

Abschlussbericht 01.11.07 – 31.10.09

1 Forschungsthema

„Wissensbasiertes Unterstützungssystem für Rapid Prototyping gerechte 3D-CAD-CAM-Prozesse“

2 Zusammenfassung

Durch die sehr kooperative Zusammenarbeit der beteiligten Forschungsstellen konnten, trotz Kürzung der ursprünglich beantragten Mittel, die wesentlichen Projektziele erreicht werden. Zu nennen sind hier vor allem die aufgebaute Wissensbasis und das Informationssystem zur anwendungsbezogenen Verfahrensauswahl und dementsprechenden RP-gerechten Produktgestaltung, die Analyseroutinen zur Qualitätsabsicherung der Geometriedaten im STL-Format, die Gestaltungsfeature für Stützkonstruktionen und für Leichtbaustrukturen sowie die entwickelten Methoden zur Optimierung der Bauteilorientierung. Hier ist es gelungen Konzepte zu entwickeln, wie die verschiedenen Einflussfaktoren unter Beachtung konkreter Anwendungssituationen in Optimierungsstrategien eingebunden werden können.

Festzuhalten ist allerdings auch, dass in einigen Bereichen noch ein großer Entwicklungsbedarf besteht. Dazu gehört

- die weitere Qualifizierung der Algorithmen und Zielfunktionen sowie die Quantifizierung von Bewertungskriterien bei der Multizieloptimierung hinsichtlich der Bauteilorientierung im Bauraum,
- die Weiterentwicklung und Diversifizierung der Algorithmen zur automatischen Generierung von Stützkonstruktionen (automatisch generierte Varianten inkl. Modellierung und Platzierung (stark auf Erfahrungswissen basierend und sowohl verfahrens- als auch geometrieabhängig)),
- die Berücksichtigung des zunehmend anzutreffenden Falls mehrerer (gleicher oder unterschiedlicher) Bauteile im Fertigungsraum und die daraus resultierenden wechselseitigen Einflüsse auf die Qualität und Wirtschaftlichkeit,
- die Einbeziehung einer Vorab-Klassifikation funktionaler und anderer Einzelflächen in die Baulageoptimierung (Bedeutung der Baulage für Oberflächenqualität, Stützkonstruktionen etc.),
- Untersuchungen und wirtschaftliche sowie qualitätsbezogene Analysen zur Berechnung und zum Einsatz variabler (wechselnder) Schichtdicken.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass mit den erreichten Forschungszielen die CAD-RP-Prozesskette geschlossen werden konnte. Insbesondere die Integration der RP-Technologie in den Konstruktionsprozess trägt zur Steigerung der Produkt- und Prozessqualität bei.

Fazit:

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Zielstellung

Für kleine und mittlere Unternehmen stellen interdisziplinäre Produktentwicklungsprozesse zur Sicherung von Qualität und Wirtschaftlichkeit und damit Wettbewerbsfähigkeit eine besondere Herausforderung dar. Aufgrund der kürzeren Marktpräsenz einzelner Produkte, der Vielzahl von Produkthanbietern und des individuellen Kundenverhaltens, ist der Trend zu kleineren Losgrößen bei gleichzeitig steigender Variantenvielzahl zu beobachten. Die erhöhten Ansprüche an die Unternehmen machen es notwendig, mehr Erfahrungs- und Spezialwissen im Produktentstehungsprozess zu berücksichtigen. Dabei spielen besonders die durch Rapid-Technologien hergestellten Prototypen und Werkzeuge eine immer wichtigere Rolle. So werden bereits in frühen Phasen des Produktlebenszyklus verstärkt funktionale und technische Bauteilprototypen benötigt. Grundvoraussetzung für alle Rapid-Technologien bildet ein vollständiges und fehlerfrei geschlossenes 3D-CAD-Modell. Dies setzt jedoch voraus, dass dem Konstrukteur bekannt ist, welche Besonderheiten mit welchen RP-Verfahren verbunden sind.

RP-Modelldaten können entweder durch Modellierung mit einem 3D-CAD-System oder durch taktile bzw. optische Vermessungsmethoden mit anschließender RP-gerechter Datenaufbereitung erzeugt werden. In beiden Fällen können Fehler auftreten, die einen zeit- und kostenintensiven Reparaturaufwand verursachen bzw. zu Ungenauigkeiten am RP-Bauteil führen. Die Ursachen liegen häufig bei falschen Genauigkeits- und Toleranzfestlegungen, ungeeigneten Stützkonstruktionen (Supports) oder auch in der Nichtbeachtung verfahrensspezifischer Besonderheiten (Materialauswahl, Schwindung, lageabhängige Bauteileigenschaften, etc.).

Weiterhin beeinflusst die Wahl der Bauteilorientierung im Bauraum der RP-Anlage maßgeblich die Qualität der Bauteiloberfläche (z. B. Treppenstufen-Effekt). Sie wirkt sich jedoch auch auf weitere Eigenschaften aus, z. B.: die Bauzeit, die Bauteilgenauigkeit bzw. Maßhaltigkeit, Art und Umfang der Stützkonstruktionen sowie den Aufwand für eine notwendige Nachbearbeitung (Post Processing). Gerade durch thermische induzierte Spannungen hervorgerufene Effekte (Verzug, Curling) oder auch die an Bauteilflächen angreifenden Supports beeinträchtigen die Bauteilqualität insgesamt und müssen bei der Bauteilorientierung berücksichtigt werden.

Ziel des Vorhabens war es, im unmittelbaren Arbeitsumfeld des Konstrukteurs und Fertigungsplaners das für die Auswahl der passenden RP-Technologie und für eine RP-gerechte Produktmodellierung erforderliche Wissen zur Verfügung zu stellen. Das zu schaffende Unterstützungssystem sollte die Lösung folgender Teilaufgaben unterstützen:

- Zweckorientierte Auswahl der RP-Verfahren und der damit verbundenen Produkt- und Prozesseigenschaften,
- Substitution vorhandener CAD-Modelle in RP-gerechte Modelle,
- Wissensbasierte Konstruktion technischer Prototypen,
- Hilfestellung bei der Funktionsintegration,
- Sicherung der Datenqualität.

4 Arbeitsergebnisse

4.1 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Zur Erreichung des Forschungsziels arbeiteten die beteiligten Forschungseinrichtungen sehr eng und koordiniert zusammen. Im Prinzip waren drei wesentliche Schwerpunkte zu bearbeiten:

- Generierung und Systematisierung der notwendigen Wissensbasis zur RP-gerechten Bauteilgestaltung
- Digitalisierung der Wissensbasis einschließlich notwendiger Methoden (unter Beachtung bzw. Weiterentwicklung bekannter Methoden der Produktdatentechnologie und des *Knowledge Based Engineering*)
- Aufbau und Test eines verfahrensabhängigen Unterstützungssystems zur RP-gerechten Bauteilgestaltung.

Tabelle 1: Arbeitsschritte und Arbeitsergebnisse

	Arbeitsschritt	Erreichtes Ergebnis
Wissens- Akquisition	Analyse KBE-Methoden	Konzepte zur Anwendung u. Weiterentwicklung mögl. KBE-Methoden
	RP-Strukturierung	Sammlung verfahrensspezifischer Wissenskomponenten
	Gestaltungsrichtlinien	RP/RT spezifische Konstruktionsrichtlinien
	Informationstechnik	Datenbank inkl. Hilfesystem
Konzeption	KBE-Konzept	Algorithmen zur Modellbeschreibung
	Datenmodell	objektorientierter Datenstrukturen
	Regelbasis	Programmiertes Regelwerk mit Datenbankanbindung
	RP-Feature	Routinen und Methoden (C++) zur Support-Erzeugung
	Funktionsintegration	Richtlinien & beispielhafte Umsetzungen
Datenauf- bereitung	Modellanalyse	Anwendung geometrischer Algorithmen zur Modellanalyse
	Qualitätssicherung	Routinen zur STL-Analyse und (teil-)automatisierten Korrektur
	Hilfesystem	Programmierung des HTML-basierten Hilfesystems in Visual Basic
Unterstüt- zungssystem	Modulentwicklung	Tool-Programmierung in C++
	Testbeispiele	Testdurchläufe mit Testbeispielen u. anschl. Analyse
	Verifizierung	Abgleich d. Testbeispiele m. d. Wissensdatenbank u. Erfahrungswerten
	Dokumentation	Dokumentation des Hilfesystems & Programm-Codes

Die **Tabelle 1** liefert einen ersten Überblick über die erreichten Ergebnisse, die nachfolgend ausführlicher erläutert werden. Es wird deutlich, dass trotz Kürzung der ursprünglich beantragten Mittel wesentliche Ziele des Projektes erreicht wurden. In einigen Arbeitsschwerpunkten mussten Anpassungen vorgenommen werden, da die Bearbeitung von Teilthemen, wie die Ermittlung optimaler Bauteilorientierungen oder die Erstellung einer umfangreichen Wissensbasis als Grundlage für RP/RM-gerechte Konstruktionsrichtlinien, komplexer war, als ursprünglich eingeschätzt. Ebenso ergab die Umfrage unter Anwendern, Dienstleistern und Anlagenherstellern sowie die Recherche in Fachliteratur, dass eine Verschiebung bei den betrachteten Verfahren zu empfehlen war. Betrachtet wurden das Strahlschmelzen, das Lasersintern, das Multi-Jet Modeling, das 3D-Printing sowie die Stereolithographie. Unter den betrachteten Verfahren wurde für das Lasersintern das höchste Potenzial zur Funktionsintegration ermittelt. Für die Untersuchungen wurden verschiedene Konzepte der Funktionsintegration

betrachtet, durch die sich gezielt gewünschte Produkteigenschaften und Produktfunktionalitäten einstellen lassen oder die Bauteilanzahl reduziert werden kann. Für diese Funktionen wurden erste Richtlinien erstellt und überprüft.

4.2 Ergebnisse im Arbeitsschwerpunkt Wissensakquisition

Die Analyse aktueller Methoden der wissensbasierten Konstruktion (KBE) hinsichtlich Ihrer Anwendbarkeit auf den betrachteten Problembereich zeigte, dass sich neben CAD-systeminternen Möglichkeiten zur Einbindung von Parameterwertebereichen und Regelkonstrukten vor allem Datenbankanbindungen und die API-Programmierung zur Integration spezieller Wissensdomänen eignen. Für Optimierungsprobleme im Bereich von Bauteilgeometrien, Topologien und räumlichen Positionierungen sind Methoden der algorithmischen Geometrie zu nutzen und weiter zu entwickeln. Hierauf wird bei der Konzeptentwicklung ausführlicher eingegangen.

Zur Akquisition RP-spezifischen Wissens wurde ein Fragebogen erstellt und an Anwender, Hersteller, Universitäten, Dienstleister sowie andere Forschungseinrichtungen im Bereich der generativen Fertigung verteilt. Auf Basis des Fragebogens und Gesprächen (hauptsächlich mit Herstellern) sowie eigener Untersuchungen wurden in Abhängigkeit der Verfahren Konstruktionsempfehlungen aufgestellt. In diesen sind jeweils für die fünf betrachteten generativen Fertigungsverfahren erzielbare Grenzwerte für Wanddicken, Spaltmaße, minimale Radien, erreichbare Fertigungstoleranzen, etc. hinterlegt (siehe Tabelle 2). Darüber hinaus wurden zu den einzelnen Verfahren weitere bei der Konstruktion zu beachtende Randbedingungen erarbeitet und zusammengefasst.

Tabelle 2: Aufgestellte Konstruktionsrichtlinien

	3D-Printing	Lasersintern	Multi-Jet Modeling	Stereolithographie	Strahlschmelzen
Schichtdicke					
z	0,09 - 0,2	0,1 - 0,15	0,016 - 0,04	0,05 - 0,15	0,02 - 0,05
Wandstärke					
xy / z	≥ 0,5 / ≥ 0,5	≥ 0,4 / ≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 0,8 / ≥ 0,8	≥ 0,5 / ≥ 0,4
Spaltmaße					
xy / z	≥ 0,5 / ≥ 0,5	≥ 0,4 / ≥ 0,4	≥ 0,4 / ≥ 0,8	≥ 0,4 / ≥ 0,4	≥ 0,2 / ≥ 1
Bohrungen					
xy / z	≥ 1 / ≥ 1	≥ 1 / ≥ 0,8	≥ 1 / ≥ 0,5	≥ 1 / ≥ 1	≥ 0,6 / ≥ 0,6
Innenradien					
xy / z	≥ 0,5 / ≥ 0,5	≥ 0,5 / ≥ 0,4	≥ 0,3 / ≥ 0,3	≥ 0,5 / ≥ 0,5	≥ 0,3 / ≥ 0,3
Außenradien					
xy / z	≥ 0,5 / ≥ 0,5	≥ 0,5 / ≥ 0,5	≥ 0,4 / ≥ 0,4	≥ 0,5 / ≥ 0,5	≥ 0,2 / ≥ 0,3
Zylinder					
xy / z	≥ 1 / ≥ 1	≥ 1 / ≥ 0,8	≥ 1 / ≥ 1	≥ 1 / ≥ 1	≥ 1 / ≥ 0,8
Maßhaltigkeit					
0,5 - 6	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1
6 - 30	± 0,2	± 0,2	± 0,1	± 0,2	± 0,2
30 - 120	± 0,3	± 0,3	± 0,1	± 0,3	± 0,3
120 - 400	± 0,5	± 0,5	± 0,1	± 0,5	± 0,5
Winkelabweichung					
0 - 10	± 3°	± 1°30'	± 1°30'	± 1°30'	± 1°
10 - 50	± 2°	± 1°	± 1°	± 1°	± 0°30'
50 - 120	± 1°	± 0°30'	± 0°30'	± 0°30'	± 0°20'
120 - 400	± 0°30'	± 0°15'	± 0°15'	± 0°15'	± 0°10'
Materialzugabe					
Fräsen	+ 2	+ 2	+ 2	+ 2	+ 0,2 - 0,5 *
Schleifen	+ 0,5	+ 0,5	ungeeignet	+ 0,5	+ 0,1 - 0,3 *

Zur Validierung und Ergänzung der aufgestellten Regeln wurde ein Prüfkörper entwickelt (Abbildung 1, links), anhand dessen die wesentlichen Geometriebeschränkungen untersucht wurden. Dieser enthält alle maßgeblichen geometrischen Elemente, um eine Validierung durchführen zu können. Der entwickelte Probekörper wurde mit den verschiedenen Verfahren hergestellt (**Abbildung 1**, rechts) und ausgewertet. Die hergestellten Probekörper zeigen, dass teilweise sogar feinere Strukturen herstellbar sind. Jedoch besitzen diese meist nicht die notwendige Stabilität für den Einsatzzweck. Zusätzlich zeigen sich bei Verfahren mit Stützkonstruktionen weitere Einschränkungen. In Abhängigkeit der Entfernungsmethoden und des eingesetzten Materials können die Geometrien weiteren Be-

schränkungen unterworfen sein. Beispielsweise können bei der manuellen Entfernung der Stützkonstruktionen beim Multi-Jet Modeling von Wachs feine gestützte Strukturen wie Wände oder Zylinder brechen, während diese ungestützt problemlos herstellbar sind. Dies gilt auch für die Herstellung von Bohrungen in der x-z bzw. y-z Ebene, da hier die Bohrung stets mit Stützkonstruktionen ausgefüllt wird. Zudem sind die geometrischen Grenzen sehr anlagenspezifisch definiert. So werden beim Lasersintern aufgrund unterschiedlicher Offset-Werte unterschiedliche minimale Wandstärken erzielt, da bei größerem Offset manche Wandstärken von der Anlagenssoftware nicht mehr als Volumen erkannt werden können. Daher ist für die Festlegung von Konstruktionsrichtlinien für die verwendeten Anlagen die Herstellung des entwickelten Probekörpers zu empfehlen, da mit diesem die anlagenspezifischen geometrischen Grenzen effizient überprüft werden können.

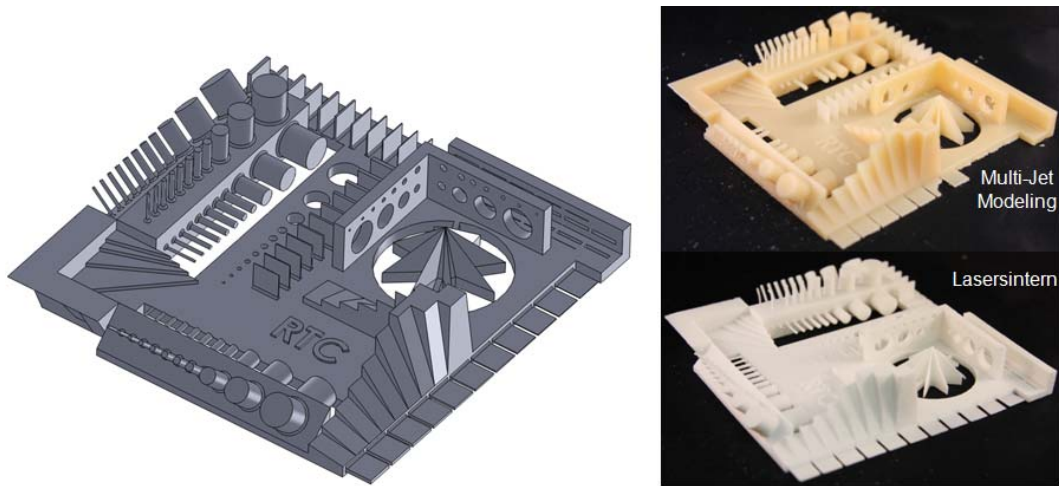


Abbildung 1: Probekörper zur Validierung der Geometriebeschränkungen

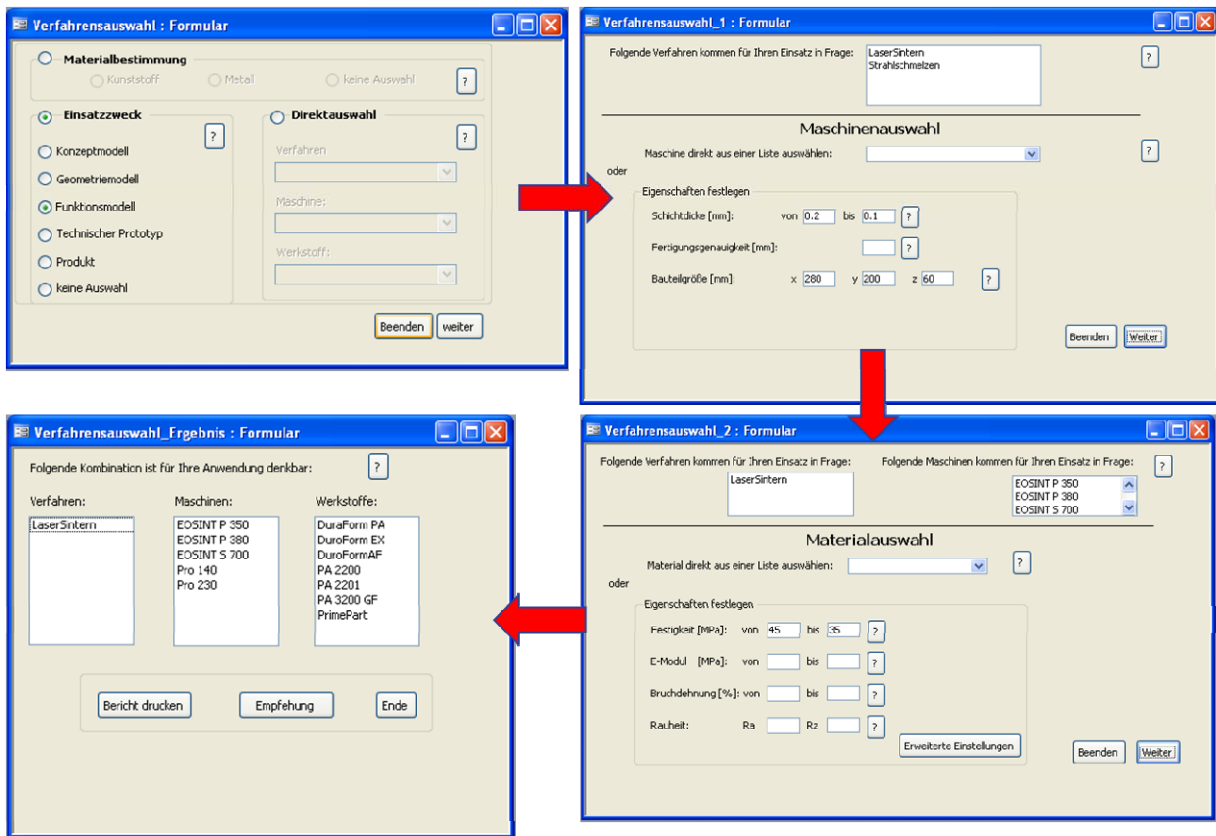


Abbildung 2: Tool zur Verfahrensauswahl

Eines der im Projekt verfolgten Ziele stellte die Unterstützung des Anwenders bei der Verfahrensauswahl dar (**Abbildung 2**). Dazu wurden die für die Verfahren Lasersintern, Strahlschmelzen, 3D-Printing, Multi-Jet Modeling sowie Stereolithographie verfügbaren Materialien und Anlagen recherchiert und die zugehörigen Kennwerte in geeignet aufbereiteten Tabellen hinterlegt. Durch sinnvolle Verknüpfung der Daten sind den Maschinen auf ihnen verarbeitbare Materialien zugeordnet. Auf Basis dieser Tabellen wurde eine Datenbank in Microsoft Access erstellt. Die Datenbank soll den Anwender bei der Auswahl von Verfahren und Material nach seinen spezifischen Anforderungen unterstützen. Die Auswahl geeigneter Verfahren erfolgt durch verschiedene Abfrageformulare (Abbildung 2), in denen der Verwendungszweck wie Konzeptmodell, Funktionsprototyp oder Produkt, gewünschte Maschineneigenschaften wie Bauraumgröße, Schichtdicke oder Fertigungsgenauigkeit sowie gewünschte Materialeigenschaften wie Festigkeitswerte, Oberflächenrauheiten, etc. ausgewählt werden können. Die Auswahl erfolgt dabei schrittweise. Zuerst wird der Verwendungszweck festgelegt, anschließend erfolgt die Verfahrensauswahl bzw. die Verfahrenseinschränkung durch entsprechende Filter. Zuletzt können spezielle Anforderungen an das Material berücksichtigt werden. Weitere Filterprozesse führen schließlich zu geeigneten Verfahren und Materialien. Zusätzlich ist die Pflege und Erweiterung der in der Datenbank hinterlegten Informationen durch spezielle Formulare vorgesehen. So lassen sich Einträge einzelner Anlagen und Materialien aufrufen und aktualisieren. Zusätzlich wurde zu dem erarbeiteten Tool eine Softwarehilfe erstellt, welche neben der Funktion der einzelnen Formulare auch die Begrifflichkeiten erläutert und somit die Bedienerfreundlichkeit sicherstellt.

4.3 Ergebnisse im Arbeitsschwerpunkt Konzeption

4.3.1 Gesamtkonzept zur Wissensintegration

In Abbildung 3 ist die Struktur des vorgesehenen wissensbasierten Unterstützungssystems dargestellt. Zusätzlich zum Antragsumfang wurde ein Bauteil-Orientierungstool eingeführt, da sich die Orientierung als maßgeblich für die Bauteilqualität herausstellte.

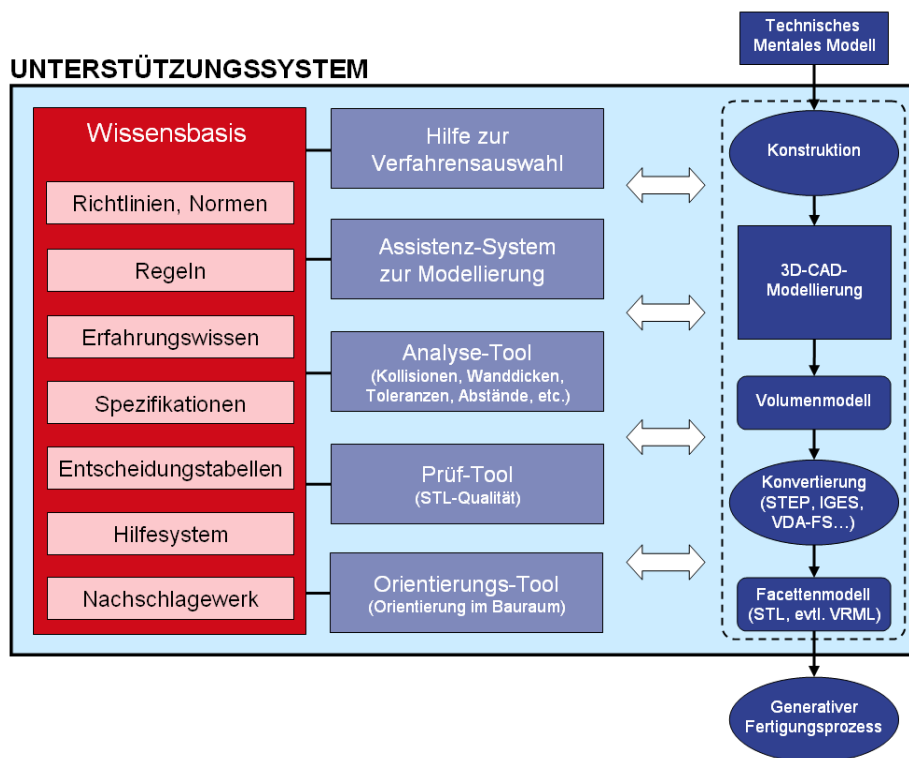


Abbildung 3: Gesamtkonzept des Unterstützungssystems

Im Rahmen der Projektbearbeitung hat sich die Bauteilanalyse unter Berücksichtigung fertigungsrelevanter Aspekte als besonderer Arbeitsschwerpunkt herauskristallisiert, so dass das CAD-nahe Grund-

konzept durch eine objektorientierte Programmierung substituiert wurde. Dies eröffnete weitere Möglichkeiten der Modellanalyse und trug des Weiteren zur deutlichen Performance-Steigerung bei. Die hierdurch gewonnenen Erkenntnisse beeinflussten weitere Arbeitsschritte, so dass sich die Optimierung der RP-gerechten Bauteilorientierung zu einem wesentlichen Projektziel entwickelte. Für metallbasierte Verfahren stellte darüber hinaus das Thema Stützstrukturen eine besondere Herausforderung dar. Hieraus wurden unter anderen folgende Teilaufgaben im informationstechnischen Bereich abgeleitet:

- Einlesen der Bauteilgeometrie (im STL-Format), Herstellung der topologischen Zusammenhänge
- Prüfung der STL-Datensätze und Analyse potenzieller möglicher Fehlerquellen, Ansätze zur automatisierten oder teilautomatisierten Korrektur
- Berechnung der konvexen Hülle zur Reduzierung des Berechnungsaufwands
- Ermittlung der Minimal- und Maximalabmessungen mit Hilfe von Begrenzungsobjekten (Bounding Box, Bounding Sphere)
- Umsetzung beliebiger Transformationen der Bauteilgeometrie zur Simulation von Drehungen
- Simulation des Slicing-Prozesses und die damit verbundene Ermittlung des Fehlervolumens zur Quantifizierung der Oberflächenqualität
- Identifizierung und Berechnung der Kontaktfläche zwischen Bauteiloberflächen und Stützkonstruktionen, Generierung der Stützstrukturen sowie Ermittlung des aufzubringenden Materialvolumens zur Herstellung der Supports
- Entwurf von Algorithmen zur Berechnung der Bauzeit, Abschätzung der resultierenden Baukosten
- Implementierung eines Genetischen Algorithmus zur Reduzierung des Rechenaufwands

4.3.2 Wissensbasierte Feature für Stützkonstruktionen

Im Rahmen der Arbeiten zum Projekt-Schwerpunkt „Stützkonstruktionen“ war eine Reihe inhaltlich-algorithmischer Fragestellungen und Aufgaben zu bearbeiten, die die Konzeption, die Parametrisierung und die (teil-) automatisierte Generierung von technologiespezifischen Stützkonstruktionen zum Inhalt hatten. Insbesondere waren dies:

- Entwicklung geeigneter (wissensbasierter) Konstruktions-Features zur fertigungsgerechten Erzeugung erforderlicher Stützkonstruktionen
- Analyse-Feature zur Ermittlung von lage- und orientierungsabhängigen Hinterschneidungen
- Bereitstellung unterschiedlicher Support-Profile (Waben- und Säulenstruktur)
- Definition von Profilkörpern mit veränderlichem Querschnitt (abhängig von Bauteilgröße, Hinterschneidungen, etc.)
- Regelbasierte Vervielfältigung der Support-Elemente zur Gesamtstützkonstruktion (Struktur) in Abhängigkeit der auftretenden Hinterschneidungen.

Diese Aufgaben wurden in enger Zusammenarbeit zwischen den Forschungsstellen bearbeitet. Da die Supports (erforderliche Anzahl, Größe, Form, Entfernbarkeit u. a.) ein wesentliches Kriterium auch für die Lageoptimierung nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten darstellen, war eine automatische Simulation der Stützkonstruktionen (ggf. sogar unabhängig von leicht abweichenden praktischen Realisierungen durch einen Praktiker oder durch Anwenderprogramme) zur Bewertung und Vergleichbarkeit verschiedener Bauteilorientierungen erforderlich. Die Aufgabe bestand darin, geometrisch und topologisch korrekte Dreiecksnetze zur Repräsentation der Supports automatisch zu generieren und an den jeweils vorgegebenen STL-Datensätzen der zu fertigenden Bauelemente zu platzieren, um damit wiederum eine reproduzierbare und evaluierbare Vorgabe für die Analyse und Bewertung der gegebenen Bauteilpositionierung zu schaffen.

Für polymerisierende Verfahren sowie metallbasierte Schmelzverfahren bestand die Zielstellung in der selektiven und parametergesteuerten Generierung lokaler Strukturen zur mechanischen Abstützung von Werkstückelementen im Prozess ihrer Herstellung. Die Auswahl der zu stützenden Flächen hängt dabei direkt von der gewählten Orientierung des Werkstücks und von weiteren technologischen Para-

metern ab. Neben dem aus Anzahl und Größe der erforderlichen Supports resultierenden zusätzlichen Material- und Fertigungsaufwand ist auch die Möglichkeit der Werkzeug-Zugänglichkeit und der Aufwand für das nachträgliche Entfernen der Supports ein entscheidender Parameter für die Bewertung der gewählten Fertigungslage.

Für die Beschreibung der zu generierenden Stützkonstruktionen wurde festgelegt, dass die Auswahl der zu stützenden Flächen anhand der Normalenrichtung der einzelnen Dreiecke realisiert werden soll (bzw. ggf. als Parameter vorgegebener Z-Richtungsvektor). Weiterhin wurden folgende Parameter zur Steuerung der Support-Generierungstools vereinbart:

- *Support Angle* (zulässige lokale Steigung bzw. Abweichung von Z-Richtung, im Fall „stufiger“ oder unterschiedlich geneigter Flächen werden automatisch mehrere einzelne Supportbereiche identifiziert)
- *XY-Offset* (Abstand eines Supports zur Außenkante der unterstützten Fläche)
- *No Support Offset* (kein Support an kleinen Überhängen senkrechter Wände)
- *Min. Height Support* (ab welcher Höhe wird eine Wand zu einer Support tragenden Fläche)
- *Hatching Parameter* (Blocklänge, Breite der Zahnspitze, Breite der Zahnbasis, Zahnintervall)
- *Support Thickness* (Für die Wandstärken der Supports wurde zunächst ein Kompromiss vereinbart, der besagt, dass eine vorgegebene Wandstärke existiert und als Parameter übergeben wird. In der programmtechnischen Realisierung werden damit komplette, „doppelwandige“ Supports generiert, während in der Praxis der Anwendungen zum Teil nur „eindimensionale“ Beschreibungen der Supportstruktur genutzt werden (maschinen- und technologieabhängig wird die Wandstärke der Supports dann mit der minimalen Laser-Stärke realisiert).

Durch die FS2 wurden die entsprechenden algorithmischen Module entwickelt, anhand mehrerer durch die FS3 zur Verfügung gestellter STL-Baugruppen unterschiedlicher Komplexität getestet und als PlugIn in der Entwicklungsumgebung *Final Surface* bereitgestellt. Beispiele sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt.

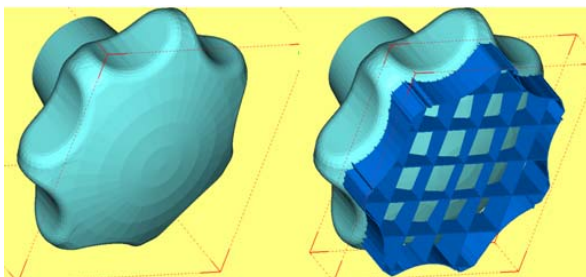


Abbildung 4: STL-Datensatz mit Stützkonstruktion

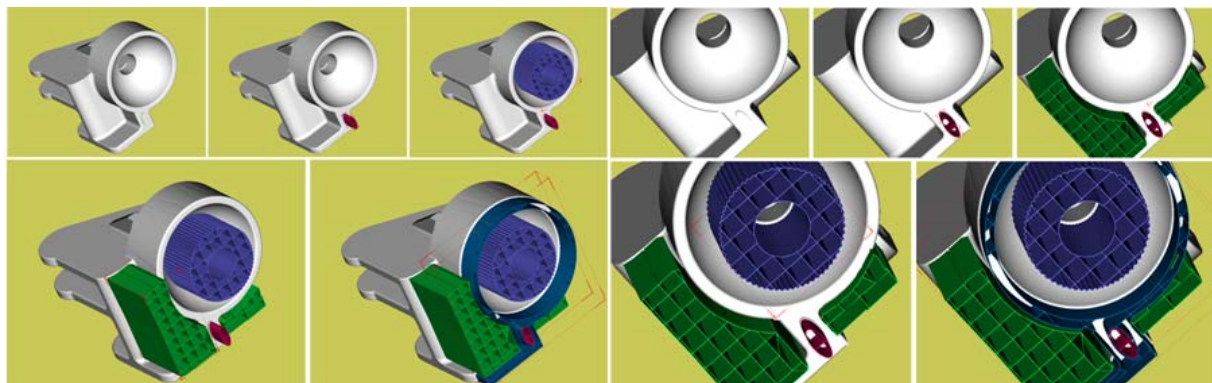


Abbildung 5: Komplexe Baugruppe mit Regelflächen- und Freiformanteilen (grau / schattiert)

Gezeigt wird die schrittweise automatische Generierung verschiedener Abschnitte der parametrisierten Stützkonstruktion bei vorgegebener Fertigungsrichtung (verschiedene Farben). Die realisierten

Programmmodule sind geeignet, einerseits eine realistische quantitative Bewertung des bei gegebener Bauteillage erforderlichen, anteiligen Material- und Maschinenaufwandes für die Supportherstellung durchzuführen, was insbesondere im Zusammenhang mit dem von FS3 in Angriff genommenen Programm zur multikriteriellen Optimierung der Bauteillage von Bedeutung ist. Andererseits gestatten die realisierten Lösungen eine automatische Generierung realistischer, geometrisch und topologisch korrekter Support-Solids nach vorgegebenen Parametern, die, insbesondere im Zusammenhang mit einem wissensbasierten Unterstützungssystem, das eine technologieabhängige Parametrisierung liefert, für eine große Anzahl von Bauteilen auch direkt für die automatisierte Fertigung genutzt werden können.

Eine Reihe von Erweiterungen der Algorithmen zur Supportgenerierung ist allerdings noch erforderlich, um das Einsatzspektrum der Module, insbesondere für die RP/RM-Fertigung auch bei unerfahrenen Nutzern und komplexen Baugruppen zu komplettieren. Diese Weiterentwicklungen sind insbesondere:

1. Weitere Parametrisierung des sogenannten „Support-Hatchings“, d. h. der Anzahl, Form und Verteilung der Kontaktpunkte zwischen Stützstruktur und Bauteil:
 - Gegenwärtig werden diese automatisch an Netzknotenpunkten eingefügt. Eine netztopologieunabhängige Verteilung nach parametrisiertem Abstand wäre wünschenswert.
 - Die Kontaktelemente zwischen Support und Bauteil sind ggf. noch als Pyramiden ausgeprägt (vgl. **Abbildung 6**), was für die Simulationsrechnung ausreichend ist, für die Praxis sollten sie als Pyramidenstümpfe mit einstellbarer Kontaktfläche realisierbar sein.
2. Die Generierung von Supportstrukturen in Bauteil-Innenräumen (Unter- und Oberseite der Supports werden durch das Bauteil begrenzt) ist noch nicht berücksichtigt, hier sind auch verschärfte Kriterien an die spätere Entfernbareit der Strukturen zu vereinbaren und bei der Parametrisierung zu berücksichtigen.

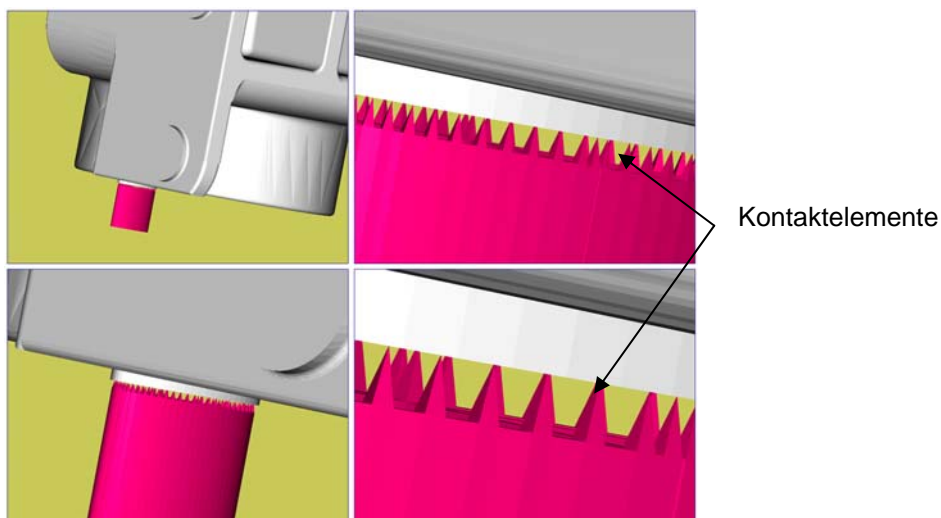


Abbildung 6: Automatisch generierte Supportelemente

4.3.3 Methodik zur Quantifizierung der Einflussfaktoren

Die Wahl der Bauteilorientierung hängt von dem jeweiligen Anwendungsfall ab. So ergeben sich entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen an Anschauungsmodelle, Geometriemodelle, Funktionsprototypen und Produkte verschiedene Bauteilorientierungen zur Optimierung der mechanischen, geometrischen und optischen Eigenschaften sowie zur Vermeidung von Curling. Die Wahl der Orientierung ist zudem stark von dem verwendeten Verfahren abhängig, da sich aufgrund von Einflüssen wie Verzug, Stützkonstruktionen oder mechanische Eigenschaften andere optimierte Orientierungen ergeben. Zusätzlich ergibt sich auch aufgrund des Treppenstufeneffekts ein Einfluss auf die Bauteilorientierung. Neben diesen Kriterien gewinnt die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit zunehmend an Bedeutung. Zusätzlich zu den Fixkosten (Investitions-, Personal-, Instandhaltungskosten, etc.) tragen

die variablen Kosten (Material- und Betriebskosten) erheblich zu den Gesamtkosten bei. Somit gilt es bei der Orientierungsauswahl die Baukosten zu berücksichtigen, die sich sowohl in der Bauzeit und somit indirekt in der Bauhöhe, als auch in der Menge des verwendeten Materials widerspiegeln. Weitere Kosten verursachende Faktoren wie Vorbereitungs- und Einrichtzeiten oder auch Materialaufbereitung und Instandsetzung tragen als variable Kosten ebenfalls zur Änderung der Wirtschaftlichkeit bei, sind aber unabhängig von der Bauteilorientierung und finden demzufolge keine Berücksichtigung bei der Festlegung. Neben der Kenntnis der Existenz Einfluss ausübender Faktoren auf die Bauteil- und Prozessqualität ist das Greifbar-Machen, also die Zuordnung verarbeitbarer Kenngrößen, von entscheidender Bedeutung. Zahlreiche Anforderungskriterien lassen sich nur schwer in messbaren Größen und Zahlenwerten formulieren, so dass eine wesentliche Herausforderung in der Quantifizierung mit dem Ziel der Vergleichbarkeit verschiedener Orientierungen lag. Die hierfür genutzten Algorithmen können dem Bereich der Algorithmischen Geometrie zugeordnet werden. Im Folgenden werden entwickelte Konzepte und Algorithmen zur Quantifizierung der Einflussfaktoren auf die Bauteilorientierung vorgestellt. Grundlage für die Kennwertermittlungen ist die Simulation der Schichtzerlegung am Facettenmodell sowie ein entsprechendes Datenmodell für die Verwendung in weiteren Algorithmen (**Abbildung 7**). Dies konnte im Rahmen des Projekts erfolgreich durchgeführt werden.

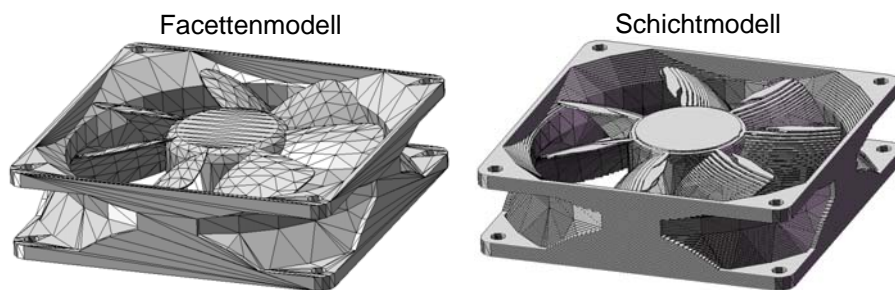


Abbildung 7: Simulation der Schichtzerlegung

BAUTEILQUALITÄT

Die Bauteilqualität wird im Wesentlichen durch die Abbildungstreue des Schichtmodells gekennzeichnet. Abweichungen von der gewünschten Bauteilgeometrie verändern die Maßhaltigkeit und somit insgesamt die Bauteilqualität. Ein mögliches Maß hierfür ist die schichtweise ermittelte Volumendifferenz zwischen Facetten- und Schichtmodell. Auf Grund des erheblichen Rechenaufwands für die schichtweise Ermittlung der Volumendifferenz wurde in diesem Projekt der Ansatz zur facettenweisen Bestimmung der so genannten Spitzenhöhe (engl. *cuspid height*) angewendet. Dies ist die maximale Abweichung in einem gedachten Fehlerdreieck (**Abbildung 8**, rechte Seite) einer Facette. Daher wurde in diesem Projekt für jede Orientierung das Bauteil hinsichtlich der Überschreitung eines Spitzenhöhen-Grenzwerts untersucht.

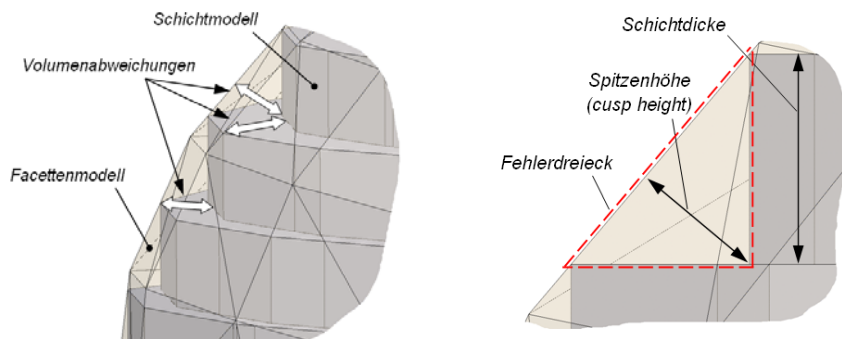


Abbildung 8: Quantifizierung der Bauteilqualität via Volumendifferenz bzw. Spitzenhöhe

Ein weiterer die Qualität beeinflussender Faktor stellt die Temperaturverteilung im Bauteil dar. Ohne spezielle Software zur Simulation der Wärmeverteilung ist eine genaue Werterfassung nicht möglich. Jedoch gibt die Ermittlung großer Belichtungsflächen und großer aufeinanderfolgender

Querschnittsprünge Anhaltspunkte über potenzielle Temperaturgradienten. Dies erforderte eine genaue Analyse der Bauteilgeometrie mit entsprechenden Algorithmen zur Berechnung der Querschnittsflächen des Schichtmodells.

Einen zusätzlichen Beitrag zur Erfassung der Bauteilqualität liefert die Kenntnis des Flächeninhalts der von Supports betroffenen Flächen. Eine Minimierung dieses Flächeninhalts bei der Ermittlung optimaler Bauteilorientierung kann den erforderlichen Aufwand für das Post Processing herabsetzen. Des Weiteren können durch Veränderung der Orientierung die an Design- oder Funktionsflächen angreifenden Stützstrukturen in einen weniger kritischen Bereich verlagert werden. Von Supports betroffene Flächen werden anhand ihrer Neigung zur Horizontalen ermittelt. Überschreitet der Neigungswinkel einer Facette einen Grenzwert (ca. $40 - 45^\circ$), so ist hier in der Regel mit Stützkonstruktionen zu rechnen. Neben der Kenntnis der Kontaktflächen ist ebenfalls zur Minimierung des Aufwands für das Post Processing die Entfernbarkeit der Supports zu berücksichtigen. Die orientierungsabhängigen Ausführungen notwendiger Supports müssen nach dem Bauprozess entfernt werden können. Dies erfordert eine ausreichende Zugänglichkeit notwendiger Werkzeuge, so dass dieser Aspekt bereits bei der Festlegung der Orientierung mit einfließt. Hierzu wird mit Hilfe des Ray-Tracing der für das Werkzeug notwendige Arbeitsraum überprüft (**Abbildung 9**).

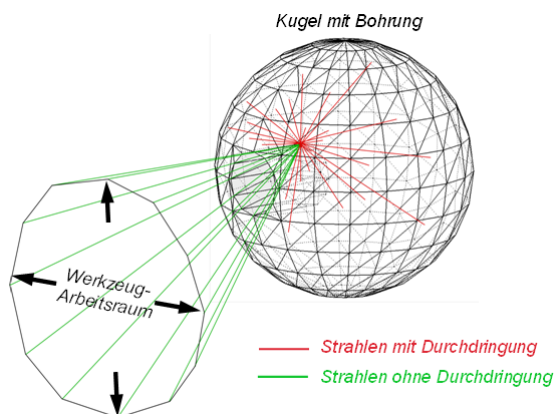


Abbildung 9: Durchdringungsprüfung zur Ermittlung der Support-Entfernbarkeit

BAUKOSTEN

Die orientierungsabhängigen Baukosten werden vorrangig durch den Materialaufwand und die benötigte Bauzeit festgelegt. Neben dem für die Erstellung der Bauteilgeometrie notwendigen Material ist ebenfalls der Materialaufwand für eventuell anfallende Stützstrukturen zu berücksichtigen. Dies hat zur Folge, dass bei der Festlegung der Bauteilorientierung ein Minimum an Supportvolumen anzustreben ist. Entsprechende Algorithmen berechnen das Volumen der Supports für eine gegebene Orientierung. Die eigentliche Bauzeit in der Anlage setzt sich hauptsächlich aus den Belichtungs- und Beschichtungszeiten (*Recoating*) der einzelnen Schichten zusammen. Somit ergibt sich eine direkte Abhängigkeit zwischen Bauzeit und Anzahl der zu fertigenden Schichten. Hierzu wird der entwickelte Algorithmus zur Schichtzerlegung des Facettenmodells eingesetzt.

MECHANISCH-TECHNOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN

Neben den Qualitäts- und Kostenfaktoren ergeben sich ebenfalls Abhängigkeiten zwischen der Orientierung des Bauteils im Bauraum und den mechanisch-technologischen Eigenschaften. So ist bei generativ hergestellten Bauteilen die Festigkeit innerhalb einer Schicht stets größer als zwischen den Schichten. Entsprechend dem Einsatzzweck des generativ herzustellenden Bauteils und den daraus resultierenden Beanspruchungsformen sollte demzufolge die Bauteilorientierung auch hinsichtlich der Richtungsabhängigkeit der Festigkeit ausgewählt werden. Entsprechende Algorithmen berücksichtigen ggf. definierte Eigenschaften, setzen jedoch die vorherige Kennzeichnung im Datenmodell voraus. Da derzeit keine Lösung für einen rechnergestützten Transfer von Produkteigenschaften via STL zur Auswertung in der RP- bzw. Anlagensoftware existiert, stellt dies eine zukünftige Herausforderung zur weiteren Schließung der CAD-RP-Kette dar. Der derzeitige Algorithmus basiert auf einem manuel-

len Eingriff zur Definition von mechanischen Eigenschaften (z. B. bevorzugte Richtung erhöhter Festigkeit, Farbe, Textur, Material, erhöhte Anforderungen an die Oberflächenqualität, etc.).

4.3.4 Funktionsintegration

Einige der in dem Projekt betrachteten Verfahren eignen sich zur Integration von Funktionen. Derartige Funktionen ermöglichen es Verbindungselemente einzusparen und die Bauteilanzahl zu reduzieren. Von den Verfahren bietet vor allem das Lasersintern das Potenzial zur Herstellung von Bauteilen mit Funktionsintegration.

Für dieses Verfahren wurden verschiedene Funktionen zur genaueren Betrachtung ausgesucht und anhand von Versuchen Richtlinien zur Auslegung erarbeitet. Als Funktionen wurden Federelemente, Schnappverbindungen, Filmscharniere und Stangenscharniere ausgewählt. Zu diesen wurden jeweils verschiedene Varianten hergestellt und bezüglich ihrer Einsetzbarkeit untersucht. Für alle untersuchten Funktionen konnte die Herstellbarkeit mittels Lasersintern nachgewiesen werden. Bei der Herstellung von Federn konnten grundlegende Zusammenhänge von Geometrie und Federkennwerten für das Lasersintern abgeleitet werden (Abbildung 10).

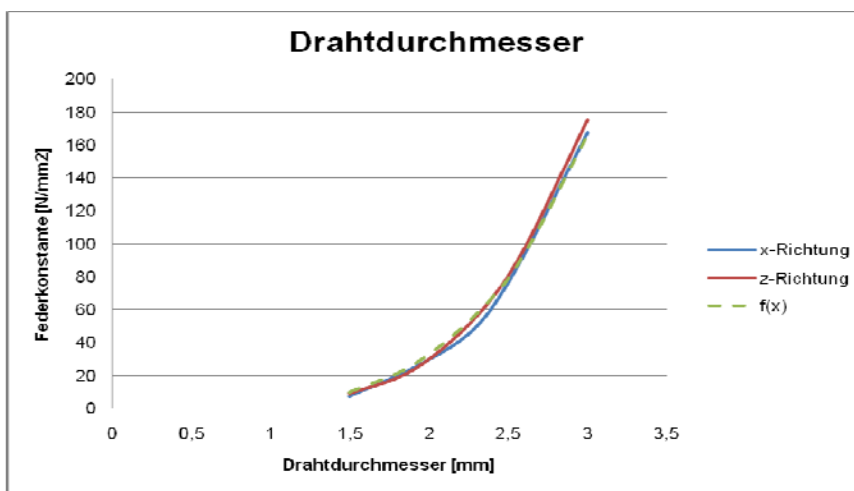


Abbildung 10: Zusammenhang von Drahtdurchmesser und Federkonstante bei lasergesinterten Bauteilen in Abhängigkeit der Orientierung

Für Schnapphaken konnten geeignete Längen zu Dicken-Verhältnissen zur Herstellung brauchbarer Schnapphaken gefunden werden, welche jedoch durch die minimale mechanisch belastbare Wandstärke begrenzt werden. Ebenso ergaben sich bei der Herstellung von Filmscharnieren Grenzen bei den herzustellenden Dimensionen, welche allerdings auch stark von den Prozessparametern und damit den mechanischen Bauteileigenschaften abhängen. Bei der Herstellung von Spaltmaßen konnten optimierte Dimensionen für die Spaltmaße ermittelt werden. Anhand der Ergebnisse wurden zukünftig verwendbare Konstruktionsempfehlungen abgeleitet. Als weiteres Ergebnis wurde auch eine Richtungsabhängigkeit der Ergebnisse beobachtet, welche auf die anisotropen Eigenschaften der Bauteile zurückzuführen ist.

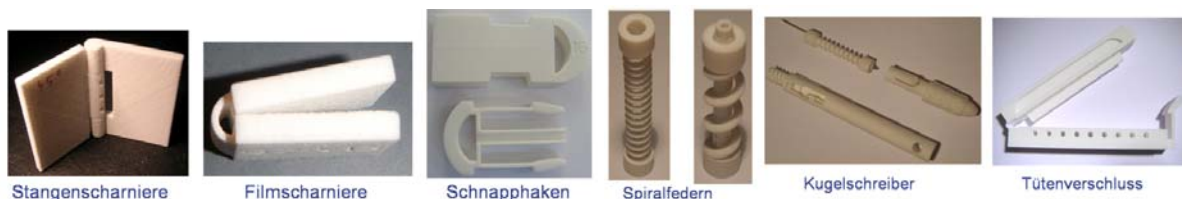


Abbildung 11: Hergestellte Bauteile mit integrierten Funktionen

4.4 Ergebnisse im Arbeitsschwerpunkt Datenaufbereitung

4.4.1 Datenkonvertierung

Das Standard-Datenformat für generative Fertigungsverfahren stellt die Standard Triangulation Language (STL) dar. In gängigen CAD-Systemen können erstellte 3D-CAD-Daten mittels der vorhandenen Schnittstelle in das STL-Format konvertiert werden. Bei dieser Konvertierung entstehen verschiedene Fehlerarten (Konstruktionsfehler, Umsetzungsfehler oder Beschreibungsfehler). Mit dem erstellten Fragebogen wurden neben den Konstruktionsrichtlinien auch Anregungen, Probleme und Empfehlungen der Anwender in das Projekt eingebracht. Die am häufigsten genannten Fehler in der STL-Beschreibung sind Löcher (1.), doppelte bzw. überlappende Dreiecke (2.), sowie falsch orientierte Dreiecke (3.). Daher wünschen sich die Anwender „fähige Konstrukteure“, welche die Anforderungen an ein RP-gerechtes CAD-Modell, wie beispielsweise ein geschlossenes Volumen, kennen. Durch Verwendung derart fehlerhafter STL-Daten kann die Qualität generativ gefertigter Bauteile negativ beeinflusst werden. Daher ist zuvor eine kosten- und zeitaufwendige teilweise manuelle Reparatur der Daten notwendig. Allerdings können schon während der Konstruktion bzw. beim Export einige Fehlerarten vermieden werden. Aus diesem Grund wurde der Einfluss von Fehlern im Rahmen des Projektes näher betrachtet.

STL-EXPORT AUS CAD-SYSTEMEN

Die meisten gängigen CAD-Systeme bieten die Möglichkeit CAD-Modelle als STL-Daten zu exportieren. Hierzu kann die entstehende STL-Qualität durch verschiedene Parameter (**Tabelle 3**) beeinflusst werden, welche in den verschiedenen CAD-Systemen jedoch zum Teil unterschiedliche Größen beschreiben. Für die durchgeführten Untersuchungen wurden verschiedene Probekörper in den CAD-Systemen Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 (PTC), CATIA V5 (Dassault Systèmes) sowie SolidWorks 2008 (Dassault Systèmes) modelliert und via STL-Schnittstelle exportiert. Die Prüfung der STL-Qualität erfolgte jeweils mit Magics RP 13 (Materialise).

Tabelle 3: Exportparameter verschiedener CAD-Systeme

SolidWorks	CATIA V5	Pro/ENGINEER
Abweichung	Durchhang	Sehnenhöhe
Winkel	Schritt	Winkelsteuerung

Die einzustellenden Parameter definieren die Auflösung des resultierenden Dreiecksnetzes und somit die Qualität der Approximation der Originalgeometrie. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist ihre programmtechnischen Umsetzung auf Grund unterschiedlicher Algorithmen. Exemplarisch wird hier zur Untersuchung des STL-Exports ein jeweils in SolidWorks und Pro/ENGINEER erzeugtes Modell (identische Geometrie und soweit möglich gleiche Konstruktionsmethodik) gezeigt (vgl. Abbildung 12), welches durch seine Komplexität die Möglichkeiten generativer Fertigungsverfahren ausnutzt.

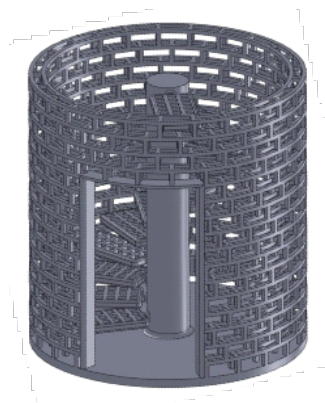


Abbildung 12: Bauteil zur Untersuchung des STL-Exports

Der Export des Modells in Abhängigkeit der jeweiligen Exportparameter ergibt in den verschiedenen CAD-Systemen teilweise deutliche Unterschiede in der Qualität der erzeugten STL-Daten (Abbildung 13, Abbildung 14). Während sich in SolidWorks vor allem eine Abhängigkeit der Dreiecksanzahl von dem eingestellten Winkel unabhängig von der Abweichung zeigt, steigt die Anzahl der Dreiecke beim Export aus Pro/ENGINEER nur bei gleichzeitig großem Wert für die Winkelsteuerung und für kleine Sehnenhöhen stark an. Bei den entstehenden Fehlern ergeben sich noch deutlichere Unterschiede. In Pro/ENGINEER variiert die Fehleranfälligkeit beinahe unabhängig von den Exportparametern. Dagegen bestehen zwischen der Entstehung von Fehlern in SolidWorks und den Exportparametern keine festen Zusammenhänge, was vermutlich auf den verwendeten Tessellierungsalgorithmus zurückzuführen ist. Die aufgetretenen Fehler sind in beiden Systemen ausschließlich sich schneidende und überlappende Dreiecke.

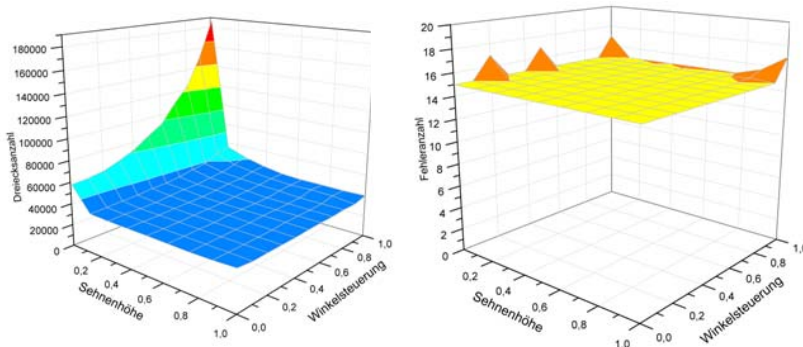


Abbildung 13: Einfluss der Exportparameter auf die Dreiecksanzahl und die Fehleranzahl in Pro/ENGINEER für das gewählte Beispiel

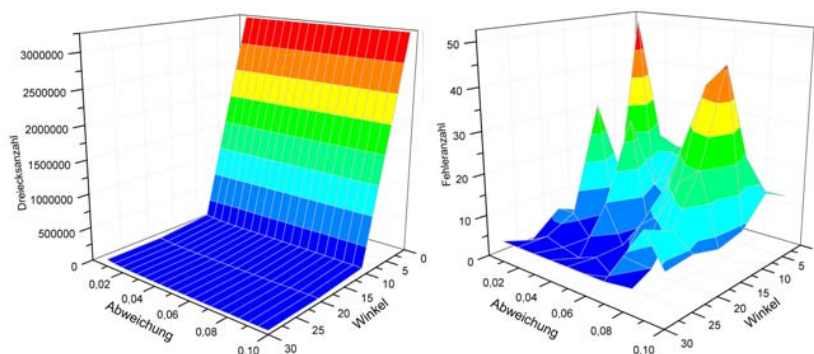


Abbildung 14: Einfluss der Exportparameter auf die Dreiecksanzahl und die Fehleranzahl in SolidWorks für das gewählte Beispiel

Das dargestellte Beispiel soll dem Konstrukteur ein Gefühl dafür geben, welchen Einfluss er auf die Qualität des STL-Formates ausüben und somit der Aufwand zur STL-Aufbereitung reduziert werden kann. Auch bestimmt er mit der auf den Exportparametern basierenden Dreiecksanzahl entscheidend über die Qualität der entstehenden Bauteile (Abbildung 15).



Abbildung 15: Einfluss der Dreiecksanzahl a auf die Bauteilqualität generativ gefertigter Bauteile (Lasersintern)

EINFLUSS FEHLERHAFTER STL-DATEN AUF DIE BAUTEILQUALITÄT

Zur Untersuchung des Einflusses fehlerhafter STL-Daten auf den Bauprozess wurden verschiedene Probekörper mittels Lasersintern hergestellt. Dazu wurden u. a. einfache Probekörper manuell mit Fehlern versehen oder fehlerhaft exportierte Modelle verwendet.

Exemplarisch für die durchgeführten Untersuchungen wird ein Modell aus ineinander tauchenden Quadern vorgestellt, dessen Außenflächen jeweils aus Freiformflächen bestehen. Dieses Modell wird aus CATIA mit wesentlich mehr Fehlern exportiert als aus Pro/ENGINEER und SolidWorks. Die Prüfung mit Magics RP zeigt, dass sechs der Freiformflächen beinahe vollständig falsch orientiert sind. Trotz zahlreicher STL-Fehler, wurde das fehlerhafte Modell durch die Anlagenssoftware verarbeitet. Das ursprüngliche Modell wird jedoch nur sehr rudimentär wiedergegeben. Keine der Freiformflächen wurde dabei korrekt in das Bauteil überführt. Das ursprünglich massive Bauteil enthält im Inneren nur wenig verfestigtes Material, welches auf einige richtig orientierte Dreiecke auf den entsprechenden Freiformflächen zurückzuführen ist.

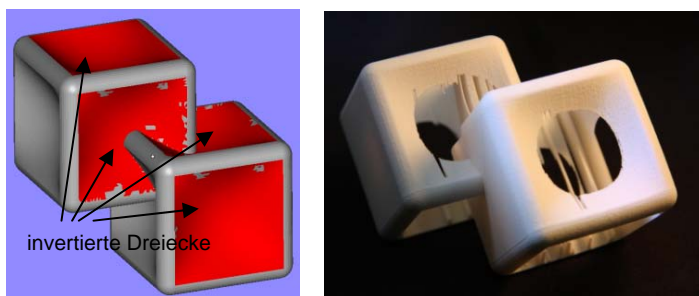


Abbildung 16: möglicher Einfluss fehlerhafter STL-Daten auf den Bauprozess

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte anhand ausgewählter Beispielmuster die mögliche Bedeutung fehlerhafter STL-Daten für die generative Fertigung von Bauteilen aufgezeigt werden. Durch die Untersuchung und Aufbereitung der Ergebnisse kann dem Anwender im Rahmen der Wissensbasis ein Gefühl für die Wichtigkeit fehlerfreier STL-Daten vermittelt werden.

4.4.2 Analysesoftware zur STL-Qualität

Die Strategie bei der softwaregestützten STL-Analyse war eine zunächst möglichst umfassende Datenanalyse sowohl hinsichtlich der Statistik (Daten und Fehler) als auch bezüglich des Charakters der Fehler oder Eigenschaften. Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Analyse können für verschiedene Anwendergruppen/Technologien und nachbearbeitende Software-Konfigurationen spezielle Suchstrategien oder Priorisierungen nachgeschaltet werden.

Bilder exemplarisch ausgewählter Eigenschaften

Lücher

Orientierung

Zer-Mannigfaltigkeit

topologisches Geschlecht

Übersicht zu dem in FS2 realisierten Programm-Modul analyse.exe

Input: *.stl Mesh
Output: Statistik

1. Anzahl der Kurven (edges)
2. Anzahl der Ecken (vertices)
3. Anzahl der Dreiecke (faces)
4. Anzahl ungerichteter edges
5. Anzahl der Randkanten (im Fall offener Netze)
6. Anzahl der zusammenhängenden Komponenten des Netzes
7. Anzahl der nicht verbundenen Teilkörper
8. Anzahl kolliderter faces
9. Anzahl isolierter vertices

abgeleitete Eigenschaften:

1. Ist das Netz geschlossen? Treten „Löcher“ bzw. „Unschtheit“ in der Oberfläche auf?
2. Ist das Netz zusammenhängend?
3. Ist das Netz orientiert? („Unklappbar“ von Oberflächennormale?)
4. Ist das Netz orientierbar? (ist eine einheitliche Orientierung aufgrund der gegebenen geometrie herstellbar?)
5. Ist das Netz in den Ecken der Dreiecke eine 2-er Mannigfaltigkeit?
6. Ist das Netz in den Kanten der Dreiecke eine 3-er Mannigfaltigkeit?
7. Wie groß ist das eingeschlossene Volumen (geschlossene Netze)?
8. Wie groß ist die beschriebene Geometrie?

Abbildung 17: Applikation zur STL-Analyse und Ermittlung von Netzeigenschaften

Als Ergebnis dieser Arbeiten liegt ein numerisch optimiertes Programm vor, das lokale, statistische und auch komplexe globale Eigenschaften von STL-Datensätzen analysiert (siehe **Abbildung 17**). Das Programm wurde als kompakte Konsolenapplikation entwickelt und der FS3 auch in Form einer einbindbaren DLL zur Nutzung zur Verfügung gestellt. Später wurde für die praktische Nutzung noch ein graphisches Front-End mit der Entwicklungsumgebung QT hinzugefügt. Das Programm gibt die ermittelten Eigenschaften der Daten bzw. des beschriebenen Bauteils in Listenform aus. Es ermöglicht auch die Vorab-Selektion einzelner Eigenschaften oder Fehlergruppen.

4.4.3 Reduzierung von Material- und Maschinenaufwand bei 3D-Druckverfahren

Die Zielstellung dieser Arbeiten war die automatische und parametergesteuerte Generierung kompakter „negativer“ Raum-Strukturen zur Reduzierung von Material- und Maschinenaufwand, die zwar ebenfalls technologisch unabdingbare Stützfunktionen realisieren, jedoch nicht eigentliche Stütz-Konstruktionen, wie sie bei sinternden RP-Verfahren benötigt werden, darstellen. Die Optimierung dieser räumlichen Strukturen stellt bei 3D-Druckverfahren dennoch eine für die Wirtschaftlichkeit der Herstellung enorm wichtige Aufgabe dar (Reduzierung kostenbestimmender Materialien für die Verdichtung bzw. den Druck unterhalb vorgegebener Freiformflächen (z.B. Reliefs, „Kacheln“, etc.) bzw. innerhalb der Baukörper und des erforderlichen Maschinenaufwandes).

Es wurden entsprechende algorithmische Module zur parametrisierten Generierung der entsprechenden Hohlräume unter Nutzung verschiedener Gitterstrukturformen (vier-/sechseckige Waben) geschaffen, optimiert und bereitgestellt (**Abbildung 18**).

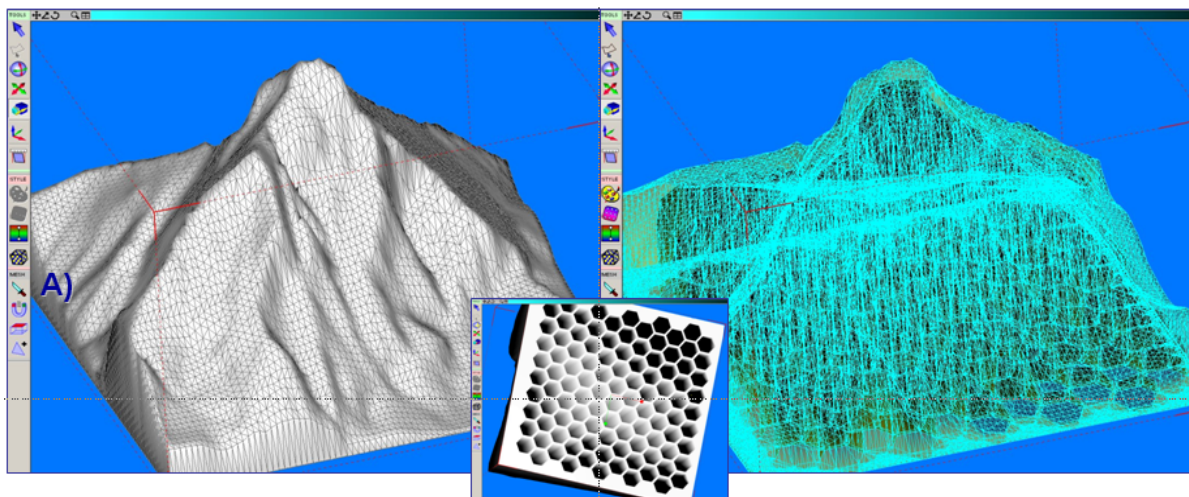


Abbildung 18: STL-Solid mit parametrisierter innerer Sechskant-Gitterstruktur

Algorithmisch besonders anspruchsvoll waren dabei die erforderliche Generierung von Offset-Freiformflächen sowie die Berücksichtigung möglicher Kollisionen der Gitterstrukturen mit konkaven Freiformanteilen (**Abbildung 19**).

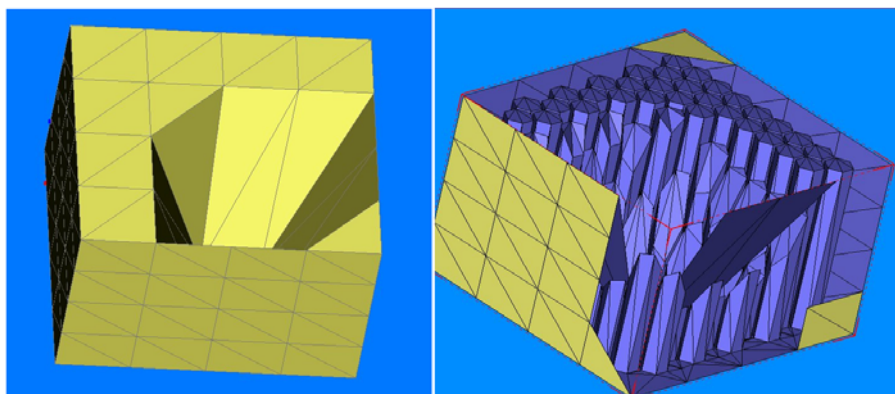


Abbildung 19: Berücksichtigung von Offset-Flächen (Wandstärke) und Kollisionsvermeidung

4.5 Ergebnisse im Arbeitsschwerpunkt Unterstützungssystem

4.5.1 Informationssystem

Die aus der Optimierung abgeleiteten Ergebnisse wurden bei der Umsetzung des Unterstützungssystems wie folgt genutzt:

- Konzepterarbeitung zur Strukturierung und Vernetzung des für die Optimierungsaufgabe und die rechnergestützte Verfahrensauswahl notwendigen Wissens (Knowledge Base Management).
- Umsetzung einer Datenbankanbindung (MS Access, SQL) an das Unterstützungssystem sowie Hinterlegung verfahrens-, anlagen- und materialspezifischer Kennwerte.
- Einbindung eines Nachschlagewerks in das Hilfesystem (Visual Basic).
- Programmierung einer Benutzerschnittstelle (Visual Basic) für die zweckorientierte Auswahl eines auf den Anwendungsfall bezogenen RP-Verfahrens und den damit verbundenen Produkt- und Prozesseigenschaften.
- Erzeugung einer Benutzerschnittstelle (Visual Basic) zur Steuerung des Optimierungsmoduls sowie entsprechende Ein- und Ausgabemöglichkeiten (Ergebnisexport, Protokolldateien, etc.).
- Prüfen des CAD-Systems SolidWorks auf Möglichkeiten der Modellierung zur Integration von Funktionselementen (Scharniere, Gelenke, Schnappverschlüsse, etc.)
- Konzeptentwurf zur RP-gerechten Funktionsintegration.

Der Wissenstransfer stellt eine wichtige Aufgabe für die zu erstellende Software dar. Aus dem recherchierten und dem generierten Wissen wurde eine Wissensbasis erstellt. Diese enthält weitreichende Informationen über generative Fertigungsverfahren, zu den einzelnen Verfahren, zu Verfahrensmöglichkeiten aber auch Verfahrensgrenzen, Konstruktionsrichtlinien sowie zu den Begrifflichkeiten. Bei der Ausarbeitung wurde die erste Normung der Verfahren (VDI 3404) zugrunde gelegt, um eine allgemeingültige Nomenklatur zu verwenden. Weitere Informationen wurden der Literatur entnommen.

Hilfe

Auswahl Diese Hilfe ist Bestandteil der Software "Wissensbasiertes Unterstützungssystem für Rapid Prototyping gerechte 3D-CAD-CAM-Prozesse".

Verfahren Ihre Aufgabe besteht darin, alle im Programm vorkommenden verfahrensbedingten Begriffe zu erläutern und Zusammenhänge zu verdeutlichen. Dem Anwender wird ein einfacher Einstieg in die generativen Fertigungsverfahren gegeben, sodass er das Programm zielsicher bedienen und exakte Angaben in den Formularfeldern treffen kann.

Richtlinien Die Beschreibungen der einzelnen Begriffe sind auf zwei Arten aufgebaut. Direkt sichtbar ist die Kurzbeschreibung, die die wichtigsten Sachverhalte kurz und prägnant verdeutlicht. Sie bieten schnell die wichtigsten Auskünfte, ohne dass ein längerer Text erfasst werden muss. Dem bereits routinierten Anwender erlauben sie somit eine rasche Rekapitulation von bereits bekanntem Wissen. Durch einen Mausklick auf einen Link am Anfang der Zusammenfassung erscheint die vollständige Beschreibung. Diese beschreibt den Sachverhalt ausführlicher und unterstützt unerfahrene Anwender.

Begriffe

Datenbank

Normen

Der Startbildschirm erscheint als erstes Fenster nach dem Programmstart. Das Fenster ist in fünf Bereiche unterteilt, welche die verschiedenen Kategorien der Datenbank darstellen.

Enthält Begriffserklärungen, Normen, Konstruktionshinweise

Auswahl eines Verfahrens durch schrittweise Abfrage relevanter Daten

Aktualisierung von bestehenden sowie Einpflegen neuer Maschinen und Materialien

Daten in Microsoft Excel Dateneinsicht exportieren

Infosystem
Das Infosystem enthält weiterführende Informationen zu allen Bereichen der Generativen Fertigungsverfahren. Hier finden sich Erläuterungen zu Begriffen und Definitionen sowie den Verfahren selbst. Des Weiteren lassen sich Normen und Richtlinien zur generativen Fertigung einsehen. Die Richtlinien unterstützen den Anwender bei der RM-gerechten Konstruktion von Bauteilen und geben Hinweise zur Auslegung und Ausrichtung von beispielsweise Wandstärken und Bohrungen.

Abbildung 20: Informationssystem für generative Fertigungsverfahren

Das Informationssystem dient der Erweiterung der Datenbank und ist mit dieser durch Verlinkungen verknüpft. Um auch eine unabhängige Nutzung zu ermöglichen wurde das System in HTML-Sprache erstellt (**Abbildung 20**). Dies garantiert zudem die Web-Tauglichkeit. Das Informationssystem bietet dem Nutzer durch kurze prägnante Beiträge die Möglichkeit sich schnell zu informieren. Zum Anderen

können aber auch detailliertere Informationen abgerufen werden, wenn sich der Anwender möglichst umfassend einlesen möchte. Die Recherche in Büchern nach den Grundlagen kann somit entfallen.

4.5.2 Anwendungslösung zur Multizieloptimierung

Die Orientierungsoptimierung gestaltet sich im Wesentlichen durch iteratives Ändern der räumlichen Lage des Bauteils (zwei Rotationsoperationen) sowie die Berechnung aller orientierungsabhängigen Kennwerte. Damit die Priorität des Bauprozesses (Qualität \leftrightarrow Wirtschaftlichkeit) angemessene Berücksichtigung findet, werden die orientierungsabhängigen Kenngrößen mit Gewichtungsfaktoren versehen. Die gewichteten Gütefaktoren bilden zusammen eine für den Genetischen Algorithmus notwendige Zielfunktion, anhand derer ein Lösungskandidat bewertet wird. Lösungen mit besseren Zielfunktionswerten werden mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als „überlebendes Individuum“ ausgewählt. Hier kennzeichnet die Zielfunktion die so genannte Fitness einer Orientierung. Der Ablauf der Multiziel-Optimierung lässt sich **Abbildung 21** entnehmen.

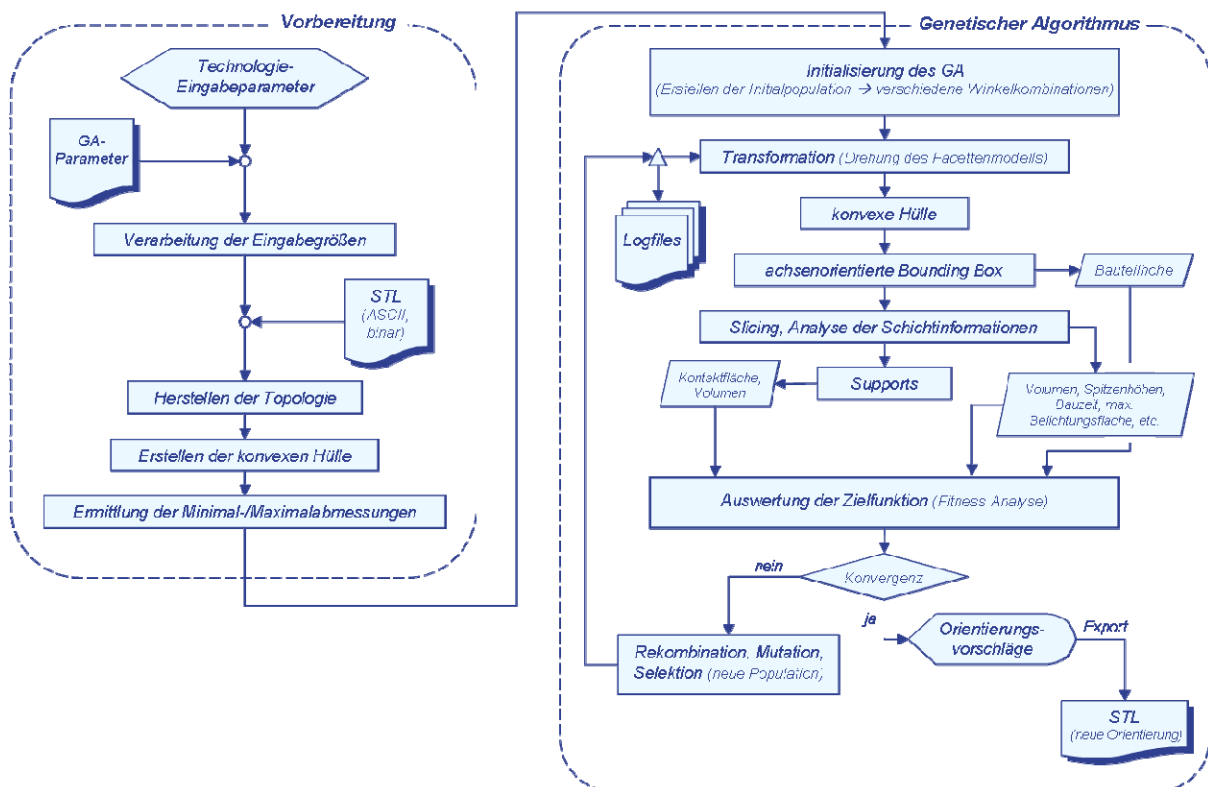


Abbildung 21: Ablaufschema der Orientierungsoptimierung

Solange ein entsprechendes Abbruchkriterium (z.B. Konvergenz der Fitnessfunktion oder max. Anzahl an Iterationsschritten bzw. Generationen) nicht erfüllt wird, werden mit Hilfe der genetischen Operatoren (Selektion, Rekombination und Mutation) neue Individuen einer Population generiert, also neue Winkelkombinationen als Lösungskandidaten ausgewählt. Die auf diese Weise sukzessiv ermittelten Orientierungen lassen sich zur Visualisierung als Facettenmodell (STL) ausgeben.

4.5.3 Verifizierung

Zur Verifizierung der durchgeführten Arbeiten wurden zahlreiche Beispielmodelle berechnet und mit der im Rahmen des Projekts erstellten Wissensbasis und anhand von Erfahrungswerten der FS1 abgeglichen. Abbildung 22 zeigt anhand eines Beispielbauteils mögliche Lösungskandidaten des Optimierungsproblems mit Hilfe eines Flächendiagramms sowie eines Kontur-Plots (Ansicht von oben auf das Flächendiagramm). Das Flächendiagramm zeigt die Fitness (Güte) einer Orientierung in Abhängigkeit ihrer definierenden Rotationswinkel. Niedrige Fitnesswerte führen zu einer guten Beurteilung einer Orientierung. Optimierte Orientierungen (dunkelblaue Stellen) wurden auf diese Weise für eine Vielzahl praktischer Beispiele ermittelt und in Kooperation mit der FS1 auf Korrektheit überprüft.

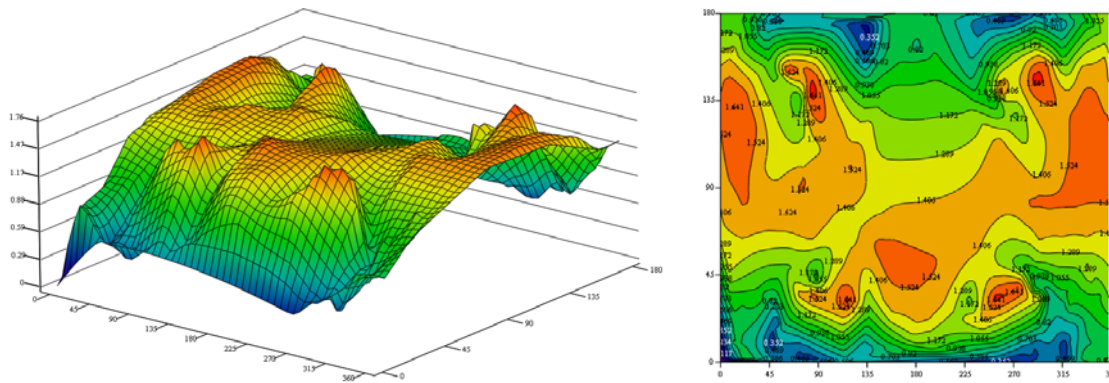


Abbildung 22: Beispiel zur Visualisierung der Berechnungsergebnisse

Eine beispielhafte Umsetzung erfolgte für drei Bauteile, die jeweils mit zwei verschiedenen Verfahren hergestellt wurden. Hierbei handelt es sich zum Einen um das Lasersintern LS (Anlage: Sinterstation DTM2000) und zum Anderen um das Fused-Layer-Modeling-Verfahren FDM (Anlage: Alphacam Dimension SST1200ES). Abbildung 23 zeigt den Gehäusedeckel einer PC-Maus, der mit der berechneten Orientierung im LS-Verfahren gefertigt wurde (Optimierungskriterien: Oberflächenqualität und Verzug).

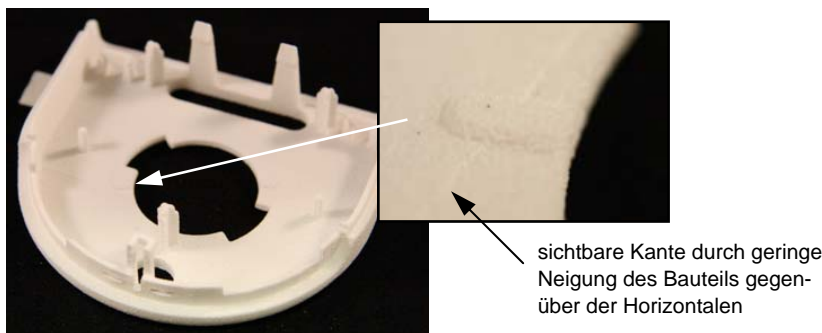


Abbildung 23: Deckel im LS-Verfahren liegend gefertigt

Das gleiche Bauteil wurde für das FDM-Verfahren hinsichtlich der Oberflächenqualität und des Support-Volumens optimiert (Abbildung 24). Es zeigte sich, dass trotz sichtbarem Treppenstufen-Effekt an der mittigen Bohrung das Bauteil prinzipiell korrekt orientiert wurde, da die Gesamtqualität zu beachten ist. Für den speziellen Fall des FDM-Verfahrens entspricht die Orientierung nicht dem absoluten Optimum, was jedoch auf die vereinfachende Annahme zurückzuführen ist, dass für den Optimierungsalgorithmus lediglich Flächen unter einem bestimmten Grenzwinkel abgestützt werden. Bei einigen Verfahren, wie dem FDM-Verfahren, werden jedoch abweichend von dieser Regel auch Stützkonstruktionen an weiteren Flächen angesetzt. Dies sind jedoch auf Erfahrungen basierende Benutzer Eingriffe, die zurzeit nur schwer in Regeln zu erfassen sind. Daher erfordert die Berücksichtigung verfahrensspezifischer Stützstrukturen weiterer Aufmerksamkeit.

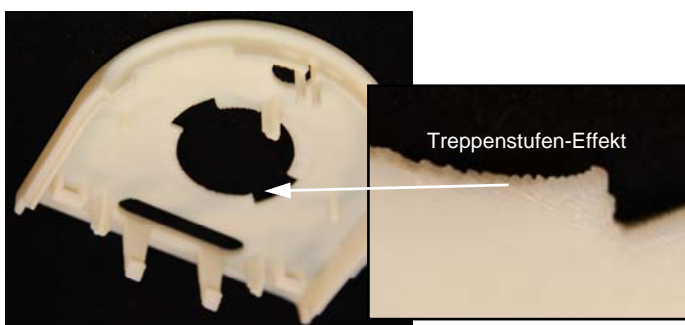


Abbildung 24: Deckel im FDM-Verfahren stehend gefertigt

Die Validierung zeigte insgesamt, dass das Tool in der Lage ist die erfahrungsmäßige Bauteilorientierung nachzuempfinden. So deckten sich die berechneten Orientierungen überwiegend mit den auf Erfahrungswerten beruhenden gewählten Orientierungen. Die Abwägung der einzelnen Gewichtungsfaktoren der Kriterien Oberfläche, Bauzeit, Verzug oder Stützkonstruktion ist jedoch weiter zu optimieren. So ergab sich auf Grund einer gleichwertigen Gewichtung der Kriterien Oberflächengenauigkeit und Verzug teilweise ein sichtbarer Stufeneffekt an ebenen oder abgerundeten Bereichen. Dies verdeutlicht einerseits den stets in Kauf zu nehmenden Kompromiss bei mehreren zu berücksichtigenden Einflussfaktoren und andererseits die Notwendigkeit der Weiterentwicklung zur besseren Abstimmung der Gewichtungsfaktoren auf Basis von Regeln. Die Eignung des Tools konnte insgesamt nachgewiesen werden und bietet eine Grundlage für weitere Forschungen in diesem Bereich.

4.6 Schlussfolgerungen für eine Projektfortführung

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass die wesentlichen Projektziele erreicht wurden. Deutlich wurde jedoch auch, dass einige Themen weiter vertieft werden müssen. Dazu gehören insbesondere:

- Die weitere Qualifizierung der entwickelten Methoden im Bereich der algorithmischen Geometrie zur Lageoptimierung
- Ausbau der Wissensbasis zu einer Online-Datenbank zur Erhöhung der Breitenwirksamkeit der Rapid-Technologien
- Weitere Integration des Unterstützungssystems in die CAx-Landschaft, insbesondere zur Qualifizierung und Ausbildung der Technologie-Anwender
- Aufbau einer Wissensbasis zur Erstellung von Stützkonstruktionen
- Weiterentwicklung und Diversifizierung der Algorithmen zur automatischen Generierung von Stützkonstruktionen (automatisch generierte Varianten inkl. Modellierung und Platzierung)
- Adaptive Schichtzerlegung
- Untersuchungen und Berechnungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Qualität bei der Fertigung mit variablen und geometrieabhängig wechselnden Schichtdicken.
- Untersuchungen und Schlussfolgerungen für die Praxis der parallelen Fertigung mehrerer Bauteile im Fertigungsraum hinsichtlich der daraus resultierenden Einflüsse auf Qualität und Wirtschaftlichkeit
- Optimierte Anordnung mehrerer Bauteile im Bauraum
- Weitere Untersuchung der Funktionsintegration und Standardisierung der Elemente
- Einbeziehung und algorithmische Umsetzung der Vorab-Klassifikation funktionaler und anderer Einzelflächen in die Baulageoptimierung
- Kennzeichnung und Transfer von Produkteigenschaften zur weiteren Nutzung und Auswertung im Unterstützungssystem zur Ausweitung der Methoden auf heterogene Bauteile.

Die beteiligten Forschungsstellen haben das Ziel, einige dieser Themen gemeinsam in einem Folgeprojekt zu bearbeiten.

4.7 Einsatz von wissenschaftlichem Personal

Das wissenschaftliche Personal wurde wie beantragt eingesetzt.

An der FS1 wurde zur Bearbeitung der Arbeitspakete ein wissenschaftlicher Mitarbeiter mit 16 Mannmonaten eingesetzt. Darüber hinaus wurde ein Mitarbeiter im Projekt für weitere 8 Mannmonate aus eigenen Mitteln zur Bearbeitung der Themenstellung finanziert. Zur Unterstützung des Mitarbeiters wurde gemäß der beantragten Mittel eine studentische Hilfskraft beschäftigt, welche auch kleinere Teilaufgaben bei der Projektbearbeitung übernahm. Die eingesetzten Sachmittel wurden für Reisen zur Koordinierung des Projektes sowie für den Besuch von Fachtagungen im Bereich Generative Fertigungsverfahren oder zur Beschaffung von Materialien eingesetzt.

In FS2 wurde für die Erfüllung der geplanten Arbeitspakete wissenschaftliches Personal wie folgt eingesetzt: wissenschaftliche Mitarbeiter - 14,25 Mannmonate und studentische Hilfskräfte – 14 Mannmonate. Die bei Einhaltung des geplanten Personalkostenrahmens eingetretenen Abweichungen von der detaillierten Personalplanung im Forschungsantrag sind auf die Verstärkung des algorithmischen Schwerpunktes (Stützkonstruktionen und STL-Analyse) einschließlich der C++-Programmierung sowie auf den Weggang eines Mitarbeiters zurückzuführen.

Für die Projektbearbeitung wurden seitens der FS3 wissenschaftliche Mitarbeiter im Umfang von 24 Mannmonaten eingesetzt. Das war erforderlich, da sich vor allem die Bereiche der Multizieloptimierung und die Absicherung der Qualität der rechnerinternen Produktmodelle als eine besondere Herausforderung darstellten. Da aus dem Projekt nur 16 Mannmonate abgesichert waren, wurde der Fehlbetrag aus eigenen Mitteln des Lehrstuhls finanziert. Zur Unterstützung der Projektbearbeitung erfolgte der Einsatz studentischer Hilfskräfte gemäß Forschungsantrag. Die eingesetzten Sachmittel wurden für Reisen zu den Projektpartnern sowie für den Besuch von RP-spezifischen Fachtagungen eingesetzt.

5 Nutzen und Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittelständische Unternehmen

5.1 Voraussichtliche Nutzung der Forschungsergebnisse

Das Unterstützungssystem für Rapid Prototyping gerechte 3D-CAD-Konstruktionen richtet sich sowohl an die Produktentwicklung als auch an unternehmensinterne und unternehmensexterne Dienstleister, die entsprechende Bauteile und Produkte fertigen. Anhand der in der KBE-Applikation enthaltenen Handlungsempfehlungen wird es dem Konstrukteur erleichtert, sowohl fertigungsgerechte RP-Bauteile zu entwerfen, als auch das richtige RP-Verfahren durch entsprechende Auswahlkriterien festzulegen. Mittelfristig wird das Unterstützungssystem für RP-gerechte 3D-CAD-Konstruktionen zu einer Kostenreduktion während der Produktentstehung und Erhöhung der Bauteilqualität beitragen.

Die zu erwartende Abnahme der Investitionskosten für Anlagen aus dem RP-Bereich macht einen frühzeitigen Einstieg in diese Technologien und die damit verbundenen Möglichkeiten zur Evaluierung der Konstruktionsergebnisse essentiell für die wirtschaftliche Vermarktbarkeit und für den Wirtschafts- und Innovationsstandort Deutschland.

5.2 Möglichkeiten zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU

Der wichtigste Beitrag dazu besteht in der Steigerung der Prozesssicherheit und Anwendereffizienz durch Standardisierung RP-gerechter Konstruktionen, sowie durch arbeitsplatznahe Bereitstellung von Anwenderwissen und durch eine anwendungsspezifische Softwareunterstützung.

Die Implementierung wissensbasierter Entscheidungshilfen zur rechnergestützten Gestaltung von Prototypen ermöglicht die Einhaltung von Industriestandards sowie eine Beschleunigung des Produktentwicklungsprozesses. Die Konsistenz wird durch die angestrebte bidirektionale Assoziativität zwischen CAD- und Unterstützungssystem gewährleistet. Dies führt bei Anpassung an betriebsspezifische Gegebenheiten zu einer verbesserten Abstimmung zwischen Konstruktion/Entwicklung und der Fertigung. Die Verkürzung der Konstruktionsphase sowie die integrierte CAD/CAM-Kopplung können zur Senkung der Entwicklungskosten bei steigender Produktqualität führen.

5.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die bisher durchgeführten Arbeiten haben aufgezeigt, dass die Kenntnis RP-gerechter Anforderungen für den generativen Fertigungsprozess von essentieller Bedeutung ist. Insbesondere das Prozessverständnis stellt die Grundlage für die rechnergestützte Optimierung der RP-gerechten Konstruktion dar. Die im Rahmen der Projektbearbeitung genutzten Kontakte zur Praxis, insbesondere die Kooperationen mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses, haben die Relevanz der CAD-RP-

Kopplung und das Interesse der Anwender an einem wissensbasierten Unterstützungssystem deutlich gemacht. Gerade die Formulierung und Nutzung einer einheitlichen Wissensdatenbank im Konstruktionsprozess, aber auch in der Prozessvorbereitung des Rapid Prototyping, ist aus Anwendersicht eine zentrale Aufgabe zukünftiger Forschungsarbeiten. Die bisherigen Arbeiten im Rahmen dieses Forschungsprojekts leisten hierzu einen Beitrag und sollen weiterhin die Grundlage für eine durchgängige 3D-CAD-CAM-Kopplung im Sinne der generativen Fertigungstechnik bilden.

6 Transfer und Umsetzung der Forschungsergebnisse in KMU

Zur Sicherstellung einer geeigneten Präsentation der Forschungsergebnisse sowie deren Umsetzung in die Praxis wurden Zwischenergebnisse und erzielte Resultate in Fachzeitschriften oder als Vorträge bei Tagungen oder Messen veröffentlicht. Zu nennen sind hier vor allem die jährlichen Anwendertagungen im Zusammenhang mit der *RapidTech* sowie die *3D NordOst*.

Darüber hinaus wurden Workshops mit potentiellen Nutzern durchgeführt und Informationen zum Forschungsprojekt im Internet veröffentlicht. Die Forschungsschwerpunkte und Forschungsergebnisse wurden über die gesamte Laufzeit mit Industriepartnern (KMU) diskutiert.

7 Angefertigte und veröffentlichte Dokumente

Berichte:

- Zwischenbericht 2008
- Abschlussbericht (dieses Dokument)

Publikationen:

- DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Vorbereitung von CAD-Konstruktionsdaten für den RP-Einsatz – eine Schnittstellenproblematik*. In: Rapid.Tech - Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie, Erfurt, 2008
- DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Determination of Optimal Build Direction for Different Rapid Prototyping Applications*. In: Proceedings of the 14th European Forum on Rapid Prototyping, Ecole Centrale Paris, 2009
- DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Ermittlung optimaler Bauteilorientierung zur Verbesserung der Prozessplanung in der CAD/RP-Kette*. In: Tagungsband der Rapid.Tech - Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie, Erfurt, 2009
- DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Multi-objective Optimization of Part Orientation for Non-Convex Parts in Rapid Technology Applications*. In: Proceedings of the 10th National Conference on Rapid Design, Prototyping & Manufacture, Bucks New University, High Wycombe, Buckinghamshire, UK, 2009
- DANJOU S., KÖHLER P.: *Anwendung geometrischer Algorithmen zur Optimierung triangulierter 3D-Modelle für generative Fertigungsprozesse*. In: Tagungsband 3D-NordOst, 12. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, GFal, Dez. 2009, S. 139ff, ISBN 978-39812158-7-8
- WEGNER A., WITT G.: *Einfluss von fehlerhaften STL-Daten auf die Bauteilqualität generativ gefertigter Bauteile*. In: Tagungsband 3D-NordOst, 12. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, GFal, Dez. 2009, S. 157ff, ISBN 978-39812158-7-8
- WEGNER, A.; WITT, G.: *RM-gerechte Auslegung funktionaler Bauteile für das Lasersintern*. In: Tagungsband der Rapid.Tech - Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie, Erfurt, 2010 (geplant)
- WITT, G.; SEHRT, J.; JANßEN, V.: *Entwicklung eines Unterstützungssystems für RM-gerechte CAD/CAM Prozesse – Ein Beitrag zum Qualitätsmanagement*. EOS International User Meeting 2008, Bad Gögging, 14. – 16. April 2008

8 Forschungsstellen und Forschungsleiter

Forschungsstelle 1:

Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Institut für Produkt Engineering/Fertigungstechnik
Lotharstr.1 47048 Duisburg
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt (Tel.: 0203/379–3360, E-Mail: witt@uni-duisburg.de)

Forschungsstelle 2:

GFal Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V.
Rudower Chaussee 30, 12489 Berlin
Dr. Frank Weckend (Tel.: 030 6392 1600), E-Mail: weckend@gfai.de

Forschungsstelle 3:

Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Institut für Produkt Engineering/CAE
Lotharstr.1 47048 Duisburg
Prof. Dr.-Ing. Peter Köhler (Tel.: 0203/379–2790, E-Mail: koehler@uni-duisburg.de)

Duisburg,

Ort, Datum

Unterschrift des Leiters und Stempelab-
druck der Forschungsstelle 1

Berlin,

Ort, Datum

Unterschrift des Leiters und Stempelab-
druck der Forschungsstelle 2

Duisburg,

Ort, Datum

Unterschrift des Leiters und Stempelab-
druck der Forschungsstelle 3