen bei der Erledigung seiner Aufgabe als Werkzeug dient. Die Technologien VR und MR können dieser Aufgabe nur gerecht werden, wenn das Produktdatenmanagement (PDM) eine systematische Verknüpfung von Produktstruktur und -eigenschaften [BHS04, S.84] automatisiert bereitstellt. Die Schlüsselfaktoren für den Erfolg einer Technologie sind dabei nach [Thi11, S.183f]: Datenversorgung, keine Medienbrüche, standardisierte Formate, eine automatisierte Datenaufbereitung, ein bidirektionaler Datenfluss und ein zentralisiertes Datenmanagement.

4.2 Virtual Reality

Bereits in den 80er Jahren wurde in der IT-Forschung die Schaffung einer perfekten künstlichen Welt angestrebt, der „Virtual Reality“ [Noe06, S.4]. Mit wachsenden technologischen Möglichkeiten konnten erstmals digitale VR Prototypen geschaffen werden.

Dieses Kapitel bietet eine kurze Einleitung in das Thema VR. Für eine ausführliche Beschreibung des Themas sei auf [DBG13] verwiesen.

Die VDI-Richtlinie 4499 definiert VR als „Anwendung einer hochmodernen Mensch-Maschine-Schnittstelle [...] die mit dem Einsatz innovativer Endgeräte den Benutzer in eine dreidimensional rechnerinterne Welt einbezieht“ [ZM10]. [Noe06, S.5] definiert VR als „eine Mensch-Maschine-Schnittstelle [...] deren Ziel es ist, eine computergenerierte, künstliche Umgebung wirklichkeitsgetreu erscheinen zu lassen“. Unter Berufung auf zwei Studien von Zeltzer und Stytz erarbeitet er aus dieser Definition drei Klassifizierungsmerkmale für VR: die Immersion ¹, die Interaktion und die Simulation. Um die industriellen VR Anwendungen von realistischen Simulationen der Filmindustrie abzugrenzen, wird ein viertes Klassifizierungsmerkmal eingeführt: die Echtzeitanwendung [Noe06, S.6]. Nach diesen Kriterien definierte VR-Anwendungen entfalten ihr Potential in visuellen Aufgabenstellungen mit hochkomplexen Datenmengen [Teg06, S.2]. Eine große Chance bietet dabei die visuelle Darstellung komplexer mathematischer Zusammenhänge zur Unterstützung der Analyse und Bewertung.

Interaktion in Echtzeit ist Bestandteil vieler IT Technologien. Ein tieferer Einblick in dieses Thema ist für das Verständnis dieser Arbeit nicht notwendig, der interessierte Leser sei auf [DBG13, S.97ff] verwiesen.

Realistische Simulationen bestimmter Produktfacetten sind ein großer Bestandteil des DMU (Abb.2.2). In VR Anwendungen werden die realistischen Aspekte der Simulation eng mit immersiven Darstellungsmethoden verknüpft. Diese Kombination von Realismus und Immersion ist aus Sicht des Autors das Alleinstellungsmerkmale von VR innerhalb des Entwicklungsprozesses.

Realismus der Simulation: Realistische VR Anwendungen lassen sich in zwei Klassen einteilen: technisch-objektive sowie visuell-subjektive Anwendungsfälle. Beispielanwendungen der ersten Klasse sind Baubarkeits- oder Ergonomieuntersuchungen mit realistisch physikalischem Verhalten der Bauteile. Für das Toleranzmanagement und damit die vorliegende Arbeit sind jedoch vorrangig Anwendungsfälle der zweiten Kategorie von Bedeutung. VR Anwendungen ermöglichen hierbei die subjektive Funktion Anmutung (Kap. 3.3) im Kontext der Produktenwicklung methodisch greifbar zu machen.

Um eine physikalisch korrekte, optische Darstellung in VR zu ermöglichen, müssen die DMU-Daten der einzelnen Bauteile (Position, Geometrie, Material, Farbe, etc...) über einen Szenegraph (Baumstruktur) logisch miteinander verknüpft werden [BHS04, S.84]. Auf dieser Grundlage ist das VR Programm in der Lage Texturen auf die Objekte zu

¹Auf www.duden.de wird Immersion im EDV-Kontext als *Eintauchen in eine virtuelle Umgebung* definiert. Abruf: 03.05.2014

legen und anschließend Schatten und Reflektionen zu berechnen [ZM10]. Da den Schatten- und Reflektionsberechnungen rechenintensive, iterative Algorithmen zugrunde liegen, führt dies zu einem Interessenskonflikt mit der geforderten Echtzeit. In Anlehnung an die eingangs erwähnte Forderungen von [Azu97, S.3], gilt es den Rechen-/Hardwareaufwand entsprechend dem Grad des Realismus und dem Anwendungsziel abzuwägen.

Immersive Darstellung: Immersion beschreibt das Eintauchen des Anwenders in die VR, wodurch der Anwender die digitale Darstellung als real erlebt. Dies wird im Allgemeinen durch die Verwendung von 3D Technologien (Projektoren, Bildschirmen oder Brillen) erreicht. Dabei ist die realistische Darstellung als Merkmal von der Immersion entkoppelt. Der Mensch kann einen unrealistischen 3D Cartoonfilm in einer Kino-Stereoprojektion als immersiv erleben, während ein gerendertes, fotorealistisches 2D Bild eines Produktes als nicht immersiv wahrgenommen wird. [ZW11] beschreibt VR als Kommunikationskanal, in dem jeder Teilnehmer seine Ergebnisse oder Interessen im Kontext des Gesamtbildes darstellen kann. Für dieses intuitive Verständnis der dargestellten Inhalte, ist die Immersion von VR Anwendungen von höchster Bedeutung. Im nächsten Kapitel wird gezeigt, wie die Technologie Mixed Reality diese Vorgehensweise auf die physische Erfahrungswelt überträgt und das Kommunikationsspektrum damit erheblich erweitert.

4.3 Mixed Reality

Erste technologische Ansätze für Mixed Reality existierten bereits in den 60er Jahren [Sut68], führten jedoch relativ lange ein wissenschaftliches Nischendasein. Erst die großen technischen Innovationssprünge der 90er Jahre hoben die Technologie zu wirtschaftlich sinnvollen Anwendungsmöglichkeiten [Miz95]. Bereits im Jahr 1994 erstellten Milgram und Kashino ein Klassifizierungsschema für MR Darstellungstechnologien. Da der Übergang zwischen VR, MR und realen Anwendungen fließend ist, schlugen sie eine kontinuierliche Klassifizierung vor: Das Virtuality Continuum [MK94].

Darin beschreibt Mixed Reality den gesamten Raum zwischen rein realen und rein virtuellen Anwendungen (Abb. 4.1). Dieser Raum unterteilt sich weiter in die Augmented Virtuality (AV, dt. erweiterte Virtualität), in dem der virtuelle Anteil überwiegt. Entsprechend wird der andere Teil Augmented Reality (AR, dt. erweiterte Realität) genannt. Ein Beispiel für AV ist die CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) [JK14, S.133ff], eine Mehrseiten-Stereoprojektion mit einem realen Sitz oder realen Bedienelementen. Durch das Einbringen der realen Elemente in die virtuelle, immersive Umgebung, kann der Anwender das virtuell Wahrgenommene mit seiner eigenen Erfahrungswelt in Be-

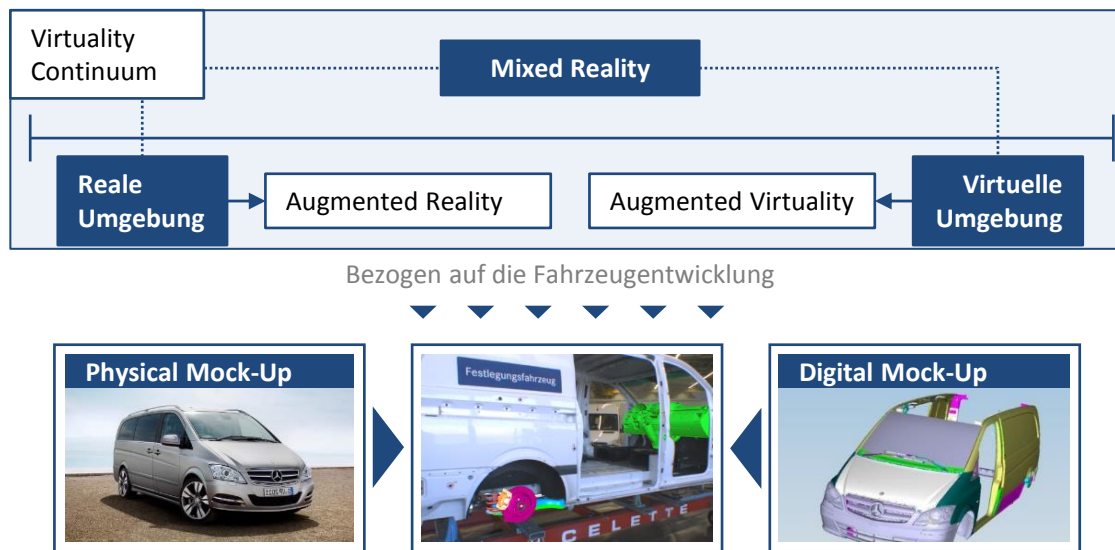


Bild 4.1: Das Virtuality Continuum nach [MK94] bezogen auf die Fahrzeugentwicklung (Quelle: Daimler AG)

zug setzen und z.B. ergonomische Untersuchungen durchführen [Zim01]. Beispiele für AR sind Unterhaltungs- und Navigationsapplikationen auf Smartphones, bei denen das Kamerabild des Geräts um entsprechende digitale Inhalte erweitert wird [Hen07].

Heute, 20 Entwicklungsjahre später, gibt es erste Tendenzen diese Definitionen von MR, AR und AV zu erweitern [Lie11, HFN11]. Für die vorliegende Arbeit wird aber auf das Virtuality Continuum und die ursprüngliche Definition von [MK94, S.6-7] zurückgegriffen: „*Reale Objekte haben eine wirkliche, objektive Existenz, virtuelle Objekte hingegen existieren in Essenz oder Effekt, aber nicht formal oder wirklich*“ (frei übersetzt aus dem Englischen). [Azu97, S.2] leitet daraus die drei Kriterien für Augmented Reality ab, die jedoch für das gesamte Spektrum von Mixed Reality gültig sind:

- Kombination von realen und virtuellen Objekten in einer Umgebung
- Interaktion in Echtzeit
- 3D Registrierung zwischen realen und virtuellen Objekten

Es sei angemerkt, dass diese Definition keine Beschränkung auf die visuelle Wahrnehmung enthält, sondern auch Beispiele für MR in anderen Sinneswahrnehmungen existieren [Azu97, Toe10]. Des Weiteren legt [Bau06, S.1] in seiner Definition von MR besonderen Wert auf die „*Kommunikation zwischen Mensch und Maschine*“, womit der Bogen zur kommunikativen Definition von VR geschlossen und die kontinuierliche Definition von Milgram untermauert wird.

4.3.1 Systemkomponenten & -setup

Dieses Unterkapitel stellt die technologischen Komponenten eines MR Systems vor. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den für diese Arbeit relevanten Aspekten. Für einen guten technologischen Überblick siehe [Toe10]. Für Anwendungsbeispiele oder einen aktuellen Stand der Technik siehe [Noe06] (2006) oder [CF11] (2011).

Mixed Reality Systeme können in drei Klassen eingeteilt werden [MK94, S.7]: Es gibt einige Systeme in denen die realen Objekte direkt vor einem virtuellen Hintergrund betrachtet werden (z.B. CAVE mit realer Sitzkiste). Wird die reale Umgebung hingegen durch eine halbtransparente Darstellungsfläche betrachtet, auf der die virtuellen Objekte dargestellt werden, spricht man von *optical-see-through Systemen*. Wird die Umgebung jedoch durch einen Sensor erfasst (z.B. Kamera) und die Sensordaten vor der Ausgabe in einer Recheneinheit mit den virtuellen Inhalten kombiniert, spricht man von *video-see-through Systemen* [Azu97, S.21].

Optical-see-through Systeme haben den Nachteil, dass sie für eine genaue Darstellung vor jedem Einsatz aufwendig kalibriert werden müssen und ein Einsatz für mehrere Teilnehmer nur unter hohem technischen Aufwand zu realisieren ist [Noe06, S.20]. Für den regelmäßigen Einsatz und die kommunikative Gruppendynamik von MR Anwendungen in der Automobilindustrie eignen sich daher vornehmlich *video-see-through* Systeme (z.B. [Gei12]). Die Kombination der Sensordaten mit den digital gerenderten Inhalten bei *video-see-through* führt zu einer Latenzzeit, die bei zeitkritischen Anwendungen Nachteile hervorrufen kann [Toe10, S.22]. Je nach eingesetztem System kann es auch zu Sichteinschränkungen durch den Sensorbereich kommen. *Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kamen nur video-see-through Systeme zum Einsatz*, da diese eine hinreichend genaue Darstellung sowie eine robuste Kalibrierung ermöglichen und der kommunikativen Komponente des Toleranzmanagements Rechnung tragen. Die Latenzzeit war für alle Anwendungen hinreichend klein und der Bildausschnitt der Kamera ausreichend.

Nach [Toe10] lassen sich die Systemkomponenten eines MR Systems in drei Kategorien einteilen:

- Darstellung
- Tracking
- Interaktion.

Darstellung: Für die Darstellung benötigt man einen Sensor (meist Kamera) zur Erfassung der realen Objekte, eine Recheneinheit zur Simulation der virtuellen Objekte und zur Kombination mit den Sensordaten sowie eine Ausgabeeinheit zur Darstellung

des Ergebnisses. Um eine korrekte Kombination der Inhalte zu erhalten, müssen die virtuelle und die reale Perspektive zueinander passen. Deshalb wird zur Erstellung der virtuellen Inhalte eine virtuelle Kamera simuliert, welche durch extrinsische (Pose = Ort + Lage) und intrinsische Parameter (Abbildungseigenschaft) beschrieben wird [Toe10, S.8]. Um diese Parameter zwischen realem Sensor und virtueller Kamera hinreichend genau abzustimmen, muss das System einer Kalibrierung unterzogen werden (Kap. 4.3.2).

Tracking: Um die extrinsischen Parameter für die virtuelle Kamera zu erhalten, muss die Pose des realen Sensors bezüglich der betrachteten Objekte im Raum erfasst werden können. Die dafür verwendete Technik bezeichnet man als Trackingsystem. Dieses kann, muss aber nicht zwingend mit dem Sensor zur Erfassung der realen Objekte deckungsgleich sein.

Interaktion: Um die Interaktion in Echtzeit zu gewährleisten, muss der Anwender über eine Eingabeschnittstelle die virtuellen Inhalte beeinflussen können.

Ein video-see-through MR System mit Kamera als Sensor zur Erfassung der realen Objekte besteht aus (Abb. 4.2):

- Interaktionsgerät
- Kamera
- Recheneinheit
- Darstellungseinheit
- Trackingsystem

Ergonomie und Usability von *Interaktionsgeräten* in MR Anwendungen ist in der aktuellen Forschung ein vielbeachtetes Thema. Diskutiert werden z.B. Gestensteuerung, Blickerfassung, Spracheingabe oder optische Marker zum Auslösen bestimmter Ereignisse [Toe10, S.96ff]. Für diese Arbeit wurden ausschließlich die handelsüblichen Eingabemedien Maus und Tastatur sowie Touchoberflächen bei mobilen Geräten verwendet.

Bei der Wahl der *Kamera* muss für jeden Anwendungsfall aus der breiten Palette von integrierten, kostengünstigen Kameras mobiler Endgeräte (z.B. Smartphones) über Industriekameras (z.B. [AVT14]) bis hin zu kostenintensiven, hochpräzisen optischen Messmitteln eine maßgeschneiderte Lösung gesucht werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Kameraauflösung die Systemgenauigkeit aber auch die Latenzzeit beeinflusst. Da die Systemgenauigkeit empfindlich von den internen Kameraparametern abhängt, gilt es darauf zu achten, dass diese präzise und robust ermittelt werden können. Empfehlenswert sind hierbei Objektive, die ein mechanisches Fixieren von Fokus und Blende ermöglichen.

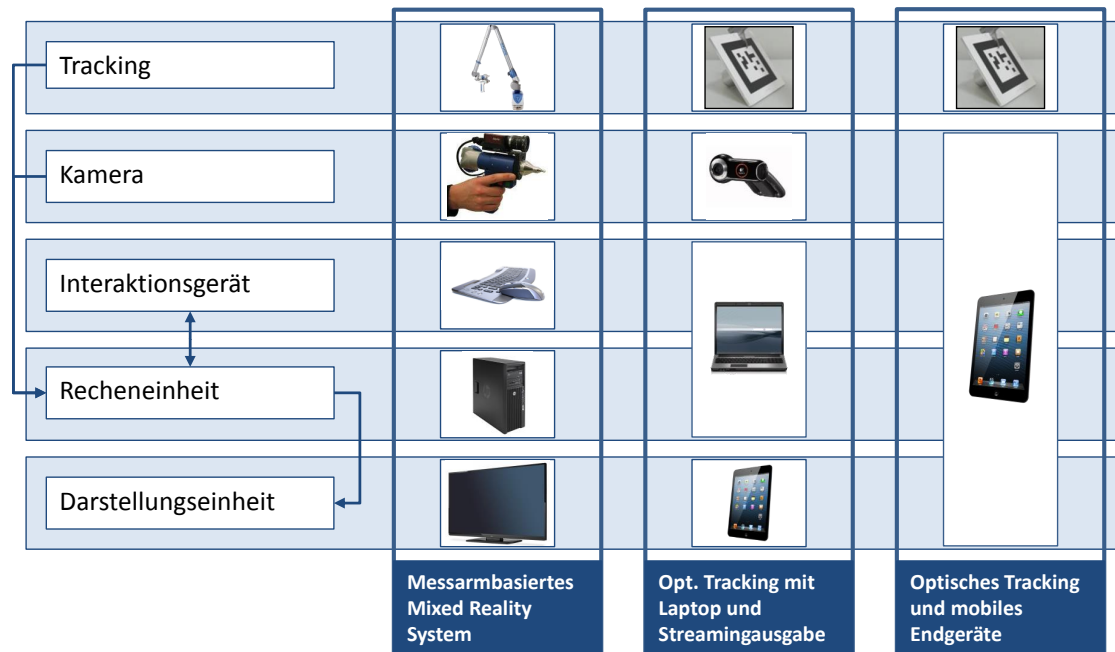


Bild 4.2: Schematische Darstellung des Informationsflusses und der Systemkomponenten verschiedener video-see-through MR Systeme

Hinsichtlich des Toleranzmanagements stellen alle Sensoren des MR Systems, also auch die Kamera, ein Messmittel dar, welches entsprechende Ansprüche erfüllen muss (Kap. 6.3.2).

Die **Recheneinheit** eines MR Systems muss hinsichtlich zwei Kriterien ausgesucht werden. Die Rechenleistung muss in der Lage sein, die virtuellen Inhalte erstellen zu können und gleichzeitig die Sensordaten zu verarbeiten. Die Rechnerabmaße müssen den Mobilitätsansprüchen der Anwendung gerecht werden [ASWZ11, S.9]. Mit fortschreitender technischer Entwicklung werden immer kompaktere Lösungen angeboten, in denen die verschiedenen Systemkomponenten integriert sind (Abb. 4.2). Sind für rechenintensive oder hochpräzise Anwendungen noch Systeme mit externem Trackingsystem und großen Festnetzrechnern im Einsatz, bieten laptopbasierte Lösungen schon ein höheres Maß an Flexibilität. Mobile Endgeräte wie Smartphones und Tablet Computer ermöglichen, unter entsprechenden Abstrichen bei Darstellungsqualität und -genauigkeit, eine Vielzahl mobiler und kompakter MR Applikationen [LG11]. [CF11, S.16] definiert hierbei MR Systeme als mobil, deren Einsatz nicht auf einen Raum beschränkt ist. Für die meisten Industrieanwendungen lassen sich selbst mit Festnetzcomputern solche mobile Lösungen realisieren. In dieser Arbeit werden kompakte MR Systeme, wie z.B. smartphonebasierte

Lösungen, die einen Ortswechsel auch ohne Auf-/Abbauaktivitäten erlauben, als hochmobile Systeme bezeichnet. In hochmobilen Endgeräten sind Display und Kamera meist integriert.

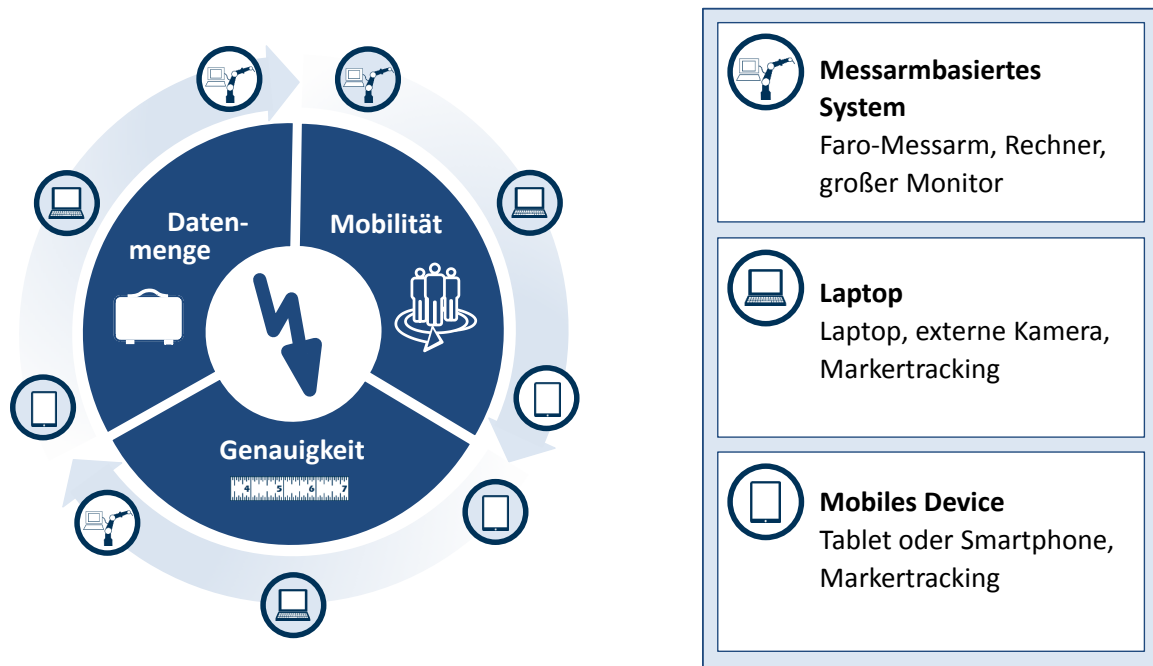


Bild 4.3: Strategische Eckpunkte mobiler AR Anwendungen [LG11]

Darstellungseinheiten lassen sich nach [Toe10, S.22] in vier Kategorien einteilen: Headmounted Displays (HMD, dt. am Kopf fixierte Bildschirme), raum- oder umgebungsfixierte Displays, bewegliche Displays und Handheld Displays. Die letzter Kategorie wird in [CF11, S.10] nochmal in PDAs, Smartphones und Tablet-PCs unterteilt. Handheld-Systeme werden auch als Window-to-the-world-Systeme (dt. Fenster zur Welt) bezeichnet [Toe10, S.28], da der Anwender durch den Bildschirm, wie durch ein Fenster, in die Mixed Reality blickt. Eine besondere Untergruppe der HMDs bilden personenbezogene Displays (Kontaktlinsen) [Par09]. Diese relativ junge Displaytechnologie befindet sich jedoch noch in einer stark experimentellen Phase.

Trackingsysteme dienen dazu, die Pose der Kamera gegenüber dem zu untersuchenden Objekt zu ermitteln. Mathematisch ist dies eine Koordinatentransformation von kamerainternen Koordinaten zu Objektkoordinaten. Bei sechs Freiheitsgraden eines Objekts im dreidimensionalen Raum müssen dafür mindestens drei Punkte in jeweils beiden Koordinatensystemen bekannt sein. Die mathematische Vorgehensweise findet sich z.B. in [BGK13]. Technisch gibt es viele Möglichkeiten ein solches Tracking zu realisieren:

Time-of-flight- oder phasenverschiebungsbasierte Systeme, optische Trackingsysteme, inertiale Trackingsysteme (Trägheit), mechanische Trackingsysteme (z.B. Messarm), Feldtracking (elektromagnetisch, Gravitation, Wifi-Mapping) sowie hybride Kombinationen unterschiedlicher Varianten. Im Rahmen dieser Arbeit kamen sowohl ein mechanisches Tracking basierend auf einem Messarm als auch ein optisches Trackingsystem basierend auf Flachmarkern zum Einsatz. Im Folgenden werden die technischen Grundlagen dieser Verfahren erläutert. Für einen vollständigen Überblick zum Thema Tracking sei auf [Toe10] verwiesen.

Trackingverfahren lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen klassifizieren: *Inside-Out* und *Outside-In Tracking* [Toe10, s.58]. Beim Inside-Out Tracking ermittelt das „bewegte Objekt“ die Trackinginformation, während der Raum (ggf. über Marker) nur die geometrische Information bereitstellt. Beim Outside-In Tracking sind die Marker an der Kamera angebracht, während ein raumfestes Trackingsystem die Kamerapose ermittelt. Im Sinne dieser Definition ist das im Rahmen dieser Dissertation verwendete, messarmbasierte Tracking ein Outside-In Tracking während das verwendete Markertracking ein Inside-Out Tracking darstellt.

Das messarmbasierte MR-System bedient sich eines *mechanischen Trackings*. Für diese Arbeit wurden Messarme der Firma FARO verwendet (Modelle Fusion & Edge). Diese bestehen aus sieben Gelenken mit optischen Winkelsensoren. Durch bekannte Länge der Verbindungsstücke und regelmäßige Kontrolle der thermischen Ausdehnung kann die Pose des Endeffektors (Messspitze) ermittelt werden - mit einer volumetrischen Wiederholgenauigkeit im Zehntelmillimeterbereich (Fusion 0,104mm; Edge 0,064 mm [far]). Das messarmbasierte MR System erzielt damit eine Gesamtgenauigkeit von 1,05 mm im visuellen Abgleich [BGK13]. Der Messarm ist für das Werkstattumfeld entwickelt und entsprechend robust ausgelegt. Die Referenzierung geschieht durch taktiles Abtasten der Referenzpunkte. Die Reichweite ist dabei jedoch auf die Länge des Arms beschränkt (Verwendet: 3,7m). Da der Messarm ein übliches Trackingsystem in der Messtechnik ist, kann bei der industriellen Verwendung auf entsprechende Messprozesse und -vorschriften zurückgegriffen werden. Der große Bekanntheitsgrad und das damit verbundene Vertrauen führen zu einer schnellen Akzeptanz durch die Anwender. Der Messarm hat handliche Maße und ist damit transportabel und flexibel einsetzbar. Da der Messarm nach der Referenzierung nicht mehr bewegt werden darf, wird er normalerweise während eines Einsatzes mechanisch oder magnetisch fixiert. Die Mobilität messarmbasierter Trackingsysteme ist dementsprechend eingeschränkt.

Optische Trackingsysteme basieren auf bildverarbeitenden Algorithmen, die in Bildern, Videos oder Livestreams bestimmte Merkmale wiedererkennen und zur 3D-Referenzierung

verwenden können. Dies können extra platzierte Marker oder natürlich vorhandene Merkmale sein (Featuretracking). Das Spektrum verwendeter Marker reicht von einfachen 2D Flachmarkern bis zu komplexen 3D Markerobjekten [Toe10, S.45ff]. Manche Marker verfügen über charakteristische Muster oder Anordnungen und können vom Algorithmus einzeln identifiziert werden. Beim Featuretracking werden Kanten (Edge detection, z.B. FAST, Harris) oder Flächen (Blob detection, z.B. SIFT, SURF) genutzt [HB11].

Die Genauigkeit und Robustheit optischer Trackingsysteme variiert sehr stark in Abhängigkeit von verwendeten Markern, Algorithmen und vorherrschenden Einsatzbedingungen (Beleuchtung, Einsatzvolumen, Kamera,...). Herausforderungen sind beispielsweise Latenzzeiten in der Bildverarbeitung, Robustheit gegenüber wechselnden Lichtverhältnissen und Betrachtungswinkel, Spiegelungen oder die Skaleninvarianz [HB11]. Demgegenüber steht eine Vielzahl an Einflussfaktoren, deren Wechselspiel bisher nicht vollständig erforscht und verstanden ist [PMK13]. Die Genauigkeit variiert von einigen Zentimetern bei simplen Flachmarkeranwendungen bis zu Hundertstelmillimetern in der optischen Messtechnik. Eine ausführliche Betrachtung der Genauigkeit von optischen Trackingsystemen auf Grundlage von Flachmarkern findet sich in Kapitel 6.3.3. Eine wichtige Voraussetzung für genaues optisches Tracking ist eine Kalibrierung der Kamera (Kap. 4.3.2). Eine Evaluierung optischer Trackingverfahren findet sich in [Lie12].

Zur Referenzierung eines optischen Trackingsystems werden die Referenzgeometrien entweder vom Algorithmus erkannt oder mit markierten Messobjekten (z.B. Markerstift) taktil erfasst. Dafür müssen die Koordinaten der verwendeten Referenzmerkmale bekannt sein. Die Reichweite optischer Trackingsysteme ist nur durch die Sichtlinie beschränkt. Es gilt jedoch zu beachten, dass mit wachsendem Arbeitsvolumen auflösungsbedingt Genauigkeit verloren geht. Die Mobilität und Flexibilität von optischen Trackingsystemen hängt von der verwendeten Kameratechnik ab. Es existieren stationäre Trackingsysteme aus mehreren räumlich fixierten Kameras (z.B. Messtechnik, CAVE). Mit kleinen Kameras (z.B. tabletintern) lassen sich aber hochmobile, flexible Lösungen entwickeln.

4.3.2 Methodik

Eine vollständig definierte MR Anwendung besteht neben einem vollständig beschriebenen Systemsetup aus einer zielgerichteten Methoden- und Prozessbeschreibung. Der Prozess eines MR Einsatzes besteht dabei aus vier Prozessschritten: Der Datenbereitstellung aus dem PDM System (Kap. 2.2), der Systemkalibrierung, der Referenzierung zwischen System und realem Umfeld und dem eigentlichen Einsatz mittels Methoden zur Darstellung, Beurteilung und Dokumentation der Erkenntnisse. Ziel der Schritte *Kalibrierung* und

Referenzierung ist dabei, die 3D Registrierung der MR Darstellung sicherzustellen. Ein genauer Registrierungsprozess ist eines der Hauptkriterien für eine erfolgreiche MR Anwendung [Azu97, S.18ff]. Dabei wird zwischen dynamischen (Latenzzeiten, Darstellung) und statischen (Referenzierung, Kalibrierung) Fehlerquellen unterschieden.

Kalibrierung:

[Luh10, S.14] definiert Kalibrierung in Anlehnung an DIN 1319 als „*Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Messwert [...] und dem zugehörigen wahren Wert für eine Messeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen. Bei der Kalibrierung erfolgt kein Eingriff der das Messgerät verändert.*“ Dabei ist der Kalibrieraufwand mit dem Systemanspruch abzugleichen: bestimmte Aufgaben benötigen keine hochgenaue Kalibrierung [CF11, S.28], bei anderen Aufgaben kann eine Anpassung der digitalen Inhalte den Erfolg bei schwankender Genauigkeit sicherstellen [RM04]. Ein wichtiger Aspekt des Kalibrierverfahrens ist die Zielgruppe der Anwender. Auf dem Weg von expertengeführten Insellösungen zu einem breiten Anwenderspektrum muss die Kalibrierung nicht nur präzise sein sondern auch einfacher, flexibler und robuster werden [Zha98, S.2]. Die Kalibrierung eines video-see-through MR Systems besteht aus der Kalibrierung des Trackingsystems, der Bestimmung der intrinsischen Kameraparameter (interne Kamerakalibrierung) und der Orientierungsbestimmung der Kamera zum Trackingsystem (externe Kalibrierung) [God]. Die *Kalibrierung eines Trackingsystems* erfolgt durch die Aufnahme einer Serie von Testpunkten mit bekannter räumlicher Orientierung. Dabei werden entweder hochpräzise Eichvorrichtungen verwendet, deren räumliche Abmaße bekannt sind (z.B. [ART]), oder das System nimmt einen raumfixierten Punkt aus mehreren unterschiedlichen Positionen auf (z.B. [far]). Im Allgemeinen werden zu kommerziellen Trackingsystemen geeignete Kalibriersysteme von den Herstellern angeboten.

Bei der *internen Kamerakalibrierung* wird zwischen der photogrammetrische Kalibrierung (bekanntes Eichobjekt) und Selbstkalibrierung (Aufnahme beliebiger Umgebung) unterschieden [Zha98, S.2]. Bei beiden Verfahren werden Vergleichsbildern aufgenommen und mittels Algorithmen Abweichungen zur idealen Kamera parametrisch ermittelt. Einflussgrößen können die radialsymmetrische, radialasymmetrische und tangentiale Verzeichnungen durch die Objektivgeometrie sowie Herstellungsfehler, der Einfluss von Kameraelementen zur Auflösungserhöhung, die Sensorbeschaffenheit, Fehler in der Signalübertragung und äußere Effekte wie Temperatur oder mechanische Einwirkungen sein [God]. Die Wahl der geeigneten Parameter zur Handhabung dieser Einflüsse bei der Zusammenführung der realen und virtuellen Bildinhalte hat einen entscheidenden Einfluss [Zha98, Toe10].

Bei der *externen Kalibrierung* muss die Pose der Kamera zum Trackingsystem präzise

vermessen werden. Eine gängige Vorgehensweise ist hierbei, ein spezielles Referenzmuster gleichzeitig mittels Trackingsystem und Kamera zu erfassen. Durch bildverarbeitende Algorithmen kann die räumliche Orientierung des Referenzmusters bezüglich der Kamera aus den Bilddaten errechnet und mit den Werten des Trackingsystems verglichen werden. Die für diese Dissertation verwendeten, photogrammetrischen Kalibrierverfahren beruhen auf Schachbrettmustern (Algorithmus nach [Zha99]) oder Eichplatten mit dreidimensionalem Profil der Firma AICON [AIC]. Weitere vielversprechende Ansätze finden sich in [Luh10] und [God].

Referenzierung:

Der dritte Schritt nach Tracking- und Kamerakalibrierung ist die Referenzierung zwischen MR System und den Untersuchungsobjekten. Dabei werden bekannte Referenzpunkte am Untersuchungsobjekt mit dem Trackingsystem erfasst. Sind die Koordinaten der Referenzpunkte in der realen Umgebung bekannt, kann die Transformation zwischen Datenkoordinaten und Objektkoordinaten ermittelt werden und das MR System kann die Daten positionsgenau überlagern (Registrierung).

Referenzpunkte können vorhandene Merkmale (Löcher, Ecken, Kanten, etc.) oder vorher gezielt platzierte Messobjekte (Opt. Marker, Messmarken, etc.) sein. Die Genauigkeit der Referenzierung ist somit auch von der Qualität der Messpunkte abhängig. Dabei müssen die Auswirkungen von Fehlern und Toleranzen der natürlichen Merkmale oder platzierten Messobjekte hinsichtlich der Gesamtgenauigkeit einbezogen werden. Überbestimmte Bezugssysteme helfen die Güte der Referenzierung zu beurteilen, wenn die verwendete Referenzierungssoftware statistische Fehler ausgibt.

Ein weiterer entscheidender Qualitätsfaktor der Referenzierung ist die Wahl des Bezugssystems. Dieses sollte den Untersuchungsraum möglichst umfassen, damit eine Fehlerbetrachtung ohne Extrapolation möglich ist. Darüber hinaus muss das Bezugssystem der zugrundeliegenden Fragestellung der MR Betrachtung Rechnung tragen (Welche Elemente sollen in Bezug zueinander betrachtet werden?). Wenn möglich sollten starre Objekte zur Referenzierung verwendet werden, z.B. im Automobil der Rohbau. Das Bezugssystem sollte weiter so gewählt werden, dass die Toleranzketten innerhalb des Systems möglichst gering ausfallen.

In Industrieanwendungen bestehen oft Vorgaben und Verfahren aus der Messtechnik, die berücksichtigt oder adaptiert werden können, um Ansprüchen und Normen gerecht zu werden. Hinsichtlich neuer MR Systeme gilt es dabei zu beachten, dass die Trackingsysteme in der Lage sind, bestehende Bezugssysteme nutzen zu können (Erreichbarkeit, Reichweite). In klar definierten, gleichbleibenden Prozessen können festmontierte Mess-

marken oder schnellmontierbare Markeradapter (z.B. Steck- oder Magnetverbindungen) zur Effizienzsteigerung und Vergleichbarkeit beitragen.

Kalibrierung und Referenzierung sind besonders wichtig zur Sicherstellung durchgängiger Bezugskonzepte sowie zur Garantie der Messmittelfähigkeit. Kapitel 6.3.3 widmet sich Herausforderungen und Lösungsvorschlägen hinsichtlich des Einsatzes von MR im Toleranzmanagement.

Darstellung & Beurteilung:

Bei der Kombination von virtuellen Inhalten mit realen Objekten existieren zwei Vorgehensweisen: Der Soll/Ist-Vergleich durch Überlagerung gleicher Inhalte und die Konzeptdarstellung durch Beurteilung virtueller/realer Objekte in einer realen/virtuellen Umgebung. Eine erweiterte Klassifizierung dieser Anwendungsfälle findet sich in [HFN11]. Eine Vielzahl von Studien beschäftigt sich mit der Bedeutung der Darstellungsart in MR Methoden (z.B.: [Noe06, Gei12, RM04]). Kapitel 6.2.5 erläutert die Bedeutung der Darstellung für MR im Toleranzmanagement.

MR Anwendungen erzeugen ihren Mehrwert durch Bereitstellung einer intuitiv verständlichen Schnittstelle zwischen realen und digitalen Inhalten. In der menschlichen Wahrnehmung entsteht eine räumliche Orientierung durch das Wechselspiel von Verdeckung und Größe verschiedener Objekte zueinander. Ein vorgelagertes Objekt wird als solches wahrgenommen, weil es dahinterliegende Objekte (teilweise) verdeckt. Diesen Effekt gilt es in MR Darstellungen zu berücksichtigen. Da in einer MR Visualisierung digitale und reale Objekte in zwei unabhängigen Ebenen überlagert werden, muss die vorgelagerte digitale Ebene so beschnitten werden, dass nur diejenigen digitalen Umfänge sichtbar sind, die sich im räumlichen Bezug nicht hinter physischen Objekten befinden. Dazu stehen verschiedene Methoden zur Verfügung: Sind die nichtbetrachteten realen Umfänge als digitale Objekte vorhanden, können sie beim Rendern der virtuellen Inhalte subtrahiert werden. Dies nennt man *Okklusion* (dt. *Verdeckung*) [Toe10, S.84]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin durch den Einsatz von Sensoren oder SLAM-Algorithmen (**S**imultaneous **L**ocalization **A**nd **M**apping) die gesamte reale Umgebung in Echtzeit zu erfassen und dies bei der MR Überlagerung zu berücksichtigen.

Durch Latenzzeiten im MR System [Toe10, S.83] oder räumliche Unterschiede zwischen digitalen und realen Inhalten (Abb. 4.4) kann es zu unbeabsichtigten Relativbewegungen in MR Darstellungen kommen (*Schwimmeffekt*). Bei Bewegung der Kamera scheinen die virtuellen Inhalte gegenüber realen Referenzobjekten zu schwimmen. Für eine objektive Beurteilung ist es daher erforderlich, eine latenzfreie Referenzierung und eine Beurteilung unter lotrechten Betrachtungswinkeln zu garantieren. Nur durch eine statische, lotrechte

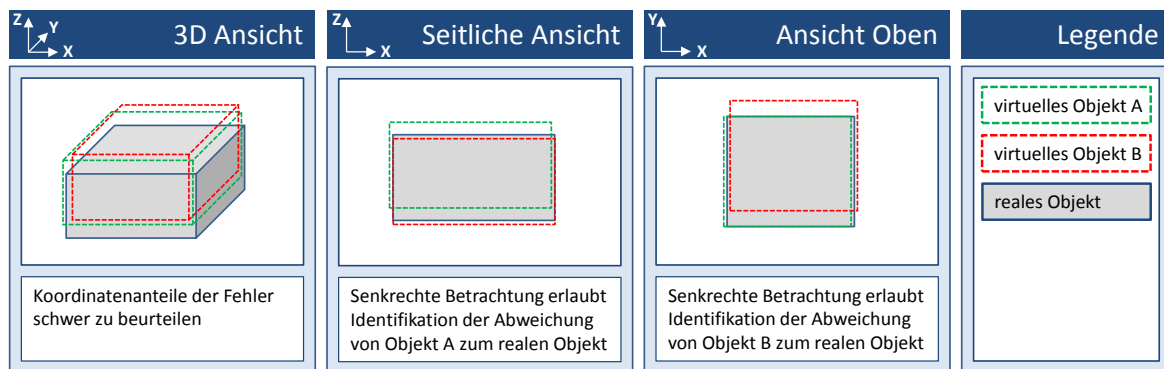


Bild 4.4: Stilisierte Darstellung der Schwimmeffekte durch Registrierungsfehler und die Notwendigkeit der lotrechten Betrachtung von Beurteilungskriterien

Betrachtung können die Beitragsleister der Abweichungen zuverlässig bestimmt werden.

4.4 Der Mixed Mock-Up in der Automobilindustrie

Hinsichtlich MR Anwendungen in der Industrie nehmen die Luftfahrttechnik [Miz95] und die Automobilindustrie eine Vorreiterrolle ein [Bau06, ASWZ11]. [Bad12, S.2] sieht die Begründung, dass viele industrielle MR Anwendungen nicht über einen Demonstratorstatus hinaus Anwendung finden, in der mangelnden Berücksichtigung industrieller Prozesse und Randbedingungen. Ein erfolgreiches Beispiel für die industrielle Einführung fand hingegen in Form des Automotive Mixed Mock-Up (MMU) statt [LG11, GLKR10]. Durch die Kombination von MR- und Rückführungsmethoden (RE, Reverse Engineering) wird ein bidirektionaler Informationsfluss zwischen DMU und PMU realisiert (Abb. 4.5). Der MR-Einsatz ist damit nicht nur die Nutzung einer innovativen Technologie. Es entsteht vielmehr eine neue Entwicklungsplattform, der Mixed Mock-Up (MMU): hybride Prototypen, die gleichzeitig aus realen und digitalen Umfängen bestehen. Der MMU wurde als eigenständige, dritte Entwicklungsplattform in den Entwicklungsprozess integriert [LG11].

Reverse Engineering Methoden fanden bisher vor allem in der Messtechnik Verwendung und basieren ebenfalls auf Trackingsystemen. Eine Integration in MR Systeme ist aufgrund der technischen Gemeinsamkeiten mit relativ geringem Aufwand möglich. Es gilt vielmehr durch geeignete Wahl des Trackingsystems sowie feinabgestimmte Prozess- und Methodenvorgaben das MMU System für das jeweilige Anwendungsfeld zu optimieren. Beispiele für RE-Systeme, die in der Automobilindustrie Anwendung finden,

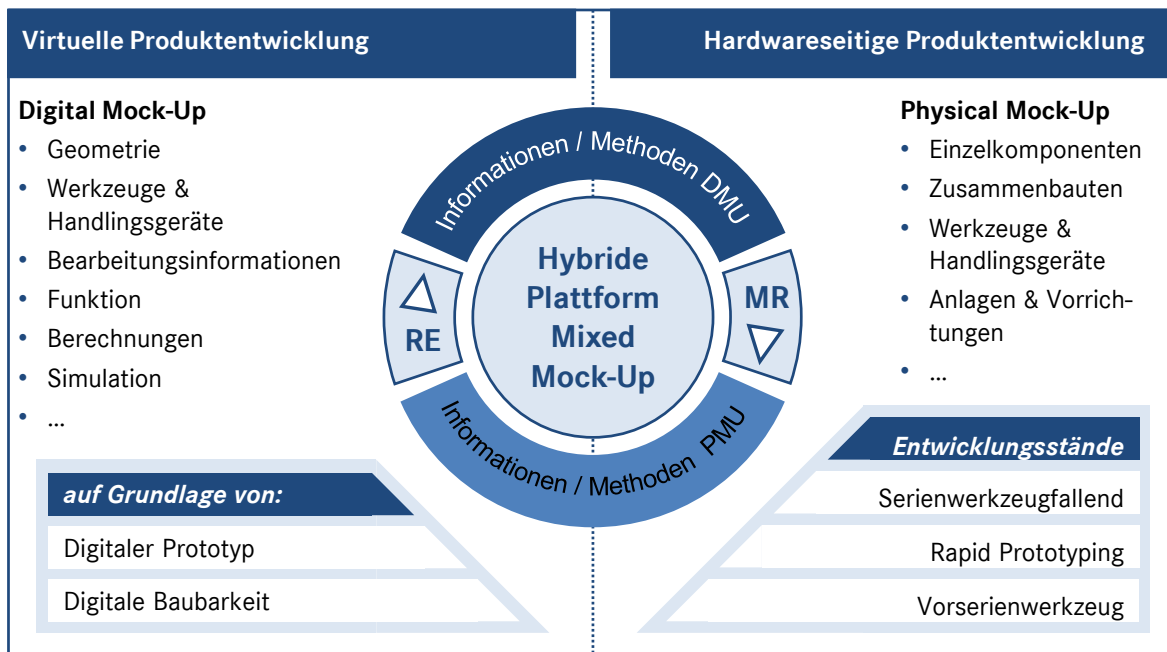


Bild 4.5: Der Mixed Mock-Up als Verzahnung von Mixed Reality (MR) und Reverse Engineering (RE) nach [Gei12, S.62]

sind taktile Messsonden, Laserscanner, photogrammetrische Systeme (z.B. GOM) oder Streifenprojektionen.

Der MMU bildet die Basis für eine Vielzahl verschiedenster Festlegungs- und Absicherungsaktivitäten in den einzelnen Entwicklungsphasen von den ersten digitalen Konzepten über das digitale Entwicklungsfahrzeug bis hin zu der Erprobung im Fahrversuch und schließlich dem Anlauf der Produktion im Zielwerk [Gei12]. Dabei lassen sich im Engineeringumfeld vier Hauptanwendungsfelder identifizieren [LG11]:

- *Konzeptabsicherung:* Virtuelle Bauteilkonzepte lassen sich in verschiedenen Varianten vor Herstellung kostenintensiver Prototypenteile im realen Umfeld bewerten - inklusive verbundener Montage- und Demontageprozesse. Der MMU erlaubt hierbei nicht nur die Kombination der unterschiedlichen Erfahrungswelten der Prozessbeteiligten sondern auch das qualitative und quantitative Erfassen von Bauräumen und Abständen zwischen DMU und PMU. Evaluationsschleifen und physische Bauteilvarianten können eingespart werden. Der Reifegrad der Hardwareteile wird erhöht.
- *Festlegung:* Ziel der Festlegung ist es Abweichungen zwischen DMU und PMU im Zusammenbau zu identifizieren und zu bewerten, um den Aufbauprozess abzusichern. Der MMU stellt durch Soll/Ist-Vergleich eine intuitive und vollständige

Bewertungsplattform. Gefundene Abweichungen können direkt an der Hardware beurteilt und bei Bedarf in den DMU zurückgeführt werden.

- *Hardwareabnahme*: Durch MMU-Soll/Ist-Vergleich können Form, Position und Toleranz von einzelnen Bauteilen, Fertigungsvorrichtungen, Handlingsgeräten oder Lehren effektiv evaluiert werden. Der MMU erlaubt hierbei gleichzeitig eine schnelle und effiziente qualitative (visuell) und quantitative (RE) Beurteilung und Dokumentation.
- *Problempunktanalyse*: Durch einen MMU Soll/Ist-Vergleich lassen sich Problem- punkte beim Hardwareaufbau in Entwicklung oder Produktion einfach und effizient rückverfolgen. Die einzelnen Beitragsleister können schnell identifiziert, eindeutig dokumentiert und verständlich kommuniziert werden.

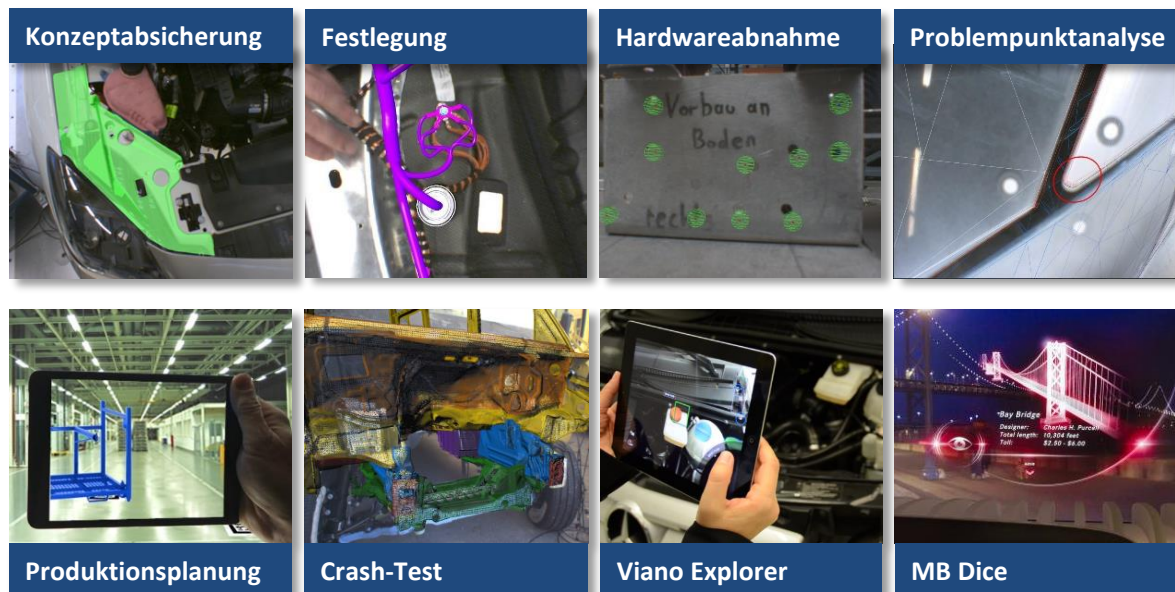


Bild 4.6: Mixed Reality Anwendungsbeispiele aus der Automobilindustrie [LG11, LG13]

Die Vorteile des MMU in der Synchronisation zwischen digitaler und physischer Entwicklungsumgebung liegen dabei in der einfachen Interpretierbarkeit, der Flexibilität im gewählten Hardwaresetup sowie der Möglichkeit einer frühzeitigen, da digitalen Erkenntnisgewinnung und -rückführung. Eine besonders große Rolle nimmt der MMU auch als unterstützende Kommunikationsplattform ein. Durch die Kombination digitaler und physischer Inhalte werden auch die real erlebten Arbeitswelten verschiedener Personen/Rollen zusammengebracht. Dies kann in Diskussionen die Interpretierbarkeit und das Verständnis zwischen den unterschiedlichen Parteien fördern.

Weitere, für diese Arbeit interessante Anwendungsbeispiele sind die Einführung von MR in mathematischen Simulationsdisziplinen im Allgemeinen [HAL04] oder am Beispiel Crash [LG13] hinsichtlich Bezugs- und Visualisierungsaspekten, der kommunikative und intuitive Ansatz für MR in Trainingsaufgaben [HAG04], interdisziplinäre MR-Anwendungen z.B. bei Konzipierung und Test von mechatronischen Systemen [Gau11] oder in Verkauf und Lehre [ZW11], die Kombination mit neuen technischen Systemen [XSYL11] oder zur Unterstützung industrieller Schweißvorgänge [HAG04, ESK⁺03].

4.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel hat VR als elementaren Bestandteil des DMU und MR als Erweiterung an der Schnittstelle zwischen PMU und DMU vorgestellt. Dabei wurden die MR Systemkomponenten sowie die grundlegenden technischen Begriffe Tracking, Referenzierung und Kalibrierung erläutert. Darüber hinaus wurde die Bedeutung der Darstellung der digitalen Inhalte für die Aussagekraft von MR herausgearbeitet.

Ausgehend von der Beschreibung wurde aufgezeigt, wie die Technologie MR in Kombination mit RE-Methoden zur Schaffung der neuen MMU Entwicklungsplattform im Automobilbau geführt hat [Gei12]. Als Hauptanwendungsfelder des MMU wurden die Konzeptabsicherung, die Festlegung, die Hardwareabnahme und die Problempunktanalyse beschrieben. Die größten Vorteile des MMU liegen dabei in einem flexiblen, frühzeitigen Einsatz sowie der Förderung von Interpretation und Kommunikation.

5 Arbeitshypothesen

5.1 Zusammenfassung Voraussetzungen & industrielle Anforderungen

Wie in Kapitel 2 hergeleitet, muss den zyklisch auftretenden Wirtschafts- und Absatzkrisen durch die Flexibilität eines global aufgestellten Produktions- und Vertriebsnetzes zielgerichtet entgegengetreten werden. Die dafür erforderliche internationale Zusammenarbeit kann nur durch ein effizientes Wissensmanagement und einen durchgängigen Informationsfluss sichergestellt werden. Darüber hinaus müssen sich neue Methoden, mit denen diesen Herausforderungen begegnet werden soll, in die bestehende Produkt- und Prozesslandschaft unter möglichst geringem Aufwand integrieren lassen. Für entwicklungsnahe digitale Prozesse stehen dabei Themen wie Datenverfügbarkeit, Datenaufbereitung sowie Geheimhaltungsaspekte im Mittelpunkt.

Eine grundsätzliche Hürde bei der Entwicklung moderner Industrieprodukte ist der Wechsel zwischen digitalen und physischen Entwicklungsumgebungen. Der Übergang an dieser Schnittstelle, inklusive wechselnder Methoden und personeller Zuständigkeiten, ist so zu gestalten, dass Kommunikationshürden oder ein Informationsverlust verhindert werden. Übergreifende Aufgabenbereiche wie das Toleranzmanagement tragen zu dieser Aufgabe in besonderem Maße bei. Da über weite Teile des Entwicklungsprozesses digitale und reale Produktentwicklung parallel ablaufen, ist die Vermittlung an den Schnittstellen zwischen digitaler und physischer Entwicklungsumgebung kein einmaliger Prozess, sondern vielmehr eine kontinuierliche Synchronisation [Gei12, S.29].

Die Forderung an das Toleranzmanagement ein interdisziplinäres Bewusstsein für Toleranzthemen zu schaffen, beinhaltet zwei Komponenten: Die Förderung von interdisziplinären Arbeitsweisen und die Reduzierung der Komplexität zur Bildung einer prozessübergreifenden Kommunikations-/Interpretationsbasis. Die Herausforderung hierbei besteht darin, einen durchgängigen Informationsfluss zu gewährleisten. Dazu ist es nötig die Methoden im Entwicklungsprozess zu verankern und alle Prozessbeteiligten in den Informationsfluss zu integrieren. Darüber hinaus gilt es auch subjektive Einflüsse in der mathematischen

Abstraktion berücksichtigen zu können. Letztendlich erfordert die Abstraktion eine Interpretation der Ergebnisse und es ist dabei auch Aufgabe des Toleranzmanagements Interpretationsfehler zu vermeiden.

Ein weiterer Anspruch an digitale Simulations- und Berechnungsprozesse wie das Toleranzmanagement ist es, die Vergleichbarkeit zwischen Berechnungs- und Versuchsergebnissen zu gewährleisten. Hierfür bedarf es verifizierter Simulationsgrundlagen sowie fähiger und präziser Messmittel und -prozesse.

5.2 Formulierung der Arbeitshypothesen

Erste Hypothese:

Dem steigenden Entwicklungsaufwand und der steigenden Produktkomplexität unter hohem Kostendruck kann eine Effizienzsteigerung in Kosten, Zeit und Qualität durch eine stärkere Verzahnung der digitalen und physischen Entwicklungsumgebung entgegengesetzt werden. Dies wurde bereits in dem Toleranzmanagement benachbarten Themenfeldern unter Beweis gestellt [Gei12, Noe06]. Daher wird angenommen, dass bestehenden Herausforderungen im Toleranzmanagement durch Synchronisation zwischen DMU und PMU sowie durch Förderung von intuitiver Interpretation und prozessübergreifender Kommunikation in ähnlicher Weise begegnet werden kann.

Der hohe Abstraktionsgrad im mathematisch getriebenen Toleranzmanagement erfordert dabei eine Reduktion der Komplexität, um effiziente und objektive Entscheidungen möglich zu machen. Die erläuterten Themenfelder internationale Zusammenarbeit, flexiblere Arbeitsprozesse und interdisziplinäres Bewusstsein machen deutlich, dass die Prozessqualität von Qualität und Quantität der Kommunikation abhängt.

Brückenthese: *An der Schnittstelle zwischen virtueller und physischer Entwicklungsumgebung findet im Toleranzmanagement zu Beginn dieser Arbeit ein Medienbruch statt. Mit dem Wechsel von DMU zu PMU gehen meist ein Personen- und Ortswechsel und damit ein Kommunikationsbruch einher. Die Methoden des MMU ermöglichen die natürliche Überbrückung dieser Lücke und können so die Prozessqualität und -sicherheit steigern sowie eine prozessübergreifende Kommunikationsplattform bieten.*

Die Brückenthese postuliert die Vorteile einer Adaption des MMU auf das neue Themengebiet Toleranzmanagements. Die Akzeptanz der eingesetzten Methoden hängt dabei stark von ihrer Eingliederung in bestehende Prozessstrukturen und dem direkten, praktischen Nutzen für die Prozessbeteiligten ab. Dabei muss der MMU in Verbindung mit dem Toleranzmanagement zwei besonderen Aspekten Rechnung tragen: Der Abstraktion

durch mathematische Modelle (2. Hypothese) und der Vergleichbarkeit im Sinn der Messmittelfähigkeit (3. Hypothese).

Zweite Hypothese:

Die Vielzahl technischer Möglichkeiten des MMU erfordert die Möglichkeit einer spezifischen Adaption auf die Belange der jeweiligen Untersuchung. Bestehende Studien zeigen, dass der Erfolg einer Mixed Reality Anwendung dabei auch von der gewählten Darstellungsform der digitalen Inhalte abhängt [Noe06, Chu02].

Die Erweiterung des Untersuchungsspektrums in neue CAE Arbeitsbereiche, wie Simulation, Berechnung oder Toleranzmanagement, muss eine Antwort auf den hohen vorherrschenden Abstraktionsgrad beinhalten. Dazu zählen eine weitere Reduktion der Komplexität und eine intuitive aber vollständige Darstellungsweise zur Vermeidung von Interpretationsfehlern.

***Visualisierungsthese:** Abstraktion und Komplexität im Toleranzmanagement erfordern neue Visualisierungskonzepte: Nur durch Bereitstellung neuer, bisher nicht digital vorhandener Objekte kann eine Beurteilung der mathematischen Ergebnisse in Bezug zu den physischen Objekten erfolgen. Diese können die Komplexität reduzieren und die Berücksichtigung flexibler Hardwareteile und dynamischer Vorgänge ermöglichen. Dies beinhaltet auch eine engere Verzahnung von VR und MR Methoden.*

Dritte Hypothese:

[Tut06] definiert die Fertigungsmesstechnik als „*alle messenden bzw. prüfenden Tätigkeiten [...] im Zusammenhang mit industriellen Fertigungsprozessen*“, insbesondere ob „*bestimmte qualitätsrelevante Eigenschaften des Produktes innerhalb von zulässigen Toleranzbereichen liegen*“. Darunter fällt auch die Überprüfung mittels Mixed Reality und es erwachsen entsprechende Ansprüche (Industrienormen und Gesetzgebung) sowie die geforderte Vergleichbarkeit bei Simulationsprozessen. Nur eine durchgängige Dokumentation der quantitativen Aspekte ermöglicht eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen aus Berechnung/Simulation und Versuch/Erprobung.

Hinsichtlich des Einsatzes von MR im Toleranzmanagement im Sinne der Brückenthese wandelt sich der Fokus der Untersuchung damit stark von qualitativen hin zu quantitativen Untersuchungsformen. Dies erfordert definierte Methoden zur Ermittlung der Systemgenauigkeit sowie zur Garantie der Prozesssicherheit im Praxisumfeld. Auf diese Weise erwächst die Möglichkeit zur Vergleichbarkeit der messtechnischen Ansprüche mit den technischen Möglichkeiten des MMU. Daraus lassen sich sowohl aktuelle Einsatzfelder ableiten als auch Forderungen zur technischen Genauigkeitserhöhung formulieren.

Genauigkeitsthese: *Der Einsatz von Mixed Reality in mathematisch getriebenen Disziplinen wie Toleranzberechnung oder Simulation erfordert eindeutige Vorgaben und durchgängige Vorgehensweisen bei Kalibrierung, Messgenauigkeit und Referenzierung sowie deren Dokumentation. Dadurch lassen sich bereits mit heute verfügbaren Systemen MMU Anwendungen für das Toleranzmanagement entwickeln.*

6 Mixed Mock-Up im Toleranzmanagement

Die Messtechnik gilt im industriellen Produktionsprozess zwar als nicht direkt wertschöpfend, fehlende oder falsch angewandte Messtechnik kann jedoch in hohem Maße wertvernichtend sein. [Tut06]

In diesem Kapitel wird zunächst ein Klassifizierungsschema vorgestellt (Kap. 6.1), welches erlaubt alle elementaren Bestandteile des MMU zu erfassen und mit den konkreten Fragestellungen bei der Konzeption von MMU Methoden in der Produktentwicklung zu verknüpfen. Dieses wird anschließend auf das spezifische Gebiet des Toleranzmanagements angewandt (Kap. 6.2) und somit eine ganzheitliche Darstellung der technischen und methodischen Möglichkeiten des MMU im Toleranzmanagement erarbeitet. In Kapitel 6.3 werden die Herausforderungen und Anforderungen des Toleranzmanagement aus Literatur und Praxis zusammengefasst, hinsichtlich der Bedeutung für den MMU Einsatz beleuchtet und entsprechende Lösungsvorschläge abgeleitet. In Kapitel 6.4 werden die Bewertungskriterien zur Verifizierung von entwickelten Methoden entlang der Arbeitshypothesen abgeleitet.

6.1 Ontologie des Mixed Mock-Ups in der Produktentwicklung

Ziel dieses Kapitels ist ein Klassifizierungsschema vorzustellen, welches alle elementaren Bestandteile des MMU enthält und mit den grundlegenden Fragestellungen verknüpft, die bei der Adaption des MMU auf neue Themenfelder behandelt werden müssen. Im folgenden Kapitel 6.2 wird dieses Klassifizierungsschema dann auf die Aufgaben und Herausforderungen des Toleranzmanagements angewandt.

Als Klassifizierungsschema für den MMU wird hier ein Schema entwickelt, welches sich

an die Ontologie aus der Informatik ¹ anlehnt [Pre14]. Eine Ontologie besteht aus einem hierarchischen System aus Klassen und Unterklassen, in welche die zu klassifizierenden Objekte, Instanzen genannt, eingeordnet werden. Dabei können die Instanzen in einer Klasse von unterschiedlichem Objekttyp sein. Dies erleichtert die Handhabung von Komplexität und Vielschichtigkeit bei der Klassifizierung von MMU-Anwendungen.

Zu Beginn der Konzeption neuer MMU-Anwendungen gilt es, eine Reihe allgemeingültiger Fragestellungen durch eine konkrete Definition von MMU-Objekten und -Methoden zu beantworten. Das hier vorgestellte Klassifizierungsschema orientiert sich an dieser Vorgehensweise. Jeder fundamentalen Fragestellung wird eine *Klasse* oder *Unterklasse* [jeweils in eckigen Klammern] zugeordnet (vgl. Abb. 6.1):

1. Was ist Gegenstand der Untersuchung, d.h. welche digitalen und physischen Objekte sollen analysiert werden und wie stehen diese Objekte miteinander im Zusammenhang? [*Untersuchungsobjekte*]
2. Wann finden diese Objekte zusammen? [*Untersuchungsphasen*]
3. Wie wird die Untersuchung mittels MMU gestaltet? [*Untersuchungsspektrum*]
 - a) Was ist die Zielsetzung der Untersuchung? [*Zielsetzung*]
 - b) Welcher MMU-Systemsetup und welche MMU-Methoden sind für diese Aufgabe zielführend? [*Ausgestaltung*]
 - c) Welche Form der Visualisierung (Darstellung & Methode) ist für diese Aufgabe zielführend? [*Visualisierung*]

Wie bereits beschrieben, enthalten die Klassen Instanzen unterschiedlichen Objekttyps. Zur Klassifizierung des MMU werden drei Objektgruppen benötigt: abstrakte Objekte, digitale Objekte sowie physische Objekte (Tab. 6.1). Die Gruppe der *abstrakten Objekte*

¹Dabei weicht der Begriff „Ontologie“ in der Informatik von der historischen Verwendung in der Philosophie ab.

abstrakte Objekte	dig. Objekte	phys. Objekte
Idee	geom. Datengrundlage (CAD)	Produktbestandteil
Zielsetzung	gerenderte Daten	Produktionsbestandteil
Zeitpunkt/Phase	math. Beschreibung	MR-Systemkomponente
Vorgehensweise	Dokumentation	

Tabelle 6.1: Objekttypen des MMU

beschreibt prozessbezogene Bausteine des MMU. Sie umfasst *Ideen* und *Zielsetzungen*, z.B.: eine funktionale Anforderung, zur Beschreibung der Objekte der Produktentwicklung, bevor diese in konkreter Form als digitale oder physische Objekte auftreten. Darüber hinaus umfasst sie den *Zeitpunkt/Phase* und die *Vorgehensweise* zur Beschreibung der temporären und kausalen Zusammenhänge.

Die Gruppe der *digitalen Objekte* umfasst mit vier Objekttypen die digitalen Bestandteile des MMU: Die geometrischen Daten, unterteilt in die *Datengrundlage* (CAD) und die *gerenderte Ausgabe* (Visualisierung), die *mathematische Beschreibung* der Bauteilbeziehungen oder Problemstellungen (Simulationsgrundlage) sowie Daten zur *Dokumentation* von Methoden oder Ergebnissen.

Die Gruppe der *Physischen Objekte* beschreibt mit drei Objekttypen die physisch greifbaren Bestandteile des MMU: Die Untersuchungsobjekte lassen sich unterteilen in den *Produktbestandteil* (Bauteil) und den *Produktionsbestandteil* (Betriebsmittel). Darüber hinaus umfasst diese Gruppe die *MR-Systemkomponenten*.

Bezogen auf den MMU in der Produktentwicklung ergibt sich die folgende Ontologie, welche in Abbildung 6.1 schematisch dargestellt ist. Aufgrund der großen Komplexität des Themas können in dieser Arbeit nicht in alle Punkte in der Tiefe behandelt werden. Im nachfolgenden Kapitel 6.2 wird diese Ontologie jedoch vollständig auf den konkreten Fall des Toleranzmanagements angewandt.

Im Folgenden wird zunächst in der Klasse *Untersuchungsobjekte* zusammengefasst, welche Ideen der Produktentwicklung zugrunde liegen und welche digitalen und physischen Untersuchungsobjekte sich daraus für den MMU ableiten lassen. Dabei umfassen die physischen Untersuchungsobjekte sowohl das Produkt bzw. einzelne Bauteile als auch die Betriebsmittel. Digitale Untersuchungsobjekte sind geometrisch (CAD) oder mathematisch beschriebene Daten (Simulation). Abstrakte Ideen, wie zum Beispiel die Fügefolge oder die Funktion im Toleranzmanagement, haben nicht zwingend korrespondierende, visualisierbare Objekte im DMU oder PMU. Um sie trotzdem in MMU Analysen einzubeziehen, müssen unter Umständen neue digitale bzw. physische Objekte entwickelt werden.

In der Klasse *Untersuchungsphasen* werden die Zeitpunkte identifiziert zu denen diese Untersuchungsobjekte miteinander in Kontakt stehen und daraus ein Schema unterschiedlicher Untersuchungsphasen abgeleitet. Dabei lassen sich im Allgemeinen drei Phasen unterscheiden: In der *konzeptionellen Phase* überwiegen die digitalen Anteile im Entwicklungsprozess und der MMU dient vor allem der Konzeption und Verifikation digitaler Konzepte. Später liegen digitale und physische Prototypen in gleichem Maße

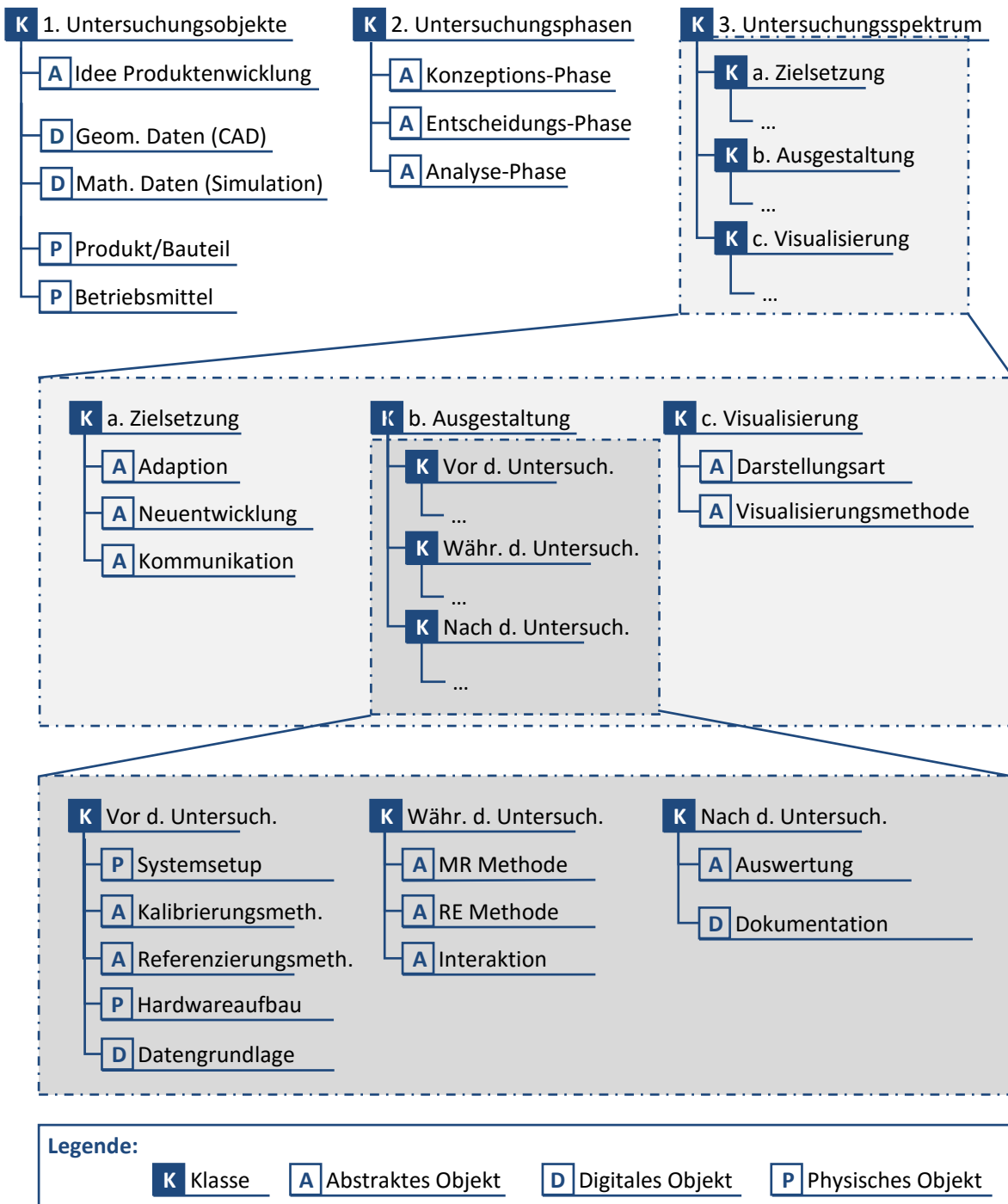


Bild 6.1: Ontologie des MMU in der Produktentwicklung

vor (*Entscheidungs-Phase*) und der MMU dient der Vermittlung zwischen den beiden Welten und der Unterstützung der Entscheidungsfindung. In der *analytischen Phase*, nahe am Produktionsstart und während der laufenden Produktion, liegt der Hauptfokus der Produktentwicklung auf den physischen Produkten und der MMU dient hauptsächlich der Kontrolle und schnellen Problembhebung.

Die Klasse *Untersuchungsspektrum* teilt sich in die Unterklassen *Zielsetzung*, *Ausgestaltung* und *Visualisierung*. Bei der Adaption des MMU auf neue Themenfelder gilt es grundsätzlich nach drei unterschiedlichen *Zielsetzungen* zu unterscheiden: Wird eine bestehende Analysemethode auf das neue Themenfeld *adaptiert*, muss eine neue Methode für ein spezifisches Objekt des *neuen* Themenfeldes *entwickelt* werden oder soll der MMU bereits bestehende Analyseergebnisse präsentieren und somit die *Kommunikation* unterstützen. Die Instanzen der Unterklasse *Ausgestaltung* dienen der Beschreibung des MR System und der methodischen Vorgehensweise. Die Instanzen der Unterklasse *Visualisierung* konkretisieren, wie die digitalen Inhalte dargestellt werden müssen, um die geforderte Zielsetzung zu erfüllen. Da die letzten beiden Unterklassen besonders umfangreich sind, wird ihnen im Folgenden jeweils ein Unterkapitel gewidmet.

6.1.1 Ausgestaltung von MMU Methoden

Für eine zielführende MR Untersuchung müssen die richtigen methodischen und systemischen Bausteine ausgewählt und kombiniert werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird dabei nochmal zeitlich in drei Unterklassen untergliedert (vgl. Abb. 6.1). *Vor der Untersuchung* muss definiert werden, für welches MR System die Methode entwickelt werden soll. Dies hängt stark davon ab, in welcher Form die digitalen und physischen Bestandteile vorliegen. Anschließend muss die Vorgehensweise und der Ablauf *während der Untersuchung* festgelegt werden. Der dritte, wichtige Bestandteil besteht darin festzuhalten, was *nach der Untersuchung* mit den Ergebnissen geschieht, um daraus die geeignete Wahl der Ergebnisdokumentation abzuleiten.

Die Voraussetzungen für eine MR Methode werden grundlegend durch den MR Systemaufbau beschrieben. Die Unterklasse *Vor der Untersuchung* enthält damit als Instanzen die möglichen MR Systemkomponenten. Dabei kann aus dem breiten Spektrum technischer Möglichkeiten gewählt werden (s. Kap.4.3.1). Aus methodischen Gesichtspunkten sind vor allem die Wahl des Ausgabemediums und des Trackingsystems interessant, da sie in direktem Maße die Kalibrierungsmöglichkeiten beeinflussen (Kap. 4.3.2). Die Kalibrierungsmethode erzeugt im Wechselspiel mit der Referenzierungsmethode die Systemgenauigkeit. In der Referenzierungsmethode muss festgehalten werden, welche Art von

Referenzierung (optisch/taktil) gewählt wird, nach welchem Verfahren Referenzpunkte gewählt und am Objekt verfügbar gemacht werden und mit welchem Algorithmus die Information verarbeitet wird. Darüber hinaus sollte der Zusammenhang zu den vorhandenen Referenzierungsmethoden innerhalb der Produktentwicklung beschrieben und wenn möglich eine Durchgängigkeit erzeugt werden.

Die Instanzen der Hardwarevorbereitung umfassen alle Maßnahmen und Prozesse, die sicherstellen, dass Verfügbarkeit und Erreichbarkeit mit dem MR System garantiert sind. Außerdem muss definiert werden, wie mit beweglichen oder flexiblen Bauelementen umgegangen werden soll (Dynamik). Die Instanzen der Datenaufbereitung beschreiben die digitale Vorbereitung der Untersuchung. Dabei muss definiert werden, in welcher Form die einzelnen digitalen Objekte zusammengestellt werden, in welchem Format sie vorliegen und ob ein Zugriff auf Metadaten zu erfolgen hat. Darüber hinaus können Methoden zur Automatisierung der Datenaufbereitung oder dem Erzeugen von zusätzlichen digitalen Objekten (Hilfsgeometrien) beschrieben werden.

Die Unterklasse *Während der Untersuchung* enthält die Instanzen zur Beschreibung der angewandten MR Methoden, zur Darstellung der augmentierten Inhalte sowie der RE Methoden zur Datenrückführung physischer Messungen in den DMU. Hinsichtlich der MR Methode kann entweder durch eine Überlagerung ein Soll-/Ist-Abgleich oder durch eine Erweiterung der physischen Umgebung eine Validierung des digitalen Konzepts stattfinden (Kap. 4). Zur Datenrückführung stehen verschiedene technische Möglichkeiten, von der einfachen Messung mittels dem Trackingsystem bis zur vollständigen Erfassung des dreidimensionalen Raums über Laserscan- oder stereooptische Verfahren, zur Verfügung. Des Weiteren beschreibt die Unterklasse *Während der Untersuchung* Methoden zur Interaktion zwischen User und System. Die Betonung liegt hierbei auf der methodischen Beschreibung, da die Hardwarekomponenten der Userinteraktion mit dem System bereits in der Instanz Systemsetup beschrieben sind. Solche Methoden können MMU Untersuchungen deutlich vereinfachen oder in manchen Fällen generell erst ermöglichen. Sie können von der Visualisierung zusätzlicher Inhalte (z.B. Referenzgeometrien, Systemgrößen wie Genauigkeit,...), zur methodischen Sicherstellung bestimmter Betrachtungswinkel oder -entfernungen bis hin zu geführten Ablaufprotokollen reichen.

Unterklasse *Nach der Untersuchung*: Ein wichtiger Bestandteil der meisten MMU Methoden ist die Art und Weise wie die gewonnenen Erkenntnisse dokumentiert und weiterverarbeitet werden. Hierbei gilt es zum einen das Dokumentationsformat und zum anderen die Dokumentationsvorgehensweise (Auswertung) zu definieren.

Die naheliegende Art MR Erkenntnisse zu dokumentieren, ist das Gesehene in Form von Bildern festzuhalten. Dabei lässt sich unterscheiden zwischen dem reinen Speichern

von Momentaufnahmen des Bildschirms (Stillimages) und der zusätzlichen gleichzeitigen Erfassung der Pose-Daten der Kamera (Snapshot). Wird die Kamerapose mit festgehalten, kann das Bild nach der Untersuchung weiter für Offline-MR-Methoden genutzt werden. Eine etwas umfangreichere Dokumentationsart ist das Festhalten von Videos. Auch hierbei lässt sich unterscheiden zwischen der reinen Aufnahme und dem gleichzeitigen Erfassen der Kamerapose. Ein weiteres wichtiges Dokumentationsformat des MMU sind eventuelle Daten aus RE Methoden. Hierbei reicht das Spektrum von einfachen numerischen Messergebnissen bis hin zu komplexen rekonstruierten 3D-Daten. Neben der Dokumentation der Mess- und der visuellen Ergebnisse kann es noch erforderlich sein, dass auch der eigentliche Untersuchungsverlauf in einem Untersuchungsprotokoll festgehalten werden muss.

Dokumentationsmethoden lassen sich nach Maß der Automatisierung und des manuellen Aufwands klassifizieren. Die einfachste Form der Dokumentation ist eine Ablage der Daten auf einem definierten lokalen Speichermedium oder einem Netzlaufwerk. Die so gewonnenen Erkenntnisse können auch verwendet werden, um bestehende Dokumentations- und Präsentationsgrundlagen zu erweitern, angefangen bei der simplen Präsentation bis zur Erweiterung definierter Meilensteine des Entwicklungsprozesses, z.B. Funktionsmaßkatalog oder Messberichte. Hierbei gilt es durch entsprechende Sicherheitsmaßnahmen die vertraulichen Daten zu schützen und eventuell bestehende, personen- oder gruppengebundene Zugriffsrechte zu gewahren. Für komplexere oder ständig wiederkehrende Untersuchungsformen eignet es sich, eine Dokumentationsvorlage zu definieren. Unter gewissen Rahmenbedingungen ist eine automatisierte Dokumentation durch die Software des MR Systems zielführend. Dies ist vor allem in Kombination mit einer Nutzerführung sinnvoll. Darüber hinaus kann der Bedarf nach einer weiteren Verarbeitung der Ergebnisse erwachsen. Unter Umständen kann es notwendig sein, dass einzelne Teilumfänge digital nachbearbeitet werden. Dies kann von einfachen farblichen Umgestaltungen über das Zuladen weiterer digitaler Umfänge, bis hin zu Schnitten oder Messungen gehen. Ist hinsichtlich der Methodenziele eine Offline Nutzung zielführend, muss auf ein entsprechendes Datenformat mit Posenspeicherung geachtet werden. Bei der Offlinebearbeitung ist eine Versionierung der Dokumente empfehlenswert, die auch eine Bearbeitungshistorie durch mehrere Personen zulässt. Auch eine statistische Auswertung der gewonnenen Erkenntnisse ist denkbar.

Die Vielzahl der möglichen Einsatzszenarien sowie der Anforderungen an das System und die methodische Vorgehensweise verdeutlichen, dass es sehr schwierig ist, eine statische MMU Methode zu entwickeln. Vielmehr besteht die Notwendigkeit eines flexiblen Ansatzes zur Adressierung eines möglichst großen Anwendungsspektrums und zur Anpassung an die Anforderung der individuellen Gegebenheiten einzelner Untersuchungen. Nur dadurch

kann eine durchgängige Anwendung in der Praxis erzielt werden.

6.1.2 Visualisierungsmethoden und Darstellungsarten

Die Instanzen der Unterklasse *Visualisierung* konkretisieren, wie die digitalen Inhalte dargestellt werden müssen, um die geforderte Zielsetzung zu erfüllen (Abb. 6.1). Zum einen müssen die *Darstellungsarten* der digitalen Objekte festgelegt werden. Dabei können insbesondere nicht-geometrische Objekte unterschiedliche geometrische Darstellungsformen annehmen, z.B. die Visualisierung eines dynamischen Vorgangs mittels einer Hüllkurve oder einer Animation. Darüber hinaus können unterschiedlichen *Visualisierungsmethoden* (Farbliche Markierung, Transparenz, etc.) verwendet werden.

Darstellungsart

Die verschiedenen Visualisierungsformen lassen sich nach aufsteigender Komplexität in folgende Darstellungsarten einteilen:

2D Darstellung, Annotation (Flags): Die einfachste Darstellungsart stellen zweidimensionale Informationen dar. Dies können z.B. Bilder oder Zeichnungen, aber auch Textinhalte oder farbliche Markierungen sein.

Zweidimensionale Inhalte müssen in dreidimensionalen MR Anwendungen über eine definierte Zuweisung zu den realen Umfängen registriert werden. Dabei entsteht nur ein immersiver und intuitiver Zugang zu den Informationen, wenn die 2D Grafiken auf virtuellen Flächen liegen, denen Flächen des realen Umfeldes entsprechen. Beispielsweise lassen sich perspektivisch korrekt dargestellte virtuelle Pfeile auf dem physischen Boden zur Navigationsunterstützung leicht verstehen, während die gleichen Pfeile schwer zu interpretieren sind, wenn sie frei über dem Boden im Raum schweben. Handelt es sich um einfache, abstrakte Inhalte wie Text oder Zahleninhalte, fällt es schwer, diese verständlich im Raum darzustellen. Abhilfe schaffen hierbei Annotationen oder auch Flags (engl. für Fahne) genannt, um eine Zuordnung im dreidimensionalen Raum zu schaffen. Eine Flag ist dabei eine Darstellungsart bei der die Information in einem meist rechteckigen Fenster präsentiert wird, während dieses Fenster über eine Linie mit dem Punkt im Raum verknüpft ist, dem diese Information zugeordnet ist.

Linienverläufe: Komplexere zweidimensionale Darstellungen können virtuelle Objekte sein, die die Kontur eines Bauteils widerspiegeln und so erlauben dieses mit Informationen zu überblenden, z.B. es farblich zu umranden oder zu markieren. Hierbei können sowohl abstrakte Linienverläufe, z.B. Wirkketten wie auch reale Verläufe z.B. Bauteilkonturen oder Fugenkanten dargestellt werden. (Abb. 6.8)

3D Geometrie: Unter die Kategorie 3D Geometrien fallen neben den Konstruktionsdaten auch die Datengrundlage für Simulationen (FEM, fotorealistische Darstellungen,...). Ein Sonderfall ist die Behandlung dynamischer Vorgänge durch das Positionieren und Clustern der 3D Geometrien zu definierten Zeitpunkten (statische Bewegungszustände).

Komplexe, zusammengesetzte Strukturen: Darüber hinaus lassen sich durch Kombination der einzelnen beschriebenen Darstellungsarten komplexe, zusammengesetzte Strukturen schaffen. So kann beispielsweise mit mehreren logisch verknüpften 2D Bezugssymbolen ein Ausrichtkonzept oder durch die Kombination eines konstruierten Bezugskörpers und virtueller Lehren ein Funktionsmaß dargestellt werden.

Visualisierungsmethodik

Die Visualisierungsmethoden lassen sich nach geometrischen und nicht-geometrischen Darstellungen sowie interaktiven Methoden einteilen. Eine Sonderkategorie bilden die Methoden zur Erzeugung eines realistischen Eindrucks.

Geometrische Darstellung

Neben der Darstellung eines Objektes (sowohl 2D wie 3D) als Vollgeometrie kann es die Vergleichbarkeit oder die Übersichtlichkeit verlangen, reale oder digitale Gegenstände sichtbar zu machen, die räumlich hintereinander angeordnet sind. Dazu eignet sich die Darstellung als halbtransparentes Objekt oder als Gitternetz (nur die äußeren Konturen als Linien). Dabei hat sich gezeigt, dass eine interaktive Anpassung und Kombination der einzelnen Visualisierungsmethoden während der Untersuchung zielführend ist [Gei12].

Des Weiteren kann es bei komplexen Geometrien notwendig sein, Methoden zur Komplexitätsreduktion einzusetzen. Dies beginnt mit der Möglichkeit einzelne Objekte zu Gruppieren und, z.B. innerhalb einer Baumstruktur, hierarchisch zu strukturieren. Über das Abbilden eines Rahmens oder einer Hüllgeometrie lassen sich sowohl verschiedene Bauteile, verschiedene Zustände eines Bauteils oder Bauteile mit abstrakten Informationen zusammenführen. Die damit verbundene Abstraktion kann die Komplexität einer solchen Szene deutlich reduzieren. Ein weiteres wichtiges Mittel zur Erhöhung der Verständlichkeit und Interpretierbarkeit einer MR Darstellung ist der Einsatz von Verdeckungsobjekten (Okklusion) zur Erzeugung eines realistischen Eindrucks (S.41).

Nicht-geometrische Darstellung

Unter nicht-geometrische Methoden fällt das Darstellen von Texten, Symbolen aber auch eine farbliche Markierung einzelner Objekte. Diese müssen wie auf Seite 57 beschrieben der Darstellungsart angepasst und zum dreidimensionalen Raum referenziert werden. Eine besondere Form der Visualisierungsmethode stellt das Einblenden von Systeminformationen dar, z.B. die aktuelle Framerate oder die aktuelle Kalibrierungsgenauigkeit,

da hierbei keine lagerichtige Positionierung nötig ist. Auch andere Informationen die zur Nutzerführung oder dem Nutzerfeedback wichtig sind, können für die Entwicklung einer MMU Methode benötigt werden und müssen unter ergonomischen Gesichtspunkten visualisiert werden können.

Interaktive Methoden

Interaktive Methoden lassen sich generell nach dem Bedarf unterteilen, ob die entsprechende Interaktion mit der Visualisierung online, d.h. während der Untersuchung, oder nur offline, d.h. vor oder nach der Untersuchung stattfindet. Neben den bereits erwähnten Methoden die Visualisierungsform zu ändern (z.B. von Transparent auf Gitter) oder zu kombinieren, kommen hier vor allem Methoden zur Datentransformation und -deformation zum Einsatz. Eine Form der Datendeformation, die von besonderer Bedeutung ist, stellt hierbei das Setzen von Schnittebenen dar. Eine weitere interessante Form der Deformation ist das Einbeziehen von weiterführenden Informationen in die Visualisierung, beispielsweise das Aufdicken des Rahmens einer virtuellen Lehre um die Systemgenauigkeit.

Realistische Darstellung

Der Realismus einer Darstellung lässt sich vor allem über Methoden beeinflussen, die in der Lage sind, den Geometrien Texturen, Materialien und Umgebungen zuzuordnen sowie die daraus resultierenden Lichtverhältnisse durch Schattenwurf und Reflektion realistisch zu simulieren.

6.2 Die Ontologie des MMU im Toleranzmanagement

Im Folgenden wird die im letzten Kapitel vorgestellte Ontologie auf das Toleranzmanagement angewandt. Dabei werden die den Klassen zugrunde liegenden Fragestellungen beantwortet, indem die konkreten Instanzen im Toleranzmanagement benannt und in ihrem Zusammenhang beschrieben werden.

6.2.1 Untersuchungsobjekte des MMU im Toleranzmanagement

Die Klasse der Untersuchungsobjekte dient der Beantwortung folgender Fragestellung: *Was ist Gegenstand der Untersuchung, d.h. welche digitalen und physischen Objekte sollen analysiert werden und wie stehen diese Objekte miteinander im Zusammenhang?* Dazu werden zunächst die abstrakten Ideen der Produktentwicklung identifiziert. Im Zuge des Entwicklungsprozesses werden daraus die konkreten digitalen und physischen Objekte

entlang des Entwicklungsprozesses abgeleitet (vgl. Abb. 6.1). Im Folgenden werden die in Kapitel 3 eingeführten Begriffe des Toleranzmanagements nochmal zusammengefasst und als Instanzen im Sinne dieser Ontologie des MMU eingeordnet (Abb. 6.2).

Die abstrakten Instanzen des Toleranzmanagements sind die Funktion mit daraus abgeleiteten Beurteilungskriterien, die Fügefolge mit daraus abgeleiteten Bezugsstellen und dem Ausrichtkonzept sowie abschließend der Toleranzwert. Daraus leiten sich die digitalen Objekte *CAD-Modell* inklusive Toleranzspezifikation und Toleranzketten, *Spann-/Fixierkonzept*, *Fügeplan*, *Funktionsmaß* und *Fugen-/Radienkonzept* sowie die korrespondierenden physischen Objekte *Bauteil/Baugruppe/Rohbau*, Betriebsmittel (*Auflage/Fixierung*), *Produktionsstraße* und *Fugen/Radien* ab (vgl. auch Abb. 3.12).

Weiterer Bestandteil der Klasse Untersuchungsobjekte ist die Beziehung zwischen diesen digitalen und physischen Objekten des Toleranzmanagements zu beschreiben. Sie unterliegen in der Regel der Verantwortung unterschiedlicher Entwicklungsabteilungen. Damit sind die Organisation der Zusammenarbeit aller Prozessbeteiligten und die interdisziplinäre Kommunikation die entscheidenden Erfolgsfaktoren für ein durchgängiges Toleranzmanagement in der Gesamtfahrzeugentwicklung [VDA06, S.5]. Entscheidend ist hierbei, dass der Informationsfluss nicht nur von der digitalen zur physischen Entwicklungsumgebung fließt, sondern ein gegenseitiger Austausch zwischen den beiden Entwicklungswelten stattfinden muss (Abb. 6.3). Dieser Informationsfluss sollte zu jedem Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses definiert und sichergestellt sein und auch externe Zulieferer mit einbeziehen können [vP02, S.113].

Die Grundlage dieses Informationsflusses in der industriellen Praxis bilden die im Entwicklungsprozess definierten Dokumente zur Ergebnisdarstellung des Toleranzmanagements sowie Diskussionsgremien, die an regelmäßigen Abspracheterminen tagen. Die Ergebnisse dieses Prozesses werden in folgenden Dokumenten festgehalten:

- Referenzierungskonzept (Messtechnik & Produktion)
- Funktionsmaßkatalog
- Fugen- & Radienplan
- Spann- & Fixierkonzept
- Konstruktionszeichnung (2D & 3D)

Diese fünf Dokumente enthalten die Ergebnisse des Tolerierungsprozesses. Sie bilden sowohl die Basis für die Kommunikation der digitalen Ergebnisse in die hardwarebasierten Bereiche des Entwicklungsprozesses als auch für die messtechnische Erfassung

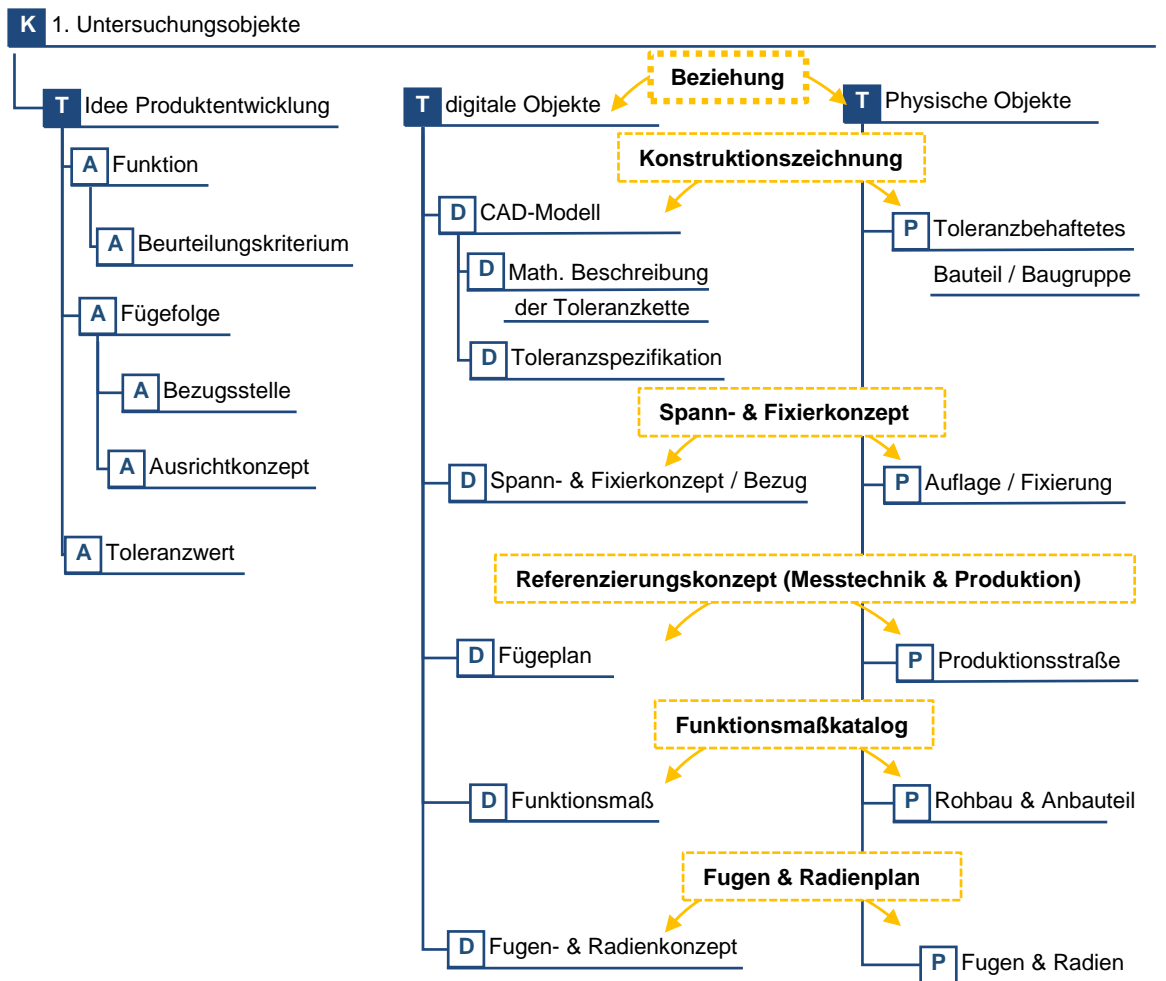


Bild 6.2: Die Klasse der Untersuchungsobjekte des MMU im Toleranzmanagement

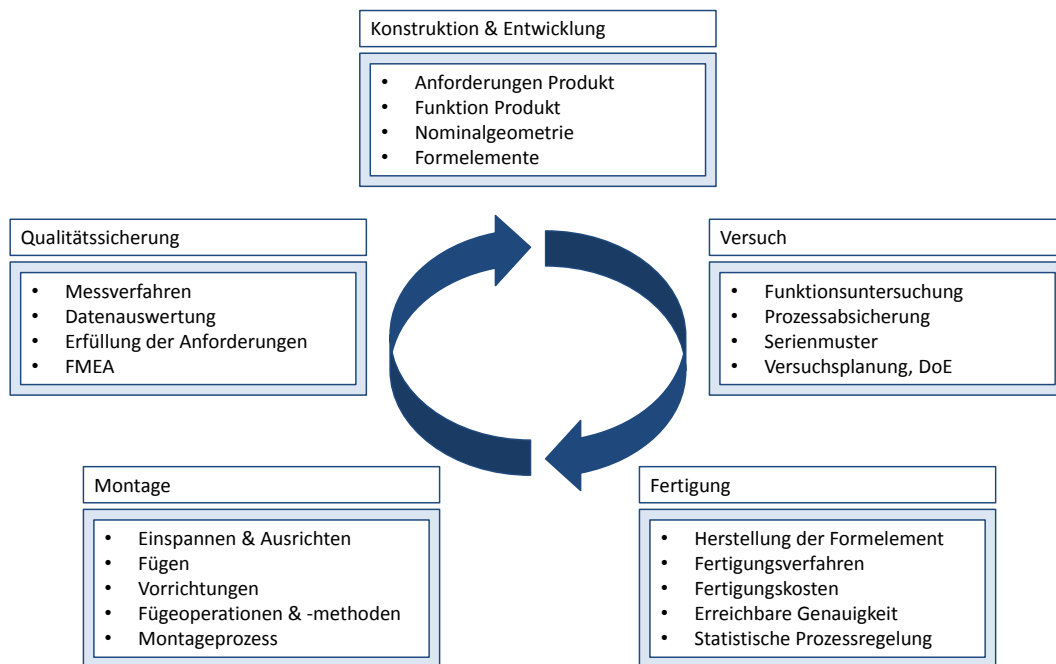


Bild 6.3: Toleranzmanagement als bereichsübergreifender Informationsfluss [vP02, S.114]

der festgelegten Prüfkriterien und der daraus ermittelten Prozesskennzahlen (Kap. 3.2.3 S.16). Um die gewonnenen Erkenntnisse mit der vertrauten Welt zu vergleichen und das Ergebnis in die weiteren Arbeitsschritte einfließen zu lassen, ist eine gemeinsame Interpretation erforderlich. Die integrierende Aufgabe des Toleranzmanagements ist es hierbei Interpretationsfehler zu vermeiden. Damit enthalten diese Dokumente die grundlegenden Informationen und Fragestellungen für MMU Analysen innerhalb des Toleranzmanagements. Die Klasse Untersuchungsobjekte des MMU im Toleranzmanagement inklusive dieser Kommunikationskanäle ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

6.2.2 Untersuchungsphasen: Verankerung im Prozess

Die im letzten Unterkapitel vorgestellten, digitalen und physischen Objekte des Toleranzmanagements müssen im temporären und kausalen Kontext des Entwicklungsprozesses verstanden werden, um die Berührungspunkte zu ermitteln, an welchen eine Zusammenführung in einer MMU Analyse einen Mehrwert erzeugt. Die Untersuchungsphasen werden nach Anteil der digitalen und physischen Komponenten in die Phasen *Konzeption*, *Entscheidung* und *Analyse* klassifiziert (Kap. 6.1). Im Folgenden werden diese Phasen im Toleranzmanagement identifiziert.

In [Sto10, S.178] wird mit Verweis auf ein Vortrag von P. Sahlin et Al. auf dem NAFEMS, Wiesbaden im Jahr 2003, aufgrund des großen Anteils toleranzbedingter Konstruktionsänderungen eine definierte Einordnung der Methoden des Toleranzmanagement in den Produktentwicklungsprozess gefordert. Entsprechend muss eine definierte Eingliederung der Mixed Mock-Up Methoden innerhalb des Toleranzprozesses erfolgen. Der Verband der Automobilindustrie [VDA06, S.5ff] gliedert den Tolerierungsprozess grob in die folgenden fünf Schritte:

1. Auswahl der Qualitätsmerkmale
2. Toleranzanalyse auf Gesamtfahrzeugebene
3. Toleranzanalyse auf Komponentenebene
4. Durchgängiges Konzept bei der Bemaßung
5. Prototypenbau & Serie

Aus dieser groben Einteilung leitet sich der standardisierte Prozess für das Toleranzmanagement ab. Innerhalb dieses Prozesses lassen sich zwei MMU-relevante Abschnitte identifizieren: die *konzeptionellen* und die *verifizierenden* Prozessschritte (Abb. 6.4).

Es liegt in der Natur des Mixed Mock-Ups, dass er erst ab dem Zeitpunkt verfügbarer Hardware zum Einsatz kommen kann. Bereits zu Beginn existieren jedoch in den *konzeptionellen Prozessschritten* (Abb. 6.4: 2 & 3) unterstützende Hardwarekonzepte. Dies können Modellaufbauten wie Design-Tonmodelle oder Maßkonzepte aus Holz sein, aber auch Vergleichshardware wie Vorgänger- oder Konkurrenzfahrzeuge. Bezeichnend ist hierbei, dass zu diesen Aufbauten meist keine direkten Partner im DMU existieren. Grundsätzlich überwiegen die digitalen Anteile im Entwicklungsprozess, der MMU kann aber zur Konzeption und Verifikation der digitalen Konzepte an der verfügbaren Hardware eingesetzt werden. Somit lassen sich die konzeptionellen Prozessschritte des Tolerierungsprozesses der *konzeptionellen Phase* der Ontologie zuordnen (Abb. 6.5).

Die verifizierenden Prozessschritte (Abb. 6.4: 5-10) beginnen mit dem Aufbau von Prototypen auf Basis der DMU Daten. Hier findet bereits der klassische Einsatz des Mixed Mock-Ups nach [Gei12] statt. Es liegen nun digitale und physische Prototypen in gleichem Maße vor. Damit beginnt die *Entscheidungs-Phase* der Ontologie: der MMU dient der Vermittlung zwischen den beiden Welten und der Unterstützung der Entscheidungsfindung. Mit zunehmendem Reifegrad des Prototypen verschiebt sich der Fokus der Produktentwicklung auf die physischen Aufbauten und der MMU dient hauptsächlich der Kontrolle

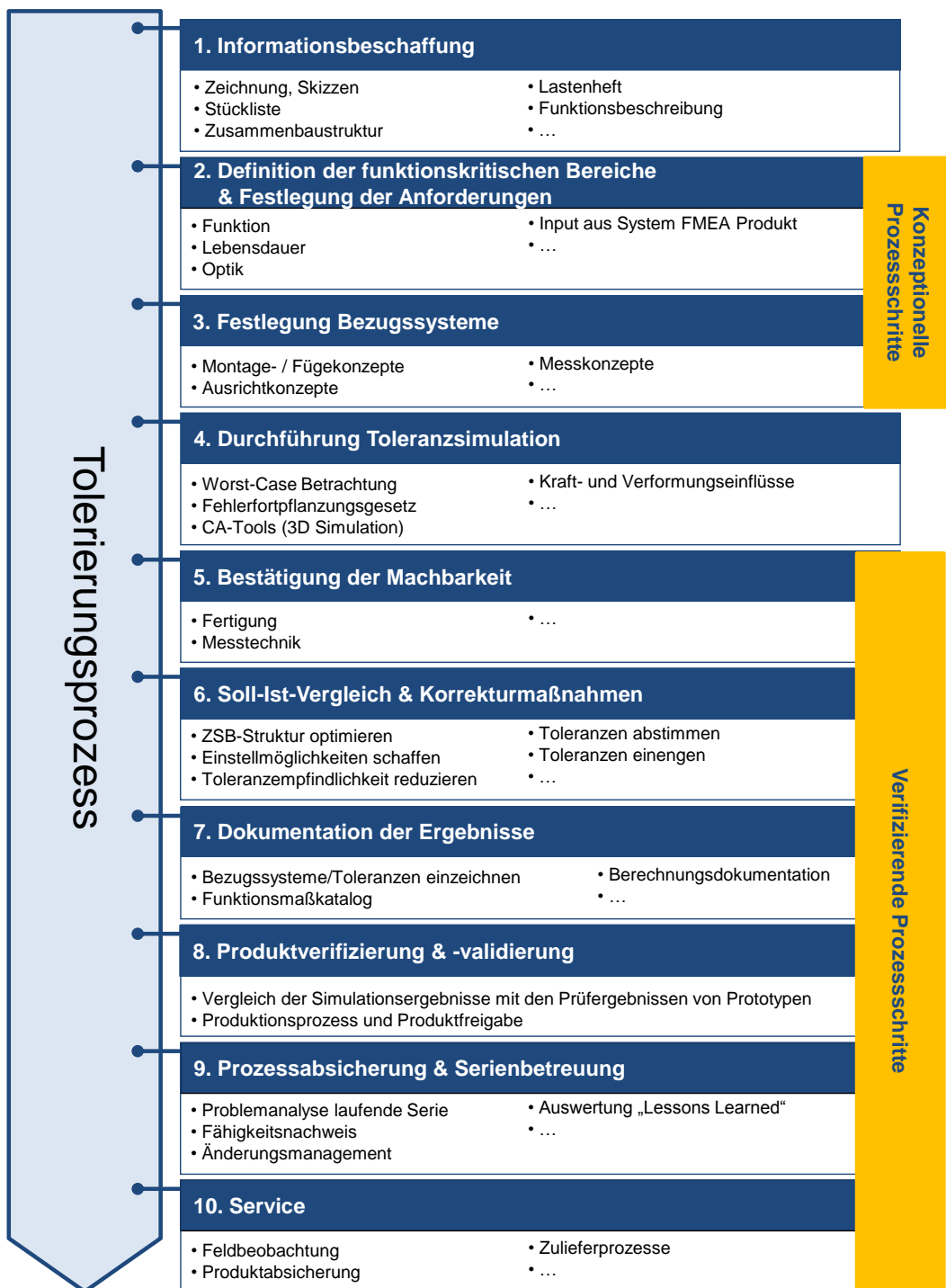


Bild 6.4: Standardisierter Tolerierungsprozess nach [VDA06, S.41] ergänzt um die MMU Einsatzgebiete (gelb).

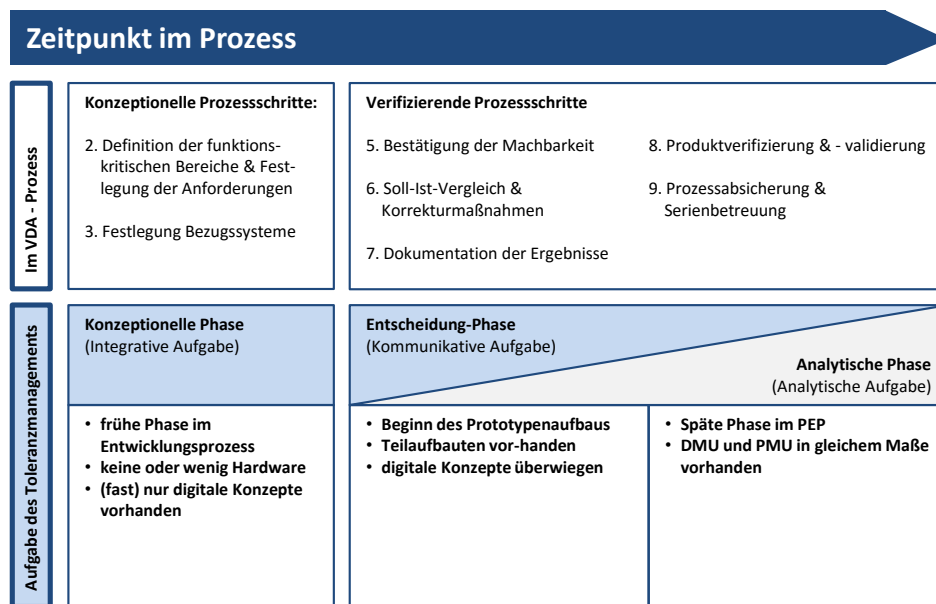


Bild 6.5: Gegenüberstellung der VDA Prozessschritte aus [VDA06, S.41] mit den Aufgaben des Toleranzmanagements

(*analytische Phase* der Ontologie). Der Übergang von der Entscheidungs- zur Analysephase ist dabei fließend und wird in den verschiedenen Prototypenphasen (E-Fzg., B/Fzg,...) mehrmals iterativ durchlaufen (Abb. 6.5). Damit lassen sich die Untersuchungsphasen der Ontologie im Entwicklungsprozess nicht temporär trennen.

Die drei Aufgaben des Toleranzmanagements (Integration, Kommunikation und Analyse, Kap. 3.2) lassen sich diesen Phasen des MMU gegenüberstellen (Abb. 6.5). In der *konzeptionellen Phase* ist die überwiegende Aufgabe des Toleranzmanagements die Integration. In der *Entscheidungsphase* ist die Aufgabe des Toleranzmanagements die Kommunikation der Informationen von der digitalen in die physische Entwicklungsumgebung sicherzustellen. Durch die Erweiterung der physischen Aufbauten mit digitalen Konzepten, können wichtige konzeptionelle Entscheidungen vorverlagert werden. In der *Analysephase* beginnt die analytische Aufgabe des Toleranzmanagements und der MMU dient der Kontrolle der physischen Aufbauten.

MMU Einsatz in konzeptionellen Prozessschritten

[VDA06, S.39] weist darauf hin, dass ein wirtschaftlicher Tolerierungsprozess nur durch eine umfassende interdisziplinäre Zusammenarbeit garantiert werden kann. Der Einsatz von Mixed Reality in frühen Prozessschritten schafft hierbei von Beginn an eine intuitiv verständliche Entscheidungs- und Interpretationsgrundlage. Der Mehrwert bei konzeptionellen Prozessschritten liegt daher in der Möglichkeit komplexe Konzepte zu visualisieren

und damit das Verständnis von Komplexität und Tragweite sowie die Interpretation der digitalen Konzepte zu erleichtern.

In frühen Phasen des Entwicklungsprozesses existieren kaum Hardwareaufbauten und keine technisch auskonstruierten Daten. Technische Aspekte aus dem Toleranzkonzept müssen aber sehr wohl bei Entscheidungsfragen berücksichtigt werden. Fugenmaße werden beispielsweise bereits in der Designphase definiert. Zu diesem Zeitpunkt existieren nur die modellierten Tonmodelle der Designer sowie digitale Oberflächendaten. Mixed Reality Systeme bieten hier die Möglichkeit, die Betrachtung und Diskussion der digitalen Konzepte bereits an den physischen Designkonzepten (z.B. Tonmodelle) durchzuführen. Auch andere physisch bereits vorhandene Objekte, z.B. Vorgängerbaureihen oder Konkurrenzfahrzeuge, können genutzt werden, um mittels Mixed Reality die aktuelle digitale Entscheidungsgrundlage zu vergleichen. Dadurch können neue Entscheidungen auch auf Grundlage bekannter, physischer Objekte diskutiert werden. Verständnis- und Interpretationshürden einer rein digitalen Bewertung werden verringert. Gleichzeitig bieten die entsprechenden Mixed Reality Dokumentationen und Methoden die Möglichkeit eines vergleichenden, objektiveren Begleitinstrumentes, welches den gesamten weiteren Entwicklungsprozess begleiten kann.

MMU Einsatz in verifizierenden Prozessschritten

In den späteren, verifizierenden Prozessschritten (Abb. 6.4: 5-9), vor allem im klassischen Mixed Reality Anwendungsfeld Prototypenbau, entfalten Mixed Mock-Up Methoden ihr großes Potential zur Steigerung der Prozessqualität: Das bestehende Analysespektrum des Toleranzmanagements kann mit Mixed Mock-Up Methoden erweitert (Abb. 6.6 links) und auf diese Weise eine Kommunikations-, Interpretations- und Synchronisationsplattform geschaffen werden (Abb. 6.6 rechts).

[Sto10, S.96] schildert die Bedeutung von Dokumentationswerkzeugen zur Tragweite von Toleranzinformationen über den Entwicklungsprozess hinweg. Der MMU als Analyseplattform erzeugt hierbei eine leicht interpretierbare Kommunikationsplattform. Dabei ist es wichtig hervorzuheben, dass sich aus Sicht des Autors der Mixed Mock-Up unter aktuellen Systemkonfigurationen nicht dazu eignet, vorhandene messtechnische Systeme zu ersetzen - eine These, die immer wieder formuliert und untersucht wird (z.B. in [Chu02]). Der erleichterte und intuitive Zugang zu Mixed Reality Dokumentationen ermöglicht jedoch eine effektive Ergänzung des klassischen Messtechnikspektrums. Das vollständige Potential wird erst in einer engen Verzahnung mit den messtechnischen Instrumenten des Entwicklungsprozesses entfaltet (Abb. 6.6 links). Es ist aber davon auszugehen, dass der Übergang zwischen optischen Messtechnikmethoden und MR Anwen-

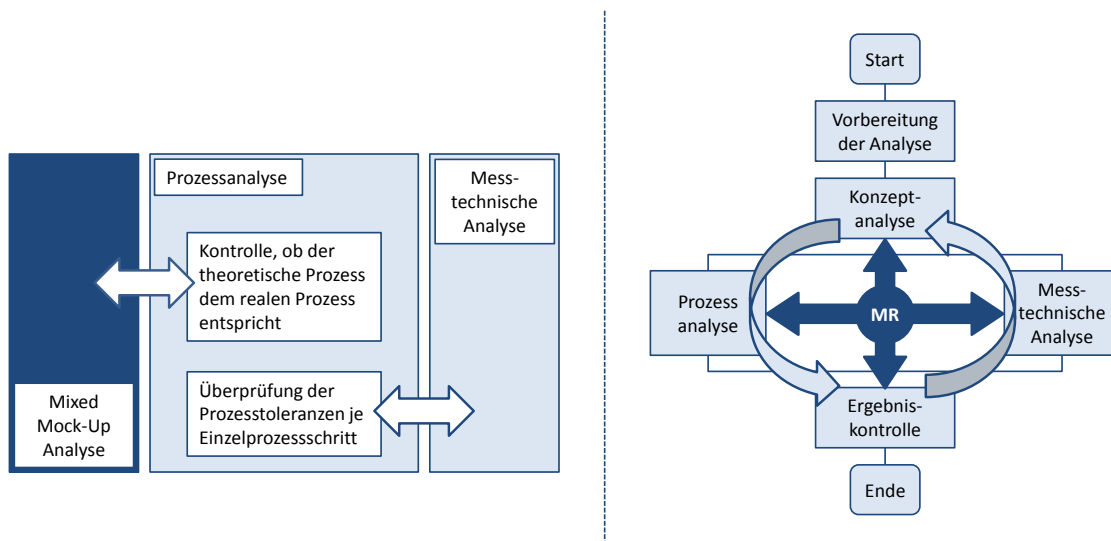


Bild 6.6: Prozessanalyse nach [BH13a, S.96,99] (hellblau) erweitert, um den Mixed Mock-Up Analyse (dunkelblau)

dungsfeldern mit der Weiterentwicklung präziser Trackingverfahren und automatisierter Bildverarbeitungsalgorithmen immer fließender wird.

6.2.3 Zielsetzung des MMU im Toleranzmanagement

In der Unterklasse Zielsetzung existieren drei Szenarien um MMU Methoden zu kategorisieren (Abb. 6.1): Wird eine bestehende Analysemethode auf das neue Themenfeld *adaptiert*, muss eine neue Methode für ein spezifisches Objekt des *neuen Themenfeldes* entwickelt werden oder soll der MMU vorsätzlich bereits bestehende Analyseergebnisse präsentieren und somit die *Kommunikation* unterstützen. Angewandt auf die Ontologie im Toleranzmanagement ergeben sich damit folgende drei Unterklassen, die im Folgenden genauer vorgestellt werden:

1. *Adaption:* Einbindung von Toleranzaspekten und -informationen in bestehende Mixed Mock-Up Anwendungen.
2. *Toleranzspezifische MMU Methoden:* Gezielte Adressierung von Toleranzaspekten durch MMU Analysen.
3. *Kommunikationsplattform:* Methoden zur gezielten Unterstützung der kommunikativen Aufgaben des Toleranzmanagements.

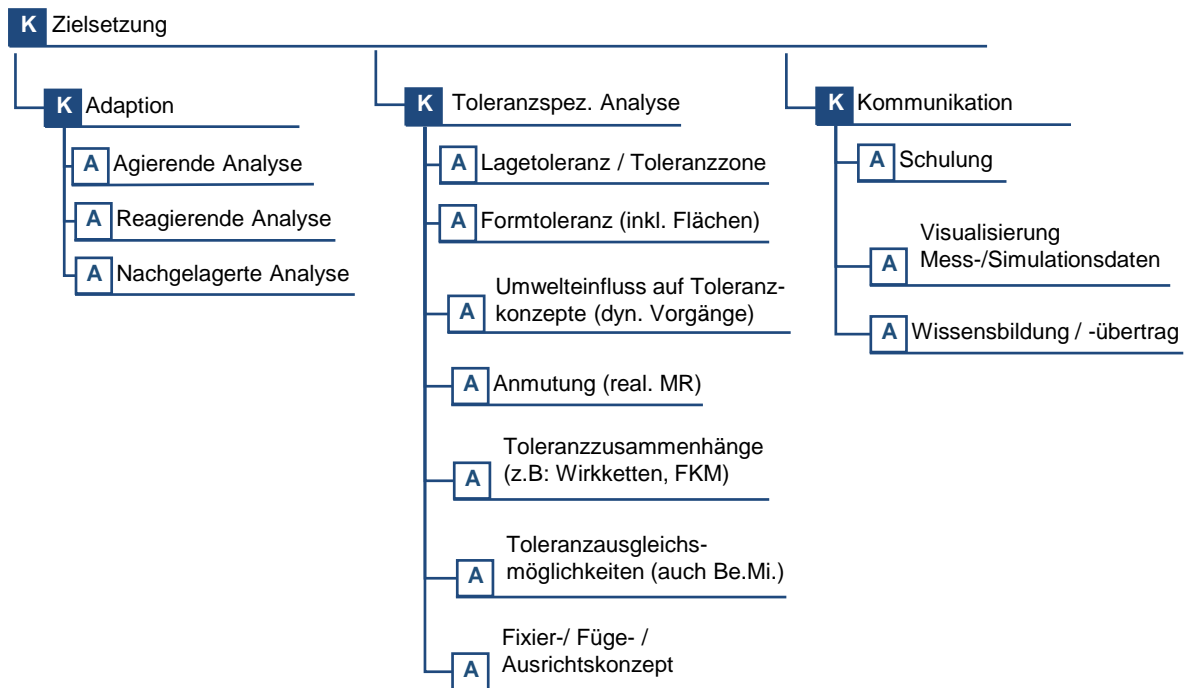


Bild 6.7: Methodenspektrum des Mixed Mock-Up im Toleranzmanagement

Adaption: auf bestehende MMU Methoden (Abb. 6.7)

Mixed Mock-Up Methoden haben sich in den Themenfeldern Hardwareabnahme, Festlegung, Problempunktanalyse und Konzeptvalidierung bewährt [LG11]. Bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse lässt sich durch die Toleranzinformationen differenzieren, ob die identifizierten Abweichungen ein individuelles Phänomen des Prototypenbaus oder aber konzeptioneller Natur sind. Ist die Abweichung durch einen individuellen Fertigungs- oder Kommunikationsfehler im Prototypenbau entstanden, muss das entsprechende Teil erneut lagerichtig montiert werden. Ist hingegen die Abweichung innerhalb der Toleranz zulässig, müssen die Auswirkungen auf die Funktionserfüllung im Sinne des Toleranzkonzepts analysiert werden. In beiden Fällen lässt sich dies am MMU untersuchen. Sollen Toleranzaspekte in vorhandenen MMU Methoden berücksichtigt werden, existieren entsprechend des Erkenntniszeitpunktes drei Unterkategorien:

- 1.1 *Agierende Analyse:* Erkenntnis des Toleranzbedarfs vor der MMU Untersuchung oder eine direkte Anfrage der Untersuchung aus dem Toleranzmanagement. Direkte Einbindung des Toleranzmanagements und Konzeption der Toleranzvisualisierung während der Datenaufbereitung. Es kann aus dem breiten Spektrum der im Folgenden vorgestellten Methoden und Visualisierungsarten gewählt werden.

- 1.2 *Reagierende Analyse*: Der Bedarf der Toleranzbetrachtung wird erst direkt während der praktischen Durchführung erkannt, z.B. bei der Problempunktanalyse. Die Toleranzinformation muss schnell verfügbar gemacht werden können. Dies kann durch ein manuelles oder automatisiertes Auswerten von verfügbaren Dokumenten (z.B. Fugenplan) oder in den Metadaten der Geometrie enthaltenen Informationen geschehen.
- 1.3 *Nachgelagerte Analyse*: Der Bedarf zur Untersuchung bestimmter Toleranzaspekte entsteht erst in der Diskussion nach dem Einsatz. Eine Berücksichtigung kann nur erfolgen, wenn die während der Untersuchung aufgenommenen Daten die Möglichkeit einer Offlinebearbeitung zulassen (Speicherung mit Posedaten). Sonst muss eine erneute MMU Untersuchung eingeleitet werden.

Neue toleranzspezifische MMU Methoden (Abb. 6.7)

Neben der Berücksichtigung von Toleranzaspekten in bestehenden Untersuchungen müssen für einen durchgängigen Ansatz die Toleranzaspekte aus Kapitel 6.2.1 durch gezielt entwickelte MMU Methoden adressiert werden. Das bestehende Methodenspektrum muss dabei um folgende Aspekte erweitert werden:

Generell entsteht der Bedarf das abstrakte, mathematische Konzept einer Toleranz sichtbar zu machen. Dafür müssen Methoden zur Visualisierung von *Lagetoleranzen*, *Toleranzzonen* und *Formtoleranzen* entwickelt werden. Insbesondere die Adressierung von Flächentoleranzen in MMU Methoden stellt hierbei eine Herausforderung dar (s. S.71). Hinsichtlich produktionsnaher Entwicklungsschritte ist vor allem die Analyse der *dynamischen Einflüsse* aus der Umgebung auf Form- und Lagetoleranzen ein wichtiges Zielfeld. Bei der Adressierung des Fugen- & Radienplans lässt sich der Bedarf ableiten, durch eine realitätsnahe Darstellung MR Methoden für die Handhabung der subjektiven Funktion „*Anmutung*“ zu entwickeln. An den Schnittstellen „Spann- & Fixierkonzept“ sowie dem „Referenzierungskonzept“ lässt sich der Bedarf ableiten, *Fixier-*, *Füge-* oder *Ausrichtkonzepte* direkt mit MR darstellen zu können. Darüber hinaus sind die komplexen *Wirkzusammenhänge* des Toleranzmanagements, z.B. die Toleranzketten oder Funktionsmaße, sowie die Mechanismen zur Umsetzung des Toleranzkonzepts (*Toleranzausgleich*, auch betriebsmittelseitig) als Zielfelder für MMU Untersuchungen zu adressieren. Eine Zusammenfassung aller toleranzspezifischen Themen, die direkt mit MMU Methoden behandelt werden können findet sich in Abbildung 6.7.

Kommunikation (-splattform) (Abb. 6.7)

Mixed Reality Methoden und Dokumentationen können die kommunikative Aufgabe des Toleranzmanagements unterstützen. Der intuitive Zugang von Mixed Reality Darstel-

lungen sowie das Erleben der Ergebnisse in einer vertrauten Umgebung unterstützen Akzeptanz und Verständnis des adressierten Publikums. Ziel hiervon kann die gezielte Darstellung zu *Schulungs-* oder *Wissensbildungszwecken* aber auch die Kommunikation von *Mess- und Simulationsergebnissen* in einer MR Dokumentation oder Untersuchung sein.

6.2.4 Ausgestaltung von MMU Methoden im Toleranzmanagement

Die Klasse *Ausgestaltung* gliedert sich in die drei Unterklassen *Vor*, *Während* und *Nach der Untersuchung*. Im Folgenden werden nur die Aspekte dieser Klassen beschrieben, die im Toleranzmanagement von den anderen MMU Anwendungen, insbesondere dem klassischen MMU im Prototypenbau, abweichen (vgl. Abb. 6.1).

Vor der Untersuchung

Hinsichtlich des *Systemsetups* unterscheidet sich die Ontologie des MMU im Toleranzmanagement nicht von dem in Kapitel 6.1 beschriebenen. Die gewählte Konfiguration des zugrundeliegenden MR Systems in Verbindung mit den messtechnischen Ansprüchen im Toleranzmanagement beeinflussen jedoch die Wahl einer geeigneten *Kalibrier-* und *Referenzierungsmethode*. Da dieses Thema für diese Dissertation von großer Bedeutung, gleichzeitig aber hochkomplex ist, werden die messtechnischen Ansprüche an Toleranzmethoden gesondert in Kapitel 6.3.2 aufgelistet und anschließend die Bedeutung für Systemsetup, Tracking, Kalibrierung und Referenzierung in Kapitel 6.3.3 diskutiert.

Hinsichtlich der Verfügbarkeit und Erreichbarkeit des *Hardwareaufbaus* ergeben sich keine Unterschiede zum klassischen MMU. Bei Untersuchung dynamischer Prozesse oder flexibler Bauteile muss besonders auf Übereinstimmung mit bestehenden Toleranzanalysen im Referenzierungskonzept geachtet werden.

Die *Datenaufbereitung* unterscheidet sich im Toleranzmanagement teilweise durch neue Datenformate, wenn Simulationsdaten als Grundlage genommen werden. Darüber hinaus müssen meistens neue Hilfsgeometrien konstruiert werden, um sichtbare Bewertungskriterien zu erzeugen (Kap. 6.2.5). In beiden Punkten lohnt sich bei häufig auftretenden Analysen eine automatisierte Datenaufbereitung oder eine Beschreibung der Toleranzen in den Metadaten der Geometriedaten.

Während der Untersuchung

Wie in Kapitel 6.2.3 (Abb. 6.7) beschrieben, ist es ein Ziel des MMU im Toleranzmanagement, Toleranzaspekte in bestehenden MMU Methoden einzubinden. Dabei wird davon ausgegangen, dass bereits das gesamte bestehende Methodenspektrum ausgenutzt wird. Neu hinzugezogene Toleranzaspekte machen sich daher nur in der Erweiterung der dargestellten Inhalte oder der Visualisierungsart bemerkbar. Diese Visualisierungsaspekte werden im nachfolgenden Kapitel 6.2.5 erläutert. Im Folgenden werden hier zunächst die Neuentwicklung toleranzspezifischer MMU Methoden sowie der Einsatz als Kommunikationsplattform beschrieben:

Lagetoleranzen / Toleranzzonen

Die Analyse von Lagetoleranzen bestehender Bauteile oder der Einhaltung von Toleranzzonen folgt dem Soll/Ist-Abgleich. Idealerweise wird dies mit Methoden der Datenrückführung gekoppelt, um erkannte Abweichungen quantitativ analysieren und dokumentieren zu können. Werden umfangreiche oder komplexe Bauräume untersucht, ist eine Nutzerführung hilfreich, um die Vollständigkeit der Untersuchungsergebnisse zu garantieren. Hinsichtlich Lagetoleranzen ist dabei vor allem die Datentransformation (Translation, Rotation) und hinsichtlich der Formtoleranz die Datendeformation von Bedeutung.

Darüber hinaus lassen sich mittels Erweiterung digitale Toleranzkonzepte im realen Umfeld analysieren, um zu verstehen, ob die Hardwareumgebung zu dieser Toleranz kompatibel ist (Toleranzausgleich, Montagevorgänge, etc...) oder ob das Toleranzkonzept im bestehenden Bauraum umsetzbar ist. Hierfür eignet sich neben der reinen MR Darstellung auch die Transformation der digitalen Umfänge entlang der erlaubten Toleranzwerte.

Formtoleranzen

Formtoleranzen folgen generell dem gleichen Muster wie die Lagetoleranzen, allerdings bestehen hinsichtlich der Datenrückführung komplexer Formen oder freigeformter Flächen höhere technische Hürden (s.u.). Hinsichtlich der Erweiterung eignet sich zur Manipulation die Datendeformation.

Das Kriterium der senkrechten Betrachtung zur Beurteilung mit Mixed Reality schließt unter bisherigen technischen Randbedingungen hinsichtlich des Toleranzmanagements einen wichtigen Aspekt aus: die Flächentoleranz. Eine Freifläche, z.B. das Relief einer Motorhaube, bezüglich der Toleranzeinhaltung zu beurteilen, ist mangels senkrechter Beurteilungskriterien nicht möglich. In einem Soll-Ist-Vergleich können nur die Kanten eines solchen Bauteils betrachten werden. Um auch die Betrachtung von Flächentoleranzen zu ermöglichen, kann auf verschiedene Hilfsmittel zurückgegriffen werden:

- *Aufprojektion von Hilfslinien*: Auf das physische Bauteil werden Hilfsgeometrien, z.B. Dreiecksformen oder ein Gitternetz aufprojiziert. Diese Hilfsgeometrien können nun mit einer entsprechenden digitalen Simulation einer solchen Projektion auf das digitale Bauteil verglichen werden. Damit lässt sich die Formtreue der Freifläche in Echtzeit betrachten, was auch eine Beurteilung möglicher dynamischer Einflussgrößen im Verbauprozess ermöglicht. Die Tiefeninformation der Lage der Fläche in Koordinatenrichtung senkrecht zur Fläche lässt sich durch einen Größenvergleich zwischen digitalem und realem Muster erreichen. Die Herausforderung besteht hierbei jedoch in der Erstellung der digitalen Darstellung und der lagerichtigen Referenzierung der Aufprojektion zum digitalen Inhalt.
- *Magnetische Fähnchen*: Durch das Platzieren stabförmiger Objekte auf der Freifläche kann ein seitliches, und damit senkrechtes, Beurteilungskriterium geschaffen werden. Denkbar sind zum Beispiel magnetische Fähnchen, die an kritischen Stellen auf der Oberfläche angebracht werden. Eine Positionierung des entsprechenden digitalen Vergleichsobjekts kann durch taktile Referenzierung oder auch durch Markerreferenzierung gewährleistet werden. Die eingesetzte Mixed Reality Software muss in der Lage sein, die entsprechende Normaleninformation an dieser Stelle zu ermitteln. Formfehler können über den Winkel zwischen digitalem und realem Fähnchen beurteilt werden. Gegenüber der Aufprojektion hat dieser Ansatz das Potential auch die Koordinatenlage senkrecht zur Fläche einfach und intuitiv quantitativ beurteilen zu können, z.B. durch Anlegen eines Lineals oder einer entsprechenden Skala auf den Fähnchen.
- *Laserscan*: Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwendung von Laserscannern dar. Diese RE Methode ermöglicht die Erfassung der Freifläche in hoher Präzision und den automatisierten Soll-Ist-Vergleich mit dem digitalen Modell. Das Ergebnis wird üblicherweise in Falschfarbendarstellung wiedergegeben. Eine Visualisierung dieser Darstellung am physischen Bauteil mittels Mixed Reality ermöglicht eine einfache Beurteilung durch intuitives sowie haptisches Verständnis der Ergebnisse. Dabei ist jedoch im Gegensatz zu den beiden anderen Methoden mit bisherigen Systemen keine Echtzeitanalyse dynamischer Prozesse möglich.

Umwelteinflüsse

Bei der Untersuchung von Umwelteinflüssen ist sowohl eine Untersuchung des digitalen Konzepts mittels Erweiterung (z.B. hinsichtlich Montageeffekten) als auch die Analyse der Toleranzursachen mittels Soll/Ist-Vergleich denkbar. Während im ersten Fall vor allem die Datentrans- und -deformation zum Einsatz kommen können, um die verschiedenen Toleranzauswirkungen am digitalen Konzept zu realisieren, sind im Falle des

Soll/Ist-Vergleichs maßgeblich die Methoden zur Dokumentation und Datenrückführung interessant, um die gewonnen Erkenntnisse in den weiteren Entwicklungsprozess mit einfließen zu lassen.

Anmutung

Um die subjektive Funktion „Anmutung“ greifbar zu machen, sind Anpassungen der Visualisierung nötig (Kap. 6.2.5). Hinsichtlich der Methoden kann das gesamte Spektrum ausgeschöpft werden. Durch die Subjektivität des Themas unterscheiden sich aber die Vergleichskriterien hinsichtlich des Soll/Ist-Vergleichs und die Ansprüche an die Datenrückführung von anderen Methodenzielen, da der Vergleich eines subjektiven Kriteriums immer zwischen dem digitalen und physischen Eindruck des Bedieners erfolgt.

Toleranzzusammenhänge

Die Darstellung von Toleranzzusammenhängen hängt ebenfalls von der geeigneten Wahl der Visualisierungsformen ab. Konzepte zu Toleranzzusammenhängen liegen oft nur in mathematisch abstrahierter Weise vor und die Methode führt nur zum Erfolg, wenn zur gewählten Untersuchungsart auch die passende Visualisierungsform gewählt wird (vergleiche Visualisierungshypothese in Kap. 5). Die Darstellung von Toleranzzusammenhängen kann entweder als virtuelles Konzept in der realen Umgebung (Erweiterung) oder zur Analyse der Einhaltung am Produkt (Soll/Ist Vergleich) erfolgen.

Manipulationsmethoden wie Transformation oder Deformation sind nur dann von Interesse, wenn eine dynamische Anpassung der dargestellten Konzepte während der Untersuchung notwendig ist. Denkbar ist hier zum Beispiel das Referenzieren des Konzepts zu Bezugspunkten (z.B. bei Funktionsmaßen) oder aber auch bei einer interaktiven Festlegung der Konzepte während der Untersuchung.

Toleranzausgleichsmöglichkeiten

Die Analyse von Toleranzausgleichsmöglichkeiten folgt dem Konzept des Soll/Ist-Vergleichs. Hierbei sind vor allem die Datenrückführung und, an komplexen Systemen, die Nutzerführung von großer Bedeutung. Darüber hinaus kann eine Erweiterung bestehender Hardware um ein digitales Toleranzausgleichskonzept dazu dienen, mögliche Kollisionen mit dem Umfeld zu überprüfen. In diesem Fall können die Manipulationsmethoden dafür genutzt werden, um die Auswirkungen der Toleranzen digital darzustellen.

Fixier-/ Füge-/ Ausrichtkonzepte

Hierbei kann eine Erweiterung der physischen Aufbauten um die digitalen Konzepte dazu dienen, die praktischen Konsequenzen, wie z.B. Erreichbarkeiten oder Kollisionen, möglichst frühzeitig zu diskutieren. Auch eine Nutzerführung durch Einblenden der Konzepte ist dabei denkbar. Der Soll/Ist-Abgleich kann hierbei vor allem dazu dienen,

die Umsetzung des abstrakten Konzepts hinter dem Toleranzmanagement an der realen Anlage zu analysieren.

Kommunikationsgrundlage

Alle bisherigen Punkte lassen sich direkt während der Untersuchung oder als Dokumentation dazu nutzen, eine Kommunikationsgrundlage zu schaffen und bestehende Kommunikationskanäle (z.B. Präsentationen oder Messberichte) zu erweitern.

Nach der Untersuchung

Auch in der Nachbereitung der Untersuchungen greift der MMU im Toleranzmanagement auf die gleichen Methodenbausteine zurück wie der MMU im Prototypenbau. Daher unterscheiden sich die Ontologien hier nicht. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Instanzen *statistische Auswertung* und *Erweiterung bestehender Dokumentationen* (z.B. Funktionsmaßkataloge,...) im Toleranzmanagement eine größere Rolle spielen als in vielen anderen Anwendungsfeldern.

6.2.5 Visualisierungsformen des MMU im Toleranzmanagement

Darstellungsarten

Neben der Bauteilgeometrie muss der MMU im Toleranzmanagement auch toleranzspezifische Objekte darstellen können. Während die Geometrien von Bauteilen oder Betriebsmitteln mit Darstellungsformen der Ontologie des MMU beschrieben werden können, muss die Ontologie des MMU im Toleranzmanagement darüber hinaus Instanzen enthalten, die diese neuen Objekte beschreiben. Diese spezifischen *Darstellungsarten* werden im Folgenden aufgezählt.

2D Annotationen: Die 2D Annotation (s. Kap. 6.1) dient der Darstellung objektgebundener Zusatzinformationen. Im MMU des Toleranzmanagements stellt sie eine einfache Art zur Darstellung von Toleranzwerten oder Bezugsstellung dar.

Linienverläufe: Linienverläufe sind die einfachste Art, Formtoleranzen darzustellen. Vor allem bei Fugen hat sich im Rahmen dieser Arbeit aber herausgestellt, dass ein einfacher Linienverlauf zur Bewertung von Formtoleranzen unzureichend ist.

Toleranzzonen: sind die Darstellung einer räumlichen Summe von Toleranzen in ein oder zwei Raumrichtungen ausgehend von der Nominallage. Die Toleranzzone bezieht sich dabei auf Lagetoleranzen einfacher Geometrien. Die Kante der Toleranzzone entspricht

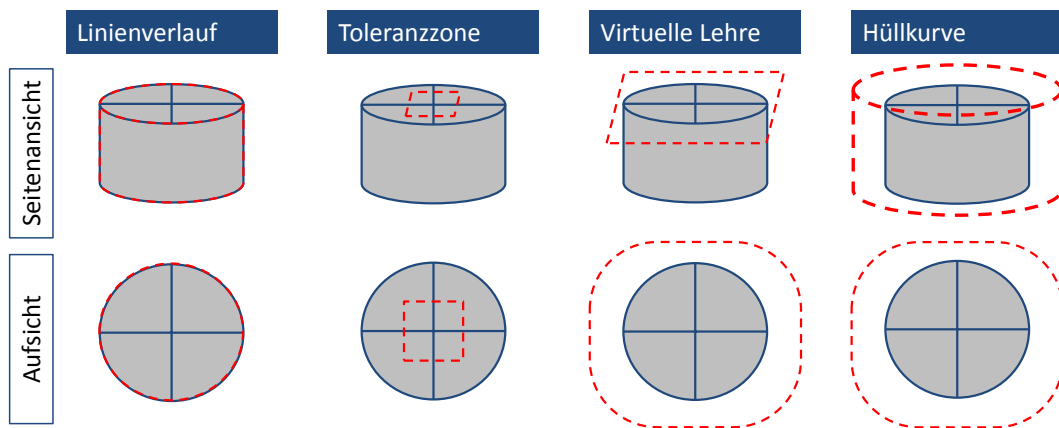


Bild 6.8: Schema unterschiedlicher Darstellungsarten

dabei den maximal zulässigen Toleranzen. Hinsichtlich der Visualisierung mittels MR betrachtet die Toleranzzone dabei immer maximal zwei der drei Raumrichtungen (Abb. 6.8). Die Toleranzzone kann dabei sowohl als zweidimensionale Zeichnung als auch als dreidimensionaler Rahmen dargestellt werden.

Virtuelle Lehre: Werden in einer Toleranzzone nicht nur die direkten Toleranzwerte betrachtet, sondern auch weiterführende Informationen, z.B. Materialstärken, Lochdurchmesser oder dyn. Abläufe des Bauteils, dann spricht man von einer virtuellen Lehre. Analog zu einer physischen Lehre lässt sich über die virtuelle Lehre eine einfache Analyse erreichen, ob die zulässigen räumlichen Abmessungen eingehalten worden sind (Abb. 6.8). Durch das Aufdicken des Rahmens einer virtuellen Lehre um die Systemgenauigkeit, kann die Analysefähigkeit der MMU Methode erhöht werden. Liegt das betreffende Merkmal in der Lehre, wird die Lagerichtigkeit bestätigt. Liegt es außerhalb, kann ein entsprechender Fehler bestätigt werden. Liegt es jedoch auf dem Rahmen der Lehre, kann mit dem bestehenden Referenzierung und Kalibrierung keine genaue Aussage getroffen werden.

Hüllkurve: Betrachtet man die räumliche Summe aller drei Raumrichtungen sowie mögliche zusätzliche dynamische Vorgänge, so spricht man von einer Hüllkurve oder auch einem Hüllkörper (Abb. 6.8).

Komplexe, zusammengesetzte Strukturen: z.B. kann durch die Kombination mehrerer logisch verknüpfter 2D Bezugssymbole ein Ausrichtkonzept oder durch die Kombination eines konstruierten Bezugskörpers und virtueller Lehren ein Funktionsmaß dargestellt werden.

Visualisierungsmethoden

Die Erweiterung der *Visualisierungsmethoden* ist ein wichtiger Aspekt für die Verankerung des Mixed Mock-Ups im Toleranzmanagement (Abb. 6.9). Elementare Grundlage für den Tolerierungsprozess sind die definierten Funktionen des zu tolerierenden Umfangs (Prozessschritt 2 in Abb. 6.4). Die Funktionserfüllung zu garantieren ist die grundlegende Aufgabe des Toleranzkonzepts. Dabei müssen hinsichtlich der Mixed Mock-Up Anwendungen drei verschiedene Funktionsarten unterschieden werden.

Der erste Funktionstyp ist eher technischer Natur und lässt sich direkt mit *geometrischen* Charakteristika verknüpfen. Diese können mit Mixed Reality unmittelbar und im Gegensatz zu rein digitalen Methoden direkt im Zusammenspiel mit der Hardware dargestellt werden. Beispiele für solche Funktionen sind Schließmaße oder Montierbarkeit von Anbauteilen (Funktionsmaße).

Solche *geometrischen Funktionen* lassen sich vor allem über die 3D Daten sowie die abstrahierte Darstellungsarten Toleranzzone, virtuelle Lehre und Hüllkurve analysieren. Dabei kommen hauptsächlich die Visualisierungsmethoden zur geometrischen Darstellung zum Einsatz, um Verständlichkeit und Übersichtlichkeit der Szene zu gewährleisten. Sollen dynamische Vorgänge untersucht werden, z.B. Kollisionen bei Montagevorgängen, dann werden darüber hinaus auch interaktive Methoden benötigt.

Andere Funktionen sind ebenfalls *technischer* Natur, können aber nicht geometrisch dargestellt werden. Beispiele hierfür sind Geräuschpegel bei der Fahrt oder Gewicht. Diese Funktionen können in Mixed Reality Anwendungen nur abstrahiert genutzt werden. Die entsprechende Information wird z.B. als Text oder Symbol dargestellt und mit den physischen Hardwareumfängen verknüpft. Damit wird eine erleichterte und intuitive Verfügbarkeit der Information an der Hardwareumgebung ermöglicht.

Da *technische Funktionen* mit den Bauteilgeometrien verknüpft sind, kommen hierbei besonders nichtgeometrische Visualisierungsmethoden zum Einsatz. Beispielsweise lassen sich Messergebnisse als Farbverlauf auf Bauteilen darstellen oder mit 2D Annotationen (Flags) an den Messstellen positionieren. Dabei sind vor allem zwei Anwendungsfälle zu unterscheiden. Die Visualisierung von technischen Funktionen kann dazu genutzt werden, einen intuitiven Zugang während einer Diskussion oder Präsentation zu ermöglichen oder während der Analyse einer geometrischen Funktion weiterführende Informationen zu berücksichtigen.

Die dritte Funktionsart ist *ästhetischer*, optischer Natur. Sie ist nur sehr schwer objektiv zu erfassen. Eine abstrakte oder technische Visualisierungsform ist hierbei nicht dienlich.

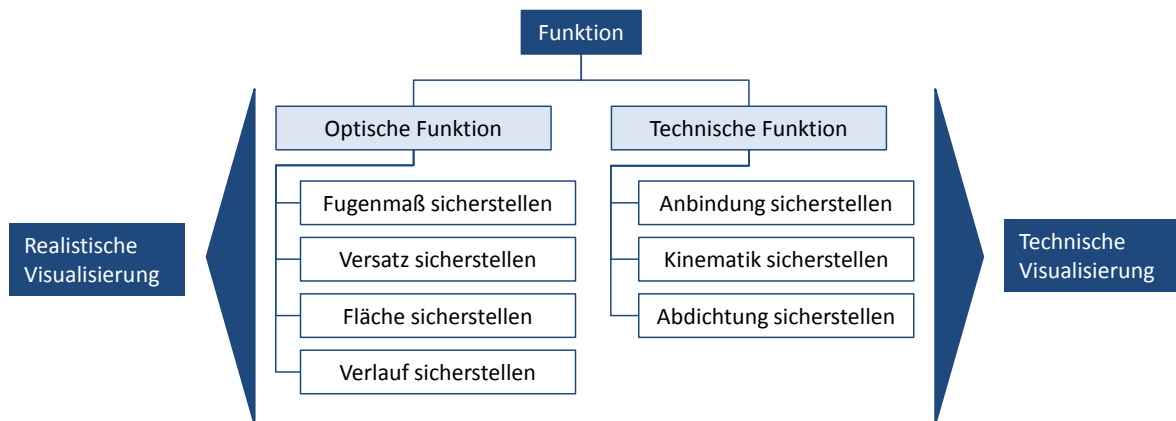


Bild 6.9: Zuordnung der Visualisierungsformen (dunkelblau) zu den Funktionsarten nach [BH13a, S.49] (Hellblau)

Die eigentliche Substanz der Funktion, der subjektive Eindruck, entsteht erst durch die Wahrnehmung des Betrachters. Ein geeignetes Beispiel für optische Funktionen sind Spaltmaße und Toleranzen von Fugen. Virtual oder Mixed Reality Anwendungen, die sich mit solchen Funktionen beschäftigen, müssen eine möglichst realistische Darstellungsform garantieren, inklusive Schattenwurf und Reflektionen.

Die Visualisierung *ästhetischer Funktionen* benötigt neben den Visualisierungsmethoden der realistischen Darstellung die Möglichkeit mit den Szenen zu interagieren. Darüber hinaus kann auch hierbei der Bedarf erwachsen, weiterführende nichtgeometrische Informationen darstellen zu müssen.

6.2.6 Anwendungsfelder des MMU im Toleranzmanagement

Aus der Ontologie des MMU im Toleranzmanagement lassen sich folgende Anwendungsfelder für Mixed Mock-Up Methoden im Toleranzmanagement ableiten:

- Virtuelle Lehren
- Visualisierung von Metainformationen
- Flächentoleranzen / Flächenverläufe
- Toleranzausgleichsmöglichkeiten
- Toleranzlagen in klassischen MR Anwendungen, insbesondere bei Festlegungsaktivitäten

- Betrachtung und Bewertung der Funktion „Anmutung“ durch realistisches, immersives MR
- Analyse von Toleranzursachen, v.a. bei flexiblen Bauteile in dyn. Prozessen

6.3 Herausforderungen & Lösungsvorschläge im praktischen Umfeld

Im Folgenden werden die Herausforderungen im Toleranzmanagement aufgezeigt und Lösungsvorschläge aus der Ontologie des MMU im Toleranzmanagement abgeleitet.

6.3.1 Herausforderungen im Toleranzmanagement

In Kapitel 3 wurden Grundlagen eines idealisierten, durchgängigen Toleranzmanagements über den gesamten Entwicklungsprozess beschrieben. Gegenstand des folgenden Kapitels ist der Abgleich dieser theoretischen Anforderungen mit den real umgesetzten Möglichkeiten sowohl anhand einer Reihe wissenschaftlicher Publikationen als durch Abgleich mit der praktischen Erfahrung befragter Experten aus der Industrie. Daraus erwächst die folgende Bestandsaufnahme der Herausforderungen des Toleranzmanagements geclustert nach folgenden Überbegriffen: Simulationsgrundlage/Verifizierung, Zeitpunkt, Durchgängigkeit/Informationsfluss, Interpretation/Dokumentation, Flexible Bauteile und Messgenauigkeit/Kalibrierung. Diese Aufzählung folgt einem Vollständigkeitsanspruch und beinhaltet daher auch Herausforderungen ohne direkten Bezug zu Schnittstellenthemen zwischen physischer und virtueller Entwicklungsumgebung.

Die Herausforderungen werden anschließend jeweils im Lichte des vorgestellten Methoden- und Visualisierungsspektrums aus Kapitel 6.2 beleuchtet. Daraus werden Lösungsvorschläge abgeleitet, die sich zum Spektrum der verschiedenen Einsatzmöglichkeiten des Mixed Mock-Ups im Toleranzmanagement zusammenfassen lassen. Gleichzeitig definieren sich daraus Rahmenbedingungen und Ansprüche für eine erfolgreiche Implementierung neuer toleranzspezifischer Mixed Mock-Up Methoden in den Entwicklungsprozess.

i) Simulationsgrundlage & Verifizierung

Herausforderung: Der optimale, durchgängige Tolerierungsprozess beginnt bereits in frühen Produktphasen. Die Grundlage jeder Toleranzrechnung bilden dabei theoretische Annahmen über Verteilungen und Eingangsgrößen des späteren Produkts und Produktionsprozess. Die präzise Modellbildung ist eine grundsätzliche Herausforderung

von Simulationsprozessen und betrifft auch andere Bereiche der Automobilindustrie, z.B. FEM-Modelle in der Crashberechnung. In [BH13a, S.28] wird darauf hingewiesen, dass Fehler in Toleranzbetrachtungen oft auf falsche oder unvollständige Annahmen zu Prozessbeginn zurückzuführen sind.

Heute werden viele Anfangswerte der Toleranzkonzepte auf der Grundlage von Konzern- und Industrienormen sowie von Erfahrungen aus Vorentwicklung und Vorgängerbaureihen gebildet. Die Qualität und Belastbarkeit der angenommenen statistischen Verteilungen und damit der folgenden Toleranzbetrachtungen ist von den beteiligten Mitarbeitern und der interdisziplinären Kommunikation abhängig [vP02, S.102].

Eine Herausforderung des Toleranzmanagements ist daher die Entwicklung von belastbaren und effizienten Methoden zur Schätzung der Anfangsverteilungen [Sto10, S.99] und zur mathematischen Modellierung der Toleranzkette [VDA06]. Darüber hinaus müssen dem Toleranzmanagement Methoden zur Verfügung stehen, um die getroffenen Annahmen möglichst frühzeitig zu verifizieren.

Lösungsvorschlag: Mixed Reality Methoden besitzen das Potential zu einer engeren Verflechtung digitaler und physischer Entwicklungsumfänge. Die Zusammenarbeit und das Verständnis unabhängiger Prozessbeteiligter untereinander können vereinfacht, gefördert und intensiviert werden. Der intuitive Zugang zu einer bildunterstützten Kommunikationsform fördert dabei das Verständnis der komplexen Zusammenhänge. In dieser Hinsicht ist der Einsatz von Mixed Reality ein einfaches aber effektives Mittel zur Förderung interdisziplinärer Kommunikation und Wissensbildung. In [LG11] und [Gei12] wird dies mit Hilfe des SECI Modells von Nonaka und Toyama [NT03] veranschaulicht.

Der Mitarbeiter des Toleranzmanagements kann seine Konzepte in einer physischen Umgebung bewerten und es ist zu erwarten, dass sich dadurch konzeptionelle Fehler oder Abweichungen der Simulation direkt und zeitnah erfassen lassen. Darüber hinaus erlaubt ihm der direkte Vergleich beider Entwicklungswelten, Ursachen für Fehler einfacher zu identifizieren und entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Fachbereichen ohne rein digital geprägte Arbeitsweisen können komplexe Inhalte direkt in der gewohnten Hardwareumgebung präsentiert werden. Dies kann die Reflektion der präsentierten Ergebnisse erleichtern und das Verständnis für die Komplexität der zugrunde liegenden digitalen Konzepte fördern.

Mixed Reality kann in Simulationsbereichen eine tragende Rolle bei der Verifikation der digitalen Konzepte spielen, sobald vergleichbare Hardwareumfänge existieren. Eine Verifikation der Datengrundlage der Simulation ist über einen Vergleich mit dem korrespondierenden Hardwareaufbau bereits vor der Simulation in einfacher, doch vollständiger Form möglich. Auf diese Weise können unnötige Iterationsschleifen in der Simulation

selbst verhindert werden. Nach der Simulation kann wiederum das Simulationsergebnis auf unkomplizierte Weise mit der Realität verglichen werden, um die Qualität der Simulation zu verifizieren.

Die bidirektionale Informationsrückkopplung zwischen allen Prozessbeteiligten sowie die visuelle Repräsentationsform der Mixed Reality Ergebnisse als Kommunikationsgrundlage können auf natürliche Weise die geforderte Durchgängigkeit im Informationsfluss fördern. Besonderes Augenmerk gilt hierbei der gewählten Dokumentationsform der Mixed Reality Ergebnisse. Eine optimale Konfiguration erlaubt auch die nachträgliche Offline-Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse.

ii) Zeitpunkt

Herausforderung: In Kapitel 3.3 wurde die Notwendigkeit eines frühzeitig hohen Reifegrades des Toleranzkonzepts aufgezeigt. Die interdisziplinäre Vernetzung des Toleranzmanagements führt dazu, dass Entscheidungen immer im ganzheitlichen Kontext getroffen werden müssen. [BH13a, S.84] weist darauf hin, dass das Optimierungspotential einer Toleranz- oder Bezugsänderung signifikant vom Zeitpunkt im Entwicklungsprozess abhängt. Dabei kann z.B. eine zu spät getroffene Optimierungsmaßnahme hohe Kosten nach sich ziehen, während zu früh getroffene Optimierungsmaßnahmen Gefahr laufen durch Änderungen am Fahrzeugkonzept hinfällig zu werden.

Die Herausforderung des Toleranzmanagements besteht darin in diesem teilweise engen Zeitfenster trotz rechenintensiver Prozesse effizient und schnell agieren zu können. Dafür sind sowohl geeignete Methoden zur Vorhersage der Produkt- und Prozessmerkmale [CHZ04] wie auch zur frühzeitigen Konzeptverifizierung an möglicher vorhandener Hardware notwendig.

Lösungsvorschlag: Mixed Mock-Up Methoden erweitern das Methodenspektrum des Toleranzmanagements um ein flexibel und unkompliziert einsetzbares Werkzeug. Ein breites Methodenspektrum ermöglicht den Zeitpunkt der Verifikation bedarfsgenau und zielgerichtet zu definieren. Mixed Reality erlaubt hierbei die frühzeitige Zusammenarbeit durch die Verifikation digitaler Konzepte an physischen Komponenten. Aber auch die schnelle Identifikation und Unterstützung des Analyseprozesses akuter, komplexer Probleme in späten produktionsnahen Entwicklungsphasen kann ermöglicht werden.

Anforderung: Gleichzeitig stellt dies den Anspruch an die zu entwickelnden Methoden, den idealen Einsatzzeitpunkt in die Prozessbeschreibung mit einzubeziehen.

iii) Durchgängigkeit & Informationsfluss

Herausforderung: Die Forderung nach einer durchgängigen Betrachtung des Tolerierungsprozesses und seiner Auswirkungen führt erst zur Notwendigkeit eines eigenständigen

Toleranzmanagements. Ohne durchgängiges Toleranz- und Ausrichtkonzept „wäre kein Produkt erzeugbar oder [...] in seiner Qualität bestimmbar“ [BH13a, S.66]. Der Anspruch eines durchgängig gültigen Konzepts bedarf der Integration verschiedener Disziplinen, Methoden und Werkzeuge [Sto10, S.100] sowie des entsprechenden Know-Hows. Grundlage für ein durchgängiges Toleranzkonzept ist daher die Aktualität und Verfügbarkeit aller für das Toleranzmanagement notwendigen Informationen. [Sto10, S.98] zeigt unter Verweis auf eine Studie von Prof. Hagenah die Schwierigkeiten der Datenrückführung auf: die Übertragung des erworbenen Wissens auf andere Bauteile/Konzepte sowie zusätzlich entstehende Kosten. Eine effiziente und verständliche Methode der Datenrückführung ist hierfür erforderlich.

Der Erfolg eines durchgängigen Konzepts ist hingegen vom gegenläufigen Informationsfluss abhängig. Nur ein durchgängiges Bewusstsein für die Vorgaben des Toleranzmanagements, der zugrunde liegenden statistischen Methoden und dem daraus resultierenden „nicht-deterministischen Charakter von Systemantwortgrößen“ [Sto10, S.8] im Produktionsprozess kann ein Toleranzkonzept in der Praxis beherrschbar gestalten. Ein typisches Phänomen mangelnder Kommunikation zwischen Konstruktion, Produktion und Kunde ist dabei die „Angsttoleranz“, eine wegen fehlendem Prozessverständnis zu enge Toleranzvorgabe zur alleinigen Absicherung des eigenen Verantwortungsbereichs [VDA06, S.38].

Lösungsvorschlag: Mixed Mock-Up Methoden fördern die Verfügbarkeit von Information durch die engere Verzahnung der digitalen und der physischen Entwicklungsumgebungen. Komplexe Konzepte können durch Visualisierung mittels Mixed Reality in der vertrauten Umgebung, sei diese digital oder physisch, intuitiv verständlich gemacht werden. Es ist daher zu erwarten, dass die Bereitschaft sich mit komplexen Zusammenhängen detailliert zu beschäftigen erhöht und potentielle Interpretationsfehler verringert werden. Dies bildet eine optimale Grundlage zur Schaffung eines durchgängigen Bewusstseins für die komplexen Sachverhalte des Toleranzmanagements.

Hinsichtlich einer durchgängigen Betrachtung muss auch eine einfache aber gezielte Datenrückführung in die digitale Entwicklungsumgebung durch Methoden des Reverse Engineering und Dokumentationsmethoden zur Offlinenutzung einbezogen werden. Die Kombination aus Datenrückführung und Offlinenutzung in der Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse bildet eine optimale Kommunikationsgrundlage für internationale, interdisziplinäre Prozesse.

Anforderung: Um die formulierten Forderungen an Informationsfluss und Durchgängigkeit zu erfüllen, müssen die entwickelten Mixed Mock-Up Methoden zwei Bedingungen erfüllen. Erstens erfordert die Durchgängigkeit im Sinne einheitlicher und vergleichbarer Ergebnisse

eine Integration der Mixed Reality und Messprozesse in das durchgängige Bezugssystem des untersuchten Toleranzkonzepts. Zweitens erfordert der Informationsfluss eine aktuelle und verfügbare Kommunikationsgrundlage. Dies stellt entsprechende Rahmenbedingungen für die Aktualität und Verfügbarkeit sowohl der zugrunde liegenden Ausgangsdaten als auch der Mixed Mock-Up Ergebnisdokumentation.

iv) Interpretation & Dokumentation

Herausforderung: Grundlage für durchgängige Toleranzkonzepte und einen interdisziplinären Informationsfluss ist eine eindeutige und verständliche Dokumentation aller Anforderungen und (Teil-)Ergebnisse [BH13a, S.66]. Eine eindeutige Definition der Dokumentation in den Meilensteinen des Entwicklungsprozesses sowie wohl definierte Verantwortungsbereiche ermöglichen allen Prozessbeteiligten Zugang zu den wichtigen Informationen.

Rechen- und Simulationsergebnisse sind aufgrund der Vereinfachung in der Modellbildung abstrakte Ergebnisse. Der Bezug zur realen Erlebniswelt der Beteiligten erfordert eine Interpretation, um eine verdeckte Fehlerfortpflanzung zu verhindern. Ohne Reflektion der Ergebnisse können diese eine Genauigkeit vortäuschen, die aufgrund der getroffenen Annahmen nicht gegeben ist [BH13a, S.28]. Es ist daher wichtig sicherzustellen, dass die Dokumentation in einer Form erfolgt, die von allen Beteiligten unmissverständlich interpretiert werden kann. Dabei ist zu beachten, dass viele Prozessbeteiligte nur partiell mit dem Tolerierungsprozess Berührung haben. Bei mehrjährigen Entwicklungsprozessen hochtechnologischer Industrieprodukte muss daher sichergestellt werden, dass eine definierte Wissensbasis geschaffen wird, die eine durchgängig einheitliche Interpretation der dokumentierten Erkenntnisse gewährleistet [LG13]. Darüber hinaus weist [TDE00, S.141] darauf hin, dass die Dokumentation im Rahmen einer schnellen, einfachen und damit effizienten Entscheidungsfindung interpretierbar sein muss.

Lösungsvorschlag: Der intuitive Zugang zu Mixed Mock-Up Methoden vermindert Interpretationsfehler durch die leicht verständliche und einheitliche Diskussionsgrundlage der Mixed Reality Visualisierung, sowohl während laufender Untersuchungen als auch in der Ergebnisdokumentation. Da Mixed Mock-Up Methoden auf einer visuellen Beurteilung durch den Anwender basieren, ist neben der reinen Zahleninformation eine weitere kritische Interpretationsebene impliziert. Während der Vorbereitung und Durchführung der Mixed Reality Untersuchungen muss der ausführende Experte das zugrunde liegende Konzept verstehen, darstellen und z.B. beim Referenzieren umsetzen. Das Konzept wird durch eine unabhängige Instanz kritisch betrachtet. Gleichzeitig sind die Prozessbeteiligten gezwungen ihren Anteil an dem Konzept zu kommunizieren und somit im Gesamtkonzept einzuordnen und zu verstehen.

Weiter besteht die Möglichkeit komplexen, zahlenbasierten Dokumenten wie Messberichten oder Funktionsmaßkatalogen durch Einfügen von Mixed Reality Bildern eine einfache, universelle Interpretationsgrundlage hinzuzufügen. Es wird erwartet, dass dadurch eine einfache und schnellere Interpretation der Messberichte erreichbar ist, ohne die geforderten hohen Standards an Präzision, Vollständigkeit und Übersichtlichkeit zu gefährden. Eine Mixed Mock-Up Ergebnisdokumentation erleichtert durch ihre visuell dominierte Darstellungsform das Einbinden subjektiver Kriterien in die entsprechenden Entscheidungsprozesse.

Anforderung: Eine eindeutige Dokumentation von Anforderungen und Ergebnissen der Mixed Reality Untersuchungen stellt ein wesentliches Qualitätskriterium der entsprechenden Prozesse dar. Dabei hat der Praxiseinsatz gezeigt, dass eine empfindliche Balance zwischen dem definierten Umfang der Dokumentation und dem zur Erstellung erforderlichen (Zeit-) Aufwand einzuhalten ist. Der intuitive Zugang zu Mixed Reality Darstellungen birgt die Gefahr eines Interpretationsfehlers durch Simplifizierung. Ein einfaches Beispiel stellt die folgende Überlegung dar: zum Verständnis eines Mixed Reality Bildes ist der gewählte Bezug bei der Registrierung des Trackingsystems nötig. Fehlt diese Information oder ist sie in der Dokumentation nicht eindeutig genug dargestellt, kann ein Interpretationsfehler entstehen: Der Betrachter stellt intuitiv den Bezug zu dem ihm vertrauten System her - und wählt damit eventuell ein falsches Bezugssystem. Ein abstrakter, komplexer Messbericht wäre ohne die entsprechende Bezugsinformation gar nicht verständlich und birgt daher weniger die Gefahr einer vorschnellen Interpretation. Es ist daher essentiell wichtig, dass Mixed Mock-Up Dokumentationen entsprechende Informationen sowie eine verständliche Darstellung des verwendeten Systems und der entsprechenden Vorgehensweisen enthalten.

v) Flexible Bauteile

Herausforderung: Eine große Herausforderung an die Messtechnik und das Toleranzmanagement stellen flexible Bauteile dar. Die Steifigkeit der Karosserie wird oft erst durch das Fügen der Einzelteile miteinander erreicht. Dies gilt es im Toleranzkonzept zu berücksichtigen [BH13a, S.40]. Darüber hinaus existieren im Automobilbau viele flexible, nichtmetallische Komponenten, z.B. Sitzschäume, Kunststoffe oder Karbonfaserverbundstoffe. Das flexible Verhalten dieser Materialien ist oft nicht ausreichend erforscht und auch in der digitalen Entwicklungswelt nicht hinreichend abgebildet.

Bezüglich der Tolerierung ergibt sich das Problem, dass flexible Bauteile in den Fertigungsvorrichtungen überbestimmt, d.h. an mehr als den vorgesehenen Bezugspunkten, aufgenommen werden müssen, um einer unbeabsichtigten Verformung vorzubeugen [Sto10, S.17]. Bei der messtechnischen Überprüfung dieser Bauteile ist darüber hinaus zu beachten,

dass sich der geometrische Konstruktionsstand und die damit verbundenen Toleranzspezifikationen auf den verbauten (eingespannten) Zustand beziehen. Es ist also wichtig diesen bei der Messung möglichst vollständig und fehlerfrei zu erzeugen. Das Resultat der geschilderten Effekte ist eine Abweichung zwischen Ausricht- und Aufnahme-konzept und damit wird die Umsetzung eines durchgängigen Toleranzkonzepts zusätzlich erschwert.

Lösungsvorschlag: Bei der Untersuchung flexibler Bauteile stellt die Echtzeitfähigkeit der eingesetzten Mixed Reality Systeme einen großen Vorteil dar. Dynamische Einflüsse auf das Produkt, z.B. das Schließen einer Fixierung, können in ihren Auswirkungen direkt erfasst werden. Dies ermöglicht das schnelle Verständnis von Wirkketten und erlaubt eine direkte Umsetzung von möglichen Gegenmaßnahmen. Dadurch können unnötige Iterationen verhindert oder verkürzt werden.

Die Echtzeit der Systeme ermöglicht das Beurteilen dynamischer Vorgänge im physischen Umfeld. Die Darstellung entsprechender Vorgänge im digitalen Umfeld mit Mixed Reality stellt sich momentan noch sehr schwer dar. Es gilt daher Darstellungsformen zu wählen, die eine Untersuchung dynamischer Prozesse dennoch ermöglichen. Hierzu zählen die Visualisierung von Hüllkurven oder statischen Bewegungszwischenständen. Auch ein markerbasiertes Tracking erlaubt die Evaluierung bestimmter dynamischer Komponenten. Hierbei ist anzumerken, dass es keine universelle Lösung gibt, sondern aus einem Portfolio möglicher Darstellungsformen die Beste für jede Untersuchung gewählt werden muss. Die Untersuchung flexibler Materialien oder beweglicher Bauteile stellt eine Herausforderung an den Registrierungsprozess dar, und erfordert eine kritische und wohldokumentierte Fehlerbetrachtung.

vi) Messgenauigkeit & Kalibrierung

Herausforderung: Der Informationsfluss von hardwareseitigen Entwicklungsumfängen zurück zum Toleranzmanagement erfolgt auf Grundlage messtechnisch gewonnener Erkenntnisse. Die Verifikation der Toleranzkonzepte stellt daher hohe Anforderungen an die Messtechnik und die Messdatendokumentation [VDA06, S.22ff]. Es gilt die erlaubten Abweichungen zwischen theoretischen Bezugsstellen und physischen Hardwareaufbauten durch wohldefinierte Ansprüche bereits in der Konzepterstellung zu Berücksichtigen. In der praktischen Anwendung werden die erlaubten Unsicherheiten durch die Kalibrierung in der Messtechnik und die Herstellungsgenauigkeit im Lehrenbau berücksichtigt [BH13a, S.11]. Messtechnische Prozesse benötigen Zeit und verursachen Kosten [Sto10, S.99]. Daher ist es im interdisziplinären Arbeitsumfeld erforderlich, dass die messtechnischen Anforderungen im Gesamtentwicklungsprozess formuliert und kontrolliert werden.

Die Präzisionsanforderungen an Messmittel gründen sich in den meisten Firmen auf einen breiten Erfahrungsschatz sowie ausführlichen internen Richtlinien. Oft werden

keine Ansprüche an die einzelnen Messungen gestellt, sondern die Prozessfähigkeit der verwendeten Messmittel dokumentiert. Hierbei spielt die Wiederholbarkeit der Ergebnisse eine wichtige Rolle. Die Herausforderung beim Etablieren neuer Prozesse besteht darin, den bestehenden Anforderungen zu genügen und diese gegebenenfalls zu verbessern. Diese Anforderungen haben eine besondere Bedeutung für die Betrachtung des Mixed Mock-Ups im Toleranzmanagement. Sie werden im folgenden Kapitel näher beleuchtet und zusammengefasst.

6.3.2 Messtechnische Anforderungen

Wie schon in Kapitel 5.2 bei der Formulierung der Genauigkeitsthese hergeleitet, muss die Analyse mit Mixed Reality den Ansprüchen der Messtechnik genügen. Im Folgenden werden die messtechnischen Anforderungen auf Mixed Reality Systeme übertragen und im Kontext der vorliegenden Dissertation interpretiert.

Die erste Forderung an messtechnische Prozesse erscheint trivial: Es muss eine messbare Größe existieren. Das Toleranzmanagement leitet hierzu von der Funktion ein messbares Kriterium ab [BH13b, S.80]. Für dieses muss eine verbindliche Messvorschrift definiert werden [Tut06, S.202]. Diese Vorschrift muss auch die geeignete Wahl der Messstelle und des zugehörigen Messsystems beinhalten [Gus13]. Nichtfunktionsorientierte Messungen stellen eine hohe Fehler- und Kostengefahr dar [Pae13].

Diese simple Anforderung untermauert sowohl die Visualisierungs- als auch die Genauigkeitsthese dieser Arbeit: Mixed Reality Visualisierungen müssen klar definierte Formen annehmen, damit eine „messbare Größe“ existiert. Hinsichtlich Simulationsergebnissen müssen dabei abstrakte Objekte in konkrete Geometrien überführt werden. Darüber hinaus müssen die Vorgehensweisen zur Beurteilung mittels der erstellten Visualisierung im entsprechenden Prozess genau definiert und nachvollziehbar dokumentiert werden. Dies schließt auch die Registrierung des Mixed Reality Systems am realen Untersuchungsobjekt mit ein.

Am Beispiel einer Fugenuntersuchung lässt sich aufzeigen, wie schwierig es sein kann eine solche messbare Größe in einer Mixed Reality Untersuchung zu erzeugen: Die geometrisch definierende Begrenzung der Fuge ist die Linie, an welcher der Biegeradius des Bleches beginnt. Mit bloßem Auge lässt sich eine solche Linie aber nicht erkennen, da der Übergang von planarer Fläche zu Biegeradius fließend wahrgenommen wird. Doch die eigentliche funktionale Messgröße für die Fuge ist die „Anmutung“, die durch Sichtlinie, Umgebungsbeleuchtung und Schattenwurf entsteht. Durch eine rein geometrische MR Visualisierung ist diese nicht interpretierbar darzustellen (Kap. 7.4).

Eine weitere Forderung an messtechnische Systeme ist die metrologische Bestätigung, in der industriellen Praxis oft Messmittelfähigkeit genannt. Diese definiert sich nach EN ISO 9000:2005 als *Satz von notwendigen Tätigkeiten, um sicherzustellen, dass ein Messmittel die Anforderungen an seinen beabsichtigten Gebrauch erfüllt*. Dafür muss ein hinreichend kleiner systematischer (Genauigkeit) und statistischer (Wiederholgenauigkeit) Fehler sichergestellt sein. Nach DIN EN ISO 10012 schließt die Sicherstellung der Fähigkeit eines Messprozesses auch die Befähigung der bedienenden Personen durch entsprechende Qualifizierungsmaßnahmen mit ein.

Der systematische Fehler wird mittels einer geeigneten Kalibrierung des Systems optimiert und festgehalten. Die Kalibrierung von MR Systemen ist in Kapitel 4.3.2 erläutert. Der statistische Fehler kann nur durch Anwendung statistischer Verfahren auf ein Vertrauensintervall eingegrenzt werden. Eine ausführliche Beschreibung der statistischen Handhabung messtechnischer Systeme findet sich z.B. in [Tut06]. Diese Verfahren setzen jedoch eine Modellierung des zugrundeliegenden Gesamtsystems voraus. Angewandt auf Mixed Reality Systeme müsste jeder einzelne Registrierungsprozess und Betrachtungsabstand neu simuliert werden. Unter diesen Bedingungen lässt sich jedoch keine praktikable Einsatzmethodik für MR Systeme entwickeln. Bisher eingesetzte Verfahren beruhen daher auf einer empirischen Abschätzung des statistischen Fehlers [BGK13]. Diese Verfahren setzten MR nur im Sinne von qualitativen Untersuchungen ein. Quantitative MR Untersuchung dienen bisher nur der Eingrenzung oder Abschätzungen von Fehlern. Mixed Reality ersetzt in diesen Prozessszenarien die Messtechnik nicht, sondern unterstützt und erweitert das Analysespektrum. Bei Ermittlung der Messmittelfähigkeit im Sinne von Industrienormen oder Rechtsvorschriften muss daher der Gesamtprozess inklusive nachgelagerter Messprozesse betrachtet werden. Trotzdem ist dies ein wichtiges und kaum untersuchtes Feld, welches vor allem hinsichtlich der naheliegenden Idee Messtechnik durch MR zu ersetzen, genau geprüft werden muss.

Die bisher aufgezählten Anforderungen betreffen nur die Wahl und Anwendung eines bestimmten Messmittels. Aus der Einbettung des Prüfprozesses in den industriellen Gesamtprozess leitet sich noch die Forderung nach Vergleichbarkeit ab. Bezogen auf die vorliegende Thematik bedeutet dies, dass die Ergebnisse und Erkenntnisse der Prüfung durch Mixed Reality Systeme mit vorangegangenen/nachfolgenden Simulationsergebnissen und Messprozessen vergleichbar sein müssen. Um diese Durchgängigkeit zu realisieren, muss ein einheitliches Dokumentationssystem geschaffen werden. Hinsichtlich Mixed Reality Methoden ist für die Durchgängigkeit eine definierte Datengrundlage und ein einheitliches Referenzsystem von herausragender Bedeutung. Letzteres schließt sowohl eine wohlüberlegte Wahl der Referenzpunkte für die Registrierung des MR Systems als auch eine Dokumentation der erreichten Registrierungsqualität mit ein. Um dabei die Vergleich-

barkeit zu gewährleisten, ist eine prozessübergreifende Kenntnis der Vergleichsmethoden notwendig.

[Tut06, S.202] empfiehlt die unternehmensweite Verkettung und Speicherung gewonnener messtechnischer Erkenntnisse, formuliert jedoch gleichzeitig die Problematik fehlender *Werkzeuge zur Datenverdichtung und Informationsgewinnung*. Auch wenn Mixed Reality einen intuitiven Zugang zu messtechnischen Erkenntnissen liefert und damit auch den Informationsgehalt verdichtet („Ein Bild sagt mehr als tausend Worte“), so gilt dieser Anspruch hinsichtlich der Reduktion der Darstellungskomplexität bei gleichzeitig maximaler, konzernweiter Verfügbarkeit auch für die Dokumentation von Mixed Reality Ergebnissen.

Damit lassen sich für die Entwicklung von Mixed Reality Methoden für das Toleranzmanagement folgende Herausforderungen hinsichtlich messtechnischer Kriterien ableiten:

- **Messunsicherheit:** Systematische und statistische Fehlerquellen des eingesetzten Systems müssen durch eine geeignete Kalibrierung und Anwendungsmethodik minimiert werden. Der zulässige Gesamtfehler muss für jedes Anwendungsszenario einzeln festgelegt werden und die Einhaltung der Fehlergrenzen durch eine durchgängige Dokumentation der Systemgenauigkeit transparent überprüfbar sein.
- **Komplexität:** Die flexiblen Einsatzmöglichkeiten und Hardwarekonfigurationen von Mixed Reality Systemen führen zu einer hohen Komplexität in den oben geschilderten Anforderungen. Gerade hinsichtlich hochmobiler Mixed Reality Systeme existieren jedoch noch viele physische Grenzen und statistische Ungenauigkeiten in den Algorithmen, die für industrielle Unternehmen nicht immer vollständig einsehbar oder vorhersagbar sind.
- **Zuverlässigkeit:** Die Komplexität und flexiblen Einsatzmöglichkeiten erfordern im Moment eine hohe Expertise, um die geforderte Wiederholgenauigkeit und Vergleichbarkeit der MR Untersuchungen sicherstellen zu können. Eine große Stärke von Mixed Reality Systemen liegt in der intuitiven Ergebnisinterpretation. In diesem rein visuellen Prüfen liegt aber auch hohes Fehlerpotential. Dies sowie mangelnde Qualitätsmerkmale in vorherrschenden Kalibrieralgorithmen münden in der Forderung nach einer stärkeren (automatisierten) Kontrollmöglichkeit innerhalb der verwendeten Methoden.

6.3.3 Bedeutung der Kalibrierung, der Registrierung & der Systemgenauigkeit

Das Thema Systemgenauigkeit und -kalibrierung ist hinsichtlich der formulierten Ziele der Genauigkeitsthese dieser Arbeit von herausragender Bedeutung. Beim aufmerksamen Studieren der vorhandenen Literatur fällt auf, dass die meisten wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema MR in der industriellen Anwendung das Thema Genauigkeit ausklammern. Wissenschaftliche Studien, die sich explizit mit der Genauigkeit von MR Systemen befassen, finden meist in industriefernen Laborbedingungen statt und lassen sich somit nur schwer auf die Themen dieser Dissertation anwenden. Eine vollständige Behandlung des Themas würde jedoch den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Das folgende Kapitel stellt die Tiefe und Komplexität der zugrundeliegenden Problemstellungen dar und bietet mögliche Lösungsvorschläge für die beschriebenen Herausforderungen Messunsicherheit, Komplexität und Zuverlässigkeit in den vier Themenfeldern Kalibrierung (a), Registrierung (b), Einsatzmethodik (c) und Systemaufbau (d). Diese Darstellung ist aber nicht abschließend. Während die getroffenen Aussagen zu den ersten beiden Themenfeldern allgemeingültig sind, konzentrieren sich die Aussagen zur Einsatzmethodik speziell auf die Anwendung im Toleranzmanagement.

a) Kalibrierung

Wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben besteht die Kalibrierung eines MR Systems aus der Systemkalibrierung und der Bestimmung der Kameraorientierung zum untersuchten Objekt im Raum (Referenzierung). Für das messarmbasierte System, das im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich zum Einsatz kam, wird dabei folgender durchgängige Kalibrierungsansatz angewendet [BGK13]: Ermittlung und Rekonstruktion der Linsenverzeichnung nach [Zha99] (interne Kamerakalibrierung), Kalibrierung der verwendeten Messspitze (Endeffektor) des Messarms mit der Software Cam2Measure [far] und anschließend die Kalibrierung der Kameralage auf dem Messarm bzgl. des Endeffektors durch gleichzeitiges mechanisches und optisches Erfassen eines Messmarkers. In der im Rahmen dieser Dissertation mitbetreuten Diplomarbeit von Herrn Björn Bliese wurde ein System zur Bestimmung der Systemgenauigkeit erarbeitet und die Gesamtsystemgenauigkeit für ein realistisches Einsatzszenario mit 1,05 mm ermittelt [BGK13, S.11]. Für optische Trackingsysteme wird die interne Kamerakalibrierung mit den gleichen Algorithmen durchgeführt. Eine weitere Kalibrierung ist bei diesen Verfahren nicht notwendig.

In [God] wird die Forderung der Möglichkeiten zur Überprüfung bzw. Neubestimmung der Kalibrierung für allgemeine Messsysteme formuliert. Die Erfahrung, sowohl im praktischen Umgang mit dem messarmbasierten System als auch bei Schulungsmaßnahmen

neuer Systemnutzer, hat gezeigt, dass für einen erfolgreichen Kalibrieransatz nicht nur präzise sondern auch robuste Kalibriermethoden von großer Bedeutung sind. Dabei unterstützen im erfolgreichen Industrieansatz vor allem eine intuitive Nutzerführung und ein verlässliches Anwenderfeedback. Die Erkenntnisse flossen in die Entwicklung einer entsprechenden Kalibriersoftware ein, die den Anwender während der Kalibrierung führt (Aufnahmepositionen, Warnung Bewegungsunschärfe, ...) und am Ende ein verlässliches Feedback über die erreichte Kalibrierungsqualität ermöglicht. Dadurch lässt sich die Messunsicherheit verlässlich eingrenzen und die Komplexität der Kalibrierung wird für den Endnutzer deutlich verringert. Durch eine Dokumentation und regelmäßige Überprüfung der erreichten Genauigkeit wird die Zuverlässigkeit des Systems sichergestellt.

b) Registrierung

Der zweite wichtige Stellhebel zur Reduzierung der Messunsicherheit und Erhöhung der Zuverlässigkeit ist das komplexe Feld der Registrierung. Gerade hinsichtlich der Forderung nach Vergleichbarkeit ist hier hinsichtlich Toleranz- und Messthemen eine Eingliederung der Methoden in bestehende Referenzierungsvorschriften unabdingbar. Die Genauigkeit und Qualität der Referenzpunkte sowie deren Lage zum Untersuchungsbaureaum spielen eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Messunsicherheit des Gesamtsystems. Dabei gilt es auch zu beachten, dass nicht alle Punkte an einem Fahrzeugrohbau in allen Aufbaustufen durchgängig zugänglich sind. Hinsichtlich der Systemzuverlässigkeit hat sich im praktischen Einsatz der Faktor Mensch als wichtigster Stellhebel herausgestellt. Es ist notwendig durch entsprechende Schulungs- und Dokumentationsmaßnahmen sicherzustellen, dass allen beteiligten Personen die Bedeutung und die Folgen der Referenzierung und der erreichbaren Genauigkeit bekannt sind. Dies setzt voraus, dass die verwendete MR Methode ein Erfassen und Dokumentieren der Registrierungsgenauigkeit zuverlässig zulässt. Im Folgenden werden die Registrierungsprozesse der verschiedenen Trackingverfahren beleuchtet:

Taktile Referenzierungssystem, z.B. messarmbasiertes MR, optische Tracking mit Markerstift: Taktile Verfahren können im Allgemeinen auf die Referenzierungsmethoden der taktilen Messtechnik zurückgreifen. Daher ist eine methodische Vergleichbarkeit innerhalb eines Unternehmens oder Industrieverbandes relativ einfach sicherzustellen. Darüber hinaus lässt sich an längerfristig verfügbaren Hardwareumfängen, wie z.B. Festlegungsrohbauteilen, durch Anbringen von absolut referenzierten Messmarken auch über mehrere Aufbaustufen die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen MR Einsätzen herstellen und dokumentieren. Hinsichtlich Toleranzthemen ist die Wichtigkeit identischer Referenzsysteme zwischen Hardware und Toleranzrechnung/-simulation hervorzuheben (Kap. 7.3).

Hinsichtlich der Messunsicherheit bieten die üblichen Registrierungsverfahren ein gutes Feedback über die erreichten Genauigkeiten. Auf diesem Wege lässt sich auch eine Dokumentation im Sinne der Vergleichbarkeit mit relativ kleinem Aufwand realisieren. Wichtig ist hierbei eine definierte und einheitliche Dokumentationsform zu wählen.

Eine Herausforderung hinsichtlich der Referenzierung auf offizielle Referenzsysteme kann eine systembedingte Begrenzung der Trackingreichweite darstellen. Hierbei lässt sich über einen Dreisprung mit einer kalibrierten Messplatte unter entsprechendem Genauigkeitsverlust eine Reichweitenverlängerung erreichen. Diese Möglichkeit gilt es daher für jeden Anwendungsfall unter Beachtung der Folgen für die Untersuchungsergebnisse einzeln zu diskutieren.

Die Komplexität der Registrierung ist vergleichbar mit der Referenzierung handelsüblicher taktiler Messsysteme. Viele Einmessprogramme bieten auch die Möglichkeit geführte Messvorgänge durchzuführen, wodurch die Komplexität der Registrierungsproblematik, gleichzeitig aber auch die Flexibilität der Einsatzmöglichkeiten, reduziert werden.

Markerbasierte, optische Referenzsysteme, z.B. Infrarottracking, planare Bildmarker: Die meisten optischen Trackingalgorithmen verwenden rechteckige, planare Marker und ermitteln die Markerorientierung im Raum dabei durch Kantenrekonstruktion (z.B. [PMK13]). Dabei kann ein auflösungsbedingter Pixelfehler über die langen Hebelarme großer Untersuchungsräume schnell zu einem großen Winkelfehler werden. Daher empfiehlt es sich für genauigkeitssensible Anwendungsfälle Systeme zu nutzen, die mit mehreren runden Markern ein Koordinatensystem aufspannen. Durch die runde Form ist der Markermittelpunkt auch bei schlechten Auflösungen extrapolativ sehr genau zu ermitteln. Durch das Aufspannen der Objektorientierung im Raum durch mehrere weit entfernte Markermittelpunkte statt einer kurzen Markerkante lässt sich die Winkelunsicherheit deutlich eingrenzen.

Das Anbringen der Marker muss als ein weiteres Glied in der Messunsicherheitskette betrachtet werden. Um diese Ungenauigkeit zu reduzieren, können die Marker fest am Untersuchungsobjekt angebracht werden und mit einem Messmittel präzise vermessen werden. Dieser Vorgang ist aber umständlich, zeitaufwendig und schränkt den Einsatz des MR Systems auf die vermessenen Bereiche ein. Außerdem sind solche festinstallierten Marker oft nicht robust gegenüber sonstigen Werkstatttätigkeiten oder wachsenden Aufbaustufen. Einmal vermessen kann das Untersuchungsobjekt also nur noch eingeschränkt den notwendigen Änderungen im Produktentwicklungsprozess folgen. Alternativ empfehlen sich kalibrierte Markeradapter, die sich an festgelegten Objektpunkten anbringen lassen, z.B. Markerstecker für Bohrungen. Dies ist eine gängige Technik in der optischen Messtechnik. Allerdings müssen hierbei die Toleranzen der Anbringpunkte und der Adap-

ter bei der Berechnung der Messungenauigkeit mit berücksichtigt werden. Die Genauigkeit hängt also auch von der Qualität und Anzahl verfügbarer Anbringpunkte ab.

Neben der großen Bedeutung der internen Kamerakalibrierung für die Messunsicherheit optischer Trackingverfahren, spielt vor allem der verwendete Algorithmus, und der damit verbundene Kompromiss aus Trackinggenauigkeit und Robustheit, eine entscheidende Rolle. Viele Algorithmen werden v.a. in synthetisch generierten Szenarien getestet. [Lie12] zeigt dabei den Bedarf nach realen Testumgebungen auf. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen dieser Dissertation die Studienarbeit von Herrn Phillip Joester betreut. Dabei wurde unter anderem die Genauigkeit eines markerbasierten Trackingalgorithmus der Software Metaio Engineer 5.0 unter industriellen Kalibrier- und Einsatzbedingungen getestet. Dazu wurde ein rechteckiger Flachmarker mit einem Adapter auf einen Messarm montiert (Abb. 6.10) und die relativen Abstände zwischen Messpunkten mittels mechanischem und Markertracking aufgenommen und verglichen. Der Gesamtfehler des mechanischen Trackingsystems setzt sich aus der volumetrischen Wiederholgenauigkeit des verwendeten Messarm Faro Fusion (0,104mm), der Fertigungsgenauigkeit des Markeradapters sowie der Referenzierungsgenauigkeit während der Versuche ab. Die Gesamtgenauigkeit zur Bestimmung der Markerposition mittels mechanischem Tracking wurde auf 0,644mm ermittelt.

Die Praxistests zeigten, dass die erreichten Genauigkeiten deutlich von denen unter Laborbedingungen [PMK13] abweichen. Dies liegt vor allem an der Komplexität des Gesamtsystems: Es zeigt sich, dass viele unterschiedliche Parameter wie z.B. Markergröße und -anzahl, Beleuchtungsverhältnisse, Bildstabilität und Betrachtungsentfernung die Trackinggenauigkeit und damit gleichzeitig die Referenzierung beeinflussen.

Hierzu wurde insbesondere der Einfluss der Kalibrierung auf die Genauigkeit der Markererfassung untersucht. Da Kameraobjektive eine radiale Verzerrung aufweisen, wurde erwartet, dass die Genauigkeit des Markertrackings abnimmt, wenn sich der erfasste Flachmarker in einer Bildposition nahe am Bildrand befindet. Dazu wurden die Erfassungsgenauigkeiten in 70 unterschiedlichen Bildpositionen miteinander verglichen (Abb. 6.11). Dabei kamen zwei unterschiedliche Kalibrierungsalgorithmen ² sowie drei unterschiedliche Kamerasysteme ³ zum Einsatz.

Es lässt sich sehr schön erkennen, dass die Genauigkeit für unterschiedliche Bildpositionen des Zielmarkers wie erwartet stark variiert und dass die Kalibriermethodik auf

²GML Camera Calibration Toolbox 0.71 mit 2D Schachbrettmuster und meatio Engineer 5.0 Plugin mit AICON 3D Kalibrierplatte.

³iPad 2 (interne Kamera), AVT Pike F-505C und Nikon D8000E.



Bild 6.10: Versuchsaufbau Praxistest Markergenauigkeit



Bild 6.11: Einfluss von Kalibrierung und Kamera auf Trackinggenauigkeit verglichen für verschiedene Markerpositionen innerhalb eines Bildes (Farbschema jeweils bezogen auf einzelne Testreihe)

die Genauigkeitsverteilung einen erheblichen Einfluss hat. Es zeigt sich aber auch, dass diese Verteilung nicht wie angenommen einem radialen Verlauf folgt oder in einer anderen Art und Weise vorhersagbar ist. Die unterschiedlichen Kameras erzielten ebenfalls unterschiedliche Genauigkeiten. Doch auch hier lässt sich unter Industriebedingungen mit entsprechend variierenden Randbedingungen keine zuverlässige Vorhersage ableiten. Dies verhindert eine robuste Vorhersage für die hier getesteten Systeme und damit eine Nutzung des Genauigkeitspotentials, welches die Systeme in manchen Bildbereichen unter Beweis stellen.

Um den Einfluss der Entfernung auf die Genauigkeit zu untersuchen wurden drei Testreihen durchgeführt. Um vergleichbare Ergebnisse trotz unterschiedlicher Brennweiten zu erzielen, wurden die Bildausschnitte für die Versuchsaufnahmen mit Nikon und AVT Pike entsprechend einer Aufnahmeentfernung mit dem iPad2 von 1m (Ausschnitt A), 2m (B) und 3m (C) angepasst. Es wurde erwartet, dass sich die Genauigkeit durch den distanzabhängigen Pixelfehler umgekehrt proportional zur Entfernung verhält. Die Ergebnisse konnten diese Erwartung nicht bestätigen (Abb. 6.12). Darüber hinaus waren alle in diesem Praxisversuch erzielten Genauigkeiten deutlich schlechter als die Systemgenauigkeit des messarmbasierten Systems von ca. 1mm (Kap. 4.3.1).

Es zeigt sich auch, dass mit den verwendeten Systemkonfigurationen die Nikon als auflösungsstärkste Kamera die schlechtesten Durchschnittsgenauigkeiten für diese Entfernungen erzielt hat. Dies illustriert den großen Einfluss des Zusammenspiels der einzelnen Faktoren auf die Genauigkeit: in diesem Anwendungsfall die Einstellung der Fokusebene. Da die Systeme nur ausgeliehen und für andere messtechnische Zwecke kalibriert waren, konnten die Fokuseinstellungen nicht einander angeglichen werden. Obwohl alle aufgenommenen Versuchsbilder als hinreichend scharf wahrgenommen wurden, scheint die Lage der Fokusebene einen enormen Einfluss auf die Genauigkeit zu haben. Während das iPad2 für nahe Aufnahmeabstände fokussiert war, lag die Fokusebene der AVT Pike eindeutig im Entfernungsbereich von Bildausschnitt B. Der Fokus der Nikon war auf noch größere Bildabstände eingestellt. Hinsichtlich der Ergebnisse ist es sehr fraglich, ob ein ungeübter Anwender ohne weitere Hilfsmittel überhaupt in der Lage ist, Fokusebene und Betrachtungsabstand derart sensibel aufeinander abzustimmen und während eines Einsatzes konstant einzuhalten.

In Abbildung 6.12 lässt sich weiter erkennen, dass es die höhere Auflösung und die verzerrungsoptimierten Objektive der Nikon ermöglichen, die Streuung der Genauigkeit für alle Aufnahmeabstände nahezu konstant und auf einem akzeptablen Niveau zu halten. Die AVT Pike hat zwar hinsichtlich Genauigkeit und Streuung bei Aufnahmeabstand A die besten Werte erzielt, kann diese aber nicht prozessstabil über alle Aufnahmeabstände

garantieren.

Das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Einflüsse macht es dem Anwender nahezu unmöglich die Situation im konkreten Einsatzfall direkt zu beurteilen oder zu optimieren. Daher ist unbedingt darauf zu achten, dass die verwendete Software und Methodik eine hochwertige Nutzerführung und ein verständliches Nutzerfeedback zur Beurteilungsqualität bereitstellt. Die eigentliche Komplexität muss dem Anwender verborgen bleiben, v.a. wenn man die hohe Flexibilität mobiler Markertrackingsysteme nutzbar machen möchte. Nur so lässt sich ein zuverlässiger Einsatz der Systeme sicherstellen.

Objektbasierte, optische Referenzsysteme, z.B. Featuretracking: Markerlose Trackingverfahren haben vor allem hinsichtlich ihrer einfachen Bedienung ein hohes Anwendungspotential, da bei vorhandenen eingelernten Trackingpunkten keine weiteren Schritte zur Referenzierung notwendig sind, als die Kamera auf das Objekt zu richten. Dabei sind Genauigkeit und Qualität wie bei den markerbasierten optischen Trackingverfahren von ähnlichen Faktoren abhängig, die während der Untersuchung nicht im Vordergrund stehen. Dadurch ist es eine große Herausforderung, die Genauigkeit solcher Systeme präzise vorherzusagen. Damit hängt die Zuverlässigkeit stark von der Erfahrung der Nutzer ab - im Widerspruch zum ursprünglichen Vorteil der einfachen Bedienung hochmobiler Systeme.

Daher eignet sich markerloses Tracking vor allem für zwei Anwendungsszenarien: um Informationen ortsgebunden anzuzeigen, bei denen die Präzision keine hohe Rolle spielt, z.B. Bauteilnummern oder Toleranzwerte (Kap. 7.4), oder zur Erweiterung von markergebundenen Trackingmethoden. Im zweiten Fall identifiziert das Trackingprogramm im Hintergrund zu den Markerinformationen weitere Trackingpunkte am Objekt. Sollte der Marker aus dem Bild wandern, reißt so das Tracking nicht ab, sondern wechselt auf die Ausrichtung anhand der identifizierten Bildpunkte. Dadurch wird die Stabilität und Benutzerfreundlichkeit des Systems erhöht. Gleichzeitig kann aber in kritischen Fragestellungen die Genauigkeit und Vergleichbarkeit über die Marker geprüft und eventuell wiederhergestellt werden.

c) Einsatzmethodik

Der wichtigste Stellhebel, mit dem den geschilderten Herausforderungen begegnet werden kann, ist diese bereits bei der Definition der Methode zu beachten und entsprechende Maßnahmen und (Grenz-) Kriterien festzulegen. Im Sinne der Systemzuverlässigkeit ist hierbei vor allem ein eindeutiges und verständliches Anwenderfeedback von größter Bedeutung. Wie schon aufgeführt muss ein Kalibrierungsverfahren beschrieben werden, welches durch Nutzerführung und Qualitätskennzahlen ein verlässliches und dokumentierbares Kalibrierungsergebnis zulässt. Durch Visualisieren der definierten Referenzpunkte oder

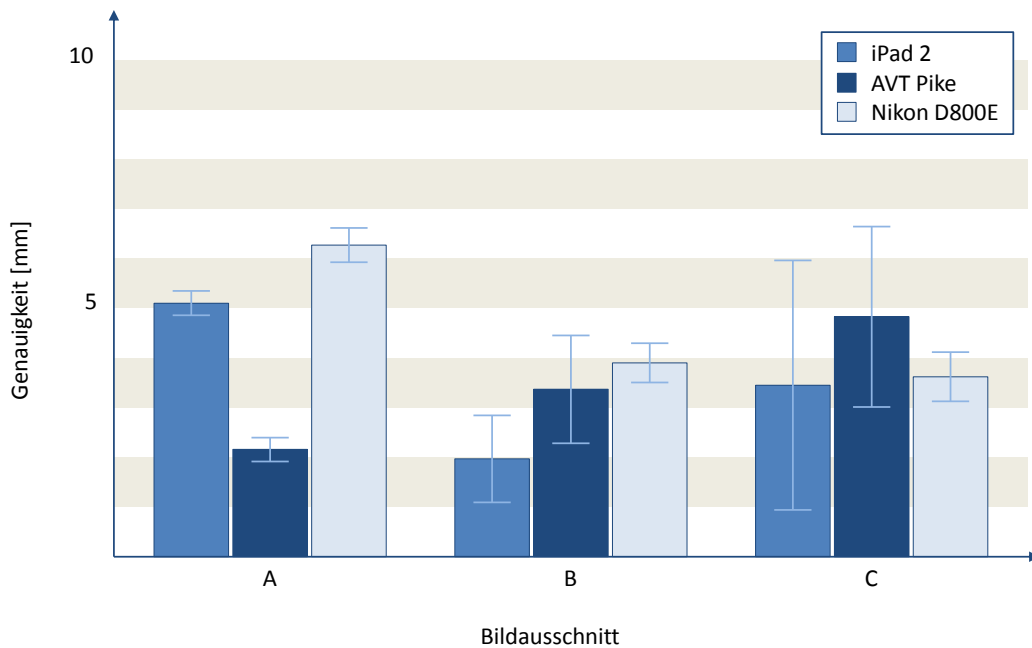


Bild 6.12: Durchschnittliche Genauigkeit und Standardabweichung in Markertracking-Testreihen mit unterschiedlichen Bildausschnitten und Kameras

entsprechender Vergleichsgeometrien lässt sich sicherstellen, dass der definierte Referenzierungsprozess eingehalten wird. Gleichzeitig kann während der Untersuchung durch diese Visualisierung die Qualität der Referenzierung und der Gesamtgenauigkeit überprüft werden. Eine vordefinierte Dokumentationsgrundlage stellt sicher, dass alle erforderlichen Qualitätskennzahlen erfasst und einheitlich abgelegt werden können. Hierbei ist eine automatisierte Integration der Dokumentation in die MR Software von großem Wert.

Eine zuverlässige Methode der Messunsicherheit zu begegnen ist das Einbeziehen der ermittelten Gesamtgenauigkeit in die Visualisierung (z.B.: Kap. 7.3). Voraussetzung ist hierbei eine zuverlässige Methode zur Berechnung der Gesamtgenauigkeit aus den Einzelgenauigkeiten von Kalibrierung und Registrierung. Dadurch wird die Messunsicherheit auch automatisch in den Ergebnissen der Visualisierung, z.B. Videos oder Screenshots, dokumentiert. Es ist auch notwendig, dass im Prozess beschrieben wird, wer, wie und wann die Genauigkeitsanforderungen für jeden konkreten Untersuchungsfall festlegt.

Der hohen Komplexität der MR Systeme kann mit zwei Maßnahmen begegnet werden: Zum einen kann bei der Wahl des Systems und der Vorgehensweise darauf geachtet werden, dass ein klares und strukturiertes Vorgehen möglich ist. Verantwortliche für die einzelnen Anforderungen und deren Einhaltung sowie eine klar strukturierte Vorgehensweise müssen definiert werden. Zum anderen muss über entsprechende Schulungsmaßnahmen eine

hinreichende Qualifikation der betroffenen Mitarbeiter sichergestellt werden. Dabei müssen nicht nur die notwendigen Handhabungsschritte trainiert werden. Vielmehr erfordert der Bedarf an flexiblen Einsatzmöglichkeiten der MR Systeme, dass ein Bewusstsein für die komplexen Zusammenhänge und deren Folgen für den Gesamtprozess erzeugt werden. Wenn das System wie oben gefordert dem Anwender ein verlässliches und eindeutiges Feedback über den aktuellen Status zur Verfügung stellt, dann ist die Handhabung der Messunsicherheit und Systemzuverlässigkeit maßgeblich von der Interpretation durch qualifiziertes Personal in jedem konkreten Anwendungsfall abhängig. Dies stellt gleichzeitig eine große Herausforderung hinsichtlich eines breiteren und mobileren Einsatzes von MR Systemen dar [LG13].

d) Systemkonfiguration

Bezüglich des Systemsetups existieren zwischen den drei Methodenzielen (Adaption, Toleranzspezifik und Kommunikation, vgl. Kap. 6.2.3) große Unterschiede. Bei der Einbindung von Mixed Reality in bestehende Mixed Mock-Up Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass es bereits ein optimierter Systemsetup vorliegt. Hierbei gilt es vielmehr, mögliche Systemnachteile, wie zum Beispiel Genauigkeitsaspekte, kritisch zu hinterfragen und eventuell durch entsprechende Methoden auszugleichen, z.B. durch Einbeziehen der Genauigkeit in die Visualisierung (Kap.7.3). Bei der Adressierung spezifischer Toleranzthemen auf technisch geometrischer Basis gilt es vor allem, die Anforderungen nach Genauigkeit (Tracking, Kalibrierung) und Referenzierung (Erreichbarkeit des Bezugssystems) sowie die Mobilität des Systems gegeneinander abzuwägen. Bei realistischen Visualisierungen spielt die Überlagerungsgenauigkeit meist eine untergeordnete Rolle gegenüber Preis, Einsatzmöglichkeit sowie Realismus und Immersion des Systems, da hier kein geometrisch-objektiver Soll-Ist-Vergleich stattfindet, sondern eher subjektive Eindrücke miteinander verglichen werden müssen.

Um eine Durchgängigkeit erzielen zu können, muss das Trackingsystem bezüglich der Systemreferenzierung anhand eines Bezugssystems die Möglichkeit bieten, Ergebnisse zu erzielen die hinsichtlich Messmittelfähigkeitsnachweis mit messtechnischen Systemen vergleichbar sind. Neben der Erreichbarkeit, die vor allem bei Bezug auf das Gesamtfahrzeug kritische Längen oder ungünstige Winkel beinhalten kann, muss hierbei auch eine hinreichend genaue Erfassung der Referenzpunkte ermöglicht werden können. Weitere Aspekte, die es zu berücksichtigen gilt, sind die Robustheit bzgl. der Belastungen im Werkstattumfeld und die Kosten des Systems. Ein schematischer Aufbau der in dieser Arbeit verwendeten Systeme findet sich in Abbildung 4.2.

6.4 Bewertungskriterien

Dieses Kapitel definiert die Bewertungskriterien an denen sich die Arbeitshypothesen im Praxiseinsatz verifizieren lassen. Abbildung 6.13 verdeutlicht die gewählte Vorgehensweise.

Die erste Arbeitshypothese (Brückenthese) spiegelt das Vertrauen wider, in anderen Disziplinen des Maschinenbaus gewonnene Mixed Reality Erkenntnisse [Noe06, Gei12] auf den Prozess des Toleranzmanagements übertragen zu können. Dazu zählt insbesondere eine engere Verzahnung neuer und bewährter Bereiche: Das heißt, es können nicht nur bisher bewährte Methoden auf konkrete Fragestellungen des Toleranzmanagements (z.B. Funktionsmaße, Schließmaße,...) angewandt werden, sondern es gilt auch toleranzkritische Aspekte, und damit das entsprechende Bewusstsein, in bisherige Mixed Reality Untersuchungen einzubringen. Nur durch diese enge Verzahnung kann die postulierte prozessübergreifende Kommunikationsplattform geschaffen werden.

Die Verifikation der Brückenthese hat daher in drei Schritten zu erfolgen. Als erstes ist zu belegen, dass der formulierte Bedarf einer Überbrückung zwischen virtueller und physischer Entwicklungsumgebung existiert und die bestehenden Probleme müssen dokumentiert werden. Hierfür eignet es sich aufgeführte Probleme und Herausforderungen aus der Literatur zusammenzufassen. Darüber hinaus werden Experten, die täglich an dieser Schnittstelle arbeiten, um ihre professionelle Meinung gebeten. Die Erkenntnisse dieser Vorgehensweise sind im Kapitel 6.3.1 aufgelistet und für die vorgestellten Praxisbeispiele jeweils in Kapitel 7 diskutiert.

Der zweite Verifikationsschritt besteht darin die übertragenen Mixed Mock-Up Methoden im Vergleich zu ihren bisherigen Anwendungsfeldern zu beurteilen. Dabei gilt es sowohl zu beurteilen, ob die bislang erzielten Effekte auch innerhalb des Toleranzmanagement zu realisieren sind, wie auch mögliche Synergieeffekte in Vorgehensweise und Wissensmanagement aufzuzeigen. Als Grundlage für diesen Vergleich sollen die gleichen Bewertungskriterien wie in [Gei12] gewählt werden: Qualität, Kosten und Zeit.

Der dritte Verifikationsschritt der Brückenthese muss belegen, dass die gewählten Methoden eine prozessübergreifende Kommunikation ermöglichen. Dafür müssen die subjektiven Erfahrungen der prozessbeteiligten Experten hinsichtlich intuitiver Bedienung, Interpretation der Visualisierungsform und der Ergebnisdarstellung sowie der Verwendungsgrad der Dokumentation evaluiert werden.

In der Visualisierungsthese wird der Sachverhalt formuliert, dass die Abstraktion im Toleranzmanagement zu einer nicht geometrischen Datengrundlage führt, z.B. mathematische Zusammenhänge oder statistische Ergebnisse. Dies stellt einen Gegensatz zu bisherigen produktnahen MMU Einsatzdisziplinen dar. Die gewählte Visualisierungsform

der digitalen Mixed Reality Inhalte muss dieser Abstraktion Rechnung tragen, ohne dabei zu Informationsverlust oder Interpretationsfehlern zu führen. Darüber hinaus handelt es sich bei den physischen Umfängen des Toleranzmanagements auch um Betriebsmittel mit dynamischen Komponenten oder um flexible Anbauteile. Um diesen Sachverhalt zu berücksichtigen, muss die gewählte Visualisierung in der Lage sein, mit einem dynamischen Hardwareumfeld zu interagieren.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, subjektive Aspekte der Toleranzwirkungen auf das Produktdesign in die Mixed Reality Betrachtung einzubeziehen. Ein möglicher Lösungsweg besteht darin, subjektive Bewertungsmethoden aus dem VR Umfeld enger mit Mixed Reality zu verzahnen. Im Sinne der Prozessqualität geht es dabei sowohl um die Schaffung eines breiteren und damit flexibel und zielgerichtet einsetzbaren Methodenspektrums als auch um die Evaluierung möglicher Synergieeffekte durch die Verzahnung zweier verwandter Arbeitsbereiche oder Entwicklungsumgebungen.

Die Verifikation der Visualisierungsthese besteht darin, für unterschiedlichste Anwendungsszenarien in Hinblick auf Grad der Abstraktion, Subjektivität sowie Dynamik, Formen der Darstellung digitaler Mixed Reality Anwendungen zu finden und deren Praxistauglichkeit zu überprüfen. Es gilt hierbei auch aufzuzeigen, dass es keine universelle Visualisierungsform für alle Mixed Reality Inhalte in einem Automobilkonzern gibt. Vielmehr begründet sich hierin die Forderung nach einer Systematik, welche flexibel auf neue Anwendungsbereiche adaptiert werden kann.

In vielen MMU Industrieanwendungen ist die Beurteilung der Vollständigkeit oder ein grober Positions- und Formabgleich im Soll/Ist-Abgleich ausreichend, da die Interpretation der Ergebnisse durch beteiligte Experten im Vordergrund steht. Ist eine höhere Präzision erforderlich, wird diese durch angehängte Messprozesse erreicht. In bisherigen Mixed Reality Studien wird entweder die Trackinggenauigkeit untersucht, und dies meist nur unter Laborbedingungen, oder es werden Anwendungsmethoden ermittelt. In beiden Fällen spielt die Gesamtsystemgenauigkeit eine untergeordnete Rolle. Um eine Vergleichbarkeit mit mathematischen Disziplinen zu gewährleisten ist eine wohldefinierte Bestimmung der Genauigkeit der eingesetzten Systeme erforderlich. Dabei ist der eigentliche Wert der Genauigkeit der gewählten Mixed Reality Systeme hinsichtlich der Methodenbetrachtung von untergeordneter Bedeutung. Wichtiger ist eine hohe Präzision bei der Bestimmung der Systemgenauigkeit. Nur dadurch kann die Messmittelfähigkeit nachgewiesen und eine zuverlässige Vergleichbarkeit zwischen physischen Umfängen und digitalen Berechnungsergebnissen erzeugt werden. Dies spiegelt sich in der dritten Arbeitshypothese (Genauigkeitsthese) wider.

Es gilt daher eine Kalibriermethodik einzusetzen, die es erlaubt, die Genauigkeit des

Mixed Reality Systems präzise zu bestimmen. Der Vergleich mit den geforderten Messmittelfähigkeiten des Toleranzmanagements definiert dann das mögliche Einsatzspektrum für Mixed Reality Anwendungen (Kap.6.3.3). Die Verifikation dieser Genauigkeitsthese beschränkt sich in der vorliegenden Arbeit auf die Vorstellung einer möglichen Methode. Es geht in dieser Arbeit nicht darum, die Genauigkeit des Mixed Reality Systems zu erhöhen. Es wird vielmehr ein Beurteilungskriterium erstellt, um zukünftige Mixed Reality Einsätze bezüglich ihrer Messmittelfähigkeit beurteilen zu können. Im Rahmen der Prozessqualität und -sicherheit zählt dazu auch eine in ihrer Form wohl gewählte durchgängige Dokumentation der erzielten Messgenauigkeit.

Hypothese	Bewertungskonzept
1. Brückenthese	1.1 Nachweis des Bedarfs zur Überbrückung an Schnittstelle zwischen realer und digitaler Entwicklungsumgebung 1.2 Vergleich zu bisheriger Anwendung anhand der Kriterien Qualität, Zeit & Kosten 1.3 Bewertung prozessübergreifender Synergie- und Kommunikationsaspekte
2. Visualisierungsthese	2.1 Nachweise der Praxistauglichkeit in den Kategorien Abstraktionsgrad, subjektiver Eindruck und Prozessstabilität 2.2 Bearbeitung flexibler Darstellungsformen und dynamischer Aspekte
3. Genauigkeitsthese	3.1 Kalibrierungsprozess definieren 3.2 Vergleichbarkeit garantieren 3.3 Genauigkeitsansprüche erfüllen

Bild 6.13: Bewertungskriterien zu den Arbeitshypothesen

6.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beinhaltet eine strukturierte Beschreibung der Einsatzmöglichkeiten des Mixed Mock-Ups. Dazu wurden zunächst der Fugen-/Radienplan, der Funktionsmaßkatalog, das Spann-/Fixierkonzept, die geometrische Toleranzspezifikation sowie das Referenzierungskonzept als Schnittstellen zwischen DMU und PMU im Toleranzmanagement identifiziert. Um die Einsatzszenarien des MMU im PEP einzuordnen, wurden die

Aufgaben des Toleranzmanagements in eine konzeptionelle, eine Entscheidungs- und eine analytische Phase unterteilt. Die entwickelten MMU Methoden wurden nach den Zielen „Adaption bisheriger MMU Methoden für das Toleranzmanagement“, „toleranzspezifische MMU Methoden“ und „Kommunikationsplattform“ unterteilt. Das methodische Vorgehen zur Entwicklung einer MMU Methode wurde entlang der Prozessschritte vor, während und nach einer Untersuchung vorgestellt und mit den erwähnten Methodenzielen verknüpft. Der Bedeutung der Visualisierungstheorie dieser Arbeit, wurde durch Erläuterung der Darstellungsarten und Visualisierungsmethodik Rechnung getragen und diese mit dem Begriff der Funktion im Toleranzmanagement verknüpft.

Anschließend wurden die Herausforderungen im Toleranzmanagement entlang der Schnittstellen identifiziert. Aus dem vorgestellten Methodenschema wurden entsprechende Lösungsvorschläge erarbeitet, aber auch Herausforderungen zur Umsetzung abgeleitet. Besonderes Augenmerk galt dabei der Herausforderung „Messgenauigkeit“, welche sich auch in der Genauigkeitstheorie dieser Arbeit wiederfindet. Die messtechnischen Ansprüche wurden in die Felder Messunsicherheit, Komplexität und Zuverlässigkeit eingeteilt. Es wurde aufgezeigt, welche Konsequenzen dies für die Kalibrierung, die Registrierung, die Einsatzmethodik und die Systemkonfiguration hat. Abschließend wurden diese theoretischen Ausführungen mit den Arbeitshypothesen zusammengeführt und daraus Bewertungskriterien für den erfolgreichen Einsatz von MMU Methoden im Toleranzmanagement abgeleitet.

7 Bewertung in der praktischen Anwendung

In diesem Kapitel werden exemplarische Praxisbeispiele vorgestellt, die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt wurden. Jedem Praxisbeispiel werden dabei vier Abschnitte zugeordnet: Ausgangslage & Zielsetzung, Durchführung, Erkenntnisse und Überprüfung der Arbeitshypothesen entsprechend der vorgestellten Bewertungskriterien aus Kapitel 6.4 (Abb.6.13).

7.1 Bauteiltoleranzen

Die hier aufgeführten Beispiele haben das methodische Ziel, Toleranzen in bestehenden MMU Anwendungen zu berücksichtigen (Adaption, Abb. 6.7) und stammen aus den in Kapitel 4 aufgeführten klassischen MR Handlungsfeldern Hardwareabnahme und Problempunktanalyse [LG11].

7.1.1 Toleranzaspekte in der Hardwareabnahme am Beispiel Schweißpunktposition

Ausgangslage & Zielsetzung

Zielsetzung des Einsatzes von Mixed Reality war die Absicherung der Schweißpunktpositionen im Fügeprozess. Im Gegensatz zu vielbeachteten Versuchen mit AR unterstützten Schweißgeräten [ESK⁺03, HAG04] wurde hierbei der MMU Ansatz zur flexiblen Prozessanalyse gewählt. Ziel der Methode war die Erweiterung bisheriger MMU Methoden der Hardwareabnahme [LG11] um die gezielte Adressierung von Toleranzaspekten. Um die Position der Schweißpunkte vollständig beurteilen zu können, mussten die Toleranzzonen berücksichtigt werden (Abb. 7.1). Dieses Praxisbeispiel beschreibt damit die Anwendungsfälle *virtuelle Lehre* und *Analyse der Toleranzursachen* an den Schnittstellen *Konstruktionszeichnung* sowie *Spann- und Fixierkonzept* in der analytischen Phase des

Toleranzmanagements. Zum Einsatz kam das messarmbasierte MR System (Abb.4.2). Auftraggeber des Einsatzes war der Prototypenbau.

In dem hier betrachteten Beispiel wurde die Fertigung von Aggregateträgerrohbauteilen (ATG,S.7) in Kleinserie bei einer externen Drittfirma untersucht. Dabei wurde der Rohbau der Vorgängerbaureihe um einen neuen Vorbau ergänzt. Der Automatisierungsgrad solcher Kleinserienfertigung ist gering und viele Arbeitsschritte werden manuell ausgeführt. Die Schweißpunktpositionen wurden mit manuell gefertigten Schablonen und Filzstift angezeichnet. Anschließend wurden die Schweißpunkte mit Schweißzangen manuell gesetzt. Der Fügeprozess fand in mehreren Fügestationen statt. Die fertigen Rohbauteile wurden anschließend in einem Werk der Automobilfirma fertig aufgerüstet und konnten von den Entwicklungsabteilungen zu Erprobungszwecken genutzt werden.

Hinsichtlich der Prozessqualität birgt das manuelle Schweißen zwei Risiken. Erstens ist das Anzeichnen mit Schablone und Filzstift nur bedingt genau. Die Schweißschablonen und Aufnahmevorrichtungen in Kleinserien sind dabei selbst manuelle Einzelanfertigungen und mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Zweitens ist es sehr schwierig präzise manuell zu schweißen, da die Schweißzangen sehr groß und unhandlich sind und teilweise von mehreren Personen gleichzeitig bedient werden müssen. Manuelles Schweißen ist daher nur im serienfernen Prototypenbau sinnvoll. Bei Erstellung funktionaler Prototypen wie z.B. der ATG wird deshalb eine besondere quantitative und qualitative Kontrolle durchgeführt.

Neben der Frage der Positionsgenauigkeit ist der Prozess des manuellen Schweißens ganzer Rohbauteile anfällig für Interpretationsfehler. Eine vollständige Überprüfung der Schweißpunktpositionen gestaltet sich aufgrund der großen Anzahl der Schweißpunkte aufwendig. Oft verhindert die Rohbaugeometrie, dass beide Seiten der zu schweißenden Punkte vom Schweißer eingesehen werden können. Viele Schweißpunkte sind nach dem Fügen eines Unterassembles nicht mehr einsehbar und müssen deshalb schon während des Fügeprozesses in der entsprechenden Aufnahmevorrichtung bewertet werden. Die Zusammenarbeit mit dem Zulieferer generiert einen erweiterten Kommunikationsbedarf mit der entsprechenden Anfälligkeit für Interpretationsschwierigkeiten.

Die Kommunikationsgrundlage mit der externen Firma waren CAD-Daten. Diese wurden auch mit Hilfe von Laptops oder in Form von ausgedruckten Screenshots zur Vollständigkeitskontrolle im laufenden Fügebetrieb genutzt. Der für den Fügeprozess entscheidende Unterschied zwischen Zwei- und Dreiblechschweißpunkten wurde in den CAD-Daten farblich hervorgehoben.

Neben der Berücksichtigung der Positionstoleranzen war auch das Fixier- und das Fügekonzept selbst Bestandteil der Untersuchung. Bei der Überprüfung der Schweißpunkte

war es wichtig zu kontrollieren, ob die Schweißpunkte in der richtigen Station unter Beteiligung aller dafür vorgesehener Bauteile gesetzt wurden. Eine potentielle Fehlerquelle solcher Prozesse ist das frühzeitige Fügen zweier Bauteile an einer Stelle, an der ein Dreiblechschweißpunkt in einer späteren Station vorgesehen ist. Die Vorgehensweise musste also sicherstellen, dass die Fügefolge am Mixed Mock-Up identifiziert werden kann.

Durchführung

Durch den Einsatz vor Ort beim Zulieferer war keine Anbindung an das PDM System während der Untersuchung möglich. Um den Fertigungsprozess nicht zu verzögern, konnte nur in begrenzten Zeitfenstern an den jeweiligen Fügestationen operiert werden. Für jede Station wurde daher eine methodische Vorgehensweise für Registrierung und Prozessablauf definiert.

Zur taktilen Referenzierung wurden die Einmesspunkte der Fügestationen verwendet. Diese waren von der Reichweite auf taktile Messprozesse ausgelegt und an den Stationen in Form von Referenzmarken verfügbar. Gleichzeitig sicherten diese Referenzpunkte eine Durchgängigkeit in der Betrachtung über die verschiedenen Stationen hinweg.

Für jede Fügestation wurden der Rohbau-Untersammenbau sowie alle zugehörigen Schweißpunktpositionen als Daten gruppiert und aufbereitet. Zwei- und Dreiblechschweißpunkte wurden dabei farblich unterschieden, um eine entsprechende Absicherung während der Untersuchung unkompliziert vornehmen zu können. Die Toleranzzonen der Schweißpunkte wurden als 3D Objekte konstruiert, um eine spätere senkrechte Betrachtung (Abb. 4.4) und damit verzerrungsfreie Beurteilung durch Mixed Reality zu ermöglichen. Die Daten der entsprechenden Fügevorrichtungen wurden vor Ort von der Zulieferfirma zur Verfügung gestellt und direkt in das entsprechende Datenformat konvertiert.

Im praktischen Einsatz wurde der gesamte Fügeprozess entlang der verschiedenen Fügestationen in zwei Arbeitstagen mittels Soll-Ist-Vergleich abgesichert. Durch die Visualisierung der Toleranzzonen wurde die Schweißpunktpositionierung und bei Bedarf die Schweißschablonen qualitativ beurteilt und über Snapshots (Screenshot mit Pose) dokumentiert. Zur Überprüfung der Schablonen wurden diese mittels Datentransformation passgenau auf das digitale Fahrzeug gesetzt. Die Überlagerung der Stationsdaten als Gitternetzdarstellung wurde zur Kontrolle und Dokumentation der Fügestationsqualität genutzt. An gefundenen Fehlstellen erlaubte der visuelle Abgleich mit Mixed Reality eine einfache und schnelle Fehlerquellenanalyse im Prozess.

Als Fehlerquellen wurden hierbei frühzeitiges Setzen eines Schweißpunktes in einer falschen Fügestation, fehlerhafte Schweißschablonen, falsche Anwendung von Schweißschablonen

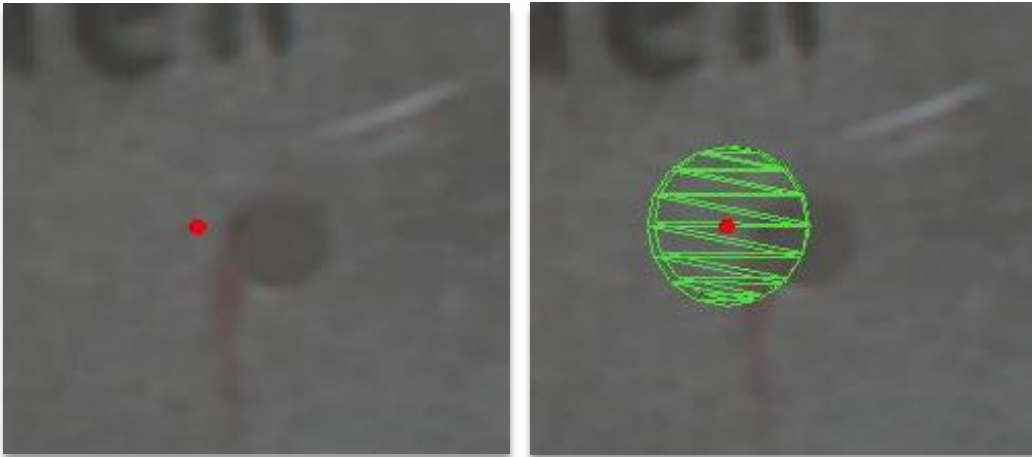


Bild 7.1: Mixed Reality Darstellung eines Schweißpunktes ohne und mit Toleranzzone

(z.B. spiegelbildliche Verwendung) sowie vergessene oder falsch positionierte Schweißpunkte identifiziert (Abb. 7.2). Die Erkenntnis, dass der größte Anteil der Schweißpunkte den geforderten Qualitätsansprüchen entsprach, führte zu einer verbesserten Kommunikationsgrundlage. Gleichzeitig konnte durch gezielte Identifikation von Fehlerquellen und deren direkte Behandlung die Prozesssicherheit und -qualität deutlich erhöht werden.

Die Erkenntnisse der Einsätze wurden in Form von Bildern zu einem Untersuchungsprotokoll zusammengefügt und als spätere Kommunikationsgrundlage aufbereitet. Hierbei musste sichergestellt werden, dass die Kalibrierung, die Einmessgenauigkeiten und die verwendete Datengrundlage entsprechend dokumentiert wurden. Da eine Schweißpunkt-wolke sehr viele Schweißpunkte umfasst, musste über eine sehr strikte Selektion der sichtbaren digitalen Inhalte pro Bild sichergestellt werden, dass die Interpretierbarkeit der Dokumentation gewährleistet ist. Nur durch die Speicherung als Snapshot war eine solche nachgelagerte Offlinebearbeitung möglich.

Erkenntnisse

Der Einsatz hat gezeigt, dass sich mittels flexibler Mixed Reality Systeme verschiedene Aspekte in ein und derselben Untersuchung behandeln lassen. Die identifizierten Prozessfehlerquellen gingen nahezu ausschließlich auf menschliche Interpretationsfehler zurück. Mixed Reality hat hier das Potential bewiesen gleichzeitig die Qualität der Fertigung (Schweißpunktposition) und des Prozesses (Interpretation, Kommunikation) zu erhöhen. Mixed Reality Dokumentationen hatten bis zu diesem Einsatz bereits ihr großes Potential in der Kommunikation mit Zulieferfirmen bewiesen. Aber der Einsatz direkt vor Ort bei einer Fremdfirma war eine Neuheit. Gefundene Problemstellen konnten direkt im Prozess



Bild 7.2: Ergebnisse der Schweißpunktuntersuchung mit Mixed Reality: Soll-Ist-Abgleich der Aufnahmevorrichtung (oben links), spiegelbildlich verwendete Schablone (oben rechts), fehlerhafte Schweißpunktposition (unten links) und fehlerhafte Schweißschablone (unten rechts)

analysiert und direkt behoben werden. Zusätzlich zur direkten Prozessanalyse bildet der Einsatz vor Ort auch eine Kommunikationsgrundlage zum Thema Qualitätsansprüche und -kontrolle gegenüber den Fremdfirmenmitarbeitern. Eine reine Beschränkung der MR Aspekte auf die Schweißinstrumente (wie in [ESK⁺03, HAG04]) lässt einen umfassenden Einsatz dieser Art nicht zu.

Es hat sich gezeigt, dass die Wahl der Visualisierungsform für einen effizienten Arbeitsablauf während des Mixed Reality Einsatzes unabdingbar ist. Die farbliche Kennzeichnung von weiterführenden Informationen, wie die Anzahl der Bleche, die mit einem Schweißpunkt gefügt werden sollen, hat sich als robust und effizient erwiesen. Die Konstruktion der kreisförmigen Toleranzzonen als 3D-Zylinder zur Sicherung der senkrechten Betrachtung sowie eine Clusterung der Daten entlang des Prozessablaufs haben sich als absolut notwendig für einen flüssigen Prozessablauf ergeben.

Während des Einsatzes hat die gewählte Visualisierungsform weiteres Verbesserungspotential hinsichtlich der Übersichtlichkeit aufgezeigt. In der zu Grunde liegenden CAD-Datenstruktur sind Schweißpunkte als Punktwolken nach Unterelementen gruppiert. Beim Import in das Mixed Reality Programm bleibt die Punktwolke als einheitliches Objekt erhalten, das entsprechend eingeblendet und mit Eigenschaften versehen werden, jedoch nicht auf den einzelnen Schweißpunkt reduziert selektiert werden kann. Um solche MR Szenen übersichtlich zu gestalten, wird normalerweise der Rohbau als Verdeckungsobjekt digital berücksichtigt. Da der Schweißpunkt geometrisch als kleine Kugel zwischen die Bleche konstruiert wird, ist er mit dem Rohbau als Verdeckungsgeometrie nicht mehr sichtbar. Ohne Verdeckung sind aber alle digitalen Schweißpunkte des Unterelementbaus auf einmal sichtbar. Da es sich oft um mehrere hundert Schweißpunkte handelt, werden die Bilder sehr unübersichtlich und selbst für Mixed Reality Experten schwer zu interpretieren. Der Vorteil der intuitiven Interpretations- und Kommunikationsgrundlage würde verloren gehen.

Daher wurde die Übersichtlichkeit der Screenshot-Dokumentation durch das Setzen von Schnittebenen nachträglich erzeugt (Offline MR). Der Aufwand für die Dokumentation wurde dadurch erheblich gesteigert und ist für einen regelmäßigen Einsatz auf dem Gebiet Schweißpunkte nicht akzeptabel. Eine mögliche Lösung wäre eine Datenstruktur in der die Punkte in Objekte gruppiert sind und so während der MR Untersuchung entsprechend ein- und ausgeblendet werden können. Eine solche Vorgehensweise ist aber nur mit einer automatisierten Datenaufbereitung effizient. Gleichzeitig steigert eine Clusterung die Gefahr Schweißpunkte im Einsatz zu vergessen. Das manuelle Einblenden der entsprechenden Objekte erzeugt einen zeitlichen Mehraufwand, der die notwendige Effizienz und den flüssigen Ablauf behindert - und somit die Grundlage für einen Einsatz in der

laufenden Produktion an den Fügestationen unterläuft. Eine solche Vorgehensweise wäre also nur mit einem definierten Software-Workflow (z.B. Ablaufprotokoll) prozesssicher.

Ein einfacherer Lösungsvorschlag besteht in der Änderung der Visualisierungsform: stabförmige digitale Schweißpunkte ragen auf beiden Seiten aus dem Rohbaublech heraus und bleiben auch mit Rohbauverdeckung sichtbar. Um eine manuelle Konstruktion der digitalen Stäbchenobjekte zu vermeiden, kann von dem üblichen Datenaufbereitungsprozess abgewichen werden. Statt einer Überführung der Geometriedaten aus dem PDM-System in das Mixed Reality Programm, reicht die Information über Koordinaten der Schweißpunktposition und der entsprechenden Normalenrichtung aus. Diese können in Form eines Tabellenimports direkt in das Mixed Reality Programm übernommen werden. Dies erlaubt die Visualisierung einer vordefinierten Schweißpunktreferenzgeometrie an jede angegebene Position. Um oben genannte Vorteile nicht zu verlieren, sollte diese Vorgehensweise die Möglichkeit enthalten auch weiterführende Metainformationen zu verarbeiten, z.B. die Anzahl der geschweißten Bleche oder die Größe der Toleranzzone. Da solche Tabellen für Schweißpunkte bereits vorhanden sind, kann der Datenaufbereitungsaufwand für ein Komplettfahrzeug von mehreren Tagen auf wenige Stunden reduziert werden. Damit erhöht sich gleichzeitig die Flexibilität mit der sich das System zur Schweißpunkt Betrachtung einsetzen lässt.

Der Einsatz wurde durch die Experten der beauftragenden Fachbereiche in der Gesamtfahrzeugkonstruktion sehr positiv bewertet. Dies zeigt sich auch darin, dass die Absicherung der Schweißpunktpositionen bei den folgenden Prototypenkleinserien durchgängig angewandt wurde. Der hier geforderte, automatisierte Datenaufbereitungsprozess wurde in das Mixed Reality Programm zur Absicherung von Schweißpunkten und -bolzen aufgenommen.

Bewertung

Brückenthese: An diesem Beispiel kann man besonders schön den Bedarf einer Überbrückung zwischen digitalen und physischen Entwicklungsprozessen erkennen. Es fand nicht nur ein Medienwechsel (PDM-System zu Papiausdruck) und ein Personenwechsel (Automobilhersteller zu Zuliefererfirma) statt, sondern damit verbunden auch ein Orts- und ein Perspektiven- / Interessenswechsel. Der hohe Abstimmungsbedarf wurde durch häufige Präsenz der OEM Mitarbeiter vor Ort gelöst. Dabei wurde entweder ein Papiausdruck mit an die Fügestation genommen oder direkt das digitale Modell auf einem Laptop herangezogen. Eine Vielzahl der identifizierten Fehler lassen sich dabei auf Interpretations- oder Kommunikationsfehler in diesem Prozess zurückführen.

Durch die Verzahnung mit bewährten MMU Methoden zur Hardwareabnahme [LG11] lassen sich deren Vorteile auf die Belange des Toleranzmanagements übertragen. Das

Bewusstsein aller Prozessbeteiligten für Fehlerquellen und Qualitätsansprüche sowie die konsequente Absicherung und Abnahme, inklusive visueller Dokumentation aller Fertigungsumfänge, führte zu einer Steigerung der Prozesssicherheit. Die frühzeitige Identifikation potentieller oder existierender Fehlerquellen in Kombination mit deren direkten und frühzeitigen Behebung erhöht nicht nur den Reifegrad und die Produktqualität der Prototypen, sondern die gesamte Prozessqualität der Kleinserienproduktion. Die Verhinderung von Ausschuss durch fehlerhafte Produktion beziehungsweise des Bedarfs an Nacharbeit führen zu einer Reduktion der Kosten. Die schnelle und effektive Fehleridentifikation und die direkten Eingriffsmöglichkeiten durch die MR Analyse vor Ort verringern die Zeit, die zur Identifikation und Diskussion von Fehlerquellen aufgewandt werden musste.

Dieses Beispiel beweist darüber hinaus das hohe Potential, welches Mixed Mock-Up Methoden zur Dokumentation der Prozesssicherheit und zur herstellerübergreifenden Kommunikation besitzen. Die beteiligten Experten des Automobilherstellers und der Zuliefererfirma bewerteten hierbei die frühzeitige Fehleridentifikation besonders vorteilhaft. Des Weiteren wurde betont, dass der Einsatz das Problem- und Qualitätsbewusstsein fördert und damit eine hervorragende Kommunikationsplattform für den restlichen Prozess bildet. An den Schnittstellen zu anderen Themen (Bolzen, Crash) wurden Synergieeffekte identifiziert. Die Visualisierungsform und die Vorgehensweise wurden z.B. auf die Schweißpunktkontrolle im Crashbereich erfolgreich übertragen.

Visualisierungsthese:

Dieser Einsatz ist ein gutes Beispiel, welche Bedeutung der gewählten Visualisierungsform im Rahmen eines sinnvollen und gesamtheitlichen Ansatzes sowie einer effektiven und zielgerichteten Vorgehensweise beigemessen werden muss. Erst durch die Konstruktion der Toleranzzonen kann die Positionsbeurteilung während des Einsatzes an der Fügestation direkt und schnell durchgeführt werden. Und erst die Konstruktion der eigentlich zweidimensionalen Toleranzzonen als dreidimensionale Objekte stellt hierbei sicher, dass die beabsichtigte Betrachtungsrichtung während des Einsatzes intuitiv und sicher eingehalten wird. Im Sinne der Prozesssicherheit hat sich auch die Visualisierung von Metainformationen durch farbliche Kennzeichnung, wie im Falle der Unterscheidung zwischen Zwei- und Dreiblechschweißpunkten bewährt.

Bei der Wahl der Visualisierungsform muss nicht nur die Form der einzelnen Geometrie sondern auch die Gesamtheit aller für die Zielsetzung notwendigen Umfänge berücksichtigt werden. Während die Selektion einzelner Schweißpunkte oder die Gruppierung in Unterbereiche die Dokumentation sicherlich vereinfachen würden, beinhaltet dies gleichzeitig die Gefahr den Vollständigkeitsanspruch der lückenlosen Abnahme aller Schweißpunktpo-

sitionen durch Vergessen oder Übersehen einzelner Geometrien nicht zu erfüllen. Neben einer verbesserten Visualisierungsform (Stäbchen) könnte hierbei auch ein entsprechender Software-Workflow (Authoring) unterstützend eingesetzt werden.

Genauigkeitsthese: Im Sinne der Vergleichbarkeit muss die Kalibrierung des MR Systems bei solchen Hardwareabnahmen dokumentiert werden. Wegen der hohen Präzision der Einmesspunkte an den Fügestationen konnte dies in diesem Einsatz durch eine einfache Überlagerung der Einmessgeometrie überprüft und in entsprechenden Screenshots festgehalten werden. Der Einsatz einer teuren oder aufwendigen Methodik zum Messmittelfähigkeitsnachweis war damit nicht notwendig - ein Beispiel für die Wahl der Kalibriermethodik unter Berücksichtigung der Voraussetzungen und Anforderungen des jeweiligen Einsatzszenarios mit Augenmerk auf Prozessqualität und -kosten.

Durch das vorhandene Referenzsystem an den Fügestationen konnte die notwendige Genauigkeit unkompliziert realisiert werden. Gleichzeitig wurde dadurch die Vergleichbarkeit zu den digitalen Fügekonzepten sichergestellt. Im Sinne der Vergleichbarkeit muss hierbei jedoch auch berücksichtigt werden, dass bei möglichen Folgeuntersuchungen direkt an den Fahrzeugen (z.B. zur Problempunktanalyse) ein Wechsel des Referenzsystems stattfindet.

7.1.2 Toleranzaspekte in der Problempunktanalyse am Beispiel Toleranzkonzept Kühlermodul

Ausgangslage & Zielsetzung

Ausgangspunkt für diese Untersuchung war die Analyse von Einbauschwierigkeiten im Prototypenbau. Ziele der Methode waren die Erweiterung bisheriger MMU Methoden der Problempunktanalyse [LG11] um die gezielte Adressierung von Toleranzaspekten sowie der Schnittstelle Füge-/Fixierkonzept. Bei der Montage des Lüftermoduls an den Kühler im Frontmodul gab es eine kritische Engstelle, so dass sich ein Dämpfergummi nicht einsetzen ließ. Bei der MMU Problempunktanalyse wird der Soll-Baustand in einem Soll-Ist-Vergleich überlagert und die Fehlerquellen visuell identifiziert. Werden bei der Problempunktanalyse die Toleranzen mit berücksichtigt, vergrößert dies die Aussagekraft der Problempunktanalyse erheblich.

Dieses Praxisbeispiel beschreibt damit die Anwendungsfälle *Toleranzen in klassischen MR Anwendungen* und *Toleranzausgleichsmöglichkeiten (aus Tolerierungssicht)* an der Schnittstelle *Geometriedaten inkl. Toleranzspezifikation* im Prozessschritt *Soll-Ist-Vergleich / Korrekturmaßnahmen* (Entscheidungsphase, Abb. 6.5). Zum Einsatz kam das messarmbasierte MR System (Abb.4.2). Auftraggeber des Einsatzes war das Toleranzmanagement.

Durchführung

Vor der Untersuchung wurden bei der Datenvorbereitung zur Einbindung der Toleranzaspekte in die Problempunktanalyse manuell eine virtuelle Lehre (2D) der Toleranzen an der Engstelle konstruiert. Die Datenaufbereitung der Bauteilgeometrien erfolgte durch automatisierte Konvertierung aus dem PDM System. Die physischen Bauteile wurden in der Werkstatt entsprechend fixiert und stellten keine dimensionale Herausforderung an die Reichweite des Messarms.

Die taktile Referenzierung erfolgte über die definierten Unterreferenzsysteme der beiden Bauteile (Lüftermodul und Kühler), die auch dem Tolerierungskonzept zu Grunde lagen. Dadurch wurde die Vergleichbarkeit zwischen der Bauteilanalyse einzeln und im Zusammenbau erreicht. Die Genauigkeit der Referenzierung wurde durch eine Drahtgitterüberlagerung der Bauteilgeometrien visuell verifiziert.

Um eine vollständige Problempunktanalyse durchzuführen, wurden sowohl der Lüfter als auch der Kühler im Frontmodul vorab einzeln in einem Soll-Ist-Vergleich überprüft. Anschließend wurde der Lüfter ohne das Dämpfergummi montiert und der Montagevorgang in einem weiteren Soll-Ist-Vergleich abgesichert. Dabei wurde festgestellt, dass der Aufnahmedorn am Frontmodul, an den der Lüfter und das Dämpfergummi montiert werden sollten, von seiner Soll-Lage abwich.

Durch die Visualisierung der virtuellen Lehre konnte direkt analysiert und dokumentiert werden, dass die beobachtete Abweichung innerhalb der erlaubten Toleranzzone lag. Der Dorn war also entgegen des intuitiven Eindrucks nicht falsch, sondern ihm Rahmen der zulässigen Grenzen positioniert. Eine weitere Analyse ergab noch während des gleichen Mixed Reality Einsatzes, dass die Ausgleichsmöglichkeiten im Toleranzkonzept nicht groß genug waren, um in der extremen Toleranzlage die Montage sicherzustellen.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem Stillimage (Screenshot ohne Pose) festgehalten und in einem Untersuchungsprotokoll dokumentiert. Durch die Diskussion der an der Untersuchung beteiligten Experten aus den Fachbereichen (inkl. Toleranzmanagement) während des Praxiseinsatzes ergaben sich jedoch schon vor Anfertigung der Dokumentation die ersten Entscheidungen über eine Problempunktbehebung.

Erkenntnisse

Dieses Beispiel veranschaulicht die Bedeutung von Toleranzen in „klassischen“ Untersuchungen im Prototypenbau. Der MMU ermöglicht ein schnelles und effektives Identifizieren von Fehlstellen. Die angegliederte Interpretation der gefundenen Abweichungen und eine entsprechende Ursachenanalyse müssen jedoch durch die verantwortlichen Experten erfolgen. Die Toleranzen sind dabei grundlegend, um zu unterscheiden, ob es sich bei den

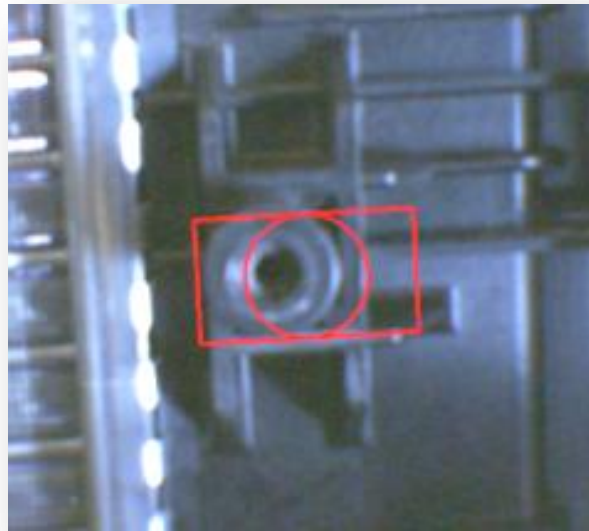


Bild 7.3: Virtuelle Lehre zur Beurteilung der Toleranzzone des Absteckers für den Kühler am Modulträger

gefundenen Abweichungen um einen einmaligen Fertigungsfehler oder um ein konzeptionelles Problem handelt, welches im Sinne des beschlossenen Toleranzkonzepts wieder auftreten kann.

Durch das Bereitstellen der Toleranzinformationen direkt am Mixed Mock-Up wurde die Absicherungsgrundlage und damit die Qualität des Analyseprozesses deutlich verbessert. Unnötige Iterationsschleifen wurden vermieden. Die Diskussion auf einer eindeutigen, visuellen Grundlage ermöglichte einen gezielten Informationsfluss zu den verantwortlichen Experten, eine vereinfachte und direkte Entscheidungsfindung und sparte dadurch zusätzliche Zeit und Kapazität.

Die Praxiserfahrung zeigt aber auch, dass für eine durchgängige Verfügbarkeit von entsprechenden Toleranzinformationen im Mixed Mock-Up ein Prozess definiert werden muss, der sicherstellt, dass die Mixed Reality Operatoren Zugang zu den Toleranzinformationen haben sowie über das nötige Know-How zur Interpretation dieser Informationen verfügen. Dies kann sowohl wie bei diesem Einsatz in der Datenaufbereitung geschehen, wie auch über die Möglichkeit entsprechender Toleranzmodule der MR-Software mit (teil-)automatisiertem Zugriff auf das PDM System. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird über toleranzkonforme Bezugssysteme für den Registrierungsprozess sichergestellt.

Bewertung

Brückenthese: Im Falle der Erweiterung von existierenden Mixed Mock-Up Methoden ist ein Nachweis des Überbrückungsbedarfs zwischen DMU und PMU hinfällig. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Notwendigkeit bereits durch die Anwendung einer Mixed Mock-Up Methode impliziert ist (siehe hierzu [Gei12]). Im Falle dieses Beispiels wurde jedoch durch die Verfügbarkeit zusätzlicher (Toleranz-) Informationen die Aussagekraft der Mixed Mock-Up Untersuchung und damit die Qualität des Prozesses deutlich erhöht. Gleichzeitig wurde die Analyse der Problemstellen im Prototypenbau direkt mit denen des Toleranzmanagements verzahnt und Iterationsschleifen einer weiteren MR Untersuchung oder einer rein digitalen Analyse vermieden. Eine zusätzliche Zeitersparnis ergibt sich durch den vereinfachten Kommunikations- und Abstimmungsprozess.

Der Mehraufwand in der Datenaufbereitung und die Verfügbarkeit und Interpretation der Toleranzinformationen durch den MR Systemoperator zeigen aber auch, dass die Vorgehensweise dieses Beispiels noch keine praxistaugliche Lösung darstellt. Dies unterstützt die prognostizierten drei möglichen Vorgehensweisen bei der Einbindung von Toleranzen in bestehende MR Methoden (S. 68). Im hier geschilderten Beispiel bestand durch die Begleitung im Rahmen der vorliegenden Arbeit sowohl eine Nähe zum Toleranzmanagement wie auch ein erhöhtes Vorwissen zu Toleranzaspekten. Es handelt sich also um den ersten Fall: Einbindung des Toleranzmanagements bereits im Datenaufbereitungsprozess.

Visualisierungsthese:

Die Visualisierung als zweidimensionale virtuelle Lehre hat sich in diesem Einsatz als vollkommen ausreichend herausgestellt. Ein dreidimensionales Objekt zur Sicherstellung der senkrechten Betrachtungsrichtung könnte hier die Prozesssicherheit erhöhen, ist aber nicht zwingend erforderlich. Der Einsatz stand in keinem zeitlich begrenzten Rahmen und so konnte der Betrachtungswinkel unter Berücksichtigung der digital ebenfalls eingeblendeten Bauteile (Drahtgittermodell) hinreichend genau eingehalten werden. Damit bestätigt dieser Ansatz die Forderung nach einer Abstrahierung im Visualisierungsansatz, deren Grad und Form sich individuell auf die Rahmenbedingungen des Einsatzes anpassen lassen muss.

Auch die Forderung zur Berücksichtigung dynamischer Aspekte wird in diesem Beispiel unterstützt. In diesem Fall wurde der Montagevorgang in den Zwischenzuständen *Bauteil einzeln* und *Bauteil montiert* visualisiert. Am Bauteil können dynamische Prozesse wie Einstellmöglichkeiten (in diesem Beispiel) oder die Auswirkungen von Betriebsmitteln (in einem anderen Praxiseinsatz) analysiert werden.

Genauigkeitsthese: Die Genauigkeit der Systemkalibrierung muss bekannt, dokumentiert und nachvollziehbar sein. Im Falle dieser Untersuchung war eine Kontrolle durch einen Soll-

Ist-Vergleich des Bauteils ausreichend. Durch Referenzieren auf das Bauteilbezugssystem, dass auch dem Toleranzkonzept zu Grunde lag, sowie durch einen hohen Bauteilreifegrad, konnte eine hohe Ausrichtgenauigkeit erzielt werden. Der Soll-Ist-Vergleich zeigte damit eine sehr gute Überlagerung des digitalen Bauteils mit dem Realen in allen anderen Bereichen. Die identifizierte Abweichung an der analysierten Problemstelle ließ sich damit eindeutig der Bauteilfertigung zurechnen. Ein möglicher Fehler durch Kalibrierung oder Referenzierung konnte ausgeschlossen werden.

In anderen Fällen, z.B. bei einem niedrigeren Bauteilreifegrad, können aber andere, aufwendigere Verfahren zur Dokumentation der Messmittelfähigkeit notwendig sein. Daraus kann auch der Bedarf für eine präzisere Methode erwachsen, z.B. die im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagene Einbindung der Messunsicherheit in die Visualisierung oder eine präzise Rückführung im Sinne des Reverse Engineering. Die Erkenntnis aus der Praxis belegt damit auch die Notwendigkeit nach eindeutig definierten aber modularisierten Dokumentationsmethoden, welche in Umfang und Aufwand an die Zielsetzung und Anforderungen der jeweiligen Untersuchung angepasst werden können.

7.2 Einfluss von Toleranzen auf das Montagekonzept der A-Säulenverkleidung

Ausgangslage & Zielsetzung

Ausgangspunkt für dieses Praxisbeispiel waren Festlegungsaktivitäten zur Absicherung der Montage und der Bewertung ästhetischer Gesichtspunkte am Fugenverlauf zwischen Armaturen und A-Säuleninnenverkleidung. Ziel der Methode war die gezielte Adressierung des Toleranzaspekts „Umwelteinflüsse“ auf das Toleranzkonzept. Aufgrund des Montagekonzeptes, welches eine Verformung der flexiblen Innenverkleidung beinhaltet, war eine reine DMU Simulation des Einbaus nicht möglich. Die Untersuchungen an der Festlegungskarosserie verifizierten das Montagekonzept in Nominallage, verdeutlichten aber auch, dass das Konzept nicht viel Spielraum zuließ. Ziel der Folgeuntersuchung mit Mixed Reality war daher die Absicherung des Montagekonzeptes unter Berücksichtigung der entsprechenden Armaturentoleranzen.

Dieses Praxisbeispiel beschreibt damit den Anwendungsfall *Toleranzausgleichsmöglichkeiten (aus Montagesicht)* an der Schnittstellen *Geometriedaten inkl. Toleranzspezifikation* im Prozessschritt *Prozessabsicherung* (Analytische Phase, Abb. 6.5). Zum Einsatz kam das messarmbasierte MR System (Abb.4.2).

Durchführung

Aufgrund des benötigten physikalischen Kontaktes und der damit verbundenen Verformung zwischen Armatur und Verkleidungsteil beim Montagevorgang, schied die Mixed Reality Konzeptvalidierung mit einer digitalen Armatur in Toleranzlage am physischen Rohbau als Lösungsansatz aus. Deshalb wurde mit Hilfe von Mixed Reality die Armatur am Rohbau in entsprechenden maximalen Toleranzlagen digital eingeblendet. Die Extremlagen der digitalen Bauteile wurden durch eine Transformation um die entsprechenden Toleranzwerte erreicht. Dies ermöglichte eine einfache und schnelle Positionierung des physischen Cockpits in diesen Toleranzlagen durch Unterlegen mit Keilen und Unterlegscheiben an den Befestigungspunkten. Anschließend konnte der Montagevorgang der A-Säulenverkleidung und der Fugenverlauf mit einem physischen Verkleidungsteil analysiert werden.

Die Untersuchung fand an einer CFK-Festlegerkarosserie statt. Diese war mit entsprechenden Messmarken für den Einsatz von taktilen Messarmen vorbereitet worden, um MMU Methoden mit dem messarmbasierten System zu vereinfachen. Die Genauigkeit der Referenzierung wurde in Form eines überbestimmten Referenzierungsprozesses statistisch ermittelt und durch Überlagerung dieser Referenzgeometrien mit dem MR System visuell verifiziert. Es wurde keine Dokumentation mit MR benötigt.

Erkenntnisse

Der Mixed Mock-Up hat sich als hervorragendes Analysewerkzeug für Festlegungsaktivitäten bewährt [Gei12]. Findet der Einsatz von Mixed Reality auf der Grundlage der Konstruktionsdaten aus dem PDM System statt, kann hierbei nur die Nominalposition der Bauteile abgesichert werden. Besteht darüber hinaus die Möglichkeit über Trans-/Deformationen die maximalen Toleranzwerte mit in die Untersuchung einzubeziehen, kann die Qualität der Absicherung und der getroffenen Aussagen signifikant gesteigert werden; bei gleichbleibendem oder minimal gesteigertem Aufwand während der Datenaufbereitung.

Bewertung

Brückenthese: In diesem Beispiel ist der Unterschied zwischen rein digitaler bzw. physischer Vorgehensweise maximal. Ohne MR wäre hier an der physikalischen Festlegungskarosserie nur der Nominalfall abgesichert worden. Eine Betrachtung des Toleranzfalles hätte nur digital stattgefunden. Der Mixed Mock-Up bietet hier die Möglichkeit durch eine signifikante Steigerung der Aussagekraft von Festlegungsaktivitäten die Prozessqualität und Prozesssicherheit zu erhöhen. Damit kann eine frühe Reifegradsteigerung auch hinsichtlich der Montageprozesse gewährleistet werden.

Visualisierungsthese: In diesem Beispiel konnten die dynamischen Einstellmöglichkeiten

zur Montage des Nominalbauteils in Toleranzlage berücksichtigt werden. Bei einfachen eindimensionalen Montagetoleranzen, genügt es hierbei das digitale Nominalbauteil direkt im MR Programm entsprechend zu transformieren. Diese dynamische Betrachtungsweise ermöglicht es in diesem Beispiel, auf unkomplizierte Weise verschiedene Toleranzlagen schnell in einer Untersuchung abzusichern. Der große Mehrwert des Mixed Mock-Ups liegt hierbei in der Echtzeitanwendung.

Sollen hingegen Formtoleranzen abgesichert werden, mussten die entsprechenden Verformungen bisher bereits im Datenaufbereitungsprozess berücksichtigt werden. Entspricht der Absicherungsumfang einer hohen Anzahl an Varianten verschiedener Kombinationen von Form- und Lagetoleranzen, führt das zu einem erhöhten Vorbereitungsaufwand. In einem solchen Fall ist es hilfreich, wenn die Toleranzinformation getrennt von der Geometrie direkt von dem MR Programm gelesen und verarbeitet werden kann (Kap. 7.4).

In diesem Fall liegt die Anforderung an die Form der Visualisierung also nicht in der Objektgestalt, sondern in der Interaktionsmöglichkeit mit der Geometrie innerhalb des MR Systems. Die Bedeutung der Anpassung der Visualisierungsform der digitalen Inhalte im Sinne von Transparenz oder Farbe ist bereits Gegenstand von [Noe06, S.79ff]. Hier sei deshalb vor allem die Bedeutung der dynamischen Anpassung der digitalen Umfänge in Form und Lage hervorgehoben (S. 59).

Genauigkeitsthese: Die Genauigkeit des Systems muss bekannt, dokumentiert und nachvollziehbar sein. Nur auf dieser Grundlage konnte entschieden werden, ob die Voraussetzungen ausreichen, um die Fragestellung der Untersuchung hinreichend genau zu beantworten. Da ohne Mixed Reality die Toleranzbetrachtung gar nicht in den Untersuchungsumfang aufgenommen worden wäre, lässt sich hier auch schon mit relativ grober Systemgenauigkeit ein Mehrwert erzeugen. Wichtig ist hierbei, dass die Genauigkeit bekannt ist und entsprechend berücksichtigt werden kann.

7.3 Gezielte Mixed Mock-Up Methoden für Toleranzthemen am Beispiel Funktionsmaßkatalog

Ausgangslage & Zielsetzung

Als Zielfeld für die Überprüfung virtueller Lehren am Beispiel der Funktionsmaße diente die Kleinserienproduktion einer B-Fahrzeugphase (S. 7). Ziel der Methode war die gezielte Adressierung des Toleranzthemas „*Funktionsmaß*“. In einer Kleinserie wurden ca. 150

Fahrzeuge in einem Produktionszyklus aufgebaut, der der späteren Serienproduktion nachempfunden war.

Um eine Übersicht über die Qualität der Produktion zu bekommen, wurden die Rohbauten vor der Endmontage messtechnisch erfasst. Aufgrund der Komplexität und der Dauer der Messung konnte jedoch nur ein Drittel der Rohbauten auf der Messmaschine vermessen werden. Ziel der Visualisierung der Funktionsmaße mit Mixed Reality war eine statistische Ergänzung der messtechnischen Erfassung. Durch die flexible und schnelle Einsatzweise des MMU konnten die Untersuchungen direkt an der Produktionslinie stattfinden und Warte- oder Stillstandzeiten im Produktionsprozess nutzen. Ein Ausschleusen der Fahrzeuge in eine separate Messstation war nicht notwendig. Dadurch sollten qualitative Tendenzen früher erkannt werden. Zusammen mit den quantitativen Aussagen der messtechnisch erfassten Fahrzeuge sollte so eine umfassende und genaue Aussage zeitnah getroffen werden. Durch die Visualisierung sollten dabei auftretende Probleme analysiert und besser kommuniziert werden können.

Dieses Praxisbeispiel beschreibt damit den Anwendungsfall *virtuelle Lehre* an der Schnittstelle *Funktionsmaßkatalog* im Prozessschritt *Prozessabsicherung* (Analytische Phase, Abb. 6.5). Zum Einsatz kam das messarmbasierte MR System (Abb.4.2).

Die Fertigung und Montage der B-Fahrzeuge wurde dabei vom Prototypenbau des Zielwerkes vorgenommen. Dabei galt es, die Zusammenarbeit zwischen dem Toleranzmanagement am Entwicklungsstandort mit der Produktionsleitung, dem Toleranzmanagement und der Messtechnik im Werk zu koordinieren.

Durchführung

Im Funktionsmaßkatalog (S. 23) werden die Montagepunkte des Rohbaus zueinander toleriert. Dadurch werden die Montage sowie die Funktion der Anbauteile, z.B. Kotflügel, Türen oder Leuchten, sichergestellt. Jedes Funktionsmaß besteht aus einer Bezugsgeometrie, z.B. einer Bohrung, als Referenzpunkt und einer Toleranzspezifikation am zu bewertenden Montagepunkt (Abb. 7.4).

Auf Grundlage der Fahrzeugkonfiguration aus dem PDM System sowie des Funktionsmaßkatalogs als PDF wurden die digitalen Funktionsmaße für diesen Piloteinsatz von Hand konstruiert. Dazu wurde jeweils ein passgenauer Zylinder am Ort der Referenzbohrung generiert. Die Toleranzzone auf der Gegenseite wurde als rechteckiger Rahmen erzeugt. Die Höhe und Länge der Lehre entsprechen dabei den doppelten Toleranzwerten Δ_x , die Dicke des Rahmens dagegen entspricht der Systemgenauigkeit δ (Abb. 7.5). Die virtuellen Lehren und die Bezüge wurden als 3D Objekte erzeugt, um eine senkrechte Betrachtung während der Untersuchung zu garantieren.

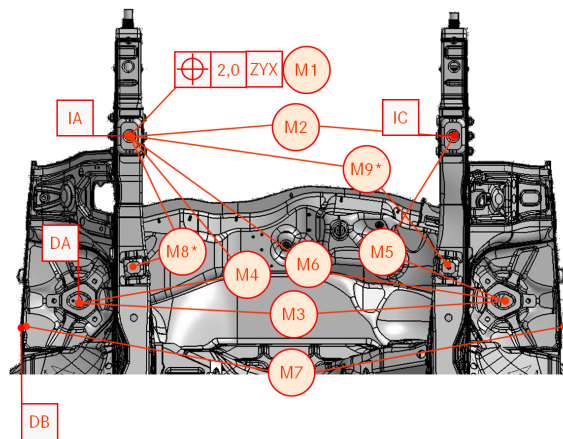


Bild 7.4: Spezifikation der Funktionsmaße (Quelle: Daimler AG)

Die digitale Toleranzzone und der digitale Bezug wurden im gleichen Datenknoten erzeugt. Im Mixed Reality Programm kann so durch eine Translation des digitalen Objektes "Funktionsmaß" die Referenzierung an der Bezugsbohrung hergestellt werden (Abb. 7.6). Dabei kann der Betrag um den das Objekt verschoben werden muss entweder gemessen oder durch visuellen Abgleich ermittelt werden.

Um einen erfolgreichen Einsatz in diesem Szenario zu garantieren, musste die eingesetzte Methodik schnell, effizient und hinreichend genau sein. Eine Prozessroutine für eine präzise Referenzierung auf den Rohbau war nötig. Dabei ist zu beachten, dass die Verknüpfung zwischen digitalem und physischem Bezug für jedes Funktionsmaß einzeln hergestellt werden musste. Die Visualisierung der Funktionsmaße musste eindeutig und leicht verständlich sein, um eine schnelle aber vollständige Überprüfung sowie eine effiziente und übersichtliche Dokumentation der Untersuchung zu gewährleisten.

Um die Vergleichbarkeit mit den Resultaten der Messtechnik zu gewährleisten, muss die Referenzierung des Mixed Reality Systems über die offiziellen Referenzpunkte des Toleranzkonzepts geschehen. Ein Einmessen auf das Fahrzeugreferenzsystem, Grundlage des Funktionsmaßkatalogs, war jedoch auf Grund der beschränkten Reichweite des Messarms nicht möglich. Daher wurde in Zusammenarbeit zwischen Toleranzmanagement und Messtechnik ein Unterreferenzsystem definiert.

Anschließend stand für zwei Tage ein Rohbau zur Verfügung. Die durchgeführten Tests sollten die Effizienz der gewährten Visualisierungsform und der definierten Methodik in Bezug auf das verfügbare Zeitfenster bestätigen. Darüber hinaus war dies die erste Möglichkeit Erfahrungen an einem Rohbau zu sammeln und mit den Experten im Werk

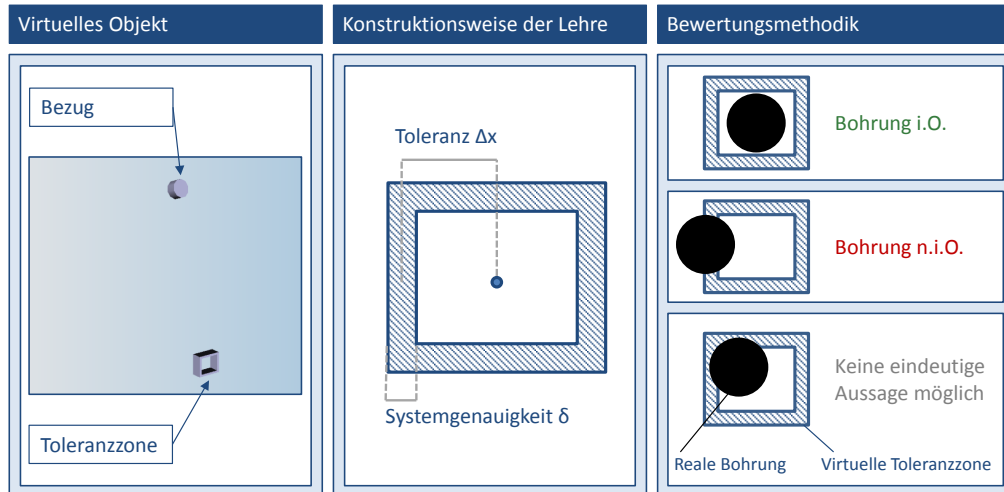


Bild 7.5: Konstruiertes Funktionsmaß als virtuelles Objekt; Spezifikation der virtuellen Lehre; Bewertungsmethodik

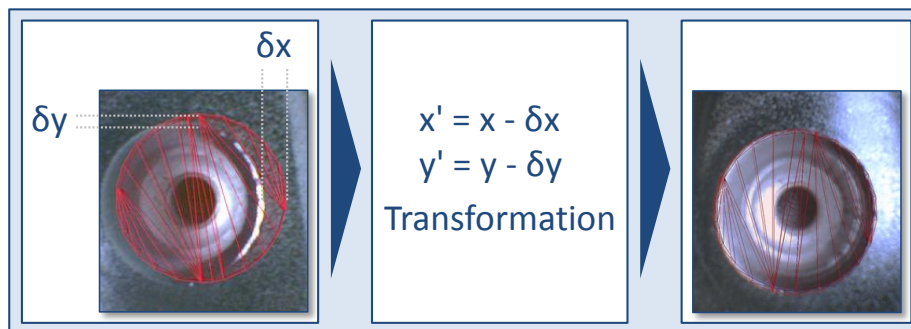


Bild 7.6: Visuelle Überprüfung der Referenzierung des Bezugs eines Funktionsmaßes durch eine Translation

zu diskutieren.

Beim eigentlichen Praxiseinsatz wurde der Messarm taktil referenziert. Anschließend wurden die durchnummerierten Bezugsstellen des Funktionsmaßkataloges in einem Soll-Ist-Vergleich abgesichert (Abb. 7.7). Die Untersuchung folgte dem Funktionsmaßkatalog als Ablaufprotokoll. Dabei wurde durch eine Transformation der Daten der Bezug referenziert (Abb. 7.6) und anschließend alle zu diesem Bezug gehörenden Toleranzzonen beurteilt und per Stillimage (Screenshot ohne Pose) dokumentiert.

Erkenntnisse

Die wichtigste Erkenntnis des Praxiseinsatzes ist die tragende Rolle des Bezugssystems für eine Visualisierung von Funktionsmaßen. Durch die im Toleranzkonzept zulässige Abweichung der gewählten Referenzpunkte des neu definierten Unterbezugssystems vom ursprünglichen Fahrzeugkoordinatensystem entsteht ein Winkelfehler zwischen dem digitalen und dem physischen Koordinatensystem. Auch wenn dieser in Absolutmaßen sehr klein ist, potenziert sich der Fehler über den großen Hebelarm der Funktionsmaße (1 - 1,5m) zu einer nicht vernachlässigbaren Größe. Die zulässigen Toleranzen sind jedoch netzparallel zum ursprünglichen Fahrzeugkoordinatensystem definiert. Durch die Verdrehung des Winkelfehlers verlieren die Toleranzangaben ihre Richtigkeit. Sie können also nicht einfach auf ein Unterbezugssystem übertagen werden. Es hat sich gezeigt, dass der Winkelfehler durch den Wechsel des Bezugssystems, von Fahrzeugkoordinaten auf ein durch den Messarm erreichbares Unterbezugssystems, zu groß ist, um verwertbare Aussagen treffen zu können.

Berücksichtigt man des Weiteren noch die Fehler der Referenzierung, der Systemkalibrierung und der Auflösungsgenauigkeit der Kamera, überschreiten die summierten Fehler die Größenordnung der einzelnen Funktionsmaße. Damit war für das gegebene Praxisszenario unter Nutzung des messarmbasierten MR Systems keine erfolgreiche Überprüfung der Funktionsmaße möglich. Möglichkeiten dieses Dilemma zu umgehen, bestehen in der engeren Verzahnung von Systemen und Methoden zwischen Mixed Reality und Messtechnik. So versprechen optische Trackingsysteme eine deutlich höhere Reichweite und damit die Erreichbarkeit der offiziellen Referenzsysteme.

Abgesehen von dieser messtechnischen Hürde wurden die erreichten Ergebnisse hinsichtlich Prozess und Qualität von allen Prozessbeteiligten sehr positiv aufgenommen. Das Potential zur Unterstützung der Analyse und Kommunikation von Funktionsmaßen in solchen Produktionsanläufen wurde von den zuständigen Experten bestätigt und eine Lösung der messtechnischen Herausforderungen wird angestrebt.

Der Einsatz von virtuellen Lehren durch Mixed Reality im Allgemeinen und zur Absiche-

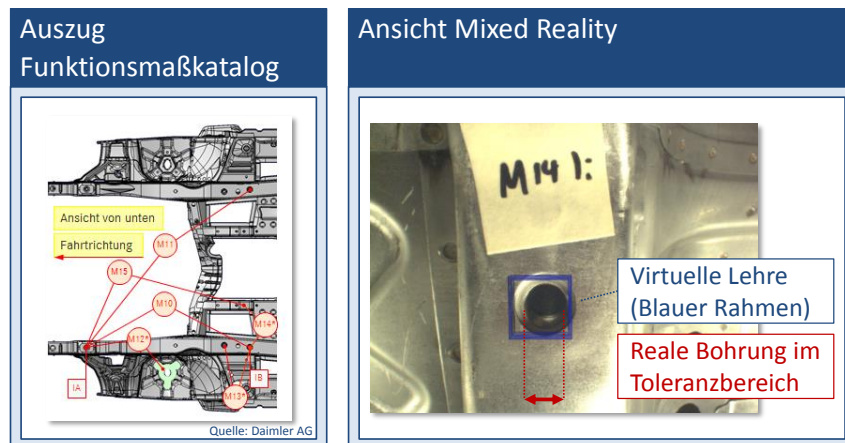


Bild 7.7: MMU Absicherung der Funktionsmaße

Die Sicherung von Funktionsmaßen im Speziellen ist also nur zulässig, wenn die Referenzierung auf die Hardware mit dem Bezugssystem der Tolerierung übereinstimmt. Darüber hinaus ist es absolut notwendig eine zuverlässige Aussage über die Systemgenauigkeit treffen zu können.

Für die korrekte Positionierung der virtuellen Funktionsmaße auf den realen Bezug hat sich eine rein visuelle Methodik als nicht zuverlässig genug erwiesen. Die Positionsgenauigkeit musste durch einen taktilen Messvorgang sichergestellt werden. Die Ergebnisse des Messvorgangs konnten die Translation des virtuellen Funktionsmaßes auf die korrekte Bezugsposition im Rahmen der Messgenauigkeit sicherstellen. Da bei dieser Vorgehensweise aber nur pro Bezug und nicht pro Funktionsmaß gemessen werden muss, lässt sich immer noch ein signifikanter Zeitvorteil erzielen.

Die gemessenen Zeiten für den Referenzierungsprozess (5-10 min) und die visuelle Überprüfung der Funktionsmaße (5-15 min pro Bezug) hat gezeigt, dass eine Überprüfung der relevanten Umfänge in 1-2 Stunden realistisch ist, wenn ein entsprechender systematischer Workflow in der Methode definiert ist. Damit hat sich die prognostizierte Flexibilität und Einsatzgeschwindigkeit der definierten Methodik im Praxisumfeld bewährt.

Bewertung

Brückenthese:

Auf den ersten Blick lässt sich der postulierte Bedarf zur Vermittlung zwischen digitaler und physischer Entwicklungsumgebung in diesem Beispiel vermissen. Durch die systematische Vermessung der gesamten Karosserie ist eine absolute und vollständige Vergleichbarkeit zwischen DMU und PMU garantiert. Darüber hinaus wird der Gesamtprozess statistisch

erfasst und damit in Sicherheit und Qualität abgesichert.

Dies trifft allerdings nur für das Drittel der Karossen zu, welches wirklich vermessen wird. Bei den übrigen Zweidritteln besteht eine absolute methodische Lücke zwischen digitaler und physischer Welt, die lediglich durch die Extrapolation der statistischen Erkenntnisse abgesichert wird. Vor allem in frühen Entwicklungsphasen sind aber statistisch signifikante Aussagen schwierig. Die frühzeitige Ergänzung um statistische Erkenntnisse durch die vorgestellte Methode erhöht die Prozesssicherheit. Durch die Reifegradsteigerung der Produkte und das frühzeitige Analysieren und Vermeiden von Prozessfehlern lassen sich Arbeitszeit und Kosten für Korrekturen oder Falschteile einsparen.

Die statistische Information, als Kommunikationsgrundlage zwischen Messtechnik, Toleranzmanagement im Werk und dem Entwicklungsstandort sowie der Produktion, wurde sehr positiv bewertet. Die grundsätzliche Vorgehensweise wurde damit unabhängig von den Herausforderungen bei der Referenzierung bestätigt. Der Lösungsansatz über andere Trackingverfahren zu einer erfolgreichen Methode zu kommen ist also vielversprechend, wenn die neuen Trackingverfahren eine hinreichend hohe Referenzierungsgenauigkeit garantieren können.

Nach Meinung der befragten Experten im Werk besteht kein Bedarf für die Ergänzung der Messberichte um eine visuelle Dokumentation durch MR. Für die Experten in den Entwicklungsbereichen wäre eine solche Dokumentation hingegen wünschenswert.

Visualisierungsthese: Die Visualisierung der virtuellen Lehre als dreidimensionales Objekt mit visualisierter Kalibrierungsgenauigkeit ermöglichte die schnelle und effektive Vorgehensweise. Das Referenzieren des Bezugs am physischen Objekt über den optischen Abgleich war jedoch nicht prozesssicher. Die Form der Visualisierung und der Grad der Abstraktion sind damit für den Erfolg der Methodik ausschlaggebend. Insbesondere bei zeitkritischen Einsätzen wie diesem kann die Form der Visualisierung ein methodisches und zielgerichtetes Vorgehen maßgeblich unterstützen. Um diese Art der Visualisierung in einem produktiven Einsatz effizient zu gestalten, ist aber eine automatisierte Form der Datenaufbereitung notwendig.

Genauigkeitsthese: Für den statistischen Abgleich der Funktionsmaße ist die Berücksichtigung der Kalibriergenauigkeit ausschlaggebend. Erst durch Einpflegen der Genauigkeit in die Visualisierungsform, kann der statistische Abgleich in der geforderten Schnelligkeit und Effektivität erfolgen. Dies setzt voraus, dass eine Kalibriermethodik existiert, mit der sich diese Genauigkeit zeitnah und präzise ermitteln lässt. Darüber hinaus erfordert dies einen automatisierten Datenaufbereitungsprozess, welcher die dynamische Einbindung und Anpassung der visualisierten Kalibriergenauigkeit ermöglicht.

Die Schwierigkeiten während des Praxiseinsatzes bezüglich des Referenzierungsprozesses untermauern die Bedeutung einer durchgängigen Vorgehensweise am Beispiel des Bezugssystems. Der Wechsel des Koordinatensystems ist mit entsprechenden Fehlern verbunden. Dies muss nicht immer zwingend, wie in diesem Fall, zum Abbruch des Einsatzes führen. Es muss aber immer im Rahmen der Gesamtgenauigkeit erfasst, beurteilt und bei weiterem Vorgehen dokumentiert werden. Die Erfahrung in diesem Einsatz unter Beteiligung vieler Experten hat gezeigt, dass dies in komplexen Systemen nicht trivial ist. Eine wohldefinierte Vorgehensweise sollte erstellt werden, um mögliche Herausforderungen diesbezüglich frühzeitig zu erfassen.

7.4 Fotorealistische Mixed Reality zur Bewertung der Anmutung am Beispiel Fugengewertung

Ausgangslage & Zielsetzung

Die Schwierigkeit bei der Bewertung von Fugen liegt darin, geeignete Bewertungskriterien zu finden. Fugen definieren sich nicht nur durch den Abstand zweier Bleche sowie den damit verbundenen Toleranzkriterien Keiligkeit und Versatz. Der subjektive Eindruck einer wertigen Anmutung entsteht auch über den Linienverlauf der Fugen, ihre Umgebung, den Radius der Fugenkante und den damit verbundenen Schattenwurf. Die Herausforderung für mathematisch getriebene Disziplinen wie das Toleranzmanagement besteht darin, die subjektive Funktion Anmutung in objektive Kriterien zu fassen und damit berechnen- und vergleichbar zu machen.

Das Virtual Reality Methodenspektrum bietet Möglichkeiten eine realistische Darstellung der Fugen inklusive Schatten und Reflektionen zu erzeugen [ZM10]. Die Praxis hat jedoch gezeigt, dass es ohne Expertenerfahrung schwierig ist, Fugen rein digital zu bewerten. Der dreidimensionale Bezug, sowohl hinsichtlich Betrachtungswinkel wie auch Entfernung zur Fugen, können nur schwer eingeschätzt werden. Interaktive 3D Medien wie Powerwall oder CAVE können hier unterstützen. Allerdings ist auch in diesen Medien Expertenwissen und Erfahrung zur richtigen Einschätzung und Bewertung nötig.

Die grundlegende Zielsetzung dieses Praxiseinsatzes bestand darin, durch Einsatz von Mixed Reality die Bewertung von digitalen Fugenkonzepten an physischen Fahrzeugen verfügbar zu machen. Damit ist der Betrachter und Entscheidungsträger in der Lage den Vergleich mit bekannten und haptisch erfassbaren, physischen Hardwareumfängen zu treffen. Ziel der Methode war die direkte Adressierung des Toleranzthemas „Funktion Anmutung“ sowie die Schaffung einer Kommunikationsplattform für die Belange des

Toleranzmanagements. Die Herausforderung des Einsatzes bestand darin, ein neues Mixed Reality System zu finden, welches eine realistische Darstellung des digitalen Umfangs inklusive Reflektionen und Schatten erlaubt. Zudem sollte der Systemsetup sicherstellen, dass ein gesamtes Fahrzeug betrachtet werden kann. Dieses Praxisbeispiel beschreibt damit den Anwendungsfall *Funktion Anmutung* an der Schnittstelle *Fugen- & Radienplan* im Prozessschritt *Definition der Anforderungen* in der konzeptionellen Phase des Toleranzmanagements.

Durchführung



Bild 7.8: Beurteilung des digitalen Fugenkonzepts mit realistischer MR am Tabletcomputer

Für die realistische Darstellung der digitalen Umfänge wurde die Software RTT DeltaGen ausgewählt [RTT]. Sie verfügt über ein Mixed Reality Plug-In (Realview) mit Markertracking. Das digitale Fahrzeug wurde so aufbereitet, dass die Fugenverläufe in Nominallage sowie minimale und maximaler Werte für Keiligkeit und Versatz dargestellt werden konnten. Um einen realistischen Eindruck zu gewinnen, wurde für die Darstellung ein Tabletcomputer gewählt (Window-to-the-world). In diesem Praxisbeispiel wurde ein Hardwareprototyp aus einem iPad 3 und einer externen Kamera eingesetzt. Der Prototyp war über ein USB-Kabel mit einem Laptop verbunden, da die Rechenleistung des Tablets nicht ausreichte. Das Kamerasignal wurde auf dem Laptop durch das RTT Plug-In „Realview“ mit dem virtuellen Rendering des Fahrzeugs überlagert. Durch die einfache Streaming Applikation „MirrorOp“ [Mir] konnte die Bildschirmausgabe des Laptops auf das iPad dupliziert werden. Dadurch entsteht für den Betrachter der Eindruck durch das iPad in die virtuelle Welt zu blicken und er ist direkt in der Lage, die digitale und die physische Fuge miteinander zu vergleichen (Abb. 7.8). Durch die Variantenschaltung der unterschiedlichen Toleranzfälle am digitalen Fahrzeug kann er auch das digitale Toleranzkonzept direkt am physischen Fahrzeug verstehen. Darüber hinaus konnten die Zahlenwerte an der jeweiligen Fuge als Flags visualisiert werden

(Abb. 7.9). Die Daten wurden als 3D Geometrie und im Programm anhand der hinterlegten Toleranzinformationen deformiert, um Keiligkeit und Versatz der Fugenverläufe zu erzeugen.



Bild 7.9: Darstellung der Toleranzwerte an zwei Messstellen als Flags auf iPad und Bildschirm

Das Markertracking ermöglichte es den Operationsraum auf das gesamte Fahrzeug auszuweiten. Wichtig für diesen Konzeptvergleich war, dass Abstand und Winkel im digitalen Szenario dem Betrachtungswinkel und -abstand zum physischen Objekt hinreichend genau entsprechen. Durch die Window-to-the-world Anwendung war hierbei eine relativ große Ungenauigkeit von bis zu 3mm akzeptabel, da kein direkter Soll-Ist-Abgleich zwischen Geometrien, sondern ein subjektiver Vergleich der Anmutung durchgeführt wurde.



Bild 7.10: Taktiles Vermessen der Marker am Fahrzeug

Eine weitere Herausforderung war die genaue Vermessung der Markerposition, um ein Springen zwischen zwei Markern zu vermeiden, wenn diese gleichzeitig im Bild aber nicht genau zu einander positioniert sind. Die Positionen der Marker zum Fahrzeug werden an das Programm durch eine xml-Datei übergeben. Darin muss die Transformation (Rotation & Translation) zwischen Marker- und Fahrzeugkoordinatensystem angegeben werden. Dazu wurden die Marker zunächst am Fahrzeug angebracht und mit dem Messarm im Fahrzeugkoordinatensystem vermessen (Abb. 7.10). Dabei wurden von jedem Marker die vier Eckpunkte ermittelt, so dass Lage und Orientierung im Raum berechnet werden konnten.

Der Realismus des eingesetzten Prototyps hinsichtlich Schatten und Reflexion war aufgrund der Hardwareperformance eingeschränkt. Die Rechenleistung des Laptops reichte nicht aus, um eine hochrealistische Darstellung mittels physikalisch korrekter Strahlengangbetrachtung (Raytracing) in der Bildwiederholungsrate der Kamera zu realisieren. Aus diesem Grund wurden in diesem Einsatz vorberechnete Schatten und eine Umgebungstextur der Werkstattumgebung eingesetzt. Die Software verfügt über einen Pause-Button, der das Bild anhalten soll, um die Berechnung des Raytracings in mehreren Iterationschleifen darstellen zu können. Leider war dieser aber in der verwendeten Softwareversion nicht funktionsfähig. Es bleibt zu hoffen, dass dieser Fehler in der nächsten Version behoben ist.

Erkenntnisse

Nach Vorstellung des Prototyps vor verschiedenen Expertengremien, haben diese ihre Einschätzung der Gesamtlösung (System und Methodik) in einem Fragebogen bewertet. Insgesamt wurden 11 Fragebögen beantwortet. Die befragten Experten waren dabei gleichmäßig verteilt über die Fachbereiche Toleranzmanagement (2), STRAK-Daten (3), Engineering (2) und IT (4). Angesichts der geringen Anzahl an Fragebögen ist eine statistisch-signifikante Auswertung nicht möglich, die Einschränkung der innerbetrieblichen Geheimhaltung lässt aber die Befragung größerer Expertenkreise kaum zu. Der Mehrwert der Befragung liegt deshalb klar in der hohen Qualifizierung sowie der mehrjährigen Erfahrung der Befragten auf dem Themengebiet „digitale Oberflächenbetrachtung“. Alle folgenden statistischen Angaben dienen allein dem Vollständigkeitsanspruch gegenüber dem Leser unter gleichzeitiger Anonymisierung der getroffenen Aussagen. Der verwendete Fragebogen findet sich im Anhang.

Alle Beteiligten können sich vorstellen, Entscheidungen bzgl. des Fugenkonzepts in Zukunft auf Grundlage der vorgestellten Mixed Reality Methode zu Treffen. Dabei haben zwei Experten jedoch Einschränkungen erhoben (Ankreuzoption: Ja, wenn...): Sie würden das System nur unter den Rahmenbedingungen eines sichergestellten stabilen

Hardwarebetriebs und der entsprechenden Verfügbarkeit an der Hardware nutzen. Laut Meinung der Experten ist der größte Nutzen des Tools dabei, dass es eine gemeinsame Diskussionsgrundlage bietet (73%) und dass es eine verbesserte Bewertungsgrundlage schafft (63%). Die Einschätzung der Entfernung und die Vergleichsmöglichkeit mit einer Vorgängerbaureihe (jeweils 36%) wird mehr Nutzen beigemessen als der Einschätzung der Winkel und der Vergleichsmöglichkeit mit Konkurrenzfahrzeugen (jeweils nur 18%). Keiner der Befragten widersprach der Aussage: Der Nutzen rechtfertigt den Aufwand für Anschaffung und Durchführung, wobei in der Abschätzung des Preises deutlich wurde, dass die Anwendung nicht mehr als 30.000 Euro kosten darf.

Die Qualität des Prototypen ist laut Meinung der Anwender akzeptabel, bietet aber noch Luft für Verbesserung. So wurden auf einer Skala im Notensystem (1=sehr gut, 5=ungenügend) die Bildstabilität mit 2,27, die Geschwindigkeit der Darstellung mit 2,36 und die Bewegungsfreiheit mit 2,45 bewertet. Die Bewertung des Gesamteindrucks der vorgestellten Lösung liegt jedoch bei 1,98. Daraus ist ersichtlich, dass die Methodik und das Potential des Systems besser bewertet wurden als die technische Umsetzung im Prototypen. Hinsichtlich des Einsatzspektrums ist interessant, dass die befragten Anwender die Anwendungsszenarien mit Markern am Arbeitsplatz oder im Rahmen einer Gruppendiskussion in einem Besprechungszimmer mit der herkömmlichen Lösung von gerenderten Bildern gleichsetzten (Note 2,7). Das Anwendungsszenario mit einem Vergleichsfahrzeug in der Werkstatt wird jedoch besser bewertet (Note 2,2).

Nach Meinung des Autors hat der praktische Einsatz des Prototypen gezeigt, dass der Bedarf eines Pause-Buttons absolut notwendig ist. Zum einen ist gerade hinsichtlich des großen kommunikativen Nutzen ein Einfrieren der aktuellen Ansicht für eine folgende Gruppendiskussion von großem Nutzen. Zum anderen hat sich gezeigt, dass für eine realistische Darstellung von Chromteilen und transparenten Bauteilen (v.a. Scheinwerfer) ein Rendering mit Raytracing unabdingbar ist. Durch Anhalten der Ansicht könnte dem Renderer genug Zeit zugestanden werden die notwendigen Iterationsschleifen für ein entsprechendes Raytracing zu durchlaufen. Im dynamischen Anwendungsmodus mit vorgerechneten Schatten und Reflektionen könnte ein Großteil der Diskussion stattfinden. Bei Bedarf könnte das Bild aber eingefroren und entsprechend realistisch berechnet werden. Um den geforderten kommunikativen Aspekt optimal zu erfüllen ist außerdem eine gleichzeitige Ausgabe auf dem iPad und einem beigestellten Monitor von Nutzen.

Die halbmobile, kabelgebundene Lösung stellt eine akzeptable Einschränkung dar. Technisch ist auch eine kabellose Variante mit Streaming über W-LAN und unter Nutzung einer tabletinternen Kamera möglich. Angesichts mangelnder Softwareimplementation und den hohen sicherheitstechnischen Hürden in geschlossenen Firmennetzwerken, ist eine

solche Lösung aber nicht im Rahmen eines realistischen finanziellen Konzepts (<30.000 €) umsetzbar.

Bewertung

Brückenthese:

In der Kommunikation entlang des Entwicklungsprozesses entsteht bei Fugen zwischen digitaler und physischer Welt ein Wechsel zwischen Medien und Kommunikationsmitteln. Das Fugenkonzept wird auf Grundlage digitaler Darstellungen entschieden und definiert. Diese digitale Grundlage umfasst hierbei nicht nur die realistische Darstellung mit VR Methoden, sondern auch die Simulation der entsprechenden Toleranzwirkungen. Ab Verfügbarkeit von Hardware verlagert sich die Diskussion an die physischen Prototypen. Gerade in kritischen Designentscheidungen ist das Vertrauen in digitale Methoden noch nicht vollständig vorhanden. Die Herstellung entsprechender physischer Kontrollmodelle vollständiger Fahrzeuge oder kritischer Teilaufbauten ist jedoch sehr kostenintensiv. Darüber hinaus können Entscheidungen, die an physische Aufbauten verschoben werden, erst zu späteren Entwicklungszeitpunkten getroffen werden. Der Sprung von der digitalen zur physischen Diskussionsgrundlage stellt den eigentlichen Bruch dar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zwischen den Entscheidungen am digitalen und am physischen Fahrzeug eine zeitliche Differenz entlang des Entwicklungsprozesses besteht. Es ist also nicht immer einfach, die digitale Entscheidungsgrundlage und deren Konsequenzen mit neuen Erkenntnissen am physischen Modell zu vergleichen. Mit der Verlagerung in die Produktion ist darüber hinaus oft ein Standortwechsel gegeben, so dass der Vergleich zwischen getroffenen Entscheidungen und fertigen Produkten in Prototypenfertigung oder Serienanlauf oft auch mit einem Ortswechsel verbunden ist. Aus Sicht der befragten Experten besteht hier der Bedarf zu mehr Durchgängigkeit und Vergleichbarkeit innerhalb der Diskussions- und Entscheidungsgrundlage. Mixed Reality bietet hier ein flexibles und effizientes Synchronisationsmedium - sowohl zwischen Personenkreisen und unterschiedlichen Orten wie auch zeitlich entlang des Entwicklungsprozesses.

Wie die Befragung gezeigt hat, liegt der größte Nutzen der Anwendung in der Schaffung einer verbesserten Entscheidungs- und Kommunikationsgrundlage. Damit erhöht sich die Prozessqualität und -durchgängigkeit. Eine verbesserte Kommunikationsplattform führt aber zu effizienteren Prozessen und damit letztendlich zu Zeit- und Kosteneinsparungen durch frühzeitige Fehlervermeidung sowie die Unterdrückung unnötiger Iterationsschleifen.

Visualisierungsthese:

Der Einsatz von Mixed Reality auf dem Themenfeld Fugen und Oberflächendesign sowie der Funktion „Anmutung“ hinsichtlich des Toleranzmanagements unterstützt explizit

die Forderung der Visualisierungsthese nach neuen Visualisierungskonzepten in Form einer engeren Verzahnung mit VR Methoden. Dabei wird ersichtlich, dass sich dies nicht nur auf den visuellen Anteil einer möglichst realistischen MR Darstellung beschränkt. Vielmehr ist der VR Prozess in diesem Themenfeld in besonderem Maße eine wichtige Entscheidungsgrundlage. Um die postulierte durchgängige Überbrückung von DMU zu PMU zu schaffen, müssen die Darstellungen und zugrunde liegenden digitalen Konzepte vergleichbar sein - ähnlich wie im Themenfeld Engineering die MR Darstellung Ansichten wie Schnitte oder Transparenz aus der digitalen Konstruktionssoftware übernimmt. Dies führt nicht nur zu der geforderten Vergleichbarkeit, sondern bietet dem Anwender auch die vertraute Beurteilungsumgebung und erhöht damit die Entscheidungsqualität und die Nutzerakzeptanz.

Trotz der Konzentration auf die subjektiven Aspekte einer hoch-realistischen Darstellungsform, zeigt auch dieser Anwendungsfall, dass hinsichtlich komplexer Toleranzkonzepte eine abstrahierte Darstellung notwendig ist. Die Reduktion des Informationsgehalts geschieht durch die Konzentration auf die Extremtoleranzlagen. Der User kann sich allein auf die visuelle Wirkung konzentrieren, ohne die mathematischen Zusammenhänge diskutieren zu müssen. Das Toleranzmanagement fordert aber auch die Vergleichbarkeit zum physischen Fahrzeug. Um diese gewährleisten zu können, müssen die Zahlenwerte verfügbar gemacht und mit Realmessungen verglichen werden. Die Darstellung durch Flags an der entsprechenden Messstelle stellt gegenüber dem komplizierten Fugenplan eine einfache und übersichtliche Variante dar. In der Prototypenlösung wurden diese Flags jedoch noch manuell erstellt, was einen entsprechenden Aufwand und eine potentielle Fehlerquelle bedeutet. Eine automatisierte Umsetzung im Rahmen der Softwareschnittstelle vom Toleranzsimulationsprogramm zur VR Software ist notwendig.

Genauigkeitsthese:

Dieser Anwendungsfall verdeutlicht, dass die Genauigkeitsdiskussion hinsichtlich des Einsatzes von Mixed Reality Systemen im Toleranzmanagement immer im Sinne der Vergleichbarkeit geführt werden muss. Die im prototypischen Einsatz erreichte Genauigkeit betrug teilweise einige Millimeter. Darüber hinaus war die Abweichung von Marker zu Marker unterschiedlich. Eine objektive Vergleichbarkeit im Sinne der Messmittelfähigkeit kann somit nicht garantiert werden. Deshalb wurde auch auf die direkte Implementierung einer Messfunktion in die MR Anwendung verzichtet. Für die subjektive Vergleichbarkeit in diesem Anwendungsfall ist vielmehr von Bedeutung, dass der Anwender in der Lage ist, den subjektiven Eindruck hinsichtlich Entfernung und Winkel realistisch beurteilen zu können. Dafür ist die erreichte Genauigkeit hinreichend und es ist auch nicht erforderlich diese präzise zu bestimmen. Aus dem gleichem Grund entfällt eine eigentlich notwendige

Kalibrierung der Sichtlinie Betrachter-iPad-Fahrzeug.

Ein wichtiger Schritt hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den theoretischen Toleranzkonzepten ist aber die Anzeige der theoretischen Zahlenwerte über Flags an den entsprechenden Messstellen. Dadurch wird die präzise Vergleichbarkeit im Rahmen des bisherigen Messprozesses über ein Laser-Gauge-Messgerät in den Prozess eingebunden. Das Tool schlägt damit nicht nur die Brücke zwischen digitaler und physischer Welt sondern auch zwischen subjektivem und objektivem Vergleich.

7.5 Weitere Erkenntnisse aus der Praxis

In diesem Kapitel werden weitere, wichtige Erkenntnisse aus den praktischen Erfahrungen dieser Dissertation kurz und prägnant vorgestellt. Aus Platzgründen wird auf eine vollständige Beleuchtung der Hintergründe und Implikationen verzichtet, da diese den bereits vorgestellten Beispielen ähneln.

Toleranzausgleich Betriebsmittel: In den bisher betrachteten Beispielen wurde erläutert, wie mit Hilfe virtueller Lehren Bauteiltoleranzen abgesichert werden können. Dabei wird kontrolliert, ob sich das zu beurteilende, physische Merkmal innerhalb der virtuellen Lehre befindet. In einem anderen Praxiseinsatz wurde die virtuelle Lehre dazu eingesetzt, eine Betriebsmittelabnahme zu unterstützen. Das Betriebsmittel sollte in der Lage sein, die Bauteiltoleranzen beim Fügeprozess auszugleichen. Dementsprechend muss in einem solchen Fall sichergestellt werden, dass sich die physische Aufnahme des Betriebsmittels in alle Dimensionen mindestens bis zum Rand der virtuellen Lehre bewegen lässt. Da es sich hierbei um einen dynamischen Vorgang handelt, unterstützt die Kombination aus manueller Bewegung der Betriebsmittelteile und visuellem Abgleich mittels MR, ein vereinfachtes Verständnis der Zusammenhänge. Im Beispieleinsatz wurde so schnell eine Diskrepanz zwischen kreisförmiger Ausgleichsbewegung und rechteckiger Toleranzzone erkannt. Der Einsatz hat auch gezeigt, dass gerade bei komplexen Betriebsmitteln eine eindeutige, visuelle Darstellung zur Beurteilung sowie ein geführter Workflow in der Software zur Garantie der Vollständigkeit nötig sind.

Dynamische Analysen: Bei der Analyse eines Frontendmoduls wurde die wirksame Analyse komplexer Toleranzzusammenhänge im Produktionsvorgang sowie die Unterstützung des Toleranzmanagements bei der Analyse flexibler Bauteile mittels MMU untersucht. Bei dem Frontend als flexiblem Kunststoffteil wurden Toleranzen im Produktionsanlauf nicht eingehalten. Mittels MR wurden die einzelnen Fügeschritte in den Produktionsstationen mittels Soll-Ist-Abgleich analysiert. Dabei zeigte sich, dass dem Fehler eine solch komplexe

Kausalkette zugrunde lag, dass selbst langjährige Experten auf diesem Gebiet große Schwierigkeiten hatten den Fehler zu finden. Mittels MMU konnte die Verformung des Bauteils durch überbestimmte Aufnahme schnell und effizient ermittelt werden.

Prozessimplementierung: Die Schwierigkeiten hinsichtlich Erreichbarkeit und Durchgängigkeit von Bezugssystemen während der beschriebenen Praxisbeispiele hat zu der Erkenntnis geführt, dass die Anforderungen und Möglichkeiten der MMU Methoden frühzeitig in Toleranzdiskussionen beachtet werden sollen. Als Konsequenz werden diese Aspekte bei aktuellen Entwicklungsprojekten bereits in der konzeptionellen Phase mit den beteiligten Experten diskutiert und fließen in die zu erstellenden Bezugs- und Messkonzepte mit ein. Aus Geheimhaltungsgründen kann über diese aktuellen Entwicklungen jedoch noch nicht detaillierter berichtet werden.

Synergieeffekte: Im Rahmen dieser Dissertation wurden auch MMU Projekte und Abschlussarbeiten in anderen Konzernbereichen durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass sich viele Erkenntnisse dieser Dissertation auf neue Gebiete übertragen lassen. Handelt es sich dabei ebenfalls um mathematische (Simulations-) Disziplinen, betrifft dies vor allem die Aspekte, Vergleichbarkeit und Bezugssysteme. So konnten die gewonnenen Erkenntnisse dieser Dissertation auf einen MMU Einsatz bei der Verifikation und Analyse im Crash-Versuch übertragen werden. Besonders das Referenzieren auf deformierte Fahrzeuge nach dem Versuch sowie die vorgestellte Methode zur Schweißpunkt Betrachtung standen dabei im Mittelpunkt [LG13]. Dies zeigt auch das große Potential einer breiten Mixed-Mock-Up Entwicklungsplattform als Kommunikationsplattform für Toleranzaspekte.

Wissensmanagement: Die vorliegende Arbeit setzte auf die vorangegangenen Arbeiten [LG11] und [Gei12] auf. Von besonderer Bedeutung waren dabei die entwickelten Modelle zur Implementierung des MMU in der Automobilindustrie aus Sicht des Wissensmanagements. Auch die vorliegende Dissertation kann dabei als gezielte Methode verstanden werden, den MMU im Konzern zu verbreitern und zu verankern [LG13] und wurde im Sinne dieses Konzepts angelegt und strukturiert.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, wie die aktuelle und zukünftige Entwicklung der Automobilindustrie von Internationalisierung, Individualisierung und Innovationsdruck geprägt ist (Kap. 2). Den daraus erwachsenden Herausforderungen kann nur mit durchgängigen Ansätzen und Strategien sowie einer Konzentration auf die Wertschöpfungskette begegnet werden. Die Ergebnisse dieser Entwicklung (z.B. Modulstrategie, globale Produktionsstrukturen, ...) erhöhen die Bedeutung von konzerninternem Prozesswissen und integrierenden Abstimmungs- und Kommunikationsplattformen. Es erwächst auch der Bedarf nach flexiblen und skalierbaren Prozessen. Im Entwicklungsprozess prägt die Digitalisierung der Prozesse und Methoden diesen Wandel. Dabei wurde der Digital Mock-Up als zweite Entwicklungsplattform neben dem Physical Mock-Up im Entwicklungsprozess etabliert.

Toleranzen bilden im modernen Entwicklungs- und Produktionsprozess einen wichtigen Stellhebel bezüglich Kosten und Qualität. Die heute angewandte prozessorientierte Tolerierung benötigt einen durchgängigen Ansatz. Dies führte zur Schaffung eines eigenständigen Toleranzmanagements (Kap. 3). Die Erfolgsfaktoren liegen dabei in einer vollständigen Integration in den Entwicklungsprozess und einer durchgängigen Vorgehensweise zur Analyse und Kommunikation aller Toleranzaspekte. Ein wichtiger Baustein des Toleranzmanagements zur Sicherstellung des Qualitätsanspruchs ist die Zusammenarbeit mit der Qualitätssicherung (Messtechnik) unter festdefinierten Standards. Aus diesen Anforderungen wurde abgeleitet, dass sich die Aufgabe des Toleranzmanagements in einen analytischen, einen kommunikativen und einen integrativen Anteil gliedern lässt.

Virtual Reality und Mixed Reality wurden als wichtige Bestandteile des Digital Mock-Ups vorgestellt (Kap. 4). Mixed Reality erhöht durch die Synchronisation zwischen DMU und PMU die Prozessdurchgängigkeit. Durch die Kombination von Mixed Reality mit Reverse Engineering Methoden wurde der Mixed Mock-Up (MMU) erschaffen, welcher das Spektrum der Entwicklungsplattformen vervollständigt. MMU Methoden

sind flexibel, kommunikativ und integrativ. Ihr Einsatz hat sich im Automobilbau in den Handlungsfeldern „Festlegung“, „Konzeptabsicherung“, „Hardwareabnahme“ und „Problempunktanalyse“ bewährt [LG11].

Die Konzeption neuer MMU Methoden ist eine komplexe Herausforderung bei der es eine Vielzahl an technologischen und methodischen Fragestellungen zu berücksichtigen gilt. Um dieser Herausforderung strukturiert zu begegnen wurde in Kapitel 6.1 ein Klassifizierungsschema (Ontologie) entwickelt, welches ermöglicht die elementaren Bestandteile des MMU im Produktentwicklungsprozess mit den wichtigen Fragen bei der Konzeption neuer MMU Anwendungen zu verknüpfen. Anschließend wurde dieses Verfahren auf das konkrete Anwendungsfeld *Toleranzmanagement* angewandt (Kap. 6.2):

Wird eine neue MMU Methode entwickelt, sollten zuerst die Frage nach möglichen Betrachtungsobjekten durch Identifikation der Schnittstellen zwischen DMU und PMU beantwortet werden. Im Toleranzmanagement führt diese Betrachtung des Übergangs DMU-PMU zur Identifikation von fünf Schnittstellen (Konstruktionszeichnung, Spann- & Fixierkonzept, Referenzierungskonzept, Funktionsmaßkatalog und Fugen- & Radienplan). Zur Eingliederung der neuen Methoden in den PEP wurden die zeitlichen Berührungspunkte zwischen DMU und PMU im standardisierten Tolerierungsprozess identifiziert und eine Differenzierung zwischen konzeptionellen und verifizierenden Prozessschritten im MMU des Toleranzmanagements vorgenommen. Entsprechend der Zielsetzung möglicher MMU Untersuchungen wurde erkannt, dass es sowohl zielführend ist Toleranzaspekte konsequent in bestehenden MMU Methoden nutzbar zu machen als auch gezielt neue MMU Methoden für Toleranzthemen zu entwickeln. Darüber hinaus kann der MMU als Kommunikationsplattform eingesetzt werden, um Ergebnisse des Toleranzprozesses zu kommunizieren. Anschließend wurden toleranzspezifische Besonderheiten bei der Ausgestaltung (Kap. 6.2.4) hervorgehoben und die Wahl der Visualisierungsform (Kap. 6.2.5) entlang des Funktionsbegriffs im Toleranzmanagement charakterisiert.

Durch eine Prozessanalyse und intensive Recherche wurden die aktuellen Herausforderungen im Toleranzmanagement identifiziert und kategorisiert. Es wurde aufgezeigt, wie diesen Herausforderungen mit dem vorgestellten MMU Methodenspektrum begegnet werden kann. Aus der engen Verzahnung zwischen Messtechnik und Toleranzmanagement erwachsen besondere Ansprüche für neu entwickelte MMU Methoden. Die Implikationen für die MMU Methoden und Systeme wurden abgeleitet. Kapitel 6.3.3 zeigt auf wie diesen Herausforderungen in den Themenfelder Kalibrierung, Registrierung, Methodik und Systemkonfiguration begegnet werden muss.

In Kapitel 6.4 wurde ein Bewertungskonzept erarbeitet, mit Hilfe dessen eine Verifizierung der Hypothesen an konkreten Praxisbeispielen vorgenommen wurde. Kapitel 7

stellt ausgewählte Praxisbeispiele vor, in denen die erarbeiteten MMU Methoden im Toleranzmanagement zur Anwendung kamen. Dabei wurde sowohl auf die gewonnenen Erkenntnisse als auch auf die Bewertung der Hypothesen im Sinne dieser Arbeit eingegangen. Im Folgenden werden zunächst die gewonnenen Erkenntnisse entlang der Aufgabenfelder des Toleranzmanagements und anschließend die Bewertung der Hypothesen zusammengefasst.

In der *analytischen Aufgabe* ist ein klarer Bedarf für MMU Methoden erkennbar. Der intuitive Zugang zu MMU Methoden erlaubt einen vereinfachten Zugang zu komplexen Sachverhalten. Dynamische Prozesse können intuitiver analysiert werden. Die Verzahnung mit bestehenden MMU Methoden erweitert das Analysespektrum des Toleranzmanagements. Die Flexibilität und Mobilität von MMU Systemen und der vereinfachte Erkenntnisgewinn erweitern das Methodenspektrum, ermöglichen damit frühzeitige Erkenntnisse und das schnellere Reagieren auf solche. Dies führt zu einer Erhöhung von Prozessqualität und -sicherheit.

Hinsichtlich der analytischen Aufgabe ist eine Standardisierung zwischen MMU- und Messprozessen mit besonderer Bedeutung des Bezugssystems gefordert. Die Messmittelfähigkeit muss im Gesamtprozess immer betrachtet werden. Der MMU kann hier auch den Bedarf nach Dokumentation und Kommunikation der Analyseergebnisse unterstützen.

In der *integrativen Aufgabe*, zeigt sich, dass nur bei Verzahnung von MMU und Toleranzmanagement das volle Potential zur Prozessdurchgängigkeit ausgeschöpft wird. Besonders die Einfachheit und Flexibilität von MMU Methoden erhöht die situationsgerechte Zusammenarbeit mit anderen Abteilungen. Darüber hinaus ermöglicht der MMU hier ein hohes Potential an Synergien zu anderen Bereichen.

In der *kommunikativen Aufgabe* zeigt sich der MMU als exzellente Kommunikationsplattform. Der intuitive Zugang der Visualisierung fördert Verständnis und Bereitschaft gegenüber den abstrakten und komplexen Sachverhalten des Toleranzmanagements. Dabei hat sich die postulierte Bedeutung der Visualisierung im Praxiseinsatz bewahrheitet. Ein richtiges Maß an Abstraktion und die Einbeziehung von Metainformationen (z.B. farbliche Kennzeichnung) haben sich zur Schaffung eines eindeutigen Beurteilungskriteriums bewährt.

Die grundlegenden Annahmen zur Verzahnung von MMU und Toleranzmanagement dieser Arbeit spiegeln sich in den formulierten Arbeitshypothesen wider. Aus der Verifikation durch den praktischen Teil dieser Arbeit lässt sich folgendes Fazit ziehen:

Brückenthese: Die Verzahnung von digitaler und physischer Entwicklungswelt durch MMU Methoden im Toleranzmanagement erhöht die Prozessqualität und -sicherheit

und bietet eine Kommunikationsplattform. Anhand der gezeigten Praxisbeispiele konnte der Bedarf zur Synchronisation zwischen DMU und PMU nachgewiesen werden. Durch gezielten Einsatz von Bausteinen aus dem breiten Methodenbaukasten zur Adressierung aktueller Herausforderungen im Toleranzmanagement konnten Prozesssicherheit und -qualität erhöht werden. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, wie der MMU, auch durch Synergien in andere Fachbereiche, die kommunikative und integrative Aufgabe des Toleranzmanagements unterstützen kann.

Visualisierungsthese: Die Wirksamkeit von MMU Methoden hängt stark von der gewählten Visualisierungsplattform ab. Abstraktion und ästhetischen Funktionen im Toleranzmanagement muss hierbei mit neuen Methoden begegnet werden. Es konnte gezeigt werden, dass erst durch eine geeignete Wahl der Visualisierungsform und -methodik das geforderte eindeutige Bewertungskriterium erzeugt wird. Dies hatte auch einen erheblichen Einfluss auf Zuverlässigkeit und Vollständigkeit sowie die zeitliche Gestaltung der MMU Analysen. Daraus erwächst die Forderung nach einem MMU System, welches eine zielgerichtete, individuelle Gestaltung und Manipulation der digitalen Inhalte begünstigt. Das große Potential des MMU durch Echtzeitfähigkeit die Analyse komplexer, dynamischer Vorgänge zu betrachten, hat sich im Toleranzmanagement bei komplexen Toleranzketten (z.B. Funktionsmaß) oder der Analyse flexibler Bauteile (z.B. Frontendmodul) bewährt.

Genauigkeitsthese: Die Vergleichbarkeit im Toleranzmanagement fordert eine Reflektion und Absicherung messtechnischer Aspekte in der Kalibrierung, der Messgenauigkeit und der Dokumentation. Hierbei müssen die Genauigkeitsansprüche jeder MMU Analyse einzeln geprüft und erfüllt werden. Es gilt darüber hinaus die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen MMU Analysen zu garantieren. Den Schwierigkeiten und Herausforderungen dieser Aufgaben wurden in dieser Arbeit Lösungswege entgegengestellt. Die Praxisbeispiele zeigen auf, dass sich hierbei keine einfache oder pauschale Lösung entwickeln lässt. Vielmehr muss bei jedem einzelnen Einsatzszenario Aufwand und Nutzen miteinander abgewogen werden. Deshalb ist es auch hier wichtig, eine breite Palette an Methoden bereitzustellen, um die Vergleichbarkeit und Genauigkeitsansprüche in jeder einzelnen Untersuchung erfüllen und dokumentieren zu können.

8.2 Ausblick

Die Praxisbeispiele haben dabei auch gezeigt, dass für einen flächendeckenden, operativen Einsatz des MMU im Toleranzmanagement noch folgende Herausforderungen erfüllt werden müssen:

Automatisierung: In vielen vorgestellten Beispielen wurden die digitalen Inhalte aufwendig per Hand konstruiert. Im Prototypenbau kommt der MMU inzwischen täglich zum Einsatz. Um auch im Toleranzmanagement eine solche Untersuchungsfrequenz erreichen zu können, müssen die digitalen Inhalte automatisiert generiert werden können (z.B.: Schweißpunkte aus Excelliste). Voraussetzung hierfür ist jedoch eine entsprechende Dokumentation der Toleranzinformation in den Metadaten der Geometrien im PDM-System.

Präzision: Es konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass der MMU bereits mit heute erreichbaren, groben Genauigkeiten einen erheblichen Mehrwert in mathematischen und präzisen Disziplinen wie dem Toleranzmanagement erreichen kann, wenn dies bei der Konstruktion der digitalen Inhalte und der methodischen Vorgehensweise entsprechend berücksichtigt wird. Die Aussagekraft des MMU im Toleranzmanagement ließe sich jedoch erheblich erhöhen, wenn sich die Genauigkeiten der verwendeten Trackingsysteme und Kalibrierverfahren denen der Messtechnik angleichen.

Mobilität: Bereits heute deutet sich mit der technologischen Entwicklung eine Verbreiterung des MMU auf mobile Endgeräte und optische Trackingverfahren an. Bei entsprechender Präzision ist dies ein vielversprechender Ansatz die Reichweitenproblematik der hier vorgestellten Praxisbeispiele einfach in den Griff zu bekommen. Darüber hinaus versprechen solche hochmobilen Systeme, eine Erhöhung der Usability und Flexibilität. Daraus kann eine große Verbreiterung des MMU Nutzerspektrums erwachsen. Wird hierbei auch eine systematische Berücksichtigung der vorgestellten Toleranzaspekte ermöglicht, kann dies erheblich zur integrativen und kommunikativen Aufgabe des Toleranzmanagements beitragen, ein prozess- und konzernübergreifendes Verständnis für Ansprüche und Konsequenzen von Toleranzthemen zu erzeugen.

Im Folgenden soll aufgezeigt werden welche Lösungsansätze sich bereits hinsichtlich der identifizierten Weiterentwicklungspotentiale Automatisierung, Präzision und Mobilität abzeichnen.

Ein vielversprechender Ansatz besteht in der Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse dieser Dissertation zur Etablierung des MMU in der Messtechnik. Auch die klassische Messtechnik hat einen analytischen und einen kommunikativen Aufgabenbereich. Durch Bestücken von messtechnischen Geräten wie Messmaschinen mit Kameras, könnte die strikte Trennung zwischen MMU und taktiler Messtechnik aufgehoben werden. Die taktil gewonnenen Erkenntnisse könnten durch die visuelle MMU Dokumentation interpretierbar kommuniziert werden und der visuelle Soll-Ist-Abgleich könnte die Identifikation zu messender Punkte erleichtern (Problemstellenanalyse).

Bestehende Systeme der optischen Messtechnik zeigen ein hohes Potential, um den beschriebenen Herausforderungen hinsichtlich Reichweite und Genauigkeit zu begeg-

nen. Bisher sind diese Verfahren technisch noch nicht in der Lage in Echtzeitsystemen eingesetzt zu werden (z.B. Bündelblockausgleich). Eine Lösung dieser technischen Herausforderung könnte MMU Methoden auf bestehenden optischen Systemen ermöglichen. Die erreichbaren Genauigkeiten und methodischen Vorgehensweisen zwischen Messtechnik und MMU wären dann absolut vergleichbar.

Die rasante technologische Entwicklung im Bereich Augmented Reality auf mobilen Endgeräten, vor allem im Consumer Bereich, wird in den kommenden Jahren zu einem großen Sprung in verfügbarer Technik und Nutzerakzeptanz führen. Eine Verbreitung der Technologie ist vor allem unter dem Gesichtspunkt der methodischen Integration von Toleranzaspekten in bisherigen MMU Methoden wichtiger Stellhebel, um die integrative Aufgabe des Toleranzmanagements zu unterstützen.

Wichtigster Stellhebel zur Automatisierung der Datenaufbereitung ist die konstante Dokumentation der Toleranzthemen in den Metadaten der digitalen Geometrien sowie eine strukturierte Verknüpfung im PDM System. Erste Ansätze hierzu sind erkennbar. Ein Beispiel für das große Potential solcher Ansätze ist auch die im Rahmen dieser Dissertation verfeinerten Methoden zur Verknüpfung von Fugenplan und HighEnd-Visualisierungen.

Studentische Arbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation wurden folgende studentische Arbeiten betreut:

Abschlussarbeiten:

Batchelorarbeit Maximilian von Beyer: *Mixed Reality: Einsatzpotential in der Rohbaufertigung und -absicherung der Anlauffabrik der Daimler AG*, Hochschule Ansbach, 30.09.2011

Masterarbeit Jan-Peter Bauer: *Konzeption einer Augmented Reality Anwendung für die Produktparte Van Transporter*, Hochschule Pforzheim, 19.01.2012

Diplomarbeit Björn Bliese: *Optimierung der Kalibrierung sowie Zuverlässigkeit eines Mixed Reality-Systems mit mechanischem Tracking*, Leibniz Universität Hannover, 22.04.2012

Studienarbeit Steffen Hezinger: *Radio-Frequency Identification (RFID)-Lösung für die Ladungserfassung mit Android-Devices*, Duale Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart, 20.09.2012

Fachpraktikum Sebastian Fauser, Universität Stuttgart, Bericht eingereicht 01.02.2013

Fachpraktikum Kai Bauer, Fachhochschule Nürnberg, Bericht eingereicht 22.03.2013

Fachpraktikum Marianne Bremer, Hochschule Furtwangen, Bericht eingereicht 30.08.2013

Studienarbeit Sandra Albrecht: *Evaluierung verschiedener Use Cases mit einer Kinect für das Projekt VANconnect von Mercedes-Benz Vans*, Duale Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart, 12.09.2013

Studienarbeit Phillip Joester: *Analyse und Klassifikation von mobilen Augmented Reality Systemen für den Einsatz in der Automobilindustrie* Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 31.01.2014

Kooperationsprojekt mit der Hochschule Albstadt Sigmaringen

Forschungsprojekt Iliyana Azman, David Bätzner, Martin Schöpf, Stefan Voggel: *Augmented/Mixed Reality im Fahrzeugbau - Wirtschaftliche Betrachtung*, 21.06.2012

Forschungsprojekt Melanie Grau, Lorenz Hautsch, Mohamad Yunos Mohamad Nor: *Augmented/Mixed Reality im Fahrzeugbau - Technologische Betrachtung*, 21.06.2012

Forschungsprojekt Benjamin Hauser, Cemal Celik, Petra Ludwig: *Wettbewerbsanalyse MIXED REALITY*, 21.06.2012

Forschungsprojekt MohdAzizul Hakim MohdYali, Wurster Klaus, Zolg Elisabeth: *Technologiemonitoring Augmented/Mixed Reality*, 21.06.2012

Projekte 2013

Forschungsprojekt Nils Loewecke, Franziska Wagenblast, Moritz Miller: *Mixed Reality im Management*, 01.07.2013

Forschungsprojekt Manuel Korreng, Orhan Ulucan, Julian Wocher: *Mixed Reality im Toleranzmanagement*, 01.07.2013

Forschungsprojekt Manuel Häusler, Felix Messerschmid, Michael Schmottermeyer, Michael Wrobel: *Mixed Reality in der Anlagenplanung*, 01.07.2013

Forschungsprojekt Thomas Keller, Marc André Märker, Tobias Storcz: *Augmented Reality in der Instandhaltung*, 01.07.2013

Anhang A: Fragebogen Fugentool

Evaluation der Vorgehensweise:

Bewertung der Anmutung & der Toleranzwerte von Fugen mit RTT RealView

1) Angaben zur Person:

Fachgebiet: IT Toleranzmanagement Andere: _____
 Führungskraft: Ja Nein

2) Welchen Nutzen sehen Sie in der Bewertung von Fugen durch Mixed Reality? (Zutreffendes bitte ankreuzen, Mehrfachnennung möglich)

- realistische Einschätzung der Entfernung
- realistische Einschätzung der Betrachtungswinkel
- Vergleichsmöglichkeit mit Konkurrenzfahrzeugen
- Vergleichsmöglichkeit mit Vorgängerbaureihe
- Gemeinsame Diskussionsgrundlage
- Objektive Bewertungsgrundlage
- Verbesserte Bewertungsgrundlage
- Weitere Vorteile _____

Können Sie sich vorstellen, Entscheidungen bzgl. des Fugenkonzeptes in Zukunft auf Grundlage der vorgestellten Mixed Reality Methoden zu treffen?

Ja Nein Ja, wenn _____

3) Rechtfertigt dieser Nutzen den Aufwand für Anschaffung und Durchführung? (Zutreffendes bitte ankreuzen)

Ja Nein Ja, wenn _____

In welchen Kostenbereich würden Sie eine Anschaffung der erforderlichen Soft- und Hardware als profitabel ansehen?

- < 5000 € 5000 - 10000 € 10000 – 20000 €
 20000 – 30000 € 30000 - 50000€ > 50000€

Kommentar: _____

1

4) Bewertung der Darstellungsqualität (mit Markertracking)

(Zutreffendes bitte ankreuzen; 1 = sehr gut, 5 = ungenügend)

Wie bewerten Sie das verwendete Tracking mit Markern bzgl.:

	1	2	3	4	5
Bild-Stabilität:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Geschwindigkeit:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bewegungsfreiheit:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5) Gesamteindruck

Bitte bewerten Sie Ihren Gesamteindruck der Bewertungsmethode für Fugentoleranzen mit Mixed Reality Methoden: (1 sehr gut, 5 ungenügend)

Gesamteindruck: __, __

Kommentar: _____

2

Anhang A: Fragebogen Fugentool

6) Priorisierung verschiedener Einsatzszenarien

Im Folgenden werden Ihnen 4 verschiedene Einsatzszenarien geschildert. Bewerten Sie diese bitte durch Ankreuzen (1=sehr gut; 5 ungenügend). Geben Sie bitte auch mögliche Nachteile des Szenarios an.

Szenario A: Bewertung anhand gerenderter Bilder

Bewertung: 1 2 3 4 5
 ○ ○ ○ ○ ○

Nachteile: _____

Szenario B: Bewertung mit Marker & Webcam am Arbeitsplatz durch Einzelperson

Bewertung: 1 2 3 4 5
 ○ ○ ○ ○ ○

Nachteile: _____

Szenario C: Bewertung mit Marker im Rahmen einer Gruppensitzung (z.B. über Beamer)

Bewertung: 1 2 3 4 5
 ○ ○ ○ ○ ○

Nachteile: _____

Szenario D: Bewertung mit Marker auf Vergleichsfahrzeug in der Werkstatt

Bewertung: 1 2 3 4 5
 ○ ○ ○ ○ ○

Nachteile: _____

Priorisieren Sie bitte die geschilderten Einsatzszenarien nach Einsatzwahrscheinlichkeit für die Anwendungsfelder „Begleitung der Erstellung des Fugenkonzepts“ (Intern Toleranzmanagement) und „Vorstellung des Fugenkonzepts vor Entscheidungsträgern“ (Extern Toleranzmanagement).

Bitte Tragen Sie die Buchstaben in der von Ihnen priorisierten Reihenfolge ein:

Priorität Einsatzwahrscheinlichkeit	Intern Toleranzmanagement	Extern Toleranzmanagement
Höchste	Szenario __	Szenario __
Hoch	Szenario __	Szenario __
Niedriger	Szenario __	Szenario __
Niedrigste	Szenario __	Szenario __

Literaturverzeichnis

- [AIC] Offizielle webpräsenz der firma aicon 3d systems gmbh. Aufgerufen: 24.03.2013.
- [ART] Offizielle webpräsenz der firma advanced realtime tracking gmbh. Aufgerufen: 24.03.2014.
- [ASWZ11] Thomas Alt, Werner Schreiber, Wolfgang Wohlgemuth, and Peter Zimmermann. *Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld*, chapter Das Verbundprojekt AVILUS, pages 4–18. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [AVT14] Offizielle webpräsenz allied vision technologies, 14. Aufgerufen: 19.03.2014.
- [Azu97] Ronald T. Azuma. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6:355–385, 1997.
- [Bac13] Richard Backhaus. Technisch hätten wir den zieltermin 2015 erreicht - interview mit dr. christian mohr dieck. Springer for Professionals, August 2013. Aufgerufen: 24.02.2014.
- [Bad12] Christian Bade. *Untersuchungen zum Einsatz der Augmented Reality Technologie für Soll/Ist-Vergleiche von Betriebsmitteln in der Fertigungsplanung*. PhD thesis, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2012.
- [Bar12] Andreas Barth. Produktvarianz als Überlebensstrategie. <http://blog.atzonline.de/>, Juni 2012. Aufgerufen: 22.06.2012.
- [Bau06] Martin A. Bauer. Augmented reality in der automobilindustrie. Proseminar TU München, 2006.
- [BGK13] Björn Bliese, Oliver Geißel, and Jan-Philipp Kobler. Kalibrierung und resultierende genauigkeit eines mixed reality-systems mit mechanischem tracking. In *11. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung*, 2013.

- [BH13a] Martin Bohn and Klaus Hetsch. *Toleranzmanagement im Automobilbau*. Carl Hanser Verlag München, 2013.
- [BH13b] Martin Bohn and Klaus Hetsch. Toleranzmanagement: Inhalte und vorgehensweisen. In *Summer School Toleranzmanagement FAU Universität Erlangen*, 2013.
- [BHS04] Amamath Banerjee, Arun Halambi, and Bikram Sharda. A decision support system for integrating real-time manufacturing control with a virtual environment. In *Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing*, pages 83–95. Springer-Verlag London Ltd., 2004.
- [Boh98] Dr. Martin Bohn. *Toleranzmanagement im Entwicklungsprozeß*. PhD thesis, Universität Karlsruhe, 1998.
- [Bre12] Ralf Bretting. Lasst uns freunde sein - social intelligence in vertrieb und handel. *Automotive IT*, 08/09:48–49, 2012.
- [Bro06] *Brockhaus - Enzyklopädie in 30 Bänden 21 Auflage*. F. A. Brockhaus, 2006.
- [Brü13a] Christiane Brünglinghaus. Erfolg für die elektromobilität: eine frage der perspektive. Springer for Professionals, Oktober 2013. Aufgerufen: 16.10.2013.
- [Brü13b] Christiane Brünglinghaus. Lieber smartphone-anschluss als viel ps. Springer for Professionals, September 2013. Aufgerufen: 01.10.2013.
- [Brü13c] Christiane Brünglinghaus. Lokalisierungsstrategien für die bric-staaten. Springer for Professionals, März 2013. Aufgerufen: 24.02.2014.
- [Brü13d] Christiane Brünglinghaus. Wie die autoindustrie jenseits der bric-staaten wachsen kann. Springer for Professionals, Dezember 2013. Aufgerufen: 11.12.2013.
- [Bur12] Andreas Burkert. Aufstieg und fall einer technologie: Forscher finden ursache am beispiel der brennstoffzelle. *ATZonline*, November 2012. Aufgerufen: 05.12.2012.
- [Bur13] Andreas Burkert. Intelligenter leichtbau durch funktionsintegration. Springer for Professionals, August 2013. Aufgerufen: 02.09.2013.
- [Böh13] Erik Böhm. Eine geschichte der geometrie, 07 2013. Aufgerufen: 19.07.2013.
- [Car13] Offizielle webpräsenz car2go, 2013. Aufgerufen: 17.10.2013.

- [CF11] Julie Carmigniani and Borko Furht. Augmented reality: An overview. In Borko Furht, editor, *Handbook of Augmented Reality*, pages 3–46. Springer Science+Business Media, LLC, 2011.
- [CHTF08] Horst Czichos, Manfred Hennecke, Hans-Rolf Tränkler, and Gerhard Fischer-auer. Messtechnik. In *Hütte - Das Ingenieurwissen*, pages H1–H96. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [Chu02] Kyung H. Chung. *Application of Augmented Reality to Dimensional and Geometric Inspection*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [CHZ04] D. CEGLAREK, W. HUANG, and S. ZHOU. Time-based competition in multistage manufacturing: Stream-of-variation analysis (sova) methodology review. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 16:11–44, 2004.
- [Cug96] J. F. Cugy. Digital mock-up (dmu) for product conception and downstream processes (dmu-bp) n° be-96-3130 - technical annex for a brite-euram iii project. Zugriff eingeschränkt auf Konsortiumsmitglieder, 1996. Datum der Bereitstellung: 21.09.1997.
- [DBG13] Ralf Dörner, Wolfgang Broll, and Paul Grimm. *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)*. Springer Vieweg, 2013.
- [Dri13] Offizielle webpräsenz drivenow. www.drive-now.com, 2013. Aufgerufen: 17.10.2013.
- [EGR⁺12] Mireille Faist Emmenegger, Simon Gmünder, Jürgen Reinhard, Rainer Zah, , Thomas Nemecek, Julian Schnetzer, Christian Bauer, Andrew Simons, and Gabor Doka. Harmonisation and extension of the bioenergy inventories and assessment. Technical report, Schweizer Bundesamt für Energie BFE, 2012.
- [ESK⁺03] Florian Echtler, Fabian Sturm, Kay Kindermann, Gudrun Klinker, Joachim Stilla, Joern Trilk, and Hesam Najafi. The intelligent welding gun: Augmented reality for experimental vehicle construction. In *Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing, Chapter 17*. Springer Verlag, 2003.
- [FAD⁺13] Hans Dieter Futschik, August Achleitner, Gernot Döllner, Christiaan Burgers, Jürgen K.-H. Friedrich, Christian H. Mohrdieck, Herbert Schulze, Martin

- Wöhr, Peter Antony, Manuel Urstöger, Karl E. Noreikat, Markus Wagner, Edgar Berger, Manfred Gruber, and Gerrit Kiesgen. Formen und neue konzepte. In Hans-Hermann Braess and Ulrich Seiffert, editors, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch, pages 119–219. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [far] Offizielle webpräsenz faro technologies inc., dokumentation der messsoftware cam2measure 10. Aufgerufen:04.03.2014.
- [Gau11] Jürgen Gausemeier. Design and vr/ar-based testing of advanced mechatronic systems. In *Virtual Reality & Augmented Reality in Industry*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [Gei12] Oliver Geißel. *AMMU - Automotive Mixed Mock-Up: Konzeption einer neuen Entwicklungsplattform für die Automobilindustrie*. PhD thesis, Univeristät Stuttgart, 2012.
- [GF03] C. Germer and H.-J. Franke. Interdisziplinäres toleranzmanagement. In *14. Symposium Design for X*, 2003.
- [GLKR10] Oliver Geißel, Lina Longhitano, Alfred Katzenbach, and Michael Resch. Automotive mixed mock-up - eine neue entwicklungsplattform der automobilindustrie. In *Tagungsband 13. IFF-Wissenschaftstage Magdeburg*, 2010.
- [God] Robert Godding. Geometrische kalibrierung und orientierung digitaler bildaufnahmesysteme. www.Falcon.de. Aufgerufen: 04.03.2014.
- [Gor11] Michael Gorriz. It wird rückrat der mobilität. <http://www.cio.de/2282534>, Juli 2011. Aufgerufen: 04.03.2014.
- [Gus13] Peter Gust. Einfluss von geometrischen toleranzen auf die lebensdauer von maschinenelementen. In *Summer School Toleranzmanagement FAU Universität Erlangen*, 2013.
- [HAG04] Bernd Hillers, Dorin Aiteanu, and Axel Gräser. Augmented reality - helmet for the manual welding process. In *Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing*, pages 361 – 381. Springer-Verlag London Ltd., 2004.
- [HAL04] CP Huang, S Agarwal, and FW Liou. Validation of the dynamics of a parts feeding system using augmented reality technology. In *Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing*. Springer-Verlag London Ltd., 2004.

- [HB08] Mathias Hüttenrauch and Markus Baum. Zehn thesen zur dritten revolution in der automobilindustrie. In *Effiziente Vielfalt*, pages 271–284. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [HB11] Jan Herling and Wolfgang Broll. Markerless tracking for augmented reality. In *Handbook of Augmented Reality*. Springer Science+Business Media, LLC, 2011.
- [Hen07] Anders Henrysson. *Bringing Augmented Reality to Mobile Phones*. PhD thesis, Linköpings universitet, 2007.
- [HFN11] Olivier Hugues, Philippe Fuchs, and Olivier Nannipieri. New augmented reality taxonomy: Technologies and features of augmented environment. In *Handbook of Augmented Reality*. Springer Science+Business Media, LLC, 2011.
- [Jia11] Mangqin Jiang. Virtual reality boosting automotive development. In *Virtual Reality & Augmented Reality in Industry*, pages 171–180. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [JK14] Sabina Jeschke and Leif Kobbelt. *Exploring Virtuality*. Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, 2014.
- [KAAR12] Nico Kämpchen, Michael Aberhard, Michael Ardelt, and Sebastian Rauch. Technologies for highly automated driving on highways. *ATZ*, 114:34–38, 2012.
- [KS12] Jens Knodel and Daniel Schneider. Open software architectures for the car of the future. *ATZ elektronik*, Volume 7:52–55, 2012.
- [Lau13] Lucas Laursen. The race to get your hands off the wheel. spectrum.ieee.org, September 2013. Aufgerufen: 02.10.2013.
- [LG11] Lina Longhitano and Oliver Geißel. Automotive mixed mock-up: Der produktive einatz von mixed reality im absicherungsprozess der daimler ag. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*, 2011.
- [LG13] Lina Longhitano and Oliver Geißel. Innovationsmanagement am beispiel des mixed mock-ups. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*, 2013.
- [Lie11] Gunnar Liestøl. Situated simulations between virtual reality and mobile augmented reality: Designing a narrative space. In *Handbook of Augmented Reality*. Springer Science+Business Media, LLC, 2011.

- [Lie12] Sebastian Lieberknecht. *Contributions to Real-time Visual Tracking and Live Environment Modeling for Augmented Reality Applications*. PhD thesis, Technische Universität München, 2012.
- [Luh10] Thomas Luhmann. *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. PhD thesis, Technische Universität Dresden, 2010.
- [Mer04] Michael Merget. *Kostenoptimierung Durch Toleranzvariation Im Simultaneous Engineering*, volume Auflage 1. Shaker Verlag, 2004.
- [Mir] Offizielle webpräsenz mirrorop. Aufgerufen: 30.07.2013.
- [Miz95] David W. Mizell. Virtual reality and augmented reality for aircraft design and manufacturing. In *International Conference on Artificial Reality and Teleexistence (ICAT)*, pages 13 – 17, 1995. Aufgerufen: 19.03.2014.
- [MK94] Paul Milgram and Fumio Kishino. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12), December 1994.
- [MSA02] *Measurement system analysis reference manual, Third Edition*. DaimlerChrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 2002.
- [Noe06] Stefan Noelle. *Augmented Reality als Vergleichswerkzeug am Beispiel der Automobilindustrie*. PhD thesis, Technischen Universitaet Muenchen, 2006.
- [NT03] Ikujiro Nonaka and Ryoko Toyama. The knowledge-creating theory revisited: knowledge creation as a synthesizing process. *Knowledge Management Research & Practice*, 1:2–10, 2003.
- [Pae13] Kristin Paetzold. Herausforderungen in der tolerierung von bauteilen aus kunststoff. In *Summer School Toleranzmanagement FAU Universität Erlangen*, 2013.
- [Par09] Babak A. Parviz. Augmented reality in a contact lens - a new generation of contact lenses built with very small circuits and leds promises bionic eyesight, Sep. 2009. Aufgrufen: 24.03.2014.
- [PMK13] Katharina Pentenrieder, Peter Meier, and Gudrun Klinker. Analysis of tracking accuracy for single-camera square-marker-based tracking. Cite Seer X, Oktober 2013.

- [PPSC09] J. Pandremenos, J. Paralikas, K. Salonitis, and G. Chryssolouris. Modularity concepts for the automotive industry: A critical review. *Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(3):148 – 152, 2009.
- [Pre14] Cornelius Preidel. Entwicklung einer methode zur automatisierten konformitätsüberprüfung auf basis einer graphischen sprache und building information modeling, März 2014.
- [Pud13] Katrin Pudenz. Pilotanlage zur gewinnung großer mengen löwenzahnkautschuk. Springer for Professionals, Oktober 2013. Aufgerufen: 16.10.2013.
- [Rau12] Ernst Raue. New ideas are born. In *Konferenzband Cebit Global Conferences*, 2012.
- [Reu00] Ralf Reuter. Achieving design targets through stochastic simulation. *Madymo Users Conference Paris*, 2000.
- [RM04] Cindy Robertson and Blair MacIntyre. Adapting to registration error in an intentbased augmentation system. In *Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing*. Springer-Verlag London Ltd., 2004.
- [RTT] Offizielle webpräsenz rtt deltagen. Aufgerufen: 30.07.2013.
- [Sch12a] Stefan Schlott. Kern des Übels sind band und takt - interview mit prof. dr.-ing. thomas bauernhansl. ATZonline, 2012. Aufgerufen: 22.03.2012.
- [Sch12b] Caterina Schröder. Hammer-projekt gestartet: Fahrzeugstrukturen aus holz für leichtere autos. ATZonline, Juni 2012. Aufgerufen: 22.06.2012.
- [Sto10] Andreas Stockinger. *Computer Aided Robust Design*. PhD thesis, Universität Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [Sut68] Ivan E. Sutherland. A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*, AFIPS '68 (Fall, part I), pages 757–764, New York, NY, USA, 1968. ACM.
- [TDE00] Anna C. Thornton, Stephen Donnelly, and Basak Ertan. More than just robust design: Why product development organizations still contend with variation and its impact on quality. *Research in Engineering Design*, 12:127–143, 2000.
- [Teg06] André Tegtmeier. *Augmented Reality als Anwendungstechnologie in der Automobilindustrie*. PhD thesis, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2006.

- [Thi11] Frank Thielemann. Potentials of innovative technologies within the scope of complex products and services. In *Virtual Reality & Augmented Reality in Industry*, pages 181–190. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [Toe10] Markus Toennis. *Augmented Reality: Einblicke in die Erweiterte Realität*. Informatik im Fokus. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010.
- [Tut06] Rainer Tutsch. Fertigungsmesstechnik. In Hans-Jürgen Gevatter and Ulrich Grünhaupt, editors, *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, VDI-Buch, pages 199–362. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [VDA06] VDA. *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Wirtschaftliche Tolerierung*. Verband der Automobilindustrie (VDA), 2006.
- [VDI02] VDI. Recyclingorientierte produktentwicklung, Juli 2002.
- [Vol12] Car Corporation Volvo. Volvo car corporation takes the strain out of the daily commute with a technology that automatically follows the vehicle in front. Pressemitteilung, Oktober 2012.
- [vP02] Stefan von Praun. *Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess*. PhD thesis, Technische Universität München, 2002.
- [WV11] WIN-Verlag. Anlagen virtuell planen, umbauen und warten. *Virtual Reality Magazin*, 2011. Aufgerufen: 14.06.2012.
- [XSYL11] Ning Xi, Bo Song, Ruiguo Yang, and King Lai. Augmented reality for nano manipulation. In *Handbook of Augmented Reality*. Springer Science+Business Media, LLC, 2011.
- [Zha98] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22:1330–1334, 1998.
- [Zha99] Zhengyou Zhang. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on*, volume 1, pages 666–673 vol.1, 1999.
- [Zim01] Peter Zimmermann. Virtual reality - forschung und anwendung bei volkswagen. *Carolo-Wilhelmina*, 1, 2001.

-
- [ZM10] Bettina Ziegler and Sebastian Metag. *Analyse der physikalischen Korrektheit von Reflexionsuntersuchungen in VR - Analyse der korrekten Reflexionsdarstellung in Virtual Reality zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses*. Verlag Dr. Müller(VDM), 2010.
- [ZW11] Martin Zimmermann and Andreas Wierse. From immersive engineering to selling and teaching. In *Virtual Reality & Augmented Reality in Industry*, pages 191–198. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.