

# **VR/AR in der prototypischen Prozessoptimierung für die thermische Absicherung von Fahrzeugen**

***Dipl.-Inf. Fabian Scheer***

***Dipl.-Ing. (FH), MBA Ralf Specht***

***Dr.-Ing. Axel Hildebrand***

*Group Research and Advanced Engineering, Daimler AG*

*Email: Fabian.Scheer@daimler.com*

*Ralf.Specht@daimler.com*

*Axel.Hildebrand@daimler.com*

***Dipl.-Ing. Oliver Geißel***

*Email: Oliver.Geissel@daimler.com*

***Dipl.-Inf. Steffen Hein***

*Email: Steffen.Hein@gmx.de*

## **Zusammenfassung**

Im Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs müssen die verbauten Komponenten frühzeitig thermisch abgesichert werden, um eine Minderung der Produktlebensdauer oder eine Einschränkung des Fahrgastkomforts durch eine Erhöhung der Temperatur im Fahrgastraum zu vermeiden. Bei der thermischen Absicherung eines Fahrzeugs handelt es sich um eine komplexe und vielseitige Prozesskette an der eine große Anzahl an Personen und Fachabteilungen beteiligt sind.

Dieser Beitrag gibt einen kurzen Überblick über den Gesamtprozess der thermischen Absicherung, wobei besonderes Augenmerk auf den zu optimierenden Prozess der Festlegung von Messstellen gelegt wird. Dabei skizzieren wir zunächst den derzeitigen Einsatz von digitalen Werkzeugen zur Unterstützung der einzelnen Prozessschritte und deren implizierende Einschränkungen. Auf Basis dieser Darstellung wird der Mehrwert einer durchgängigen Begleitung des Gesamtprozesses mittels virtueller Technologien erläutert. Die Analyse des Mehrwerts einer Prozessoptimierung durch Verwendung virtueller Technologien wird hierbei prozessspezifisch in Anwendungen für die Digital Mock-Up (DMU) Phase und die Physical Mock-Up (PMU) Phase unterteilt.

Anhand der Analyseergebnisse stellen wir ein Konzept zur Prozessoptimierung der thermischen Absicherung mit einem durchgängigen, den gesamten Prozess begleitenden Softwarewerkzeug unter Verwendung virtueller Technologien vor. Einen wesentlichen Bestandteil des Konzepts bildet ein Autorensystem zur thermischen Absicherung. Dabei wird im Einzelnen auf die durch das Autorensystem unterstützten Prozessschritte

für die Festlegung von Messstellen eingegangen. Ferner stellen wir in diesem Beitrag eine Unterstützung der Anbringung von Messsensoren an einem Versuchsfahrzeug durch Methoden aus dem Bereich Augmented Reality vor. Dazu verwenden wir einen mechanischen Messarm der Firma Faro, wahlweise mit einer daran montierten Kamera oder einem Ultra Mobile PC (UMPC). Im Weiteren präsentieren wir die Kalibrierung des Gesamtsystems, sowie die Einmessung von statischen Objekten (Fahrzeugbauteilen), an denen die Messsensoren anzubringen sind. Abschließend beschreiben wir eine Methodik zum Umgang mit der in diesem Szenario entstehenden Verdeckungsproblematik.

## Schlüsselwörter

Thermische Absicherung, Prozessoptimierung, Augmented Reality, Mechanisches Tracking

## 1 Einleitung

Der Prozess der thermischen Absicherung von Bauteilen ist in der Gesamtentwicklung eines Kraftfahrzeugs ein entscheidender Bestandteil. Durch die Prozesskette der thermische Absicherung (TAG) wird die Überhitzung von Bauteilen, sowie die daraus resultierenden Konsequenzen, wie eine Einschränkung des Fahrgastkomforts aufgrund erhöhter Temperatur im Fahrgastraum, vermieden [Gei07]. Bereits in einer frühen Phase werden auf der Basis eines digitalen Prototypen Bauteiltemperaturen durch Berechnungen und Simulationen bewertet und hinsichtlich sicherheitsrelevanter Kriterien untersucht. In einem späteren Prozessschritt werden die Simulations- und Berechnungsdaten durch Messreihen am realen Prototypen verifiziert. Der Prozess der thermischen Absicherung gliedert sich in mehrere Prozessschritte, die in Abb.1 grob kategorisiert werden.

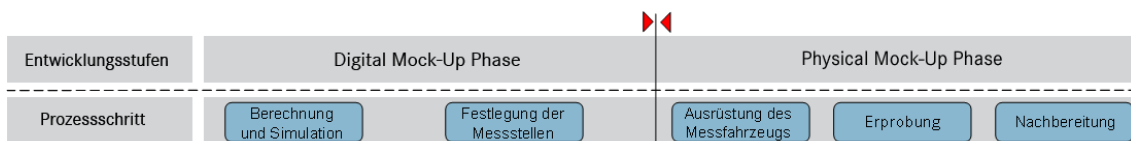


Abbildung 1: Vereinfachter Überblick des Gesamtprozesses

## 2 Der Prozess der Festlegung von Messstellen

Die Ausrüstung von Fahrzeugprototypen für die thermische Absicherung neuer Baureihen bzw. bei Modellpflegen erfordert die Festlegung notwendiger Messstellen, die in Form von Messstellenplänen beschrieben werden. Dies geschieht bereits in frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung, in denen die Entwicklungsarbeit an einer rein digitalen Repräsentation des Fahrzeugs, dem DMU, erfolgt. Unter Berücksichtigung von Berech-

nungs- und Simulationsergebnissen wird in interdisziplinären Runden, mit Beteiligten aller von der thermischen Absicherung betroffenen Bereiche, eine Auswahl der relevanten Messstellen für die jeweilige Absicherungsphase vorgenommen. Als Datenbasis zur Zusammenstellung der Messstellenpläne dient die allgemeine Sammlung standardisierter Messstellen in Form eines Messstellenkatalogs, welcher in einem zentralen Datenbanksystem verwaltet wird [Gei07]. Die Messstellenpläne liegen in digitaler Listenform vor und werden innerhalb des laufenden Prozesses, falls nicht bereits definiert, iterativ um die exakte Position des am Versuchsfahrzeug anzubringenden Messensors ergänzt. Dazu werden die Positionen der Messstellen im CAD-System CATIA bestimmt und manuell archiviert [Gei07]. Anhand der auf diese Weise zur Verfügung stehenden Daten werden für einzelne Messstellen oder Gruppen von Messstellen übersichtliche und aussagekräftige Messstellendokumentationen erzeugt, die neben den Messstellenplänen in dem späteren Prozessschritt der Ausrüstung des Messfahrzeugs dem Applikateur in der Werkstatt zum Anbringen der Messsensoren unterstützend zur Verfügung gestellt werden. Eine vereinfachte Übersicht über den bisherigen Prozess zur Festlegung von Messstellen im Rahmen der thermischen Absicherung ist in Abb. 2 gegeben.

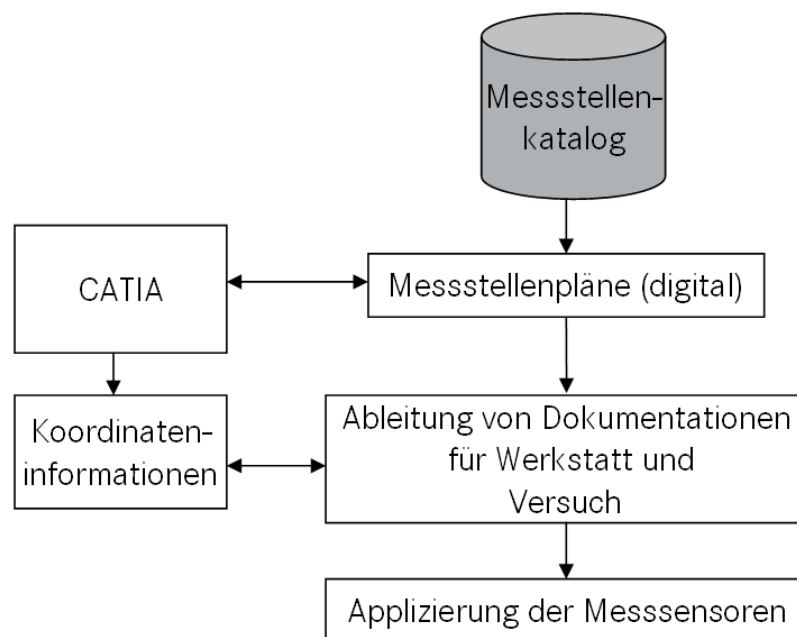


Abbildung 2: Vereinfachte Übersicht des Prozesses TAG

An die DMU-Phase schließt sich sukzessiv die PMU-Phase an, in der die ersten realen Prototypen in der Werkstatt gefertigt werden. Dies können zum einen Prototypen einer neuen Baureihe, aber auch Prototypen von Modellpflegen einer bereits vorhandenen Baureihe sein. Für die thermische Absicherung werden spezielle Fahrzeuge aufgebaut, die anhand der Dokumentationen aus der DMU-Phase in der Werkstatt mit entsprechenden Messensoren versehen werden. Im Anschluss an die Bestückung finden Erprobungsfahrten, sowie abschliessend eine Phase der Nachbereitung statt.

## **2.1 Optimierungspotential im Prozessmodell**

Eine detaillierte Analyse des Prozesses der thermischen Absicherung lieferte mögliche Optimierungspotentiale zur weiteren Steigerung der Prozesseffizienz. Einerseits besteht ein Potential zur Harmonisierung der Softwarewerkzeuge. Durch eine einheitliche Verknüpfung der Daten und Dokumente ließe sich die Aktualisierung aller Datenquellen automatisieren. Andererseits sind die derzeit eingesetzten Messstellendokumentationen nicht in allen Fällen eindeutig, wodurch teilweise zusätzliche Iterationsschleifen bei der Festlegung und Applizierung der Sensoren notwendig werden. Darüberhinaus kann durch die Einbringung einer 3D Datenvisualisierung unter Verwendung von Methoden der Virtuellen und der Erweiterten Realität eine weitere Steigerung der Prozesseffizienz erzielt werden.

## **2.2 Mehrwert durch Prozessoptimierung mit virtuellen Technologien**

Um die zuvor beschriebenen Optimierungspotentiale zur Effizienzsteigerung im Prozess der thermischen Absicherung umzusetzen, bedarf es einer durchgängigen Begleitung des Gesamtprozesses durch digitale Werkzeuge. Diese müssen auf einer gemeinsamen Datenbasis arbeiten, um die Verknüpfung der Daten bzw. deren automatische Aktualisierung zu gewährleisten und idealerweise in nur einem einzelnen Softwarewerkzeug zu bündeln. Abb. 4 veranschaulicht die Integration eines entsprechenden Werkzeugs in den Gesamtprozess, wobei die einzelnen Teilumfänge prozessspezifisch der Digital Mock-Up Phase und der Physical Mock-Up Phase zugeordnet werden. Die unterschiedlichen Anforderungen der beiden Hauptphasen spiegeln sich auch im Einsatz der virtuellen Technologien wieder, denn für die DMU Phase kommen vorwiegend Methoden aus dem Bereich der Virtuellen Realität und für die PMU Phase vorwiegend Methoden aus dem Bereich der Erweiterten Realität für die weitere Prozessoptimierung zum tragen.

### **Digital Mock-Up Phase**

Mit der Schaffung eines Autorenwerkzeugs können die Funktionalitäten der bislang getrennt eingesetzten Softwarewerkzeuge effizient in einer Applikation für die DMU Phase gebündelt werden. Durch den Zugriff auf eine einheitliche Datenbasis für den Gesamtprozess wird eine durchgängige Aktualität und Korrektheit der Daten sichergestellt. Des Weiteren kann ein unabhängiger Betrieb mehrerer Benutzer gewährleistet werden. Im benutzerunabhängigen Betrieb können bereits einzelne Fachabteilungen mit minimalem Zeitaufwand ihre Messstellen in das Werkzeug einstellen, wodurch insbesondere durch Rückfragen entstehende Wartezeiten bei der Definition von neuen Messstellen im Gesamtprozess vermieden werden können.

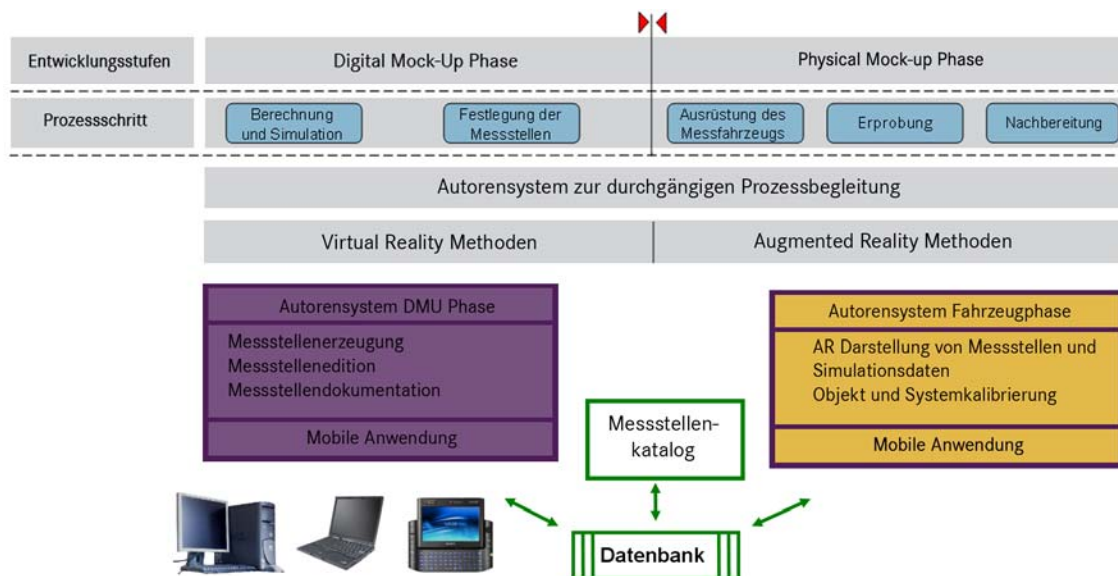


Abbildung 4: Begleitende Softwarewerkzeuge im Gesamtüberblick

Die 3D Daten der Bauteilgeometrien werden in dem Autorensystem, welches an ein VR-System gekoppelt ist, visualisiert und mit den Messstelleninformationen des Messstellenkatalogs durch eine geeignete Anbindung des Autorensystems an die vorhandene Datenquelle kombiniert. Neue Messstellen können durch direkte Interaktion mit den 3D Daten erstellt und im Katalog ergänzt werden. Durch die Erzeugung und Verwaltung der Messstelleninformationen in einem Werkzeug entfällt somit der Einsatz von zusätzlichen, voneinander unabhängigen Softwarewerkzeugen zur manuellen Erfassung und Pflege der messstellenrelevanten Daten.

Wird im Autorensystem eine Messstelle in den 3D Daten generiert, kann durch ein integriertes Viewpointmanagement die aktuelle Ansicht gespeichert und später zur automatischen Erzeugung von Bilddokumentationen wieder verwendet werden.

Um ferner den digitalen Prozess des Änderungsmanagements von Bauteilen zu automatisieren steht im Autorensystem die Funktion „Ankerpunktcheck“ zur Verfügung. Dieses Verfahren überprüft und kennzeichnet die von Bauteiländerungen betroffenen und somit inkonsistenten Messstellen in den digitalen Messstellenplänen des Autorenwerkzeugs als fehlerhaft. Weiterhin bekommt der Anwender eine Ausgabenachricht über die betroffenen Messstellen und kann diese korrigieren. Anhand der Ankerpunktcheckfunktion wird somit die durchgängige Aktualität und Korrektheit der Messstellen in Bezug zu den 3D Daten des Digital Mock-Ups gewährleistet und abgesichert.

### Physical Mock-Up Phase

Die 3D Informationsdarstellung des Autorensystems unterstützt den Mitarbeiter in der adäquaten Wahrnehmung der für seine durchzuführenden Aufgaben erforderlichen Informationen. Eine Verwendung des Autorensystems mit seiner frei navigierbaren und in-

teraktiven 3D-Visualisierung auf einem mobilen Endgerät ermöglicht dem Applikateur in der Werkstatt eine noch präzisere Platzierung der Messstellen und somit eine hohe Reproduzierbarkeit durch eine eindeutige Anleitung und interaktive Visualisierung des Anbringungsorts. Mittels der gewählten Darstellungsform kann der Mitarbeiter Vorort in den digitalen Informationen navigieren, um sich somit einen besseren und aussagekräftigen Überblick zu verschaffen. Als potentielle Fehlerquelle gilt es jedoch den Kontexttransfer der rein virtuellen Informationen in die reale Welt zu berücksichtigen [SL06]. Durch Einsatz von Augmented Reality Verfahren bei der Informationsdarstellung der virtuellen Daten in einem Videobild der realen Einsatzumgebung entfällt dieser Kontexttransfer. Der Verbauungsort der Messsensoren wird dem Mitarbeiter korrekt dargestellt, so dass Missverständnisse bei der genauen Platzierung vermieden werden. Ferner können dem Applikateur, sowie teilnehmenden Mitarbeitern aus den einzelnen Versuchsabteilungen, die vorab ermittelten Berechnungs- und Simulationsergebnisse direkt am realen Prototyp angezeigt werden. Der Bezug zum Kontext des realen Prototyps ermöglicht somit zusätzliche Aussagen über die Qualitätskriterien der verwendeten Messstellen und die Erreichung des geforderten Absicherungsbedarfs.

### 3 Umsetzung und Konzeption des Autorensystems

In diesem Abschnitt wird das Konzept und die Umsetzung eines einheitlichen digitalen Werkzeugs für den Prozess der thermischen Absicherung am Gesamtfahrzeug vorgestellt. Abb.5 veranschaulicht dieses Konzept. Die Einzelnen für den Gesamtprozess erforderlichen digitalen Werkzeuge werden in einem zentralen Autorensystem für die TAG gebündelt. Das Autorensystem wurde dabei als Modul des Softwaresystems VEO der Daimler AG entworfen.

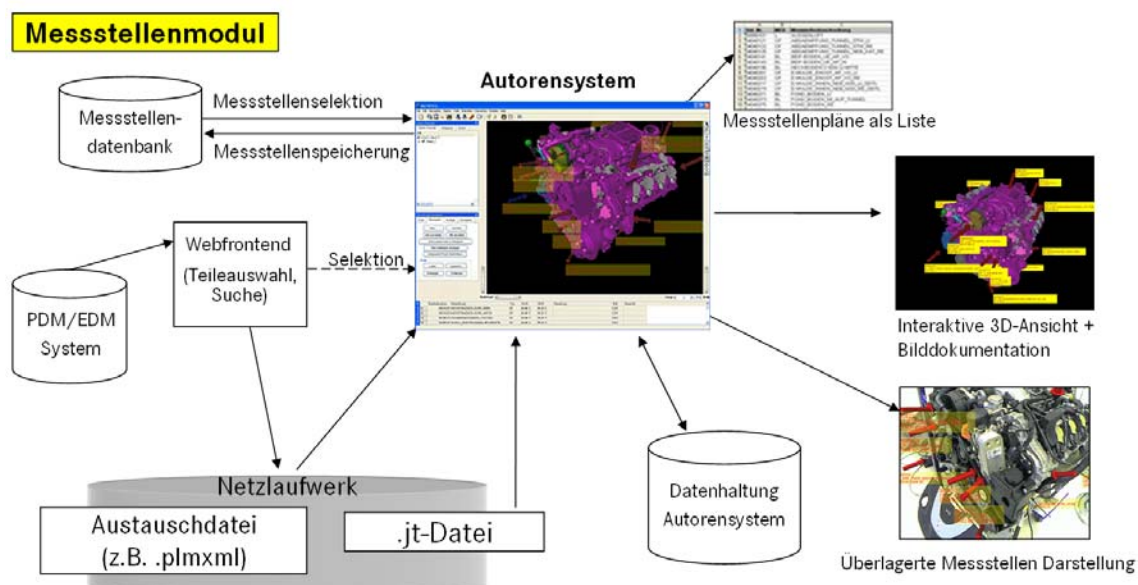


Abbildung 5: Konzeption Autorensystem zur TAG

### 3.1 Datenintegration und Datenhaltung

Statt wie bisher mit einzelnen digitalen Werkzeugen auf verschiedene Datenquellen zuzugreifen, wird der Zugriff auf die für den Gesamtprozess erforderlichen Informationen, wie z.B. die 3D Daten der Bauteile im PDM/EDM-System und die Messstelleninformationen des Messstellenkatalogs, zentral im Autorensystem gebündelt. Zur Dokumentation und Pflege der Daten verfügt das Autorensystem über ein integriertes Datenbanksystem. Dort werden die durch das Autorensystem neu generierten Daten, wie z.B. erzeugte Bilddokumentationen, die Messstellenpläne, 3D Informationen der Messstellen und neu gesetzte Messstellen abgelegt.

Die Anbindung der verschiedenen Datenhaltungssysteme an das Autorensystem ist derzeit noch nicht vollständig abgeschlossen, so dass beispielsweise der Zugriff und die Ablage im Messstellenkatalog durch Dateien simuliert wird.

### 3.2 Virtuelle Techniken in der Prozessoptimierung der TAG

Die Zusammenführung der für den Gesamtprozess der thermischen Absicherung benötigten Informationen im Autorensystem ermöglicht eine effiziente 3D Visualisierung der Daten. Die Position einer Messstelle wird dabei je nach Messtellentyp durch eine Kugel, einen Kegel oder einen Würfel veranschaulicht. Zur besseren Erkennung werden die Messstellen mit einem gut sichtbaren Pfeil versehen, der an der Oberflächennormale der Messstelle ausgerichtet ist. Zur Differenzierung der einzelnen Messstellen wird am Ende des Pfeils ein Textfeld (Billboard) mit den für den Mitarbeiter notwendigen Informationen, wie z.B. der Bezeichnung und der Temperaturgrenzwerte der Messstelle, dargestellt.

Die Zuordnung von Messstellen zu einzelnen Modulen bzw. Submodulen im Fahrzeug ist terminologisch durch die Bezeichnung einer Messstelle gegeben. Unter Zugriff auf die Daten der zentralen Messstellendatenbank können dem Mitarbeiter daher durch die Selektion eines Bauteils im Autorensystem, welches ebenfalls den einzelnen Modulen bzw. Submodulen zugeordnet ist, alle für dieses Bauteil bereits vorhandenen Messstellen angezeigt werden. Anhand dieser Auswahl kann der Mitarbeiter die benötigten Messstellen auswählen und interaktiv in der 3D Darstellung platzieren. Die Summe aller vom Mitarbeiter verwendeten Messstellen für ein Versuchsfahrzeug bildet den einzelnen Messstellenplan, der durch das Autorensystem automatisch erzeugt und dokumentiert wird.

Die genaue Platzierung vorhandener, sowie neu generierter Messstellen wurde durch ein *Picking* des gewünschten Punkts auf dem Bauteil realisiert. Der gefundene Schnittpunkt auf der Objekt Oberfläche wird als sogenannter Ankerpunkt der Messstelle gespeichert. Bei einem Großteil der Messstellen handelt es sich um Oberflächenmessstellen, die mit dem Abstand ihres Radius zur Oberfläche am Bauteil angebracht werden, um eine gute Sichtbarkeit zu gewährleisten. Umluft- und Mediummessstellen bilden die anderen bei-

den Messstellentypen. Deren Anbringungsort liegt nicht auf einer Oberfläche sondern in einem gewissen Abstand zur Bauteiloberfläche oder innerhalb eines Mediums, wie z.B. einer Ölwanne, und wird durch einen Würfel bzw. Kegel symbolisiert. Um diese Messstellen in den dreidimensionalen Daten platzieren zu können, wird dem Mitarbeiter als Interaktionsmetapher ein Schieberegler zur Verfügung gestellt, durch den die Messstelle entlang der Richtung der Normalen des vorher definierten Ankerpunkts oder in freier Navigation verschoben werden kann.

Nachdem ein Mitarbeiter die Platzierung einer Messstelle am 3D Modell vollzogen hat, kann er über die Navigation in den 3D Daten eine aussagekräftige Ansicht auf die Messstelle einstellen und speichern. Die so erzeugte Ansicht wird in einem späteren Prozessschritt für die automatische Generierung von Bilddokumentationen benötigt. Mit Beendigung des Festlegungsprozesses der Messstellen stehen somit alle benötigten Informationen für die Generierung von Bilddokumentationen der Messstellen, sowie der Messstellenpläne zur Verfügung, welche automatisch erzeugt werden.

Im Zuge des Gesamtprozesses können Änderungen von Bauteilen am Versuchsfahrzeug erforderlich werden, so dass die in Bezug auf die ursprünglichen Bauteile vorgenommene räumliche Verortung der Messstellen zu Inkonsistenzen führen kann. Um dennoch eine Korrektheit und Aktualität zu gewährleisten, wird eine automatische Überprüfung der Messstellenpositionen mittels der bereits erwähnten Funktion „Ankerpunktcheck“ durchgeführt. Das Verfahren ist für alle Messstellentypen einsetzbar und basiert auf der Distanzüberprüfung zwischen der Position der Messstelle und dem Oberflächenverlauf des Bauteils. Wird ein für den Messstellentyp spezifischer Schwellwert überschritten, so muss die Messstelle von einem Mitarbeiter überprüft werden und wird im Datenbestand als fehlerhaft markiert. Nach Abschluss der Funktion werden dem Mitarbeiter die fehlerhaften Messstellen dargestellt, so dass er diese korrigieren kann.

Zur effizienten Unterstützung des Applikateurs der Messsensoren am Versuchsfahrzeug ist die Mitnahme einer interaktiven 3D Darstellung der Daten auf einem mobilen Endgerät, wie z.B. einem UMPC oder einem Tablett-PC im Werkstattbereich gegenüber den vom Autorensystem automatisch erstellten 2D Bilddokumentationen der Messstellen vorzuziehen. Derzeit ermöglicht die sehr große Anzahl an Dreiecken der Bauteilgeometrien jedoch keine hinreichend interaktive Darstellung auf diesen Geräten, ohne die Geometrien entsprechend aufzubereiten. In unserem Testszenario bestand die Geometrie eines Motorblocks bereits aus 5 Mio. Dreiecken. Um dennoch eine Anzeige der Daten auf einem UMPC zu erreichen, wurde ein Level of Detail Verfahren eingesetzt. Dazu werden zusätzliche 3D Modelle eines Bauteils verwendet, die in ihrer Dreieckanzahl reduziert sind. Selektiert der Mitarbeiter ein Bauteil, so wird die hochaufgelöste Version des Bauteils nachgeladen. Die Berechnungszeit für die Darstellung konnte auf diese Weise um bis zu 75% reduziert werden und ist nun auch auf mobilen Endgeräten für den Einsatz im Werkstattbereich möglich. Wird der UMPC ferner für eine überlagerte Visualisierung auf einem realen Videobild eingesetzt, so können die Daten mittels einer Entkernung weiter reduziert werden, da sie lediglich als Hüllgeometrie zur Verde-



ckungsberechnung und nicht zur direkten Darstellung verwendet werden, wie im Folgenden noch beschrieben wird.

### 3.3 Augmented Reality für die Prozessoptimierung in der Werkstatt

Die Ausstattung eines Versuchsfahrzeugs mit Messsensoren erfordert eine hochpräzise, reproduzierbare Lokalisierung der Anbringungsorte. Für die Darstellung der Applikationsorte mittels eines Augmented-Reality-Systems müssen daher hochgenaue Tracking-systeme zum Einsatz kommen, um Registrierungsfehler bei der Überlagerung des realen Videostreams mit den virtuellen Informationen zu vermeiden. Aufgrund der eingeschränkten Akzeptanz von HMDs in produktiven Anwendungen erfolgt die Augmentierung auf einem Display, welches über einen Schwenkarm räumlich ausgerichtet wird [Hil99], [Med02], [BG04]. Ein mechanisches Tracking unter Verwendung eines Messarms bietet dabei den Nutzen einer sehr präzisen Bestimmung der Pose und weist zudem aufgrund der nicht vorhandenen Überdeckungs- bzw. Interferenzproblematik weitere Vorteile gegenüber anderen Trackingverfahren auf [RDB01]. Messarme sind in vielen Teilen des Unternehmens ein etabliertes Standardwerkzeug. Für unsere Anwendung setzen wir einen Messarm der Firma Faro ein, auf dessen Messspitze eine Kamera oder ein UMPC mit integrierter Kamera montiert wird. Im Falle der Kamera dient ein zusätzlicher Monitor am Montageort zur Informationsdarstellung. Der Mitarbeiter kann den Arm um das zu betrachtende Objekt bewegen und die korrekten Anbringungsorte der Messstellen werden in Echtzeit eingeblendet (siehe Abb.6).

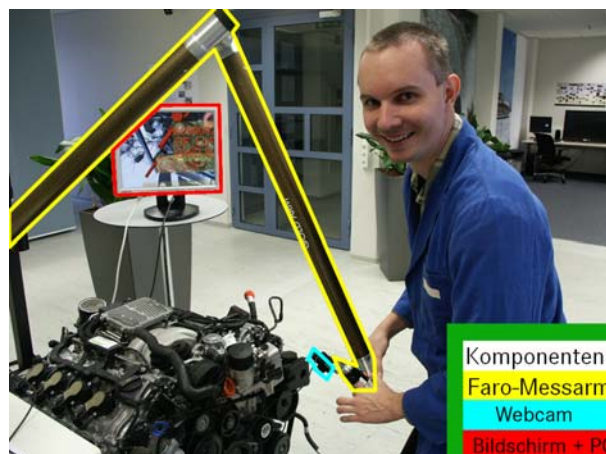


Abbildung 6: Komponenten des AR Szenarios

#### 3.3.1 Kalibrierung

Eine hochgenaue, lagerichtige Überblendung der realen Objekte im Videobild mit virtueller Information erfordert eine präzise Kalibrierung des Gesamtsystems. Dazu werden zuerst die intrinsischen Kameraparameter bestimmt, die unter Verwendung des Kameramodells nach Heikkila und Silven [HS97] verwendet werden.

Anschließend wird die Transformation bestimmt, welche die Beziehung zwischen der Messspitze des Faro-Messarms und dem CCD Chip der Kamera beschreibt. Dazu sind zwei Verfahrensschritte nötig. Zuerst wird eine optische Marke in der Nähe des Faro-Messarms fixiert, deren vier Eckpunkte mit der Messspitze angefahren werden. Anhand der vier gemessenen Eckpunkte kann die Transformationsmatrix  $M_{MC \leftarrow TC}$  bestimmt werden, wodurch die Position der optischen Marke im Koordinatensystem des Faro-Messarms berechnet wird. In einem zweiten Schritt wird unter Verwendung eines Marker basierten Trackings die Transformation  $M_{MC \leftarrow VC}$  zwischen der Kamera und der optischen Marke bestimmt. Parallel dazu wird der Messwert des Faroarms, gegeben durch die Transformation  $M_{TC \leftarrow SC}$ , ermittelt. Durch die ermittelten Größen kann die Transformation zwischen Kamera und Messspitze  $M_{SC \leftarrow VC}$  berechnet werden:

$$\begin{aligned} M_{SC \leftarrow VC} &= (M_{MC \leftarrow TC} \cdot M_{TC \leftarrow SC})^{-1} \cdot M_{MC \leftarrow VC} \\ &= (M_{MC \leftarrow SC})^{-1} \cdot M_{MC \leftarrow VC} \\ &= (M_{SC \leftarrow MC}) \cdot M_{MC \leftarrow VC} \end{aligned}$$

Um *Jittereffekte* der durch das Markertrackingsystem gelieferten Position zu minimieren, führen wir zur Bestimmung von  $M_{MC \leftarrow VC}$  mehrere Messreihen durch, so dass mögliche Ausreißer in den Messwerten eliminiert werden können. Eine Weiterentwicklung des Systems schliesst die Automatisierung dieses Prozesses durch den Ansatz zur *Jitter* Reduktion von [Rub06] ein.

Der letzte Schritt in der Kalibrierung des Gesamtsystems besteht in der korrekten Registrierung des zu untersuchenden Objekts, welches im dargestellten Beispielszenario durch einen Motor gegeben ist. Anstatt den Motor getrennt zu lokalisieren, behandeln wir ihn als statische Geometrie in unserer virtuellen Szene. Dies impliziert eine einmalige Einmessung des Motors und erfordert weiterhin, dass weder der Motor noch der Ursprung des Messarms in ihrer Lage zueinander verändert werden dürfen. Die Bestimmung der Transformation des Motors im Koordinatensystem des Faro-Messarms basiert auf Landmarken [WCB95]. Landmarken stellen eindeutig definierte Punkte auf einem Objekt dar. Zur korrekten Registrierung legen wir markante und gut abtastbare Punkte am realen Motor und dazu korrespondierende Punkte im virtuellen Modell fest. Die Position der realen Landmarken im Trackingkoordinatensystem des Faro-Messarms erhalten wir durch das Einmessen der Punkte mit dem Messarm. Um die Transformation zwischen den realen Landmarken und der Punktmenge auf dem virtuellen Objekt zu bestimmen, können in unserem System das algebraische Verfahren nach Horn [HOR87], das numerische Verfahren nach Levenberg-Marquardt [PVT02], sowie ein vereinfachtes selbst entwickeltes Verfahren [Hei08] verwendet werden.

Es bleibt anzumerken, dass für einen Versuchsaufbau in der Werkstatt lediglich die Objektkalibrierung durchgeführt werden muss, insofern die Position der Kamera auf dem Messarm oder der Kameratyp nicht verändert wird, so dass die Rüstzeit des Systems

von wenigen Minuten keinen störenden Faktor für die Akzeptanz der Anwendung darstellt.

### 3.3.2 Verdeckung

Zur korrekten Anzeige der Messstellen am Motor würde theoretisch die Verwendung der vermessenen Landmarken als Punktwolke ausreichen. In der Praxis führt dies jedoch zu einer Überfrachtung der Darstellung mit allen für einen Blickpunkt vorhandenen Informationen [MKS06]. Auf diese Weise würden dem Applikateur Messstellen eingeeblendet, die normalerweise für seinen Betrachtungspunkt durch die Geometrie des realen Motors verdeckt wären, was den Anbringungsprozess erschweren bzw. zu einer Fehlplatzierung von Messsensoren führen könnte. Abb.7 oben rechts veranschaulicht diesen Sachverhalt und hebt die eigentlich durch den realen Motor verdeckten Messstellen eingekreist hervor. Um dieses Problem zu umgehen, verwenden wir das 3D Modell des Motors zur korrekten Berechnung der Darstellung. Dabei ermöglicht der Einsatz von *Alpha Blending* dem Mitarbeiter durch einen Schieberegler die Transparenz des Motors einzustellen, so dass ihm im Arbeitsprozess jeweils wahlweise eine Ansicht auf das 3D Modell oder auf den realen Motor zur Verfügung steht (Vgl. Abb.7 unten).

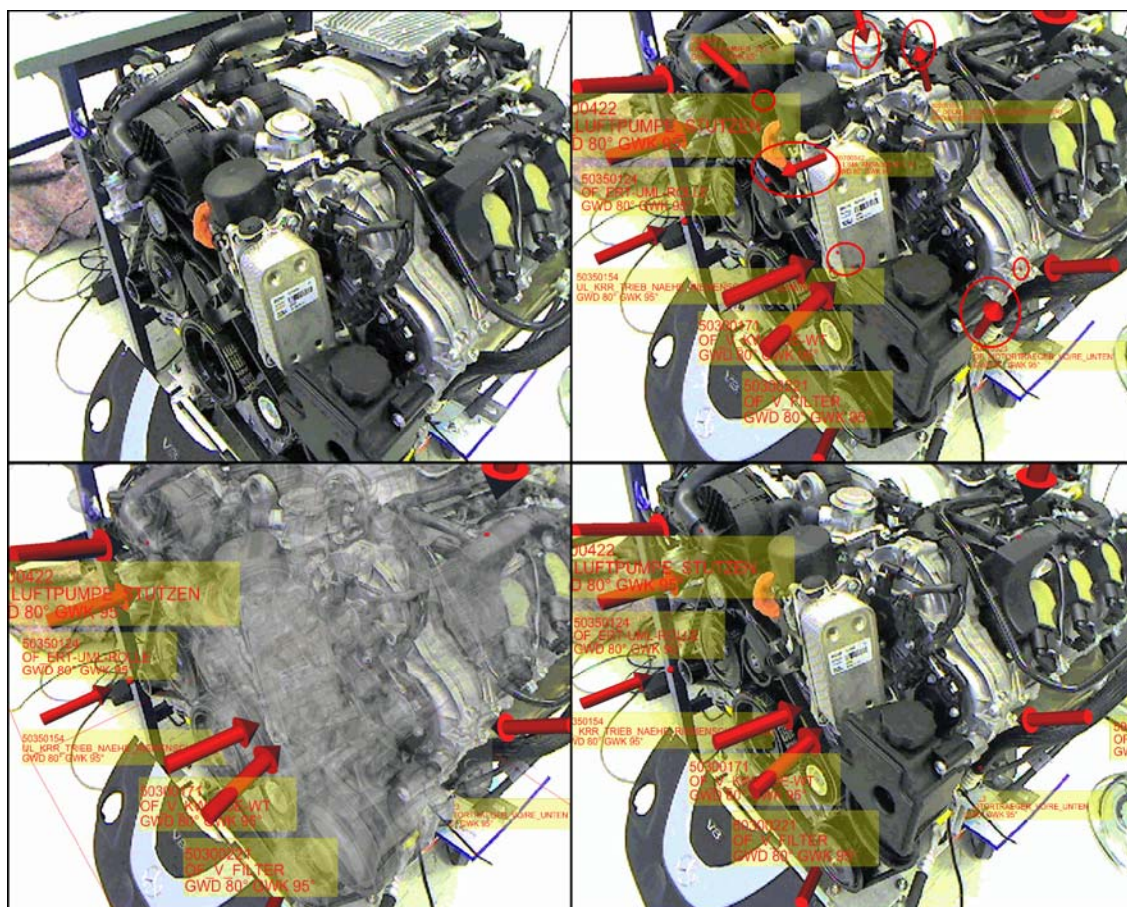


Abbildung 7: Verdeckungsproblematik

Die Verdeckung von Messstellen durch die Geometrie des Motors wird dabei durch die Informationen des Tiefenbuffers und eine Sortierung der Geometriedaten erreicht (siehe [AMH02]). Wenn auch die Problematik der Verdeckung somit gelöst wird, impliziert das Verfahren Einschränkungen für den Anbringungsprozess von Messsensoren, die nicht auf der Aussenhülle der realen Geometrie, sondern erst durch Demontageprozesse von Bauteilen zu erreichen sind. Diese Problemstellung ist in der Prozessunterstützung durch Augmented Reality im Bereich des Service, des Betriebs und der Wartung seit längerem bekannt und wird durch interaktive Handlungsanweisungen, wie z.B. in [AR04] gelöst. In unserem Fall ist jedoch nicht von einem gleich bleibenden Aufbau des PMU auszugehen. Stattdessen stellt jeder Versuchsaufbau einen eigenständigen Prototyp dar, so dass kein Multiplikatoreffekt durch eine Ausführung von denselben immer wiederkehrenden Handlungen erreicht werden kann. Ein Authoring samt Implementierung der Ein- bzw. Ausbauanweisungen für jeden Prototypen würde zu viel Zeit in Anspruch nehmen und den Gesamtprozess unnötig verzögern. Stattdessen führt der Mitarbeiter den Ein- und Ausbau der Bauteile nicht nur real sondern auch virtuell durch, indem er das verbaute Bauteil im Autorensystem für die Anzeige deaktiviert. Die Konsistenzhaltung zwischen virtueller und realer Szene obliegt somit momentan dem Mitarbeiter. Anhand der Messstellenpläne kann der Mitarbeiter jederzeit nachvollziehen welche Messstellen noch angebracht werden müssen. Um dieses Vorgehen in Zukunft zu umgehen soll für eine Weiterentwicklung des Systems der Ansatz von [MKS06] unter Verwendung einer Magic Linse als Interaktionswerkzeug und einer Festlegung des Fokus auf die lediglich durch Ausbauprozesse zu erreichenden Messstellen eingesetzt werden. Hierdurch können dem Mitarbeiter die Messstellen im Inneren des Motors dargestellt werden.

## Acknowledgement

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes "Werkstatt der Zukunft" durchgeführt. Wir sind dankbar für die Ideen und die Unterstützung der Projektleiterin Frau Dr. Longhitano, von Herrn Dr. Siegert, von Herrn Liegert und allen weiteren Kollegen der Daimler AG, die zum Erfolg beigetragen haben.

## Literatur

- [AMH02] T. Akenine-Möller, E. Haines: Real-Time Rendering. A K Peters, 2<sup>nd</sup> edition, 2002
- [AR04] W. Friedrich: ARVIKA, Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service, Publicis Corporate Publishing, 2004
- [BG04] U. Brüseke, M. Grafe, R. Wortmann, C. Scharfe, H. Westphal: VARI - An Augmented Reality Interaction Device for Education- and Training-Applications. In: Mechatronics and Robotics, Nr.1, 13. - 15. Sep. 2004 IEEE, APS

- 
- [Gei07] O. Geißel: Einführung von neuen Technologien in den Prozess der thermischen Absicherung am Gesamtfahrzeug. Master's Thesis, Universität Stuttgart, 2007.
- [Hei08] S. Hein, Methoden zur mobilen, dreidimensionalen Informationsdarstellung im Prozess der thermischen Absicherung eines Fahrzeugs. Diplomarbeit, Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Universität Ulm, 2008
- [HS97] J. Heikkila, O. Silven: A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction, CVPR 1997, Washington, DC, USA
- [Hil99] A. Hildebrand, A Medical Diagnosis Support System within a dynamic Augmented Reality Environment, In: Kim, Myoung-Hee(Ed.)u.a.; Computer Graphics Center (ZGDV) u.a.: Advanced Medical Image Processing. Proceedings 1999, Darmstadt
- [HOR87] B. K. Horn: Closed-form Solution of Absolute Orientation using Unit Quaternions. In: Journal of the Optical Society of America (1987), April, S.629–642
- [Med03] Medical Augmented Reality for Patients (MEDARPA), 2003, <http://www.medarpa.de/>, Stand: 02.03.2008
- [MKS06] E. Méndez, D. Kalkofen, D. Schmalstieg: Interactive Focus and Context Visualization for Augmented Reality, ISMAR 2007, Nara, Japan
- [RDB01] J. P. Rolland, L. D. Davis, Y. Baillet: A Survey of Tracking Technology for Virtual Environments. In: W. Barfield, T. Caudell: Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality, 2001, S.67-112
- [Rub06] M. Rubio, A. Quintana et al.: Jittering Reduction in Marker-Based Augmented Reality Systems. ICCSA, 2006, S.510-517
- [SL06] R.Suomela, J. Lehtikoinen: Taxonomy for Location-Based Information, Springer-Verlag, London, 2004
- [PVT02] W. H. Press, W. T. Vetterling, S. A. Teukolsky, B. P. Flannery: Numerical Recipes in C++: the art of scientific computing. 2. Auflage. Cambridge University Press, 2002
- [WCB95] R. T. Whitaker, C. Crampton, D. E.Breen, M. Tuceryan, E. Rose: Object Calibration for Augmented Reality. Computer Graphics Forum 14, Nr. 3, 1995, S. 15–28