

Ergebnisbericht zum Teilvorhaben

„Gesamtintegration des neuen CAM-Systems“

im Verbundprojekt

„Forschungscampus Digital Photonic Production: DPP“



Laufzeit des Vorhabens:	01.05.2016 – 30.09.2019
Zuwendungsempfänger:	EXAPT Systemtechnik GmbH Theaterstrasse 12 52062 Aachen
Projektpartner:	Fraunhofer Institut für Produktionstechnik (IPT) Lehrstuhl für Digitale Additive Produktion der RWTH Aachen University (DAP) ModuleWorks GmbH (ModuleWorks) EXAPT Systemtechnik GmbH (EXAPT)
Förderhinweis:	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N13976 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.
Autoren:	Dipl.-Inform. Michael Königs Dipl.-Math. Michael Servos

Ausgangssituation und Zielstellung

Die Herstellung photonisch erzeugter Halbzeuge oder Fertigteile ist heute durch die Verwendung aufgabenspezifischer Software-Werkzeuge gekennzeichnet. So erfolgen die Konstruktion und Auslegung eines Werkstücks bspw. mit Hilfe von CAD- und CAE-Softwaresystemen, in denen ein technischer Entwurf zunächst iterativ bzgl. der geforderten Bauteileigenschaften sowie der erwarteten Belastungssituationen optimiert wird. Die Planung des eigentlichen Bearbeitungsprozesses verteilt sich anschließend auf technologie- und anlagenspezifische Planungsumgebungen. In Erstgenannten wird ein Produktentwurf dabei zunächst mit ergänzenden Stützstrukturen sowie Gitterstrukturelementen für das Bauteilinnere angereichert. Erst daraufhin erfolgt die Ableitung eines zur Fertigung benötigten Bearbeitungsprogramms in zweitgenannten, meist anlagenspezifischen Planungsumgebungen. Zu Bahngenerierung werden hierbei material- und maschinenspezifische Prozessparameter vorgegeben.

Losgelöst von der Prozessauslegung erfolgt nach Abschluss der Fertigung die Prüfplanung und Prüfdurchführung in Software-Werkzeugen der einzusetzenden Prüfmittel. Im Bedarfsfall – bspw. bei aufgetretenen Qualitätsproblemen – findet eine meist dokumentenbasierte Rückmeldung von Qualitätsberichten statt, um Anpassungen am Bearbeitungsprozess vorzunehmen.

In der industriellen Praxis ergeben sich insbesondere durch Brüche im digitalen Informationsfluss sowie der eingeschränkte Kompatibilität zwischen den eingesetzten Systemumgebungen enorme Herausforderungen, die den wirtschaftlichen Aufbau von Fertigungsabläufen mit photonischen Prozessschritten deutlich einschränken. Im Detail können diese auf die folgenden Umstände zurückgeführt werden:

1. Der Austausch zwischen Bauteilkonstruktion und Fertigungsplanung beschränkt sich auf geometrische Informationen. Basierend auf diesen Daten ist eine belastungsangepasste Erzeugung von Gitterstrukturen nicht unmittelbar durchführbar, sondern bedarf einer verstärkten, meist abteilungsübergreifenden Kommunikation sowie manueller Nacharbeit.
2. Der Datenaustausch zwischen Technologie- und Bahnplanung erfolgt kompatibilitätsbedingt über Dreiecksdarstellungen. Insbesondere für Stütz- und Gitterstrukturen ergibt sich dabei eine hohe Anzahl an Dreiecken und folglich ein hoher Rechenbedarf für die Erzeugung und Sicherung von Planungsständen.
3. Die hohe Anzahl an Dreiecken führt weiterhin zu Einschränkungen bei der Visualisierung eines Planungsergebnisses sowie zu enormen Rechenzeiten bei der Bahnberechnung.
4. Die Planung von subtraktiven, kollisionsfreien Nachbearbeitungsschritten benötigt die Rückführung von ggf. erzeugten Stützstrukturen in entsprechende CAM-

Planungsumgebungen. Die Verwendung von Dreiecksdarstellungen führt hier mit den verfügbaren CAM-internen Bahnplanungsalgorithmen zu hohen Rechenzeiten sowie einer ungenügenden Qualität der resultierenden Werkzeugpfaden

5. Die Parametrierung der Bahnplanung in anlagenspezifischen Planungsumgebungen führt zum Aufbau lokaler Technologiedatenbanken. Hierdurch bleibt die Nutzung von geeigneten Technologieparametern auf einzelne Anlagen beschränkt, obwohl eine Übertragung auf weitere Anlagen tendenziell möglich ist.
6. Die bedarfsorientierte, dokumentenbasierte Qualitätsrückmeldung schränkt ein strukturiertes Zusammenstellen von Qualitätsergebnis, Bauteilbezug und Technologieparametern ein. Hierdurch ist der Aufbau einer technologischen Expertise durch einen ebenfalls hohen manuellen Aufwand gekennzeichnet.

Aus diesen Umständen leiten sich unmittelbar die Ziele dieses Teilvorhabens „Gesamtintegration des neuen CAM-Systems“ des Verbundvorhabens „Forschungscampus Digital Photonic Production: DPP“ ab:

1. **Konzeptionierung einer CAM-Planungsumgebung, mit der sich eine digital durchgängige Planungskette zur wirtschaftlichen Planung photonischer Bearbeitungsprozesse aufbauen lässt.** Hiermit sollen in einer einzigen Systemumgebung belastungsangepasste Stütz- und Gitterstrukturen erzeugt, eine Bahnplanung durchgeführt sowie die Erstellung von Bearbeitungsprogrammen vorgenommen werden können. Weiterhin sollen hierauf aufbauend auch kollisionsfreie subtraktive Nachbearbeitungsschritte planbar sein.
2. **Nutzung von CAD- bzw. CAE-intern erzeugten Belastungsvorgaben sowie die Verwendung prozeduraler Algorithmen zur Erzeugung belastungsangepasster Strukturen.** Dies beinhaltet die Entwicklung schlanker Strukturbeschreibungsformate, mit denen sich effiziente Struktur- und Bahnberechnung umsetzen lassen. Weiterhin umfasst dies den Aufbau geeigneter CAM-Visualisierungskonzepte zur interaktiven Darstellung und Bewertung von Berechnungsergebnissen.
3. **Aufbau von Schnittstellen für Prüfplanungen und Qualitätsrückmeldungen (Prüfplanungstool).** Hiermit soll es auf digitalem Wege möglich sein, Prüfvermerke und Qualitätsergebnisse aufwandsarm mit Material-, Maschinen und Technologieparametern sowie Bauteilregionen zu verknüpfen.
4. **Aufbau einer zentralen Technologiedatenbank** zur Verwaltung von material- und maschinenspezifischen Technologiedatensätzen sowie den hiermit erzielten Qualitätsergebnissen. Hierdurch soll es dem Anwender möglich sein, bei einer Neuplanung auf Ergebnisse ähnlicher Prozesse zurückzugreifen.

Durchgeführte Arbeiten und erzielte Projektergebnisse

Um die benannten Ziele zu erreichen, sind im Vorhaben insgesamt sieben Arbeitspakete vorgesehen. Nachfolgend werden die Arbeiten der EXAPT Systemtechnik GmbH für jedes Arbeitspaket kurz vorgestellt.

Arbeitspaket 1: Definition der Anforderungen und Schnittstellen

Zu Beginn des Vorhabens wurde in Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern ein Gesamtkonzept für die angestrebte Systemumgebung festgelegt. Dieses umfasst Systemkomponenten, Systemaufbau, Planungsablauf und systeminterne Informationsflüsse. Hierbei wurde insbesondere darauf geachtet, dass sich mit dem Ansatz sowohl der angestrebte digitale Informationsfluss zwischen Konstruktion, Bearbeitungsplanung und Qualitätssicherung als auch der Aufbau einer zentralen Technologiedatenbank realisieren lässt. Das Ergebnis der Zusammenarbeit ist in Abbildung 1 zu sehen und wird nachfolgend entlang des Planungsablaufs erläutert. Zur Einordnung der Systemkomponenten in den vorgesehenen Arbeitsplan des Teilvorhabens wurde jede Komponente bzw. Funktion in der Abbildung mit dem Arbeitspaket, in dem sie entstehen soll, versehen.

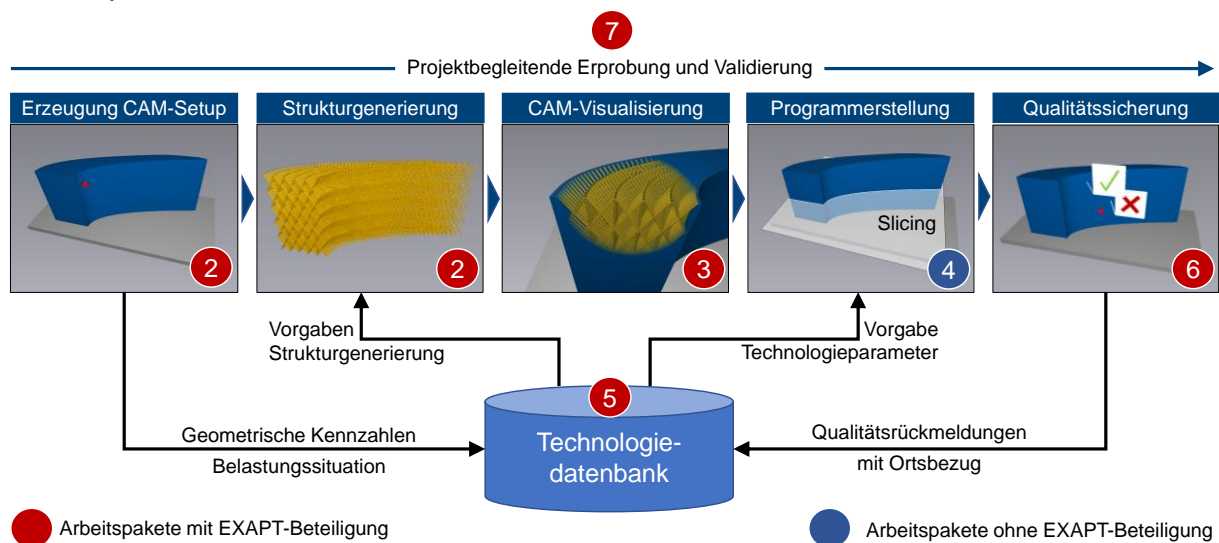


Abbildung 1: Gesamtaufbau des Software-Demonstrators

Den Ausgangspunkt bildet die Übernahme von Konstruktions- bzw. Auslegungsdaten, die innerhalb der CAM-Planungsumgebung zur Erzeugung eines CAM-Setups zusammengefügt werden. Neben geometrischen Informationen beinhaltet dies auch die Übernahme von Belastungssituationen, die aus CAE-Datenbeschreibungen abgeleitet werden. Die aufbereiteten Informationen werden anschließend an CAM-interne prozedurale Strukturgenerierungsmodule weitergeleitet, welche hierauf aufbauend belastungsangepassten Strukturen erzeugen (Aufgabe: DAP). Die Berechnungsergebnisse werden in einem nächsten Schritt in einen geometrischen Bezug zum Planungssetup gebracht und mittels geeigneter Visualisierungskonzepte dargestellt (Aufgabe: EXAPT). Für die hierbei notwendige Erzeugung und

Rückübertragung von Berechnungsergebnissen werden geeignete Repräsentationen der Strukturen aufgebaut. Weiterhin werden Mechanismen umgesetzt, um die ggf. erzeugten Stützstrukturen auch bei einer anschließenden Planung von (spanenden) Nachbearbeitungsschritten berücksichtigen zu können.

Genügt ein Planungsstand den gestellten Anforderungen, erfolgt eine CAM-interne Bahnplanung (Aufgabe: Moduleworks). Hierzu wird das CAM-Setup mit den generierten Stützstrukturen sowie vorzugebenden Technologieparametern an einen systeminternen Bahnplanungsalgorithmus weitergeleitet. Dieser erzeugt hierauf aufbauend die benötigten Belichtungsbahnen, die anschließend in ein Bearbeitungsprogramm überführt werden können.

Nach erfolgter Bearbeitungsplanung dient das erstellte CAM-Setup zur Vorgabe einer Prüfplanung (Aufgabe: IPT). Hierbei lassen sich betroffene Bereiche des virtuellen Aufbaus mit Prüfvermerken versehen. Die gleiche Eingabemaske soll später auch innerhalb der Qualitätssicherung zur Anwendung kommen, um eine Rückführung von Qualitätsergebnisse mit entsprechendem Bauteilbezug zu ermöglichen.

Die Strukturgenerierung, die Technologieparametervorgabe sowie Prüfplanung und Qualitätsrückmeldung nutzen entlang des gesamten Planungsprozesses eine zentrale Technologiedatenbank (Aufgabe: EXAPT). Diese schlägt auf Grundlage zuvor ermittelter Geometrie Kennzahlen und Belastungsgrößen bspw. die Auswahl geeigneter Strukturgenerierungsalgorithmen vor. Zudem entstammen dieser Vorschläge zu Prozessparameterangaben, die in der Vergangenheit zu erfolgreichen Herstellungsprozessen geführt haben. Auch erfolgt hierüber der Austausch von Prüfvermerken bzw. Prüfergebnissen zwischen Qualitätsplanung und Qualitätssicherung. So lassen sich Technologieparameter und Bearbeitungsergebnis bspw. für den strukturieren Aufbau der technologischen Expertise verknüpfen. Bei zukünftigen, vergleichbaren Bearbeitungsaufgaben lassen sich diese Informationen dann gezielt finden und bei der weiteren Planung berücksichtigen.

Arbeitspaket 2: Entwicklung prozeduraler Strukturen

Zur Einbindung prozeduraler Strukturen in eine CAM-Programmierungsumgebung wurden aufbauend auf Arbeitspaket 1 mehrere Konzept- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Die Ergebnisse erlauben im Zusammenwirken die Erstellung von additiven Prozessschritten innerhalb eines CAM-Programmiersystems. Bei der Umsetzung wurde dabei berücksichtigt, dass zukünftig sowohl additive als auch subtraktive Bearbeitungsschritte innerhalb einer Bearbeitungsplanung möglich sein sollen. Zum Beispiel sollen Nachbearbeitungen für zuvor additiv erzeugte Bauteilbereichen genauso planbar sein, wie additive Fertigungsschritte auf bestehenden, u. U. spanend hergestellten Geometrieelementen. Die Tätigkeiten lassen sich dabei in die folgenden sechs Schritte einteilen:

1. **Aufbau eines CAM-Setups:** Zu Beginn wurden Import-Funktionen aufgebaut, um ein Ausgangsszenario, bestehend aus Geometrieelementen und Belastungsbeschreibungen, aufzubauen.
2. **Format zur effizienten Ablage von erzeugten Strukturen:** Zur Vermeidung von großen Speichermengen, die bei klassischen, zumeist dreiecksbasierten Austauschformaten auftreten, wurde ein deutlich effektiveres Beschreibungsformat für Stütz- und Gitterstrukturen entworfen.
3. **Methode zur Erzeugung von Stützstrukturen:** Für Überhangbereichen werden zur Abstützung von Bauteilbereichen zusätzliche Geometrielemente notwendig. Um eine Durchgängigkeit innerhalb einer Systemumgebung zu erreichen, wurden Algorithmen und Schnittstellen entworfen, um diese innerhalb der CAM-Umgebung anlegen zu weiterverarbeiten können.
4. **Methoden zur Behandlung und Rückübersetzung von Stützstrukturen in Solid-Grundkörper:** Für Kollisionsbetrachtungen und Bahngenerierung wurden Aufbereitungsmaßnahmen entworfen, die Stützstrukturgeometrien in Solid-Grundkörper zurückübersetzen. Hierdurch können hohe Rechenzeiten bei der Bahnplanung vermieden sowie die Qualität der Bahnplanung erhöht werden.
5. **Methoden zur Erzeugung von Gitterstrukturen für das Bauteilinnere:** Um Bauteilgewicht einzusparen sowie Bauteileigenschaften an erwartende Belastungssituationen anzupassen, wurden prozedurale Algorithmen entworfen, mit denen Gitterstrukturen bereits CAM-intern ausgelegt und erzeugt werden können.
6. **Methoden zur Visualisierung von generierten Strukturen:** Zur Visualisierung des Planungsergebnisses wurde ein Aufbereitungsalgorithmus erarbeitet, mit dem Strukturen im definierten Ausgangsformat volumetrisch dargestellt werden können zu können.

Im Folgenden werden die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse, sowie das zur Erreichung notwendige Vorgehen für jeden Schritt beschrieben.

1. Zur Übernahme von Geometrie- und Belastungsinformationen wurde in Anlehnung an das Vorgehen zur Planung subtraktiver Bearbeitungsschritte ein Import-Workflow aufgebaut. Hierbei wird vorausgesetzt, dass eine bereits bestehende Bauteilgeometrie sowie eine zu erzeugende Bauteilgeometrie innerhalb einer Baugruppe oder in getrennten Dateien vorliegen. Diese werden in die CAM-Planungsumgebung geladen, in Bezug zueinander ausgerichtet und mit „Rohteil“ (grau) oder „herzustellende Geometrie“ (blau) markiert (vgl. Abbildung 2). Im Vorhaben wird zur Datenübernahme das STEP-Format verwendet (AP 203 bzw. AP 214). Nach dem Import erfolgt das Anlegen von Belastungssituationen. Dieses ist wie in Abbildung 2 angedeutet durch grafisch-interaktive Selektion von

Oberflächenbereichen und Zuweisung einer Belastung – im Bild eine Punktlast mit 1500 N – möglich. Um jedoch auch einen verlustfreien Austausch mit CAD- und CAE-Systemen zu ermöglichen, wurden weiterhin auch Import-Schnittstellen zu Datenformaten der CAE-Systeme Abaqus und z88 Aurora erarbeitet. So ist auch eine Direktübernahme von vorab geplanten Belastungsszenarien möglich. Das so erzeugte CAM-Setup wird in einem nächsten Schritt in ein Zwischenformat (Punkt 5) überführt, welches zur Generierung prozeduraler Strukturen an entsprechende Generierungsalgorithmen weitergeleitet werden kann.

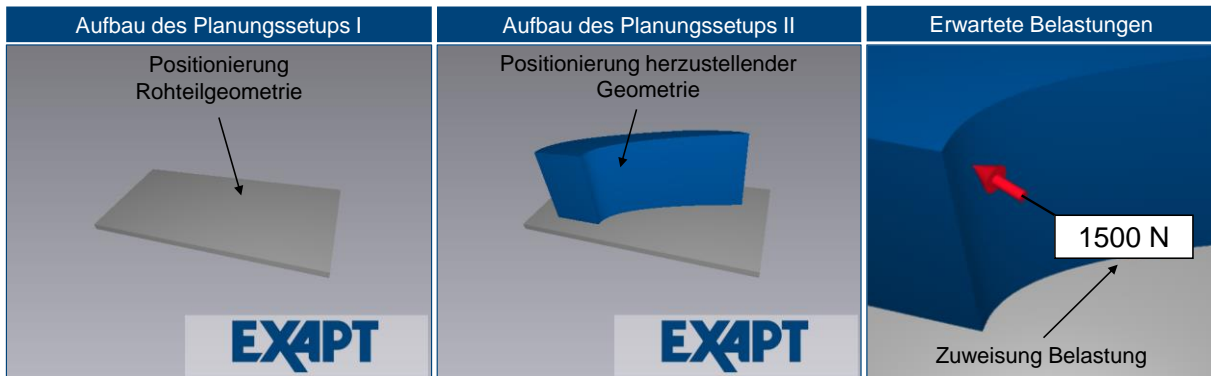


Abbildung 2: Aufbau eines Planungssetups

2. Zur Reduzierung von hohem Rechen- und Speicherbedarf wurde in Zusammenarbeit mit DAP, IPT und Moduleworks das in Abbildung 3 gezeigte Beschreibungsformat entworfen. Strukturelemente werden dabei im einfachsten Fall durch paarweise, dreidimensionale Endpunkte P_{Start} und P_{Ende} sowie zugehörige Radien $Radius_{Start}$ und $Radius_{Ende}$ analytisch beschrieben. In der Praxis hat sich gezeigt, dass sich durch die analytische Darstellung Speicher- und Rechenzeiteinsparungen um das 10- bis 100-fache reduzieren lassen. Im Vorhaben wird die Beschreibung daher durchgängig zum Aufbau von Stütz- und Gitterstrukturalgorithmen, zur Visualisierung sowie zur Generierung von Belichtungsbahnen und Bearbeitungsprogrammen verwendet.

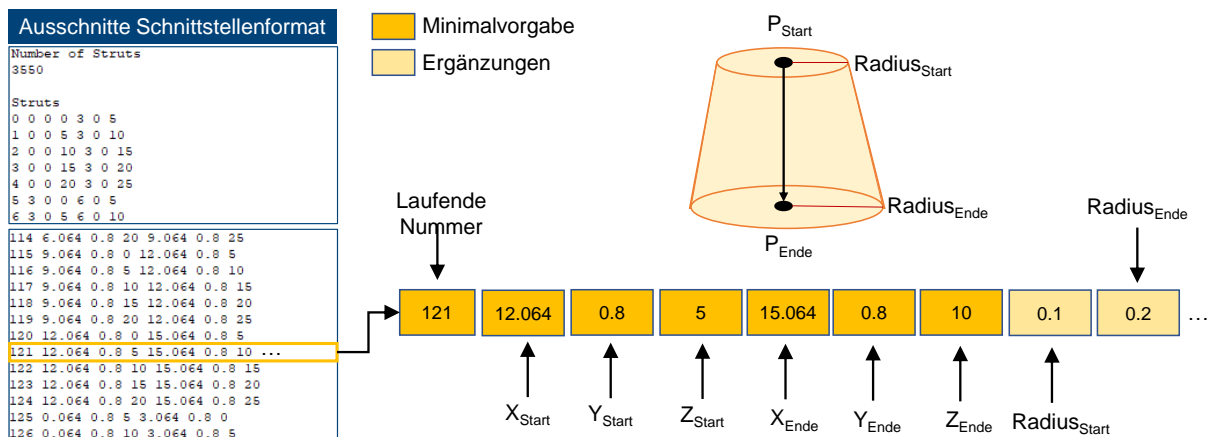


Abbildung 3: Format zur Darstellung von Stütz- und Gitterstrukturen

3. Meist werden auch Strukturen zum Stützen von Überhangbereichen benötigt. Hierzu wurde der in Abbildung 4 dargestellte Algorithmus umgesetzt. Das Grobkonzept wird an dieser Stelle kurz skizziert: In einem ersten Schritt werden anhand der Orientierung der Bauteils Überhangbereiche identifiziert, die daraufhin anhand eines benutzerdefinierbaren Abstands gerastert werden. Hieraus geht eine initiale Menge an Überhangpunkten (rot) hervor. Für Überhangpunkte werden in einem nächsten Schritt Kegel mit einem Öffnungswinkel, welcher dem doppelten des maximale möglichen Überhangwinkels entspricht, generiert (gelb).

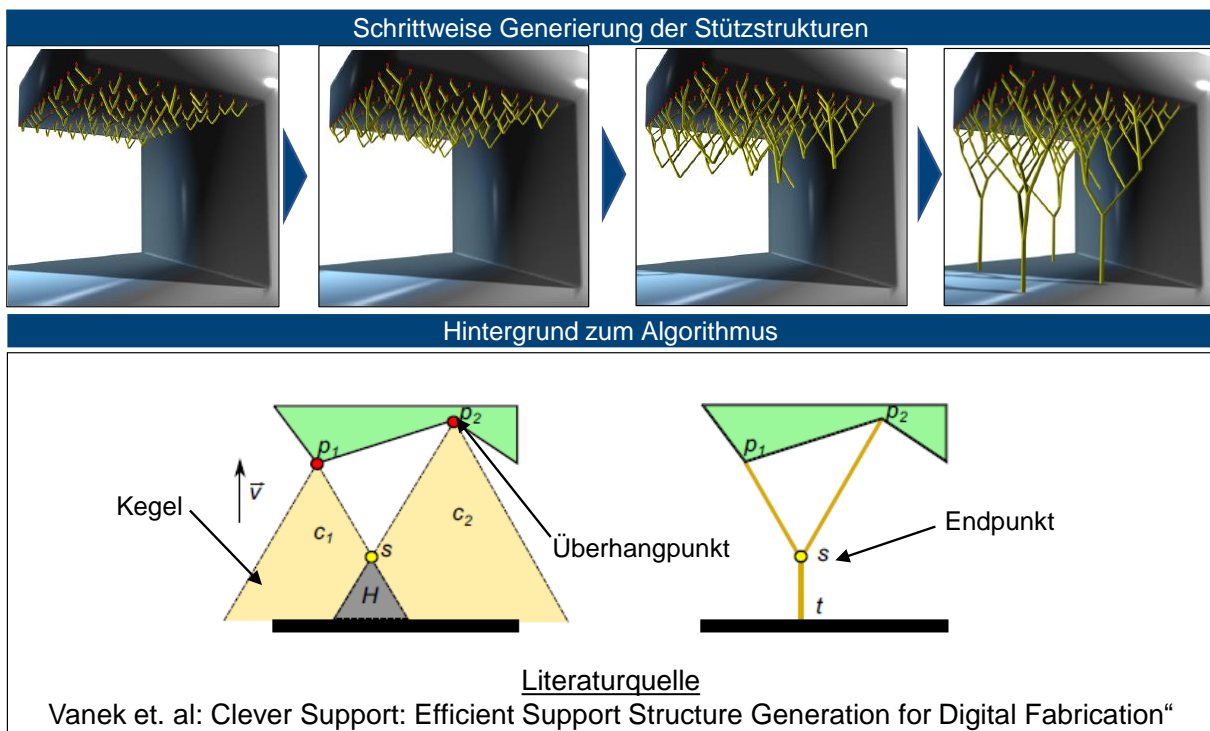


Abbildung 4: Erzeugung von Stützstrukturen

Im Anschluss ermöglichen paarweise Kegelschnitte das Auffinden eines Schnittpunktes, der am nächsten an einem betrachteten Überhangpunkten liegt (gelb). Durch die Verbindung von Überhangpunkten und Schnittpunkt lassen sich daraufhin zwei Streben (gelb) mit initialen Endradien $\text{Radius}_{\text{Start}}$ und $\text{Radius}_{\text{Ende}}$ generieren und der Stützstruktur hinzufügen. Die verbundenen Überhangpunkte werden anschließend aus der Menge an Überhangpunkten entfernt. Dafür wird der neu erzeugte Schnittpunkt als Überhangpunkt in diese Menge aufgenommen. Anschließend werden $\text{Radius}_{\text{Start}}$ und $\text{Radius}_{\text{Ende}}$ um einen benutzerdefinierbaren Prozentsatz erhöht, bevor der Algorithmus neu startet. Dies erfolgt solange, bis die Menge der Überhangpunkte leer ist.

4. Die Erzeugten Stützstrukturen stellen zusätzliche Geometrielemente dar, die innerhalb der Eingangsdaten nicht vorhanden sind und zur Planung nachfolgender Bearbeitungsschritte in die CAM-Planungsumgebungen zurückgeführt werden müssen. Dadurch wird beispielsweise eine (teilweise) Entfernung dieser

Strukturen durch eine spanende Nachbearbeitung ermöglicht. Während jedoch die Vielzahl an erzeugten Einzelstreben für Visualisierungen geeignet ist, ist die Darstellungsweise zur Weiterverwendung innerhalb eines CAD-Geometrikerns unzureichend. Allein die manuelle Selektion einer Vielzahl dieser Streben zur Definition von Fräsbereichen ist im Allgemeinen nicht wirtschaftlich durch den CAM-Programmierer durchführbar. Daher müssen die zusätzlichen Geometrielemente in eine BREP-Darstellung überführt werden, welche von CAD-Geometrikernen nativ unterstützt werden. Anschließend können diese „Solids“ zur Parametrierung nachfolgender evtl. subtraktiver Bearbeitungsschritte verwendet werden.

Für die Rückübersetzung wurde im Projekt eine Variante des HACD-Algorithmus (Hierarchical Approximate Convex Decomposition) durchgeführt. Dieser ermöglicht eine Zerlegung des Gesamtstützstrukturvolumens in konvexe Grundkörper. Die generierten konvexen Volumina können anschließend direkt in Solid-Körper überführt und effizient innerhalb der CAM-Umgebung verwendet werden. In Abbildung 5 ist ein Beispiel für diese Rückübersetzung dargestellt.

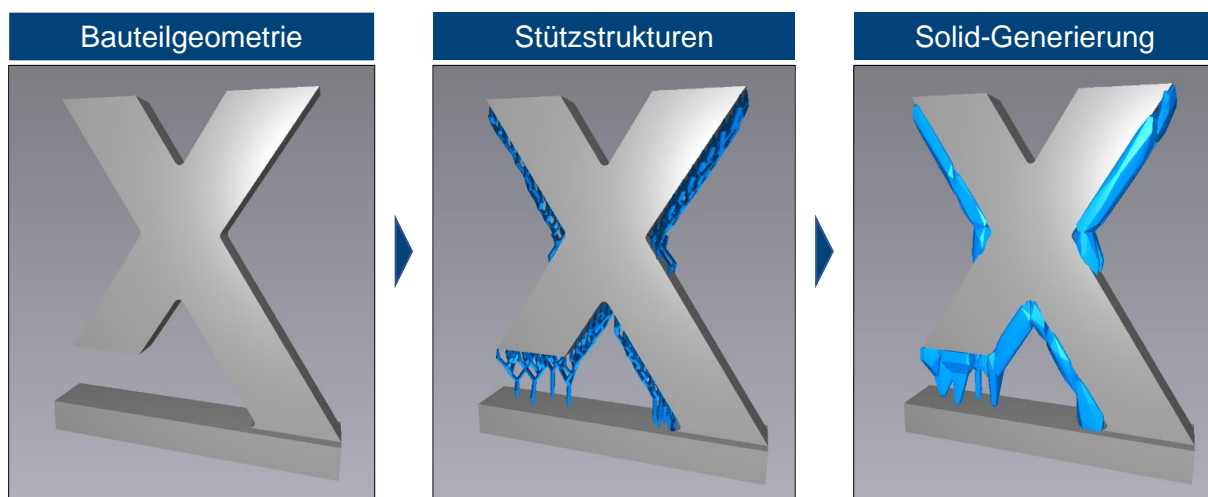


Abbildung 5: Konvexkörperapproximation zur Optimierung der Bahnplanung

Nach der Analyse des Bauteilgeometrie (1) werden für erkannte Überhangbereiche Stützstreben generiert (2). Diese sind aufgrund Ihrer Vielzahl und ihrer geometrischen Beschaffenheit nicht auf direktem Wege als Solid-Geometrie in das CAM-System überführbar und stehen demnach nicht zur Planung und Parametrierung weiterer Prozessschritte bereit. Die Anwendung des HACD-Algorithmus approximiert die Gesamtgeometrie der Stützstellen durch eine Menge konvexer Volumina, die eine effiziente Überführung in Solids erlaubt (3). Zur Überprüfung der Wirksamkeit des Ansatzes wurde der erstellte Stützstruktur-Algorithmus auf das in Abbildung 6 gezeigte Beispielwerkstück angewendet.

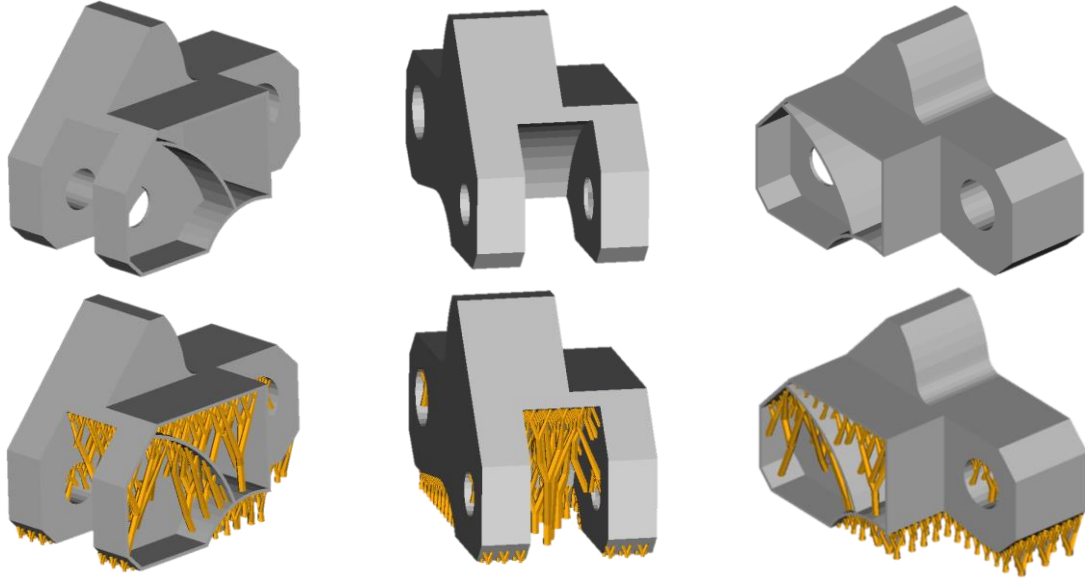


Abbildung 6: Konvexkörperapproximation zur Optimierung der Bahnplanung

Anschließend wurde der HACD-Algorithmus zur Rückübersetzung genutzt. Auf der resultierenden Planungsgrundlage wurde daraufhin eine subtraktive Folgebearbeitung geplant. Abbildung 7 gibt einen Eindruck zum Bahnplanungsergebnis. Es zeigt sich, dass durch das Gesamtverfahren die bereits CAM-intern verfügbaren Bahnplanungsalgorithmen weiterverwendet werden können. So entstehen kollisionsfreie Verfahrensbewegungen bei gleichzeitig geringer Rechenzeit und hoher Qualität der Bahnverläufe. Bspw. ergibt sich für die gezeigte Restmaterialentfernung keine Unmenge an kurzen Pfadsegmenten für jede Einzelstrebe der Stützstruktur.

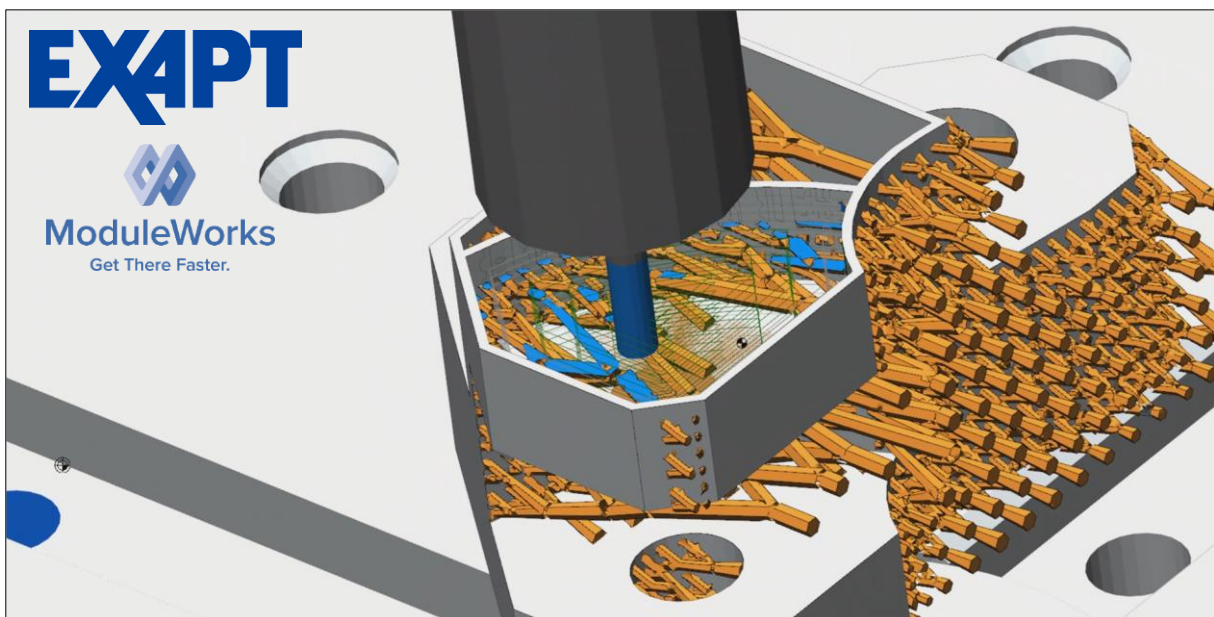


Abbildung 7: Simulation einer geplanten Nachbearbeitung

5. Zur Erzeugung von Gitterstrukturen für das Bauteilinnere wurde gemeinsam mit dem DAP das Konzept der Gitterprototypen entworfen. Dadurch lassen sich komplexe Gitterstrukturen anwendungsabhängig aus verschiedenen, individuell parametrierbaren Grundbausteinen zusammensetzen. Gitterprototypen werden dabei vom DAP im gemeinsam erarbeiteten Austauschformat bereitgestellt. Bild 8 gibt einen Einblick zu unterstützten Prototypen.

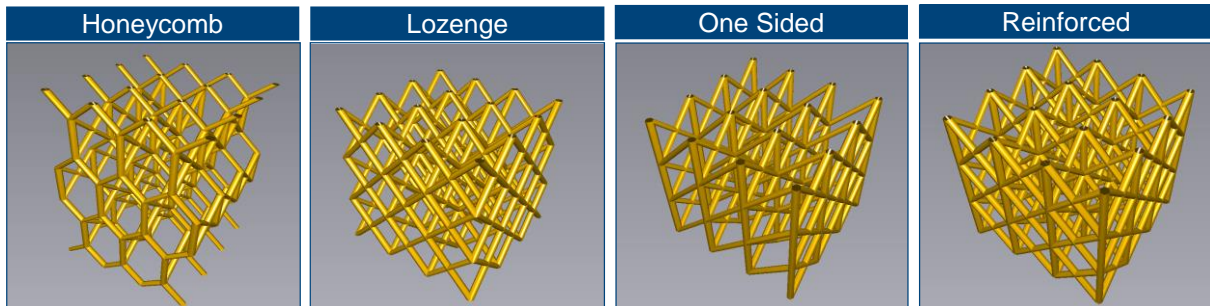


Abbildung 8: Beispiele für Gitterprototypen

Zur Verwendung der Prototypen wurde weiterhin ein Konzept zur Zerlegung eines gegebenen Bauteilvolumens in einzelne Zellen erarbeitet. Dieses wird vereinfacht in Abbildung 9 dargestellt. Ein ausgewählter, additiver Bauteilbereich wird dabei in einem ersten Schritt entlang eines festzulegenden Rasters in Einzelzellen zerlegt. Im Zusammenspiel mit einer vorgegebenen Lastsituation lässt sich dann für jede Einzelzelle ein geeigneter Prototyp auswählen und abhängig von den lokalen Anforderungen in Größe und Strebendurchmesser parametrieren. Abschließend werden die erstellten Einzelstreben jeder Zelle in ein globales Koordinatensystem überführt und zur Visualisierung und Bahnberechnung bereitgestellt.

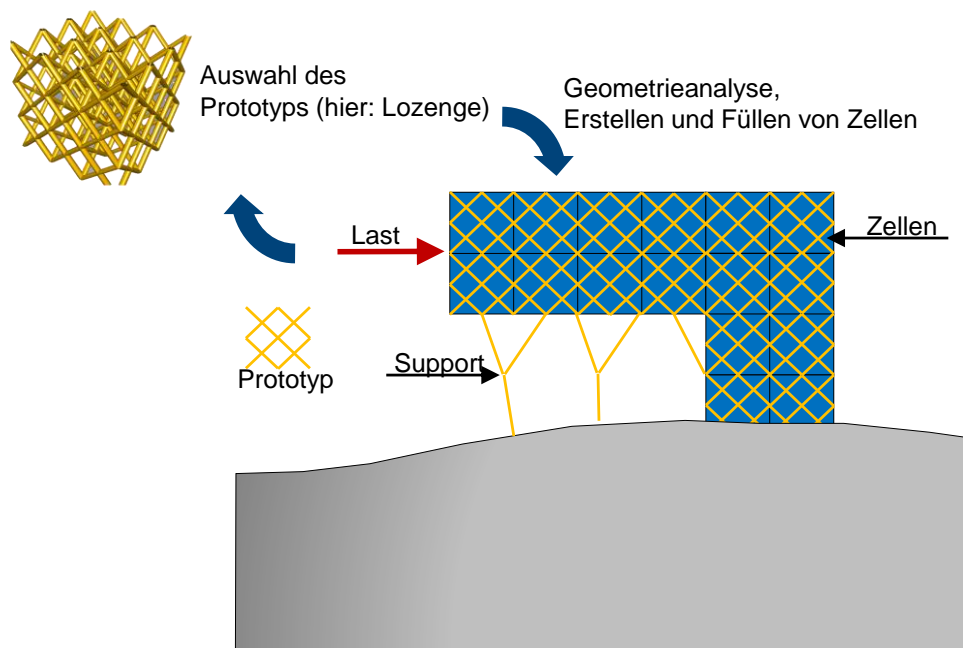


Abbildung 9: Beispielhafte Zellerlegung eines additiv zu fertigenden Bauteils

6. Anhand der definierten analytischen Darstellungsform erfolgt die Visualisierung der Strukturen. Durch lineare Interpolation der Durchmesser $\text{Radius}_{\text{Start}}$ und $\text{Radius}_{\text{Ende}}$ entlang des Liniensegmentes zwischen P_{Start} und P_{Ende} , wird ein volumetrischer Kegelstumpf erzeugt. Durch Vereinigung der strebenweise erzeugten Kegelelemente entsteht dann das Volumen der generierten prozeduralen Struktur. Zur echtzeitnahen Visualisierung und zur Vermeidung von hohen Speicher-Ressourcen findet die beschriebene Überführung nicht offline auf der CPU, sondern online auf dem Grafikprozessor des eingesetzten CAM-Rechners statt. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass heutige CAM-Rechner über entsprechende Hardware verfügen. Dabei reduziert sich der Speicherbedarf zur Visualisierung auf die bereits im Ausgangsformat vorhandenen Endpunkte und Radien. Ein Beispiel für die volumetrische Darstellung ist in Abbildung 10 geben.

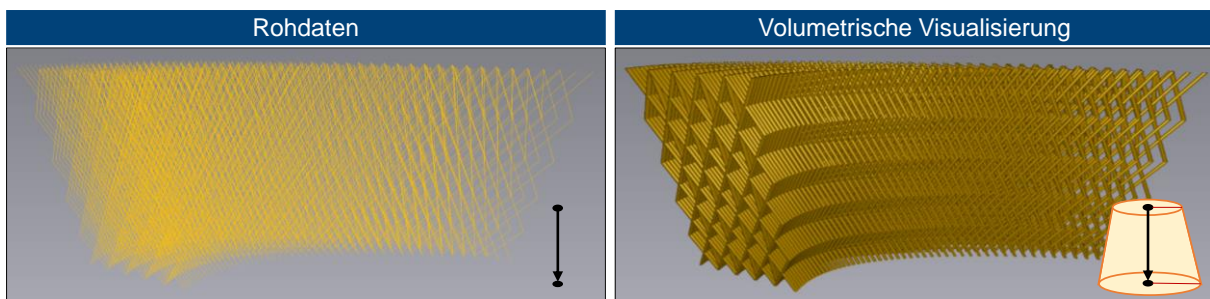


Abbildung 10: Visualisierungsansatz zur Darstellung von Stütz- und Gitterstrukturen

Im linken Teil der Abbildung sind lediglich die erhaltenen Rohdaten des Strukturgenerators dargestellt. Im rechten Teil des Bildes wird das Ergebnis der Überführung der Rohdaten in eine volumetrische Darstellung dargestellt. Durch die gewählte Umsetzung ist eine volumetrische Visualisierung zu interaktiven Bildwiederholraten möglich. Bei steigender Bauteilkomplexität mit einer erhöhten Anzahl an Strukturelementen werden jedoch trotzdem adaptive Methoden notwendig, bei denen die Gesamtanzahl der potenziell darzustellenden Strukturen auf festzulegende Regions-of-Interest einzuschränken ist.

Arbeitspaket 3: Visualisierung / Software-Demonstrator

Zur Darstellung der Strukturen innerhalb der CAM- Umgebung wurde aufgrund von Übersichtlichkeitsanforderungen sowie ggf. hardwaretechnischen Beschränkungen eine adaptive Visualisierungslösung entworfen. Diese ermöglicht eine Überblendung der zu fertigenden Geometrieoberfläche und den darunter befindlichen Strukturelementen in Abhängigkeit der Distanz des Bauteilbereichs zur virtuellen Kamera. Ein Beispiel für das Visualisierungskonzept ist in Abbildung 4 gegeben.

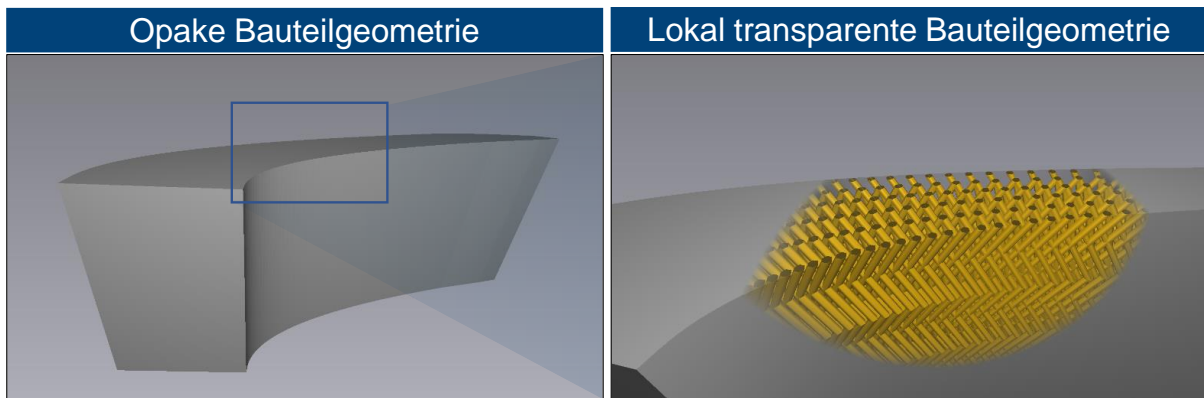


Abbildung 11: Überblendungskonzept zur lokalen Visualisierung Gitterstrukturen

Bei großem Abstand zwischen aktueller Kameraposition und Bauteiloberfläche wird lediglich diese dargestellt. Die darunterliegenden Strukturen werden dabei nicht für die Darstellung verarbeitet, sodass die hierfür notwendigen Rechenzyklen eingespart werden können. Wird der Abstand zur Bauteiloberfläche reduziert, findet ab einem benutzerdefinierbaren Grenzbereich eine Überblendung der Bauteiloberfläche mit den darunterliegenden Strukturen statt. Die Bauteiloberfläche wird an entsprechenden „Regions-of-Interest“ lokal transparent und die darunter liegenden lokalen Strukturbereiche sichtbar.

Zusätzlich zu dieser Entwicklung kommt ein Level-of-Detail-Konzept zum Einsatz, welches Bauteilbereiche außerhalb eines aktuell relevanten Betrachtungsbereichs in geringerer Auflösung darstellt. So lassen sich Hard- und Softwareressourcen weiter schonen. Hierzu wird das Bauteilvolumen zunächst durch eine Octree-Baumstruktur hierarchisch aufgeteilt. In einem nächsten Schritt werden die erstellten Strukturelemente räumlich in die Blattknoten dieser Baustruktur sortiert. Anschließend kann für jeden Blattknoten durch Distanzberechnung zur virtuellen Kamera ein Detaillierungsgrad bestimmt werden, in welchem die enthaltenen Strukturelemente dargestellt werden sollen. In isolierten Versuchen konnte hierbei eine Verdopplung der darstellbaren Strukturelemente ohne nennenswerten Verlust der Darstellungsqualität erzielt werden. Nach Fertigstellung der Visualisierungskonzepte sowie der Erarbeitung eines Algorithmus zur optimalen Auswahl des Detaillierungsgrads wurden das gesamte Visualisierungskonzept demonstratorisch in die CAM-Programmierungsumgebung eingebunden.

Arbeitspaket 4: Bahnberechnung

Arbeitspaket 4 wird der Vollständigkeit halber in den Schlussbericht aufgenommen, auch wenn die EXAPT Systemtechnik GmbH in diesem nicht aktiv geworden ist. Der Partner Moduleworks hat in diesem Paket den Bahnplanungsalgorithmus entworfen und umgesetzt, der anhand des definierten CAM-Setups sowie der Vorgabe von Technologieparametern die benötigten Belichtungsbahnen sowie das maschinespezifische Bearbeitungsprogramm bereitstellt.

Arbeitspaket 5: Technologiedatenbank und Parameterstudien

In Arbeitspaket 5 wurde in enger Zusammenarbeit mit dem DPP und dem IPT ein Datenmodell zur Abbildung von Technologieparametern, Maschinen und Werkstoffen erarbeitet. Dazu wurden zunächst Workflows definiert, die ein Benutzer z. B. bei der Auswahl von Maschine, Material und Prozessparametern durchläuft. Darauf aufbauend wurde das Datenmodell derart aufgebaut, dass Schnittstellen zur Datenbankabfrage unmittelbar den Aufbau der Workflows in der Endanwendung unterstützen. Abbildung 12 enthält ein vereinfachtes Abbild des Datenmodells für den Anwendungsfall „Ressourcenauswahl“. Nach einer initialen Geometrieanalyse lassen sich in einem ersten Schritt Bauteilgröße, Bauteilengstellen und Überhänge identifizieren. Hierdurch kann die Anzahl der in Frage kommenden Maschinen und Materialien bereits eingeschränkt werden. In einem nächsten Schritt kann die Auswahl geeigneter Parametersets erfolgen, die sich feiner in die Anwendungsbereiche Upskin, Inskin, Downskin unterteilen lassen. In Abbildung 12 sind die dabei berücksichtigten Prozessparameter innerhalb eines Parametersets ersichtlich. Weiterhin kann auf ein eigenes Parameterset für Support-Strukturen zurückgegriffen werden, um in diesen Bauteilbereichen bspw. höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten erzielen zu können. Auf Grundlage der Vorauswahl ist anschließend eine technologieoptimierte Bahnplanung möglich, die durch den Projektpartner ModuleWorks weiter vertieft wird. In der Abbildung 12 ebenfalls zu erkennen ist die Verknüpfung von Qualitätsrückmeldungen mit Technologieparametern, die für Arbeitspaket 6 entscheidend ist.

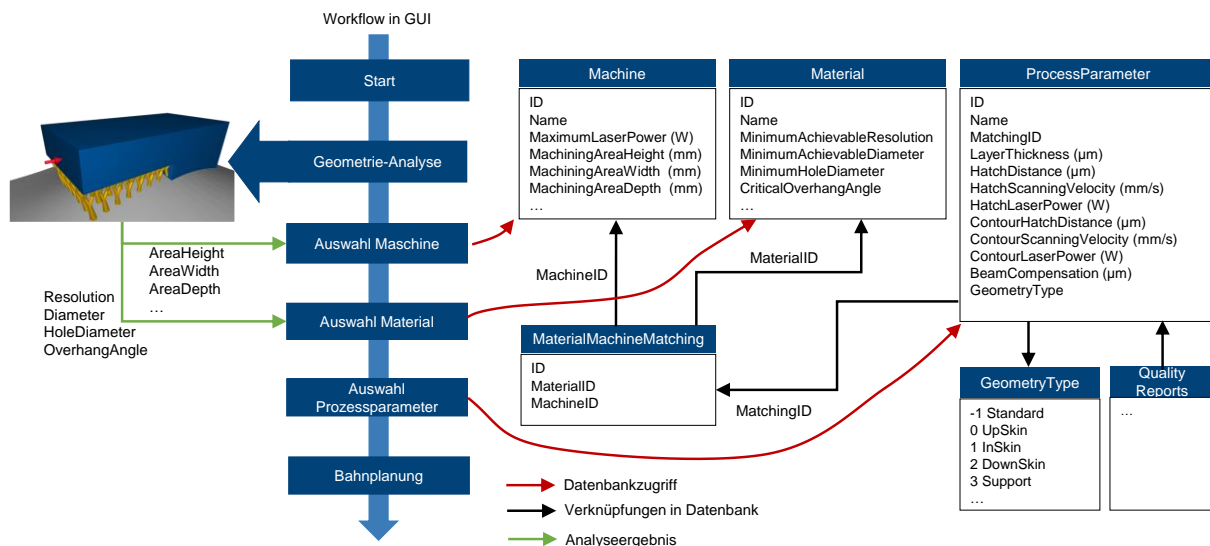


Abbildung 12: Grundaufbau der Technologiedatenbank

Arbeitspaket 6: Integration Prüfplanungstool zur zukünftigen Automatisierung

In Zusammenarbeit mit dem IPT wurde das Datenmodell weiterhin um die Unterstützung von Reports erweitert. Diese gliedern sich an die Prozessparametersets an (Abbildung 12), und erlauben eine orts aufgelöste, manuelle Rückmeldung von

erkannten Fertigungsproblemen. Dabei wird in einem ersten Schritt eine Verknüpfung zwischen Einzelstreben einer gegebenen Gitterstruktur bzw. einer gegebenen Bauteiloberfläche und den bei der Planung herangezogenen Prozessparametern hergestellt. Aufgrund des Datenmodells ergibt sich dabei automatisch eine Zuordnung zur verwendeten Maschine sowie den eingesetzten Materialien.

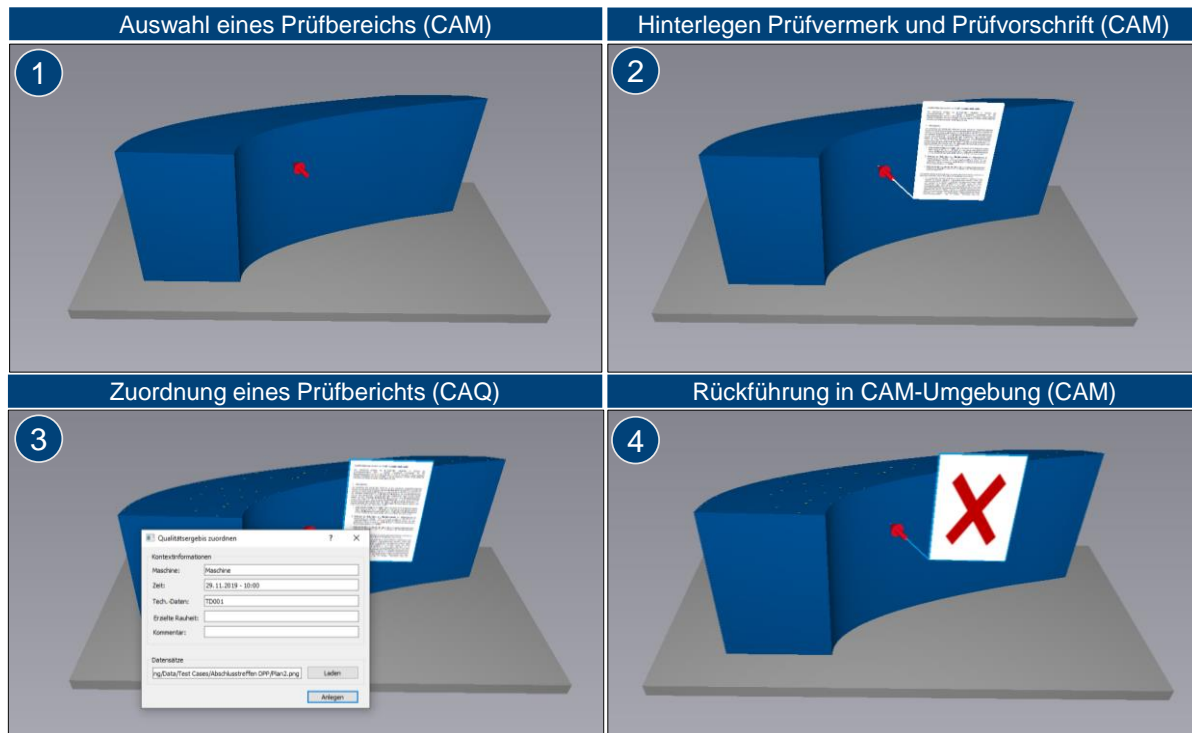


Abbildung 13: Planung von Prüfprozessen und Ergebniserückführung

Hieran anknüpfend wurde die CAM-Umgebung um das Anlegen von Prüfvermerken erweitert (Abbildung 13, 1 und 2). Durch Selektion von Strukturen oder Oberflächenbereichen lässt sich hierdurch ein vordefinierter Prüfvermerk mit Toleranzvorgaben anlegen. Dieser wird für das Bauteil in der Technologiedatenbank hinterlegt.

Die gleiche Schnittstelle steht dem Qualitätsprüfer in der Qualitätssicherung zur Verfügung. Nach abgeschlossener Prüfung kann er seine Qualitätsberichte mit einer kurzen Beschreibung (Abbildung 13, unten) an einen Prüfvermerk anheften. Die Informationen werden dann innerhalb der Technologiedatenbank mit Gitterstruktur bzw. Bauteiloberfläche und den bei der Fertigung verwendeten Prozessparametern verknüpft. Hierdurch ist es dem Anwender zukünftig möglich, bei einer Neuplanung auf Ergebnisse ähnlicher, bereits durchgeführter Prozesse zurückzugreifen.

Die dargestellten Benutzerschnittstellen sowie die Datenbankanbindung wurden in Arbeitspaket 6 realisiert.

Arbeitspaket 7: Erprobung und Validierung

Fortlaufend zur Projektlaufzeit wurden die Systemkomponenten aller Partner demon­stratorisch in die EXAPT-Umgebung integriert und mit gemeinsam festgelegten Demonstratorbauteilen getestet. Ein Teil hiervon ist in den Abbildungen 5, 6 und 9 dargestellt. Zum Projektabschluss konnte weiterhin ein Gesamtdurchlauf von Konstruktion (CAD) über Prozessplanung und Generierung des Bearbeitungs­programms (CAM) bis hin zur Planung von Qualitätsprüfungen und Datenrückführung (CAQ) durchgeführt werden. Hierbei hat sich bestätigt, dass mit der aufgebauten Lösung eine vollständig digitale Prozesskette für photonische Prozesse aufgebaut werden kann. Das entstandene Austauschformat trägt dazu bei, die Datenspeicherung sowie den Datenaustausch zwischen Sub-Systemen drastisch zu reduzieren. Hierdurch wird insbesondere die Berechnungszeit für Struktur- und Bahn­berechnung positiv beeinflusst. Weiterhin hat sich bestätigt, dass durch die entwickelten CAM-Methoden zur Abbildung und geometrischen Kapselung von Stützstrukturen (vgl. Arbeitspaket 2) auch anschließende subtraktive Prozesse geplant werden können. Damit ist die Möglichkeit zur abwechselnden Planung additiver und subtraktiver Prozessschritte innerhalb einer CAM-Planungsumgebung gegeben.

Die angestrebten Projektziele der EXAPT Systemtechnik GmbH wurden damit erreicht.

Voraussichtlicher Nutzen der Projektergebnisse

Die erzielten Projektergebnisse ermöglichen weiterhin den Aufbau von Hilfswerkzeugen zur fortlaufenden Erweiterung der technologischen Expertise. Dies kann zum aktuellen Zeitpunkt durch die manuelle Eintragung von Prüf- und Qualitätsberichten in CAM- und CAQ-Abteilungen erfolgen, welche anschließend über eine zentrale Technologiedatenbank mit geometrischen und technologischen Merkmalen des Bearbeitungsprozesses angereichert werden. Für ähnliche Planungssituationen kann das System dann entsprechende Einträge für Optimierungszwecke bereitstellen. Eine vielversprechende, hieran anknüpfende Weiterentwicklung bilden Einbezug und Auswertung prozessbegleitend erfasster Maschinensignale. Diese bergen das Potenzial, den manuellen Prozess für den Aufbau technologischer Expertise vollständig zu automatisieren. Diese Möglichkeit soll in Zusammenarbeit mit allen beteiligten Partnern in der zweiten DPP-Projektförderphase untersucht werden.

Während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet

Zur Laufzeit des Vorhabens wurden keine Fortschritte auf dem Gebiet der prozeduralen Generierung von Stütz- oder Gitterstrukturen in einer CAM-Planungsumgebung festgestellt.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Parallel zur Projektlaufzeit wurden die jeweils aktuellen Ergebnisse in regelmäßigen Abständen auf Industrie- und Fachmessen vorgestellt. Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den durchgeführten Maßnahmen sowie dem Durchführungszeitraum.

Tabelle 1: Durchgeführte Veröffentlichungen im Projektzeitraums

Durchgeführte Maßnahme	Zeitraum
Vorstellung des Projektes auf der AMB	September 2016
Vorstellung aktueller Ergebnisse auf der EXAPT Hausmesse	November 2016
Vorstellung des Projektes im WZL Seminar: CAD/CAM/NC-Verfahrenskette	November 2016
Vorstellung aktueller Ergebnisse bei den Turning Days	Februar 2017
Vorstellung aktueller Ergebnisse auf der Intec	März 2017
Vorstellung aktueller Ergebnisse auf der EMO	September 2017
Vorstellung des Projektes und aktueller Ergebnisse auf dem Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium	Mai 2017
Vorstellung aktueller Ergebnisse auf der EXAPT Hausmesse	Februar 2018 April 2018 Juni 2018
Vorstellung der aktuellen Projektergebnisse auf dem International Laser Technology Congress (AKL)	Mai 2018
Vorstellung des Projektes im WZL Seminar: CAD/CAM/NC-Verfahrenskette	November 2018
Vorstellung der Ergebnisse auf der Metav	Februar 2018
Vorstellung der Ergebnisse auf der AMB	September 2018
Vorstellung aktueller Ergebnisse auf der EXAPT Hausmesse	Februar 2019 April 2019 Juni 2019
Vorstellung aktueller Ergebnisse auf der EMO	September 2019

Darüber hinaus sind nach Projektende weitere Veröffentlichungsmaßnahmen geplant. Einen Überblick hierzu wird in Tabelle 2 gegeben. Geplante Veranstaltungen, die sich im Jahre 2020 auf das Jahr 2021 verschoben haben, sind durch ein Durchstreichen des Zeitpunkts sowie eine entsprechende Neudatierung gekennzeichnet.

Tabelle 2: Geplante Veröffentlichungen nach Projektende

Geplante Maßnahme	Zeitraum
Vorstellung der Projektergebnisse auf den EXAPT Profit Days – Digitale Agenda in Augsburg	November 2019
Vorstellung aktueller Ergebnisse auf dem EXAPT Arbeitskreis	November 2019
Vorstellung des Demonstrators auf dem Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium 2020 → 2021	Mai 2020 → Mai 2021
Vorstellung aktueller Ergebnisse auf der EXAPT Hausmesse	Februar 2020 April 2020 (digital) Juni 2020 (digital)
Vorstellung des Projektes im WZL Seminar: CAD/CAM/NC-Verfahrenskette	November 2020 → November 2021