

Moderne Werkzeuge und Prozesse zur beschleunigten Produktentwicklung Scannen, Rapid Prototyping, Virtuelle Realität

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck

Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

Mit einem 3D-CAD System wurde dem Konstrukteur ein Werkzeug an die Hand gegeben, mit dem er schneller und zuverlässiger seine Konstruktionen am Rechner ausführen kann, als dies über Jahrhunderte hinweg mit dem Reißbrett möglich war. Aufbauend darauf können aus den räumlichen CAD-Daten über eine Rapid Prototyping Anlage schnell Bauteile für Anschauungs- oder Funktionsmuster hergestellt werden. Umgekehrt hierzu ist es möglich, reale Objekte mit einem 3D-Scanner zu erfassen, um diese dann in die virtuelle Rechnerwelt zurückzuführen. Schließlich können die CAD Konstruktionen an einer virtuellen Wand als Modelle realistischer als am Monitor betrachtet werden. Anhand ausgesuchter Fallbeispiele soll gezeigt werden, wie mit diesen 3D-Werkzeugen die Produktentwicklungsprozesskette beschleunigt, die Produktkosten gesenkt und die Qualität gesteigert werden können.



Die in diesem Bericht veröffentlichten Erkenntnisse wurden im 3D-Visualisierungszentrum, ein Kompetenzzentrum der GSO-Hochschule Nürnberg, erarbeitet. Das Kompetenzzentrum wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

1. Einführung

Der Erfolg eines Unternehmens hängt primär von der Fragestellung ab:

"Was benötigt der Kunde, in welcher Zeit, zu welchem Preis und in welcher Qualität?"

Diese Grundhaltung und die damit verbundene Fragestellung sind letztlich auch in der Qualitätsmanagementnorm ISO 9000 manifestiert. Hier sollen sich die Firmenprozesse an der Kundenanforderung und der Kundenzufriedenheit orientieren.

Firmenintern ergibt sich nun hieraus die Fragestellung

"Wie kann ich dem Kunden termingerecht, zum erwarteten Preis und in der gewünschten Qualität das Produkt liefern?"

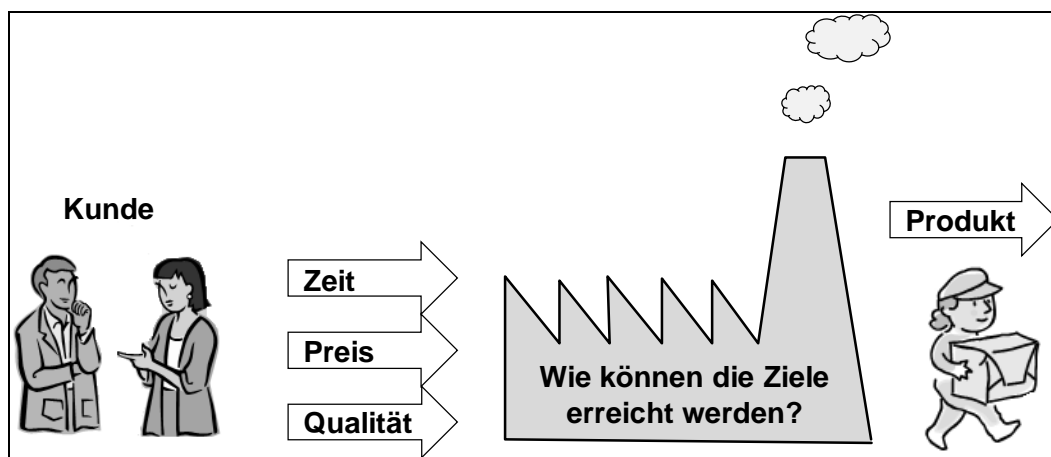


Abbildung 1: Kundenorientierte Fragestellung zur Zielerreichung

Dieser Prozess ist leider nicht statisch, d.h. die Kundenanforderungen ändern sich ständig, was wiederum den Unternehmen eine hohe Flexibilität abverlangt. Die Ursachen für veränderte Kundenwünsche sind vielschichtig und können sein:

Kundenorientierte, bzw. bedarfsorientierte Entwicklung

Der Kunde bestimmt, was das Produkt können muss. Funktionen die nicht erforderlich sind, werden nicht bezahlt und Produkte die die Funktion nicht erfüllen, werden nicht gekauft.

Ein Beispiel hierfür ist die Werkzeugmaschinenbranche. Hersteller von Werkzeugmaschinen liefern dem Kunden individuell auf das zu fertigende Produkt zugeschnittene Maschinen, deren Lebensdauer aufgrund des konstruktiven Aufbaus begrenzt ist. Dies ist für die Nutzer aber kein Problem, denn nach der Lebensdauer der Maschine findet üblicherweise auch ein Produktwechsel in den zu fertigenden Teilen statt. Für die nachfolgende Generation an Fertigungsteilen werden wieder neue Bearbeitungszentren gefordert, die auf das Produkt abgestimmt sind und höhere Fertigungsgenauigkeiten zulassen. Hier zeigt sich, dass eine Verschiebung vom Verkäufer- zum Käufermarkt stattgefunden hat.

Vorschriften und gesetzeskonforme Entwicklungen

Die dramatische Nuklearkatastrophe von Fukushima am 11. März 2011 hatte zur Folge, dass daraufhin die 143 in der EU bestehenden Kernkraftwerke einem Stresstest unterzogen wurden. Zudem müssen die in der Planung und im Bau befindlichen Kraftwerke daraufhin modifiziert werden.

Ein anderes, in der breiten Öffentlichkeit nicht so bekanntes Beispiel, ist die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, die das Schutzniveau zur Unfallverhütung von Maschinen regelt. Mit der neuesten Fassung wurden unter anderem die grundlegenden Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen an den technischen Fortschritt angepasst.

Diese zwei Fallbeispiele zeigen, dass die Unternehmen ihre Produktkonstruktion im Laufe der Zeit verändern müssen, um die gesetzlichen Auflagen zu erfüllen.

Designorientierte Entwicklung

Unternehmen und deren Mitbewerber stehen inzwischen weltweit gesättigten Märkten gegenüber und unterziehen sich damit einem Verdrängungsprozess. Für den Käufer bedeutet dies, dass er zwischen mehreren, gleichartigen Produkten wählen kann und somit Preis, Qualität und Leistung objektiv vergleichbar werden. Da jedoch alle Unternehmen der Idee „günstiger Preis, hohe Leistung, zuverlässige Qualitätsstandards, guter Service“ folgen, führt dies zu einem unerwünschten Effekt: Hierdurch werden die Angebote nun weniger differenzierbar und lassen sich so dem Kunden gegenüber nicht als einzigartig darstellen. Um hier dem Kunden die rationale Kaufentscheidung zu nehmen, müssen die typischen Marketingmerkmale (Preis, Leistung, Qualität und Service) durch das Produktdesign und die Marke („Brand“) ergänzt werden. [REESE 2005]

So sollen beispielsweise Produkte von der Gestaltung, Bedienung und der Farbgebung (Design) zum Erscheinungsbild der Firma passen (Corporate Identity CI oder Corporate Design CD).

Hier wird u.a. auch deutlich, dass zum einen der Konstrukteur neben den reinen technischen Anforderungen auch Designaspekte erfüllen muss. Darüber hinaus muss er mit stark künstlerisch geprägten Personen zusammenarbeiten, die neben der technischen Sichtweise auch ästhetische Aspekte mit einbringen und eventuell auch Arbeitsweisen und Werkzeuge bevorzugen, die sich von denen eines Konstrukteurs unterscheiden.

Technologieorientierte Entwicklung

In den Produkten soll modernste (und ausgereifte) Technik zum Einsatz kommen. Diese Kundenforderung und damit der verbundene Produktwandel beeinflusst gleichzeitig auch die designorientierte Entwicklung.

Diese technologische Weiterentwicklung zeigt sich eindrucksvoll in den Ausstattungsvarianten der Automobile. Klimaanlage, Airbags und Navigationssysteme gehören zwischenzeitlich überwiegend zur Grundausstattung vieler Mittelklasse- und Kleinfahrzeuge. Parkassistenten oder Night Vision Systeme, die heute in der Oberklasse verfügbar sind, könnten auch bald in kleineren Fahrzeugtypen eingebaut werden.

Maschinen und Anlagen werden heute nicht mehr mit mechanischen Tasten und Schaltern bedient, vielmehr wird vom Käufer erwartet, dass diese intuitiv über ein Mensch-Maschinen-Interface bedienbar sind und die Kommunikation beispielsweise über einen Touchscreen erfolgt.

Anhand dieser Beispiele kann abgeleitet werden, dass der Produktlebenszyklus immer kürzer wird und neue Produkte nach immer kürzeren Entwicklungszeiten auf den Markt gebracht werden müssen. Dies kann beispielsweise auch am VW Golf belegt werden.

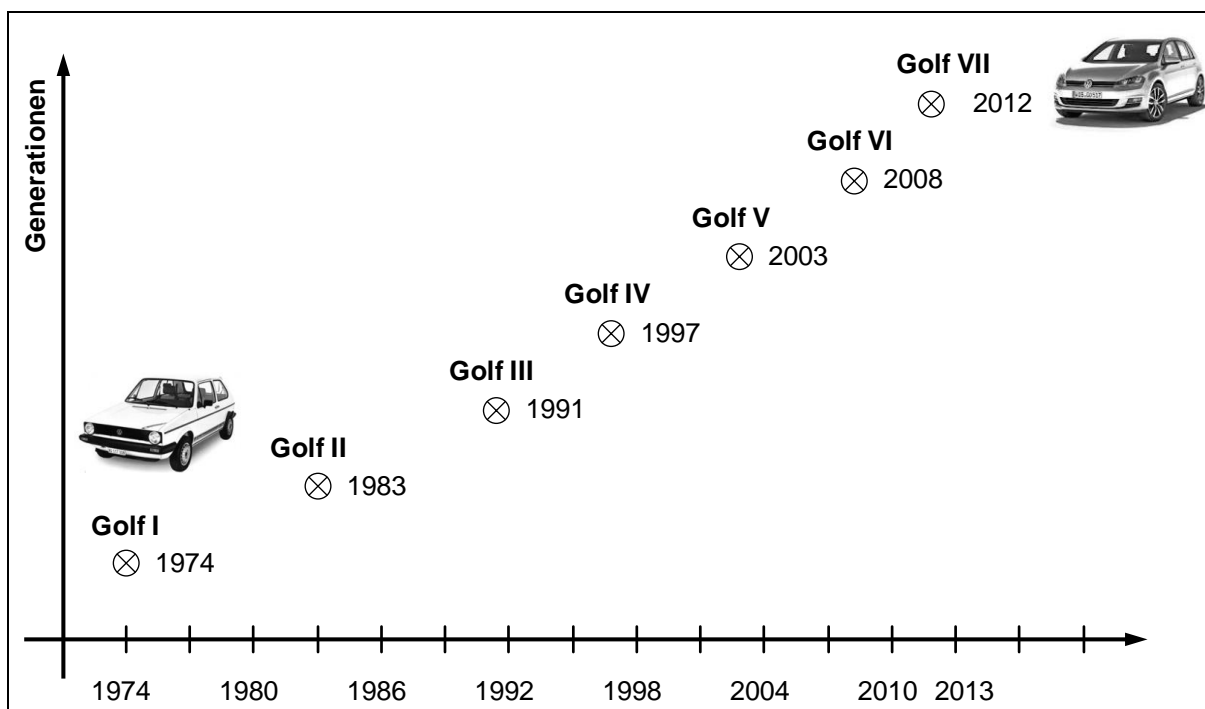


Abbildung 2: Modellwechsel am Beispiel VW Golf

Schreibt man den Modellwechseltrend für den VW Golf fort, so könnte demzufolge der Golf VIII bereits drei Jahre nach dem Erscheinen des Golfs VII auf dem Markt kommen.

Die Gründe für die Beherrschbarkeit der immer kürzer werdenden Produktentwicklungsprozesse sind vielschichtig. Schäppi listet hier folgende Erfolgsfaktoren für die Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen auf [SCHÄPPI 2005]:

- Entwicklungsorientierte Unternehmensstruktur
- Organisationsstruktur für fachübergreifende Projektarbeit
- Klare Markt-, Technologie- und Kooperationsstrategie
- Präzise marktorientierte Produkt- bzw. Projektdefinition
- Effektive fachübergreifende Teamarbeit
- Stärkere Gewichtung der Vorentwicklungs- und Produktdefinitionsphase
- Strukturierter Innovationsprozess, transparente Go/Stop-Entscheidungen
- Effizientes Projektmanagement
- Verwendung integrierter Entwicklungsmethoden
- Unterstützung von Kreativität
- Simultane Produkt-, Produktions- und Marketingentwicklung
- Marktorientiertes Kosten- und Qualitätsmanagement
- Prototyping und kundenorientierte Produkttests

Neben diesen methodischen und prozessorientierten Entwicklungsabläufen hat auch die Weiterentwicklung der Konstruktionswerkzeuge und die damit verbundene Software dazu beigetragen, dass heute effizienter entwickelt und konstruiert werden kann als früher.

Bei dem Einsatz eines 3D-CAD Systems steht das 3D-Modell im Mittelpunkt. An dieses Datenmodell lassen sich eine Vielzahl von Prozessen anknüpfen.

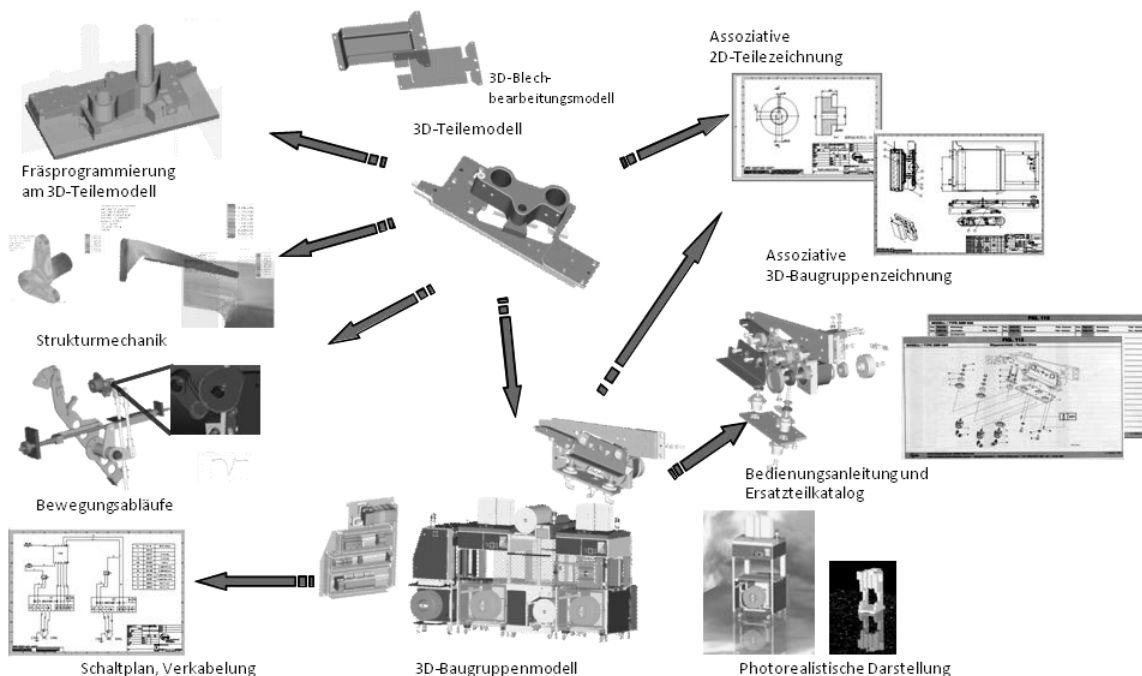


Abbildung 3: 3D-Modell ist die Grundlage für weitere Prozessschritte [HORNFECK 2003]

Baugruppen werden aus den 3D-Einzelteilen zusammengesetzt, Programme für Werkzeugmaschinen werden aus dem 3D-Modell abgeleitet (CAD/CAM-Prozess) oder die Volumenmodelle werden in Simulationsprogramme übergeben, mit denen dann z.B. strukturmechanische Berechnungen durchgeführt werden können.

Um die Produktentwicklungsprozesse effektiv zu gestalten sind zum einen optimale Werkzeuge (Soft- und Hardware) erforderlich. Zum anderen müssen die Firmenprozesse so optimiert werden, dass die Leistungsfähigkeit der neuen Werkzeuge voll ausgeschöpft werden kann. Darüber hinaus entscheidet aber immer noch der Mitarbeiter, ob er den kontinuierlichen Verbesserungsprozess aktiv mitgestaltet oder ob er bewusst dagegen arbeitet.

Bezogen auf die eingangs formulierte Fragestellung: "Wie kann ich dem Kunden termingerecht, zum erwarteten Preis und in der gewünschten Qualität das Produkt liefern?", muss die nächste Fragestellung im Unternehmen heißen: "Welche modernen Werkzeuge können in der Produktentwicklung eingesetzt werden, wie müssen hierzu die Prozesse gestaltet sein und wie werden die Mitarbeiter motiviert, sich an dieser Umgestaltung zu beteiligen?".

Durch den "Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung" (EFRE) wird der Aufbau des 3D-Visualisierungszentrums an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg zwischen 2009 und 2015 gefördert. Hier beschäftigen sich Professoren und Mitarbeiter mit der Fragestellung, welche 3D-Werkzeuge gibt es über die bekannten 3D-CAD Systeme hinaus, um den Produktentwicklungsprozess zu beschleunigen, die Produktkosten zu senken und die Qualität zu steigern. Hierzu stehen im 3D-Visualisierungszentrum die Werkzeuge Rapid Prototyping, 3D-Scannen und eine Virtuelle Wand zur Verfügung.

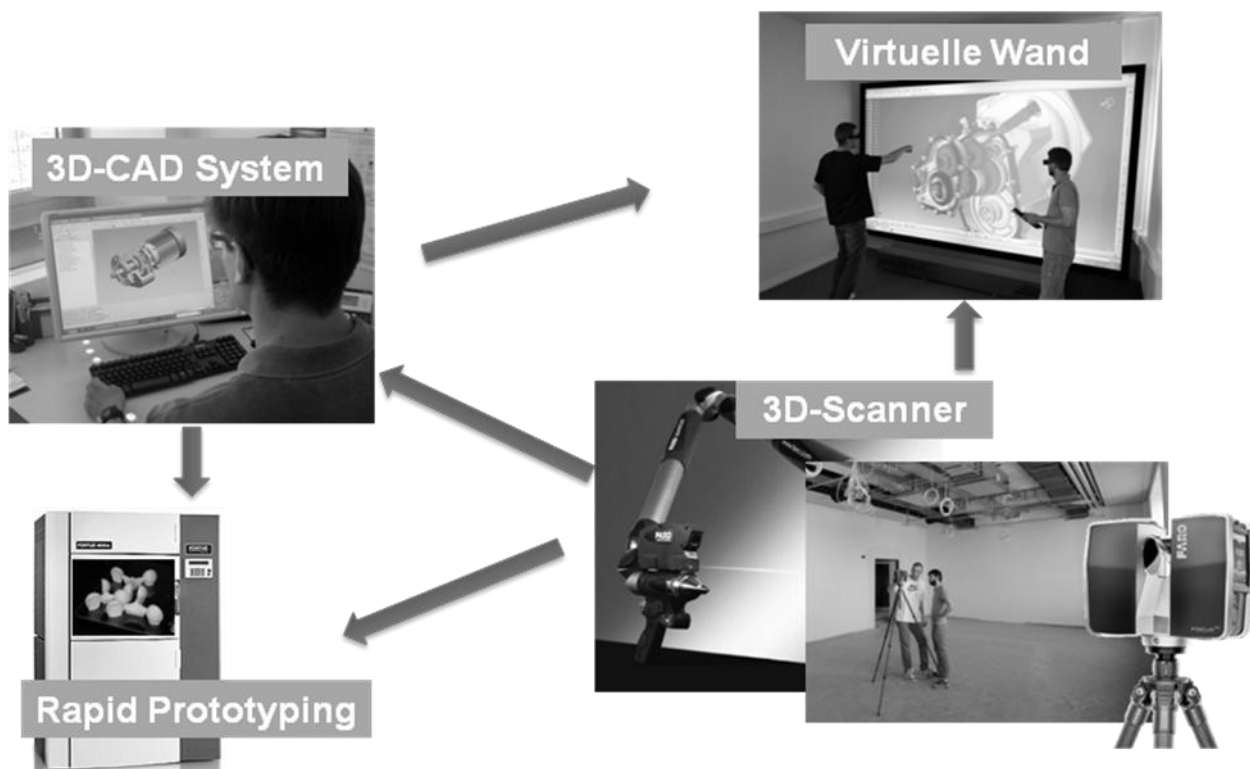


Abbildung 4: 3D-Werkzeuge als Ergänzung zum 3D-CAD-System

Ausgehend von den räumlichen Daten eines 3D-CAD Systems können über eine Rapid Prototyping Anlage (RP-Anlage) schnell Bauteile für Anschauungs- oder Funktionsmuster hergestellt werden. Umgekehrt hierzu ist es möglich, reale Objekte mit einem 3D-Scanner zu erfassen, um diese dann in die virtuelle Rechnerwelt zurückzuführen. Alternativ können auch die eingescannten Punktwolken an die RP-Anlage überführt und dupliziert werden. Schließlich ist es möglich, die CAD Konstruktionen an einer virtuellen Wand realistischer als am Monitor zu betrachten. Gescannte, reale Gegebenheiten lassen sich im virtuellen Raum mit Konstruktionsdaten kombinieren.

Anhand von ausgewählten Beispielen soll nun gezeigt werden, wie diese Werkzeuge an 3D-CAD Systeme "angekoppelt" werden können, um hier noch rationeller und wirkungsvoller die Entwicklungsprozesse zu beschleunigen.

Zum besseren Verständnis der Fallbeispiele werden vorab der Rapid Prototyping Prozessablauf, das 3D-Scannen und die virtuelle Wand erklärt.

2. Grundlagen

2.1. Rapid Prototyping

Prozessbeschreibung

Generative Fertigungsverfahren beruhen auf dem Grundprinzip des schichtweisen Aufbaus von Strukturen. 3D-CAD-Daten werden über eine STL-Schnittstelle (Surface Tesselation Language oder Standard Triangulation Language) an die Software der Fertigungsmaschine übergeben. Hier wird das herzustellende Bauteilmodell in Einzelschichten zerlegt. Dieser Datensatz wird an die Fertigungsmaschine übertragen und das Bauteil Schicht für Schicht hergestellt. Üblicherweise werden diese Bauteile aus Kunststoff hergestellt. Bauteile aus Gips, Metall oder Papier sind ebenfalls denkbar.

Überhängende Strukturen werden durch Stützstrukturen unterbaut, die nach dem RP-Prozess entfernt werden. Hier werden die Stützstrukturen, je nach RP-Verfahren, mechanisch entfernt oder ausgewaschen. Ein Sonderfall stellt beispielsweise das Direkt Laser Cusing Verfahren und das Selektive Laser Sinterverfahren dar. Das Pulver, das hier als Ausgangswerkstoff vorliegt, dient gleichzeitig als Stützmaterial. In einem weiteren Nachbearbeitungsprozess können die Bauteile mechanisch geglättet werden oder es wird eine Oberflächenbeschichtung aufgebracht.

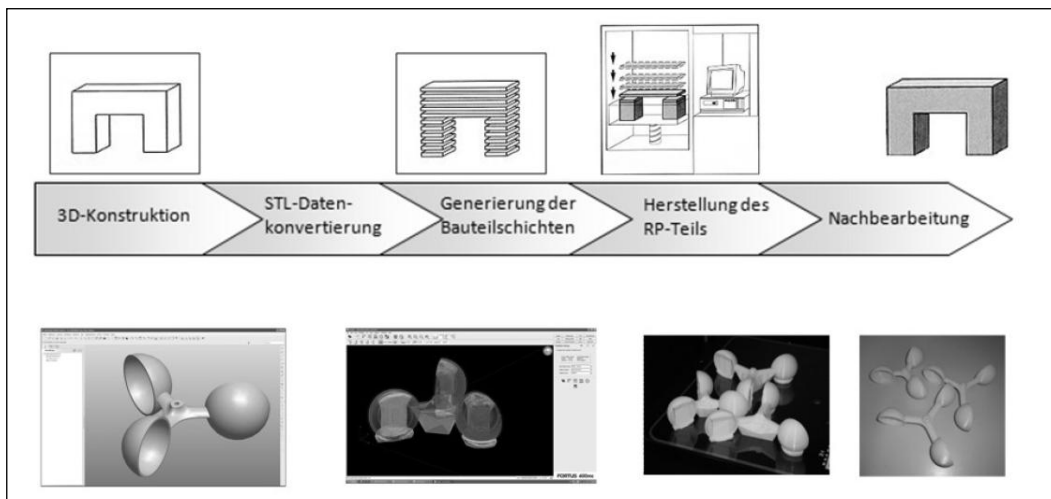


Abbildung 5: Prozessablauf des generativen Fertigungsverfahrens

Merkmale und Vorteile:

Alle generativen Fertigungsverfahren weisen nachfolgende Merkmale auf, woraus auch wiederum die Stärken und Vorteile dieser Fertigungstechnologie abgeleitet werden können.

- Alle auf dem Markt befindlichen Maschinen können mit dem standardisierten (STL)-Datensatz angesteuert werden
 - ➔ 3D-CAD-Modelle können mit jeder beliebigen Software modelliert werden
 - ➔ die Generierung der Schichtgeometrie erfolgt z.T. automatisch direkt aus den 3D-CAD-Daten
- Es ist kein Einsatz produktspezifischer Werkzeuge notwendig
 - ➔ kein Rüstaufwand erforderlich und eine Vielzahl an Bearbeitungswerkzeugen entfällt
- Die Datensätze können grundsätzlich in jeder beliebigen Orientierung gebaut werden
 - ➔ keine Spannproblematik, keine Spannvorrichtungen erforderlich
- Es können verschiedene „Druckjobs“ parallel abgearbeitet werden
 - ➔ zeitaufwendige serielle Fertigung ist nicht erforderlich

Das 3D-Visualisierungszentrum der GSO-Hochschule verfügt über eine Fertigungsanlage nach dem Extrusionsverfahren bzw. FDM-Verfahren (fused deposition modeling). Das Funktionsprinzip ist aus Abbildung 6 ersichtlich. Ein Kunststoffdraht wird über Transportrollen einer Heißdüse zugeführt und dort aufgeschmolzen. Auf einer Bauplattform werden die einzelnen Schichten aufgetragen. Ist die erste Schicht gefertigt, wird die Bauplattform um die Schichtdicke nach unten gefahren und die nächste Schicht kann erzeugt werden. Parallel

zu den Baustrukturen werden die Stützstrukturen erzeugt, um später aufgetragene, überhängende Baustrukturen abzustützen.

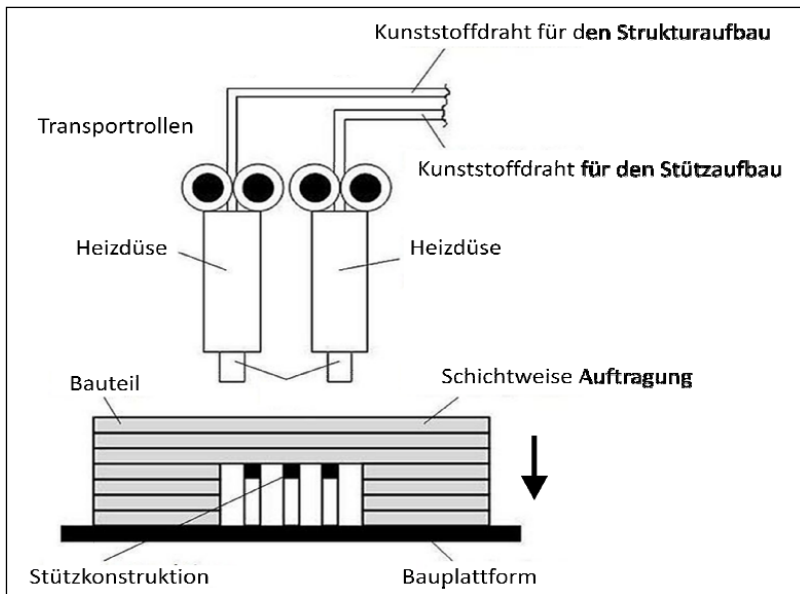


Abbildung 6: Prinzipaufbau einer FDM-Anlage

2.2. 3D-Scannen

Das 3D-Scannen hat sich aus der Messtechnik entwickelt. Wird an einem Objekt, z.B. Werkstück, ein Abstandsmaß gemessen oder von einem festen Standpunkt die Entfernung zu einem Gebäude bestimmt, so liegt hier nur eine eindimensionale Messgröße vor (Abstand in einem Längenmaß). Werden diese Messungen beliebig oft wiederholt und wird ein Bezug der Messpunkte zu einem Koordinatensystem hergestellt, so können die gemessenen Punkte softwaretechnisch zu einem Modell zusammengesetzt werden. In diesem Fall spricht man vom 3D-Scannen. Werden diese erfassten Punktwolken im Rechner weiter bearbeitet, so spricht man vom Reverse Engineering Prozess.

Dreidimensionale Objekte können sowohl mittels mechanischer Verfahren (z.B. Koordinatenmesstechnik, durch schichtweise Abtragung), radiologischer Verfahren (Computertomographie (CT) oder Magnetresonanztomographie (MRT)), ultraschallbasierter Verfahren oder optischer Verfahren vermessen bzw. eingescannt werden. Optische Verfahren lassen sich entsprechend Abbildung 7 unterteilen.

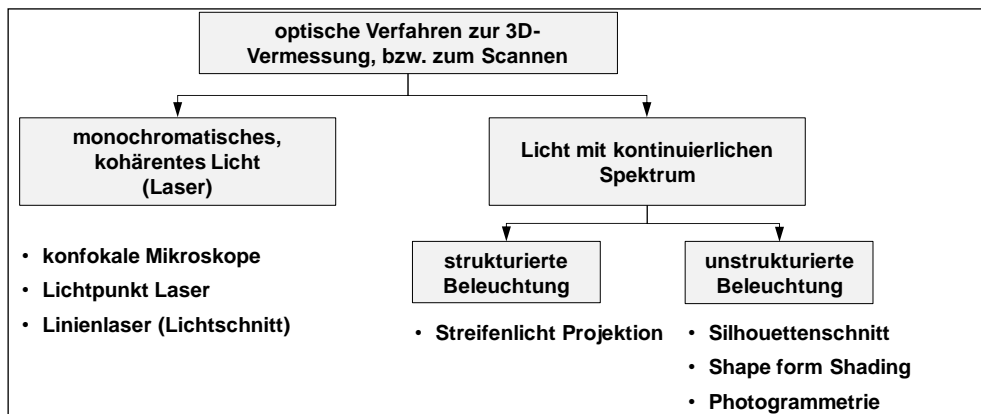


Abbildung 7: optische Mess- und Scanverfahren

Grundprinzip des Laserscanners:

Im Bereich der berührungslosen 3D-Messtechnik sind die Laserscanner am weitesten verbreitet. Allerdings verfließen in der Praxis zunehmend diese Verfahren, da Multisensorsysteme und hybride Messsysteme (z.B. Linienlaser in Kombination mit taktilem Messkopf) verschiedene Prinzipien anwenden, um die spezifischen Vorteile auszunutzen.

Ein 3D-Laserscanner ist aus folgenden Modulen aufgebaut:

- **Laser-Entfernungsmesser**
Die Entfernungsmessung basiert hierbei entweder auf der Ermittlung der Laufzeit (Impulslaufzeitverfahren), der Phasendifferenz (Phasendifferenzverfahren) oder des Winkels zwischen den gesendeten und den empfangenen Lichtstrahl (Triangulationsverfahren).
- **Abtastende Punktlaser oder Linienlaser (Scanner)**
Der Laserstrahl wird hierbei in unterschiedlichen Richtungen rasterförmig ausgelenkt. Diese Abtastung erfolgt beispielsweise direkt über Servomotoren, an denen der Laser installiert ist oder indirekt über Planspiegel oder Prismen. Dabei werden zusätzlich die Azimut- und Elevationswinkel ermittelt, um eine Zuordnung der Messpunkte untereinander zu erhalten.
- **Einheit zur Bestimmung des lokalen und/oder globalen Koordinatensystems**
Hat der Scanner eine feste Position (terrestrische Laserscanner), so können sich die erfassten 3D-Koordinatenpunkte auf diese Position beziehen. Wird der Scanner versetzt oder das einzuscannende Teil verschoben, damit Konturen im Schattenbereich erfassbar sind, können die einzelnen Punktwolken softwaretechnisch zu einer Punktwolke zusammengesetzt werden (merge). Hierbei müssen sich die einzelnen Punktwolken überschneiden. Dabei entstehende doppelte Punktkoordinaten werden übereinander gelegt und ergeben damit das gesamte Modell. Alternativ dazu können auch bei jedem Scanvorgang Referenzen (Kugeln, Muster, etc.) mit erfasst werden, die dann auch innerhalb der einzelnen Punktwolken zur Deckung gebracht werden können.
Bei bewegten Laserscannern (z.B. Airborn-Laserscanning) muss die ständig veränderliche Position des Flugzeugs oder Fahrzeugs beispielsweise über ein Satellitenpositionssystem (GPS) ermittelt werden und anschließend mit den lokalen Koordinaten der inertialen Messeinheit (IMU) verrechnet werden.
- **Zusatzmodule**
Integrierte Farbkameras ermöglichen es, zusätzlich zu den geometrischen Informationen und der Intensität ebenfalls noch Farbwerte zu erfassen.

Prozessbeschreibung - Reverse Engineering Prozess -

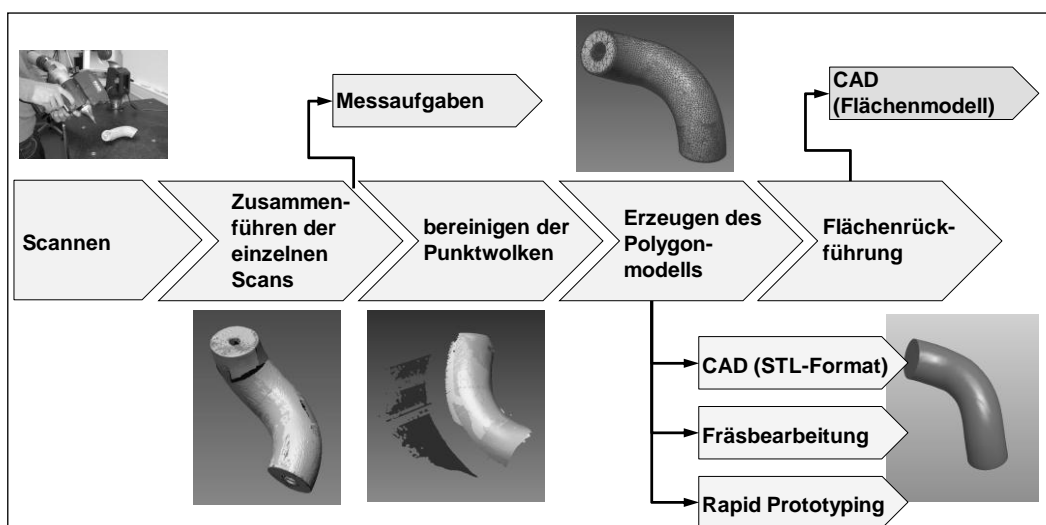


Abbildung 8: Prozessablauf 3D-Scannen

Nach dem Scannen und dem Zusammenführen der einzelnen Punktwolken zu einem Gesamtpunktwolkenmodell werden die Punktwolken bereinigt. Hier werden überflüssige Punkte entfernt, die beispielsweise von der Auflagefläche des Bauteils stammen.

Im nächsten Schritt werden die Punkte zu einem Polygonmodell vernetzt. Dieses Polygonmodell kann bereits jetzt im STL-Format in das CAD-System überführt werden oder ist die Basis für die Erstellung von Bearbeitungsprogrammen oder Rapid Prototyping-Teilen.

Damit ein Flächen- oder Volumenmodell entsteht, muss abschließend eine Flächenrückführung vorgenommen werden.

Merkmale und Vorteile:

Gegenüber der taktilen Einzelpunktmessung und der photographischen Dokumentation erschließen sich hier folgende Vorteile:

- Punktwolken enthalten 3D-Informationen
 - Abstandsmaße können, im Gegensatz zu Photographien, entnommen werden
- Geometrie wird vollständig erfasst
 - Alle Koordinatenpunkte sind archiviert und sind auslesbar
(Bei Einzelpunktmessungen können Messpunkte vergessen werden. Ein erneutes Messen kann teuer sein, wenn das zu messende Objekt an einem anderen Standort ist.)
- reale Objekte können in die virtuelle Rechnerwelt überführt werden
 - schnelle Modellaufnahme
 - Variantenkonstruktionen lassen sich auf der Grundlage realer Objekte nachvollziehen
 - Neukonstruktionen lassen sich eindeutig an bestehende Objekte anpassen (Schnittstellenproblematik)
 - Konstruktionsdaten und Scandaten der realen Objekten lassen sich zu Anschauungs- und Simulationszwecken visualisieren (z.B. Marketingaspekt, Fabrikplanung)

Das 3D-Visualisierungszentrum verfügt neben einen Linienlaserscanner und einem Streifenlicht-Projektionsscanner, die Studierende im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten aufbauten, über zwei kommerzielle Laserscanner.

Terrestrischer Laserscanner, Faro Focus 3D:

Die Entfernungsmessung erfolgt nach dem Prinzip der Phasenverschiebung. Der Abtastmechanismus wird über eine langsame 360°-Drehbewegung um die vertikale Achse in Kombination mit einer schnellrotierenden 45°-Spiegelfläche, die um die Horizontalachse rotiert, umgesetzt. Somit weist der Scanner einen „Panorama-View“ mit einem Gesichtsfeld von horizontal 360° und vertikal 305° auf. Die integrierte Farbkamera ermöglicht es, zusätzlich zu den geometrischen Informationen und der Intensität ebenfalls noch Farbwerte zu erfassen. Hiermit können Objekte innerhalb eines Bereichs von 0,6m und 120 m mit einem systematischen Distanzfehler von ± 2 mm erfasst werden.

Faro Laser ScanArm

In der Scaneinheit sind ein taktiler Messkopf und ein Linienlaser integriert. Der Laserstreifen besteht aus 640 Punkten. Diese werden am Objekt reflektiert und auf einem CCD Array erfasst. Die Auswertung erfolgt über das Triangulationsverfahren. Der Distanzfehler beträgt 0,05 mm.

2.3. Virtuelle Wand, Virtueller Raum

Die Welt wird vom menschlichen Auge dreidimensional erfasst und begriffen. Um sich technische Konstruktionen besser vorstellen zu können, hat Leonardo da Vinci begonnen, seine Ideen perspektivisch zu konstruieren. Als eine Arbeitsteilung zwischen den Konstrukteuren und den Fertigern im Zuge der Industrialisierung eingeführt wurde, lernten die Techniker reale dreidimensionale Gegenstände zweidimensional auf dem Zeichenblatt darzustellen und sind auch umgekehrt in der Lage, sich anhand der 2D-Zeichnungen das reale Bauteil vorzustellen. Damit komplexere Konstruktionen verstanden werden und Nichttechniker Konstruktionen verstehen, wurden perspektivische Darstellungen, wie z.B. die isometrische Perspektive, die Zentralperspektive oder die dimetrische Darstellung, auf den Zeichnungen dargestellt.

Wie wichtig eine sehr gute räumliche Vorstellung der Konstruktion ist, zeigen mehrere Studien an der TU München aus den 90er Jahren. Hier bekamen Konstrukteure eine Konstruktionsaufgabe vorgelegt und es wurden sowohl die Vorgehensweise der Probanden als auch die Arbeitsergebnisse analysiert [EHRENSPIEL 2009]. Es hat sich gezeigt, dass die Studienteilnehmer, die in der Lage waren, die Ideen perspektivisch zu skizzieren, auch die besseren Lösungen entwickelten.

Mit einem 3D-CAD System kann heute die Konstruktion quasi dreidimensional betrachtet werden und das Verstehen der Konstruktion wird erheblich erleichtert. Allerdings stellt sich bei der genaueren Betrachtung heraus, dass die CAD-Modelle am "ebenen" Bildschirm perspektivisch, zweidimensional dargestellt werden. Um die virtuellen Computermodelle fotorealistisch im Maßstab 1:1 betrachten zu können, werden sogenannte PowerWalls eingesetzt. Sollen die 3D-Modelle stereoskopisch dargestellt werden, sind virtuelle Wände oder virtuelle Räume (Cave) notwendig. Im zweiten Einsatzfall taucht der Nutzer selbst in die virtuelle Umgebung des stereoskopischen Modells ein und kann mit diesem interagieren. In diesem Fall spricht man von einer immersiven, virtuellen Umgebung. In der Regel sind die Hardwarekomponenten austauschbar, was bedeutet, dass an einer virtuellen Wand oder auch in einer Cave fotorealistische Bilder projiziert werden können.

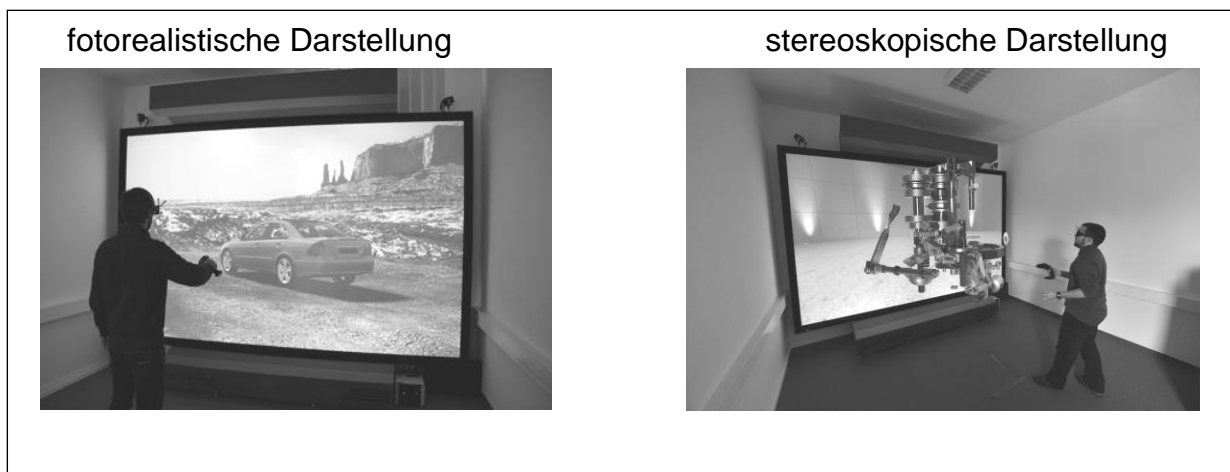


Abbildung 9: Anwendungsbeispiele einer virtuellen Wand

Erzeugung des stereoskopischen Effekts:

Das dreidimensionale Sehen und damit die Tiefenwahrnehmung des Menschen beruht darauf, dass jedes Auge ein Bild wahrnimmt. Dadurch, dass die zwei Augen versetzt sind, kommen die beiden erfassten Bilder nicht zur Deckung. Sie sind versetzt. Aufgrund des Bildversatzes kann das menschliche Gehirn die Tiefeninformationen ermitteln.

Der Effekt des Bildversatzes wird auch ausgenutzt, um räumlich wirkende Darstellungen zu projizieren. Es werden zwei versetzte Bilder auf einer Projektionsfläche erzeugt. In einem weiteren Schritt muss erreicht werden, dass das eine Bild auf das eine Auge des Menschen fällt und das zweite Bild muss auf das andere Auge fallen. Hier gibt es passive und aktive Verfahren:

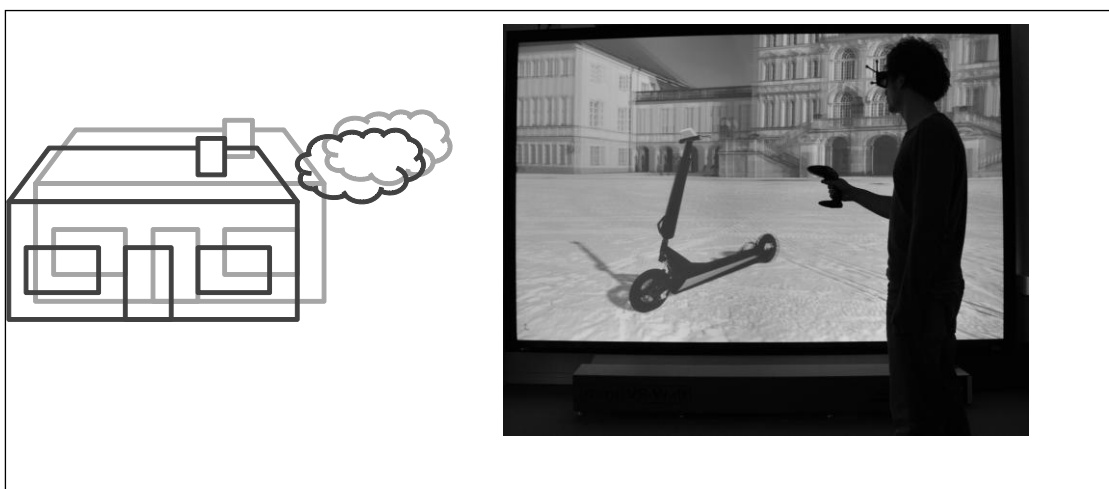


Abbildung 10: stereoskopischer Effekt durch die Projektion zweier, versetzter Bilder

Passive Verfahren basieren darauf, dass je ein Projektor ein unterschiedlich kodiertes Bild versetzt erzeugt. Der Betrachter hat wiederum eine Filterbrille mit zwei verschiedenen Filtereigenschaften auf, die wiederum nur das eine Bild auf das rechte Auge durchlässt und das andere Bild auf das linke Auge durchlässt. Somit kann das menschliche Gehirn aus den zwei nicht deckungsgleichen Bildern eine dreidimensionale Abbildung erzeugen (siehe Abbildung 11).

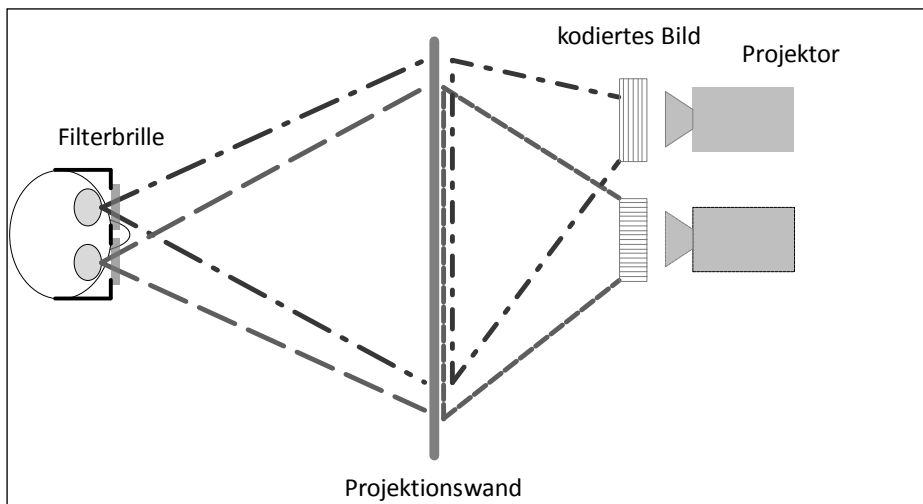


Abbildung 11: passives Projektionsverfahren durch Filtertechnik

Zur Bildtrennung werden drei Verfahren angewandt:

■ **Farbfiltertechnik**

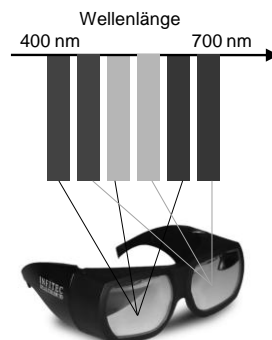
Hier besitzen die Filterbrillen je einen Rot/Blau- oder Rot/Grün-Filter. Das mit Rotanteilen angereicherte Bild durchdringt den blauen bzw. grünen Filter. Das mit Blau bzw. Grün angereicherte Bild wird durch den Rotfilter geschickt.

■ **Polarisationstechnik**

Mit dem ersten Projektor wird ein horizontal polarisiertes Licht erzeugt, das den horizontalen Polfilter der Brille durchdringen kann. Der zweite Projektor erzeugt ein vertikal polarisiertes Licht, das wiederum nur durch den Polfilter des zweiten Brillenglases durchgelassen wird. Neigt der Betrachter seinen Kopf zur Seite, verringert sich die Lichtstärke sehr stark. Um diesen Nachteil zu kompensieren, kann zirkular polarisiertes Licht erzeugt werden.

■ **Interferenzfiltertechnik**

Die einzelnen Farbbänder des Lichts werden in zwei Bereiche aufgeteilt und somit werden zwei Bilder erzeugt, die aus dem unteren bzw. oberen Frequenzbereich bestehen. In den zwei Brillengläsern werden dann die unterteilten Frequenzbänder gefiltert.



Aktive Verfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass ein Projektor abwechselnd (hintereinander) die versetzten Bilder erzeugt. Die Bildwechselfrequenz ist dabei so groß, dass das menschliche Gehirn dies nicht wahrnehmen kann.

Mit einer Shutterbrille werden abwechselnd das linke und das rechte Brillenglas geschlossen. Dadurch werden die versetzten Bilder wahrgenommen. Die zeitliche Abstimmung des Öffnen und Schließens der Brillengläser mit den Bildfolgen erfolgt durch eine Synchronisationseinheit, die die Schaltsignale an die Brille überträgt (Abbildung 12).

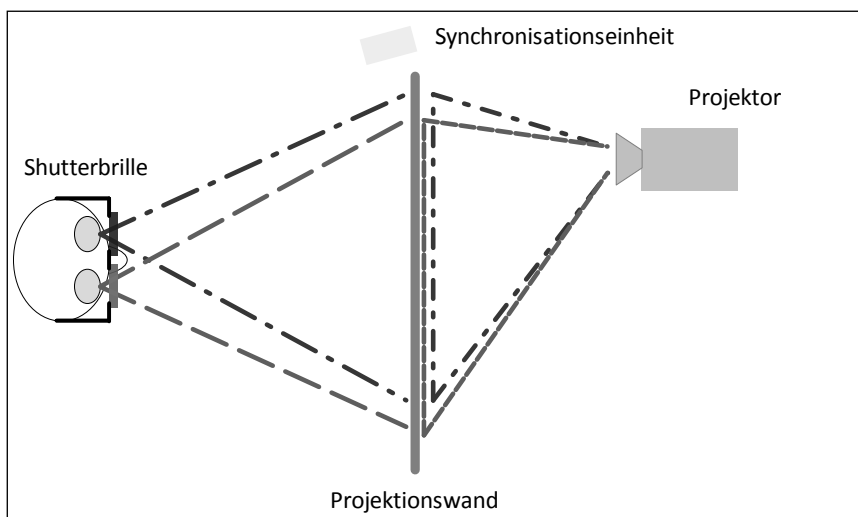


Abbildung 12: aktives Projektionsverfahren durch Shutterbrille

Ist eine Projektionsleinwand vorhanden, spricht man von einer virtuellen Wand oder einer PowerWall. Bei dieser Geräteausstattung kann der Betrachter das räumliche Modell nur sehen, wenn er nach vorne schaut. Möchte der Betrachter zusätzlich Geschehnisse auf der rechten oder linken Seite erkennen, so müssen zusätzlich seitliche Projektionswände positioniert werden. Die kann natürlich räumlich auch soweit ausgebaut werden, dass an allen sechs Seiten des Raumes Projektionsflächen vorhanden sind. In diesem Fall spricht man vom virtuellen Raum oder von einer "Cave".

Zusatzgeräte:

Zur Verbesserung der Immersivität (Vermittlung von Sinneseindrücken, die der Realität sehr nahe kommen) stehen verschiedene Zusatzgeräte zur Verfügung. Im Einzelnen werden hier drei Zusatzgeräte, der Fly-Stick, das Trackingsystem und die haptischen Eingabegeräte beschrieben:

Fly-Stick:

Mit dem Fly-Stick kann das räumliche Modell gesteuert werden. Hierbei lassen sich beispielsweise die Modellposition verändern und die Darstellungsmodi einstellen oder Teile können gegriffen werden, um diese auszubauen.



Abbildung 13: im 3D-Visualisierungszentrum eingesetzter Fly-Stick der Fa. Advanced Realtime Tracking GmbH

Tracking System:

Im einfachsten Fall kann der Betrachter das stereoskopische 3D-Modell vor sich betrachten und es durch den Fly-Stick bewegen. Wenn der Betrachter in der Realität seinen Kopf bewegt oder um das Objekt herumläuft, so verändert sich der Blickwinkel auf den Gegenstand. Diese Veränderung der Sichtweise kann ebenfalls in der

virtuellen Realität nachgebildet werden. Mit Trackingsystemen wird in Echtzeit die veränderliche Position des Betrachters erfasst und die Lage des 3D-Modells zum Betrachter wird laufend neu berechnet. Damit entsteht der Eindruck, dass sich der Akteur um das Objekt bewegt.

In der ersten Ausbaustufe erfolgt die Erfassung der Kopf- oder Handposition des Menschen beispielsweise über passive Reflektorkugeln und Trackingkameras. Darüber hinaus lassen sich die Positionen aller Gliedmaßen erfassen. Dies führt dazu, dass die gesamte Motorik des Menschen, aber auch anderer Lebewesen, als Avatar in der virtuellen Welt abgebildet werden kann.



Abbildung 14: Trackingssystem mit passiven Reflektorkugeln zur Erfassung der Kopfposition

Haptische Eingabegeräte:

Der Vollständigkeit halber sind hier noch die haptischen Eingabegeräte erwähnt. Diese Geräte, meist Joystick oder Datenhandschuhe, sollen durch Force Feedback (Kraftrückkoppelung) dem Nutzer der virtuellen Realität ein gesteigertes reales Empfinden vermitteln. Diese Geräte geben dem Anwender Rückmeldung, wenn ein virtuelles Teil gegriffen wird und während der Bewegung mit anderen Teilen kollidiert. Allerdings befinden sich diese Geräte noch im Anfangsstadium des Einsatzes und sind zudem sehr unhandlich, was wiederum das realistische Empfinden trübt.

Prozessbeschreibung der virtuellen Realität

Mit der Einführung von 3D-CAD Systemen war es möglich die am Computer konstruierten Modelle perspektivisch darzustellen. Damit entstand ein quasi räumlicher Eindruck. Um aber von einer virtuellen Realität sprechen zu können sind drei weitere Merkmale zu erfüllen:

1. eine virtuelle Szene ist erforderlich, d.h. es müssen Informationen über Gestalt und Verhalten des virtuellen Prototypen vorliegen,
2. das Gefühl einer Immersion muss entstehen, d.h. der Mensch muss das Gefühl haben, dass er sich in der virtuellen Umgebung befindet ("being there") und
3. es müssen Interaktionen möglich sein, d. h. der Mensch agiert mit den Modellen in Echtzeit

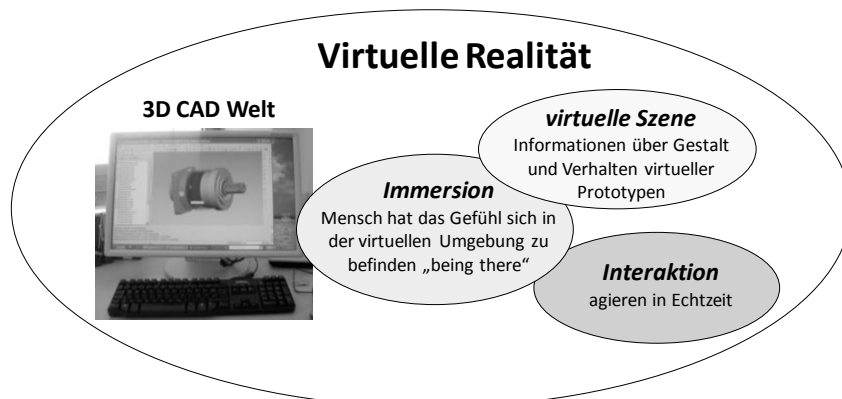


Abbildung 15: Merkmale der virtuellen Realität

Bezogen auf die fotorealistische Darstellung nach Abbildung 9 wird die virtuelle Szene dadurch erzeugt, dass fotorealistische Oberflächen, Texturen und Spiegelflächen dargestellt werden. Der immersive Eindruck entsteht aufgrund der 1:1 Projektion, Durch verschiedene Betrachtungswinkel und einer "fly through" Funktion können Interaktionen vorgenommen werden.

Mit Hilfe der stereoskopischen Darstellung wird der Eindruck der virtuellen Realität verstärkt.

Hier wird die virtuelle Szene beispielsweise durch dynamische Kollisionsbetrachtungen oder durch das spezifische Verhalten von flexiblen Materialien erweitert. Die Immersion wird u.a. durch die stereoskopische Projektion und durch haptische Geräte verstärkt. Letztlich kann durch Navigations- und Auswahlfunktionen das VR-Modell manipuliert werden. Somit können auch Montage- und Demontagesimulationen ausgeführt werden.

Vorteile und Merkmale:

Gegenüber dem Arbeiten am 3D-CAD Bildschirm erschließen sich durch den Einsatz von VR-Anlagen in Verbindung mit der entsprechenden Software folgende Vorteile:

- An einer PowerWall lassen sich fotorealistische Darstellungen im Maßstab 1:1 projizieren
 - Der Betrachter empfindet das Modell als realistischer und kann aufgrund der realen Modellgröße Designaspekte besser beurteilen als auf einem kleinen Bildschirm.
- Designreviews sind an virtuellen 1:1 Modellen möglich
 - stereoskopische Darstellungen sind für technisch weniger versierte Personen verständlicher
- erweiterte Simulationsmöglichkeiten
 - z.B. Sichtfeldsimulationen
Probanden können in einem realen Fahrersitz Platz nehmen. Durch die Projektion des Fahrzeuginnenraums oder der Führerhauskabine eines Krans können tote Winkel ermittelt werden. Damit werden beispielsweise sichteinschränkende A-Säulenkonstruktionen vor dem Bau des Fahrzeugs erkannt.
- Mensch/Avatar Schnittstellen sind realitätsgetreu umsetzbar
 - Montageabläufe können durch den Menschen am virtuellen Modell simuliert werden.
 - Kollisionsbetrachtungen während der Einbauphase sind möglich (3D-CAD Programme erlauben nur Kollisionsuntersuchungen im eingebauten Zustand).
- Virtuelle Realität kann mit realen Objekten kombiniert werden (Mixed Reality)
 - schwer simulierbare Haptik kann mit realen Objekten eingebunden werden

Das 3D-Visualisierungszentrum verfügt über eine 3,53 m x 2,20 m große VR Wall der Firma Schneider Digital. Das gesamte darzustellende Bild wird in Clusterrechnern in vier Quadranten unterteilt. Jedes Teilbild wird von vorne durch je einen Stereoprojektor auf die Leinwand projiziert. In der Gesamtheit entsteht dadurch mittels vier Stereobeamer eine virtuelle Projektion.

Ergänzt wird die Hardware durch einen Fly-Stick und ein Trackingsystem der Firma Advanced Realtime Tracking GmbH.

Zur Aufbereitung und Visualisierung der 3D-CAD Daten dient die Software DeltaGen der Firma RTT AG.

3. Fallbeispiele

Anhand einiger ausgewählter Fallbeispiele wird aufgezeigt, wie sich die drei Verfahren Scannen, Rapid Prototyping und virtuelle Realität zu den unterschiedlichsten Prozessketten vereinen lassen. Gleichzeitig sollen diese Beispiele als Anregung dienen, um weitere Produktentwicklungsprozesse in Verbindung mit diesen 3D-Werkzeugen zu erstellen, mit dem Ziel die Entwicklung zu beschleunigen, die Entwicklungs- und Produktqualität zu verbessern und die Entwicklungskosten zu reduzieren.

Prozesskette: Scannen - Rapid Prototyping



Abbildung 16: Modellierung und Test eines neuen Eisstockgriffs

Aus Knetmasse modellierte Griffe für Eisstöcke wurden eingescannt. Aus den Punktwolken wurde ein Polygonnetz erzeugt, das in die Software der Rapid Prototyping Maschine überspielt werden konnte. Hieraus entstand abschließend ein belastungsfähiger Griff aus ABS-Kunststoff.



Abbildung 17: menschliches Herz aus ABS-Kunststoff, hergestellt auf der Basis von CT-Daten

In der Computertomographie-Datei eines eingescannten menschlichen Körpers sind alle Körperteile wie die Knochen, das Gewebe, die Muskeln usw. in einer Punktwolke enthalten. Um die Daten des Herzes zu erhalten, mussten die umgebenden Punkte gelöscht werden. Im Anschluss daran konnten dann die Polygonnetze generiert werden und abschließend erfolgte die Herstellung des Rapid Prototyping Modells.

Prozesskette: Simulation - Rapid Prototyping - Test



Abbildung 18: Test eines Wasserkrafttrades

Im Rahmen einer Bachelorarbeit entstand ein Kaplanlaufrad, das konstruiert, simuliert, gebaut und getestet wurde [HOFMEISTER 2009]. Mit konventionellen, spanenden Fertigungsmethoden war das Kaplanlaufrad nicht wirtschaftlich herstellbar. Gießverfahren kamen aufgrund der Stückzahl „Eins“ nicht in Frage. Deshalb blieb als wirtschaftliche Lösung nur, das Laufrad als Rapid Prototyping Teil mit einem generativen Fertigungsverfahren aus Kunststoff herzustellen. Das so gefertigte Kaplanlaufrad aus ABS Kunststoff konnte nun in ein relativ einfach gestaltetes Blechgehäuse (Saugrohr) eingebaut und getestet werden. Dieses Fallbeispiel zeigt hier in eindrucksvoller Weise, dass mit Hilfe der generativen Fertigungsverfahren (Rapid Prototyping) Teile wirtschaftlich generierbar sind, die mit konventionellen Fertigungsverfahren (5 Achsen-Fräsen) nur äußerst aufwendig herstellbar sind.

Prozesskette: Scannen - virtuelle Realität



Abbildung 19: Stereoskopische Visualisierung der CT-Daten eines Herzen

Eine Alternative zum bereits oben geschilderten Prozess, aus den CT-Daten Hardwaremodelle zu erzeugen, ist die stereoskopische Visualisierung der gescannten Punktwolken auf einer virtuellen Wand. Damit wird dem Betrachter der Eindruck vermittelt, dass das Modell, hier das menschliche Herz, real im Raum "schwebt". Durch Interaktionen mit dem Fly-Stick in Verbindung mit dem Trackingsystem lässt sich das Herz von allen Seiten betrachten und auf mögliche Gefäßveränderungen hin untersuchen.

Prozesskette: Reverse Engineering (Scannen - Qualitätskontrolle)



Abbildung 20: Soll-/Ist-Vergleich von Gussteilen

Eine weitere Möglichkeit, Scandaten softwaretechnisch zu verarbeiten, besteht im Soll-/Ist-Vergleich von Bauteilen. Gerade bei komplexeren Geometrien, wie beispielsweise bei der Erstmusterprüfung von Gussteilen, ist die vollständige messtechnische Erfassung der Geometrie mit taktilen Messmethoden (z.B. über die Koordinatenmesstechnik) sehr aufwendig und zeitintensiv. Aus diesem Grund reduzieren sich die Messaufgaben auf die wesentlichen Hauptmaße. Zur messtechnischen Erfassung der gesamten Kontur bietet sich das 3D-Scannen an. Hier wird das reale Bauteil erfasst und die aufgenommene Punktwolke und das ideale CAD Modell übereinander gelegt. Über farbliche Darstellungen oder Textangaben können die Abweichungen vom realen Modell zum CAD Modell dargestellt werden. Über diese Prozesskette ist dann eine 100% - Prüfung der Geometrie möglich.

Prozesskette: Reverse Engineering (Scannen - Konstruktion)



Abbildung 21: Vermessung bestehender Bausubstanz und Anbaukonstruktion

Besteht die Aufgabenstellung darin, bestehende Abmessungen zu erfassen (Schnittstellenerfassung), um an bestehende Gegebenheiten neue Konstruktionen anzupassen, so ist dies bei zugänglichen Objekten vielleicht noch einfach. Handelt es sich beispielsweise um Gebäudeteile, wird die Vermessung aufwendiger. In diesem Fall können die Gebäudeteile eingescannt und direkt aus den Punktwolken Abstände entnommen werden, die wiederum als Basis für die Anbaukonstruktion dienen.

Würden nur einzelne Punkte vor Ort erfasst werden, besteht die Gefahr, dass Messpunkte vergessen werden. Dies bedeutete, dass eine weitere Messung erforderlich wäre. Ist das zu messende Objekt weiter entfernt, müssen neben den reinen Messzeiten auch die Reisekosten mit in die Aufwendungen mit eingerechnet werden. Hier lässt sich ein weiterer Vorteil herausstellen: Bei der vollständigen 3D-Erfassung liegen alle Messpunkte vor und es muss nur die Punktwolke am Rechner aufgerufen werden, um die fehlenden Informationen zu erhalten. Eine erneute Messkampagne ist in diesem Fall nicht nötig.

Prozesskette: Scannen - Konstruktion - Rapid Prototyping



Abbildung 22: Konstruktion einer Bremsenhalterung

Das hier gezeigte Beispiel betrifft ebenfalls die Schnittstellenerfassung mit einem 3D-Scanner. Da die Hinterradschwinge des vorliegenden Fahrradrahmens keine prismatische, sondern veränderliche Kontur aufweist, ist eine Zweipunktmessung an verschiedenen Stellen nicht ausreichend, um die Konstruktion des Bremsenhalters als Anbauteil durchführen zu können. Das Einscannen der kompletten Rahmengenometrie hat auch hier Vorteile.

In einem weiteren Prozessschritt wurde direkt aus dem CAD-Modell ein Rapid Prototyping Teil hergestellt, um Einbauversuche und erste Funktionstests unter verminderten Belastungsbedingungen durchzuführen.

Prozesskette: Rapid Shaping Prozess



Abbildung 23: Herstellung von Kernformen nach dem Rapid Shaping Prozess

Ein erweiterter Einsatzbereich des Rapid Prototyping bzw. des Rapid Tooling ist die Herstellung von Kunststoffformen aus ABS Kunststoff, die als Laminierformen zur Herstellung von CFK-Bauteilen dienen. Mit Hilfe dieses sogenannten Rapid Shaping Prozesses können teilweise teure Fräsformen durch kostengünstige Kunststoffformen ersetzt werden [HORNFECK 2012]. Neben den Laminierformen lassen sich auch Formkernteile herstellen, die nach dem Laminieren ausgewaschen werden können.

Prozesskette: Fabrikplanung

Durch kontinuierliche Umbaumaßnahmen in den Produktionsstätten ist in vielen Fällen die Dokumentation nicht mehr auf dem aktuellen Stand. Weitere Planungsarbeiten werden dadurch erheblich erschwert. Durch das Einscannen der vorhandenen Räumlichkeiten kann die Ist-Situation aufgenommen werden und auf dieser Basis die Um- und Neuplanung erfolgen (Abbildungen 23 bis 25).

Zwei Vorteile lassen sich bei dieser Vorgehensweise besonders hervorheben:

1. Der Aufwand, die Ist-Situation zu erfassen, ist wesentlich geringer, als die Erstellung eines 3D-CAD Modells. (Eine Erfassung der Ist-Situation in einem 2D-Layoutplan ist in vielen Fällen nicht zielführend, da die räumlichen Verhältnisse ebenfalls die Planung beeinflussen.)
2. Mögliche Kollisionen und Probleme mit Freiräumen (Verkehrswege, Bedien- und Wartungsräume, etc.) können erkannt werden.
3. Schnittstellen zu den peripheren Einrichtungen (Versorgungsleitungen, Spänetransportsysteme etc.) sind erfassbar und die Anschlussbaugruppen können funktionsgerecht eingeplant werden.



Abbildung 24: Punktwolke der Maschinenhalle mit alter Maschine [BÜTTNER 2012]



Abbildung 25: Punktwolke der Maschinenhalle, alte Maschine gelöscht [Büttner 2012]

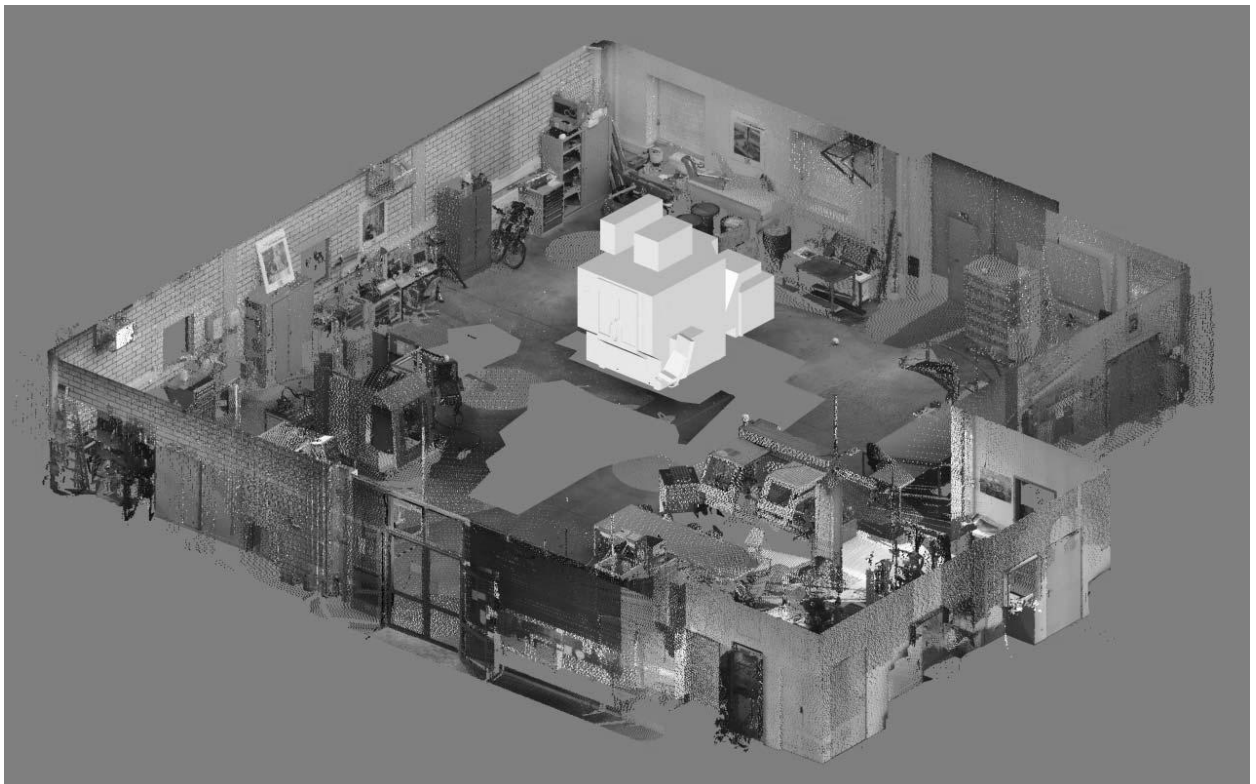


Abbildung 26: Punktwolke der Maschinenhalle mit neuer Maschine [Büttner 2012]

4. Zusammenfassung und Ausblick

Im 3D-Visualisierungszentrum der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg, dessen Aufbau durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung gefördert wird, werden die Werkzeuge Scannen, Rapid Prototyping und virtuelle Realität eingesetzt, um die Produktentwicklung zu beschleunigen. In diesem Zusammenhang werden die erforderlichen Prozesse, aufbauend auf die in der Konstruktion weit verbreiteten 3D-CAD Systeme, definiert.

Anhand der aufgezeigten Fallbeispiele ist ersichtlich, dass durch eine gezielte Einbindung dieser Werkzeuge Entwicklungskosten und -zeit eingespart und die Produktqualität gesteigert werden kann. Hierzu ist es erforderlich, dass sich Techniker und Ingenieure mit diesen Technologien auseinandersetzen und speziell für ihre Anforderungen die entsprechenden Prozesse mitgestalten. Die Beispiele sollen hier eine Anregung geben und stellen nicht die gesamte Einsatzbreite der 3D-Scanner, der generativen Fertigungsverfahren und der virtuellen Realität dar. So werden heute Raums Scanner vom Landeskriminalamt eingesetzt, um Tatorte zu erfassen. Der Vorteil gegenüber der bisherigen Fotodokumentation besteht darin, dass durch die räumlichen Informationen nachträglich Tathergänge rekonstruiert werden können und die Ermittler beliebig oft an den "Ort des Geschehens zurückkehren können".

Durch den sehr erfolgreichen Einsatz dieser Werkzeuge, Prozesse und Arbeitsmethoden darf aber nicht darüber hinweggetäuscht werden, dass es auf diesem Gebiet dennoch einen großen Forschungs- und Entwicklungsbedarf gibt. Gerade das Handling der großen Datenmengen von Punktwolken ist heute, trotz beachtlicher Rechnerleistungen, ein noch nicht gelöstes Problem. Desweiteren setzen die Automobilfirmen Powerwalls und Caves ein, um ihre Fahrzeugmodelle darzustellen. In den Zulieferbetrieben und den übrigen Branchen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik oder der Architektur- und Baubranche geht man teilweise noch mit großer Skepsis an diese Themen heran, da der Nutzen noch nicht richtig transparent ist. Dies gilt gerade auch für den Einsatz der VR-Technologie im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess. Besonders hier gilt es durch Prozessanalysen das Kosten/Nutzen Verhältnis deutlicher herauszuarbeiten.

5. Literaturverzeichnis

[BÜTTNER 2012]

Büttner, J.: Erstellung eines Prozesshandbuchs für die Weiterverarbeitung von Scandaten für die Werkstatt- und Fabrikplanung. Nicht veröffentlichte Bachelorarbeit der Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik der GSO-Hochschule, Aufgabenstellung und Betreuung durch Prof. Dr.-Ing. R. Hornfeck, 2012

[EHRENSPIEL 2009]

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. 4. Auflage. München, Wien: Hanser 2009.

[HOFMEISTER 2009]

Hofmeister, S.: Weiterentwicklung und Optimierung einer axialen Wasserkraftturbine zur Energiegewinnung in freiströmenden Gewässern. Nicht veröffentlichte Bachelorarbeit der Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik der GSO-Hochschule, Aufgabenstellung und Betreuung durch Prof. Dr.-Ing. W. Stütz, 2009

[HORNFECK 2003]

Hornfeck, R.; Höhn, J.: Prozessorientierte 3D Produktentwicklung in einem mittelständigen Unternehmen. In: Technik in Bayern - Aktuelles aus VDI und VDE. Juli/Aug. 2003, 7. Jhg., Ausgabe Nord.

[HORNFECK 2012]

Hornfeck, R.: Rapid Shaping Prozess zur Herstellung von CFK-Bauteilen. Dezember 2012, Nr. 52, Schriftenreihe der GSO-Hochschule Nürnberg.

[REESE 2005]

Reese, J.: Der Ingenieur und seine Designer, Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design. Berlin: Springer, 2005.

[SCHÄPPI 2005]

Schäppi, B.; Andreasen, M.; Kirchgeorg, M.; Radermacher, F.-J.: Handbuch Produktentwicklung. München, Wien: Hanser 2005.