

Kurzbericht zum Vorhaben

**„Werkzeugwegplanung für adaptive  
Produktivitätsoptimierung durch datengesteuerte  
Modellierung für dynamische Fräsprozesse“**

im Rahmen des Eurostars Projekts  
**E! 115498 DynaTWIN**  
**„Adaptive Produktivitätsoptimierung durch datenbasierte Modellierung für  
hochdynamische Fräsprozesse“**

**„Adaptive productivity optimization through data-driven modelling for dynamic milling  
processes“**

**Denys Plakhotnik, Deborah Rogiers**

ModuleWorks GmbH  
Henricistraße 50  
52072 Aachen

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2155A  
Projektlaufzeit: 01.10.2021 – 30.09.2024

## **Teil I – Kurzbericht (Förderkennzeichen: 01QE2155A - E! 115498 DynaTWIN)**

### **Zusammenfassung**

Das Ziel von ModuleWorks im Projekt war die Entwicklung einer Softwarekomponente, die einen hochproduktiven Fräsprozess von Flugzeugtriebwerksteilen ermöglicht.

Der Arbeitsablauf des Fertigungsprozesses der Turbinenschaufeln hat zwei Ansätze.

Beim ersten Ansatz geht es um die Optimierung des bestehenden Werkzeugwegs für das mehrachsige Fräsen von Turbinenschaufeln. Der ursprüngliche Werkzeugweg kann in jeder Software eines Drittanbieters erzeugt werden. Anschließend kann er in ein neutrales Standardformat, z. B. CLS, exportiert werden. Allerdings enthalten die CLS-Formatdefinitionen nicht alle notwendigen Schlüsselwörter, um den Fertigungsprozess zu steuern. Daher hat der Projektpartner Fraunhofer IPT eine Erweiterung des CLS-Formats entwickelt, die ein höheres Maß an Flexibilität bei der Definition der Bearbeitungsparameter während des Fräsprozesses bietet. Schließlich wurde die Unterstützung der erweiterten Version des CLS-Formats von ModuleWorks implementiert. Die neuen Versionen der CLS-Dateien können in die ModuleWorks-Software importiert werden, wobei alle erforderlichen Prozessinformationen, wie z. B. die Geometrie des Fräswerkzeugs, die Vorschubgeschwindigkeit und die Spindeldrehzahl, erhalten bleiben. Sobald ein Werkzeugweg importiert ist, muss der Weg bei jedem Schritt (Werkzeuggesteuerung) hinsichtlich des abgetragenen Materials analysiert werden. Die Berechnung des abgetragenen Materials liefert zwei wichtige Eigenschaften des Fräsprozesses - das Volumen des abgetragenen Materials und die Kontaktfläche zwischen dem Fräswerkzeug und dem Werkstück. Die Berechnung der Kontaktfläche wurde durch Parallelisierung der Berechnungen optimiert. Dies war möglich, da diese Berechnung auf der Raytracing Technologie einer Vielzahl von Dreiecken basiert, die effizient parallelisiert werden können. Da sich die Konfiguration der Kontaktzone während des Fräsprozesses ändert, kann die Fläche der Kontaktzone mit einem entwickelten Algorithmus analysiert werden, der auf Signalverarbeitungsfiltern basiert. Die Änderungen in der Kontaktfläche können für die Dauer und Häufigkeit der Quasi-Zeitspanne analysiert werden, innerhalb derer die vorhergesagte Kraftbelastung auf das Fräswerkzeug bestimmte Muster darstellen soll, die als glatte Kurven oder abrupte Änderungen mit signifikanten Amplituden, die dem Resonanzphänomen ähneln, interpretiert werden können.

Der zweite Ansatz beruht darauf, solche Werkzeugwege für das mehrachsige Fräsen von Turbinenschaufeln zu programmieren, dass sich die auf das Fräswerkzeug und die Turbinenschaufel wirkenden Schnittkräfte in einer vorhergesagten, kontrollierbaren Weise ändern. Bei diesem Ansatz wird berücksichtigt, wie tief das Fräswerkzeug in das Werkstück eintaucht, indem der Abstand zwischen der Werkzeugspitze des Fräswerkzeugs und der Turbinenschaufel festgelegt wird. Diese Funktionalität wurde durch die Einführung des 2D-Parameterraums mit UV-Koordinaten implementiert. Dabei definiert die V-Koordinatenachse die Höhe der Turbinenschaufel und die U-Koordinatenachse den Umfang der Turbinenschaufel in der orthogonalen Richtung der Kante.

Dazu stimmte sich das Unternehmen zunächst hinsichtlich der Anforderungen ab und legte sich auf die Softwareoberfläche Rhino fest und stimmte sich zu den Anforderungen an die graphische Nutzoberfläche ab. Anschließend wurde die dynamische Simulation durch den Import von CLS-Dateien sowie deren Visualisierung und Verarbeitung ermöglicht. Weiterhin wurde eine Bahnplanung für Werkzeugwege mit nicht-uniformen UV Verteilungen von Material auf der zu bearbeiteten Fläche entwickelt. Abschließend erfolgte die praktische Erprobung der Technologie,

wozu die Vorschubraten der CLS-Dateien farblich kodiert wurden. Die Projektergebnisse wurden durch ein durchgängiges Projektmanagement zur Organisation und Koordination erreicht.

### **Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben verlief wie in Absprache mit dem Projektträger geplant.

### **Wesentliche Ergebnisse**

Wesentliche Ergebnisse des Projektes betreffen Algorithmen, die die Programmierung effizienter Werkzeugwege für die Herstellung von Turbinenschaufeln erleichtern: die Softwareoberfläche und das Grafische Nutzungsinterface, den Import sowie die Verarbeitung von CLS-Dateien, anpassbare Werkzeugwege und die Bereitstellung von spezifischen Werkzeugen für Bauteile mit einer nicht-uniformen Materialverteilung.

Schlussbericht zum Vorhaben  
**„Werkzeugwegplanung für adaptive  
Produktivitätsoptimierung durch datengesteuerte  
Modellierung für dynamische Fräsprozesse“**

im Rahmen des Eurostars Projekts  
**E! 115498 DynaTWIN**  
**„Adaptive Produktivitätsoptimierung durch datenbasierte Modellierung für  
hochdynamische Fräsprozesse“**

**„Adaptive productivity optimization through data-driven modelling for dynamic milling  
processes“**

**Denys Plakhotnik, Deborah Rogiers**

ModuleWorks GmbH  
Henricistraße 50  
52072 Aachen

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2155A  
Projektlaufzeit: 01.10.2021 – 30.09.2024

## **Teil II –Sachbericht (FKZ: 01QE2155A - E! 115498 DynaTWIN)**

### **Zusammenfassung**

Das Ziel von ModuleWorks im Projekt war die Entwicklung einer Softwarekomponente, die einen hochproduktiven Fräsprozess von Flugzeugtriebwerksteilen ermöglicht. Dazu stimmte sich das Unternehmen zunächst hinsichtlich der Anforderungen ab und legte sich auf die Softwareoberfläche Rhino fest und stimmte sich zu den Anforderungen an die graphische Nutzoberfläche ab. Anschließend wurde die dynamische Simulation durch den Import von CLS-Dateien sowie deren Visualisierung und Verarbeitung ermöglicht. Weiterhin wurde eine Bahnplanung für Werkzeugwege mit nicht-uniformen Verteilungen von Material auf der zu bearbeiteten Fläche entwickelt. Abschließend erfolgte die praktische Erprobung der Technologie, wozu die Vorschubraten der CLS-Dateien farblich kodiert wurden. Die Projektergebnisse wurden durch ein durchgängiges Projektmanagement zur Organisation und Koordination erreicht.

### **Zielsetzung**

Das Ziel von ModuleWorks in dem Projekt war die Entwicklung einer Softwarekomponente, die einen hochproduktiven Fräsprozess von Flugzeugtriebwerksteilen ermöglicht. In diesem Zusammenhang wurde ein Simulationsrahmen entwickelt, um die Werkstück- und Werkzeugdynamik unter Berücksichtigung des Materialabtrags zu simulieren. Es wurde angestrebt, durch das entwickelte Prozessmodell eine Optimierung durch tatsächlich gemessene Schwingungsdaten und deren Berücksichtigung in Simulationsungenauigkeiten zu erhalten. Außerdem kann die Auswahl der Spindeldrehzahlen gewählt werden.

### **Ergebnisse und Arbeiten des Teilvorhabens**

#### **Arbeitspaket 1: Agile Produktentwicklung**

In diesem Arbeitspaket wurden die Softwareanforderungen gemeinsam mit den PartnerInnen festgelegt.

Diese Anforderung umfassen die Definition der Softwareoberfläche für den Werkzeugeingriff mit FEM-Simulation in der Software Rhinoceros. Außerdem wurden die Anforderungen an die Integration der Graphical User Interface in der Software Rhinoceros festgelegt.

## Arbeitspaket 2: Dynamik-Simulations-Modul (A)

In diesem Arbeitspaket wurde die Entwicklung einer Parser-Funktionalität vorangetrieben, die den Import von CLS-Dateien vom Partner innerhalb des ModuleWorks Kern erlauben. Ein Beispiel dieser Dateien des Partners Fraunhofer IPT ist in Abbildung 1 zu sehen. Anders als Standard oder TI CLS-Formaten bietet die Datei des IPT zusätzliche Informationen zum Kontaktpunkt, an dem geschnitten wird und der Flächennormalen des Vektors des Schneidepunktes.

#spindle speed and the direction of the spindle rotation

**SPINDL/12000, CLW**

#rapid move

**RAPID**

#GOTO move (3d point - tool position (CL), 3d vector - tool orientation, 3d point - cutter contact point, 3d vector - surface normal at the contact point)

**GOTO/3.371389, 286.470184, 95.665363, -0.000572, 1.000000, -0.000818 \$\$ SX40.278, SY111.36, SZ41.292, SXori-0.11061, SYori0.94388, SZori0.31123**

#feedrate

**FEDRAT/2165.0000,MMPM**

Abbildung 1: CLS-Datei des Partners Fraunhofer IPT.

Zusätzlich zum ModuleWorks NC-Format nutzt ModuleWorks andere Formate, insbesondere solche, die durch die Software in der CAD-Umgebung Rhinoceros dargestellt werden. Allerdings werden die CLS-Dateien des IPT nicht in der Software Rhinoceros unterstützt. Im DynaTwin Projekt entwickelte ModuleWorks Softwareschnittstellen, die einen Import von Bahnplanungen von IPT CLS-Dateien ermöglichen. Mittlerweile kann die importierte Bahnplanung in Rhinoceros visualisiert werden (Abbildung 2).

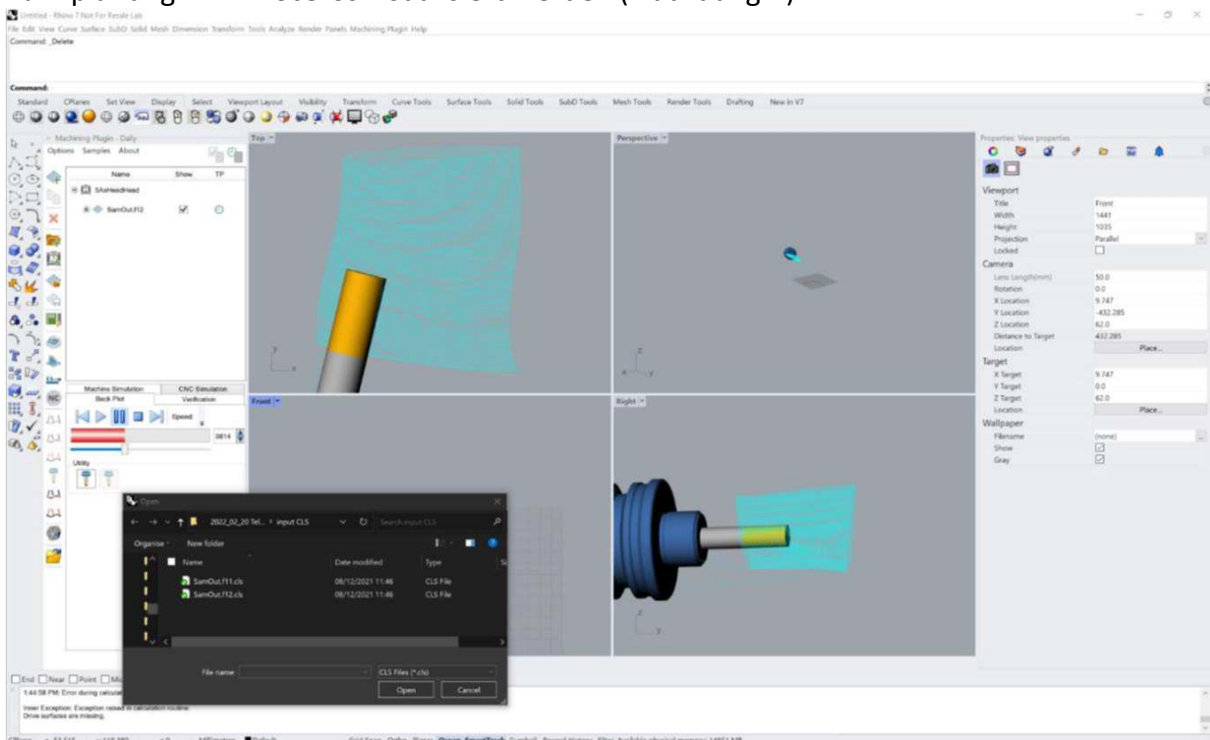


Abbildung 2: Visualisierung Rhino.

Eine weitere wichtige Entwicklung in diesem Arbeitspaket war die Parallelisierung von Schnittpunkten der sich bewegenden Werkzeuggeometrie und des Rohteils. Dies ist von Bedeutung, um die Leistung der Berechnung des Werkstückeingriffs zu verbessern. Eine Herausforderung ist es dabei, die Berechnungsaufwände so zu teilen, dass im besten Falle gleich große Berechnungsaufgaben anfallen, die parallel aufgeführt werden können. Dabei ist der erste Schritt, zu erkennen welche Teile des Werkzeugs im direkten Kontakt mit dem Rohteil sind. Diese Information kann dabei helfen, unnötige Geometrien auszuschließen und die Werkzeugoberfläche in kleinere (Teil-)Meshes zu zerlegen (Abbildung 3).

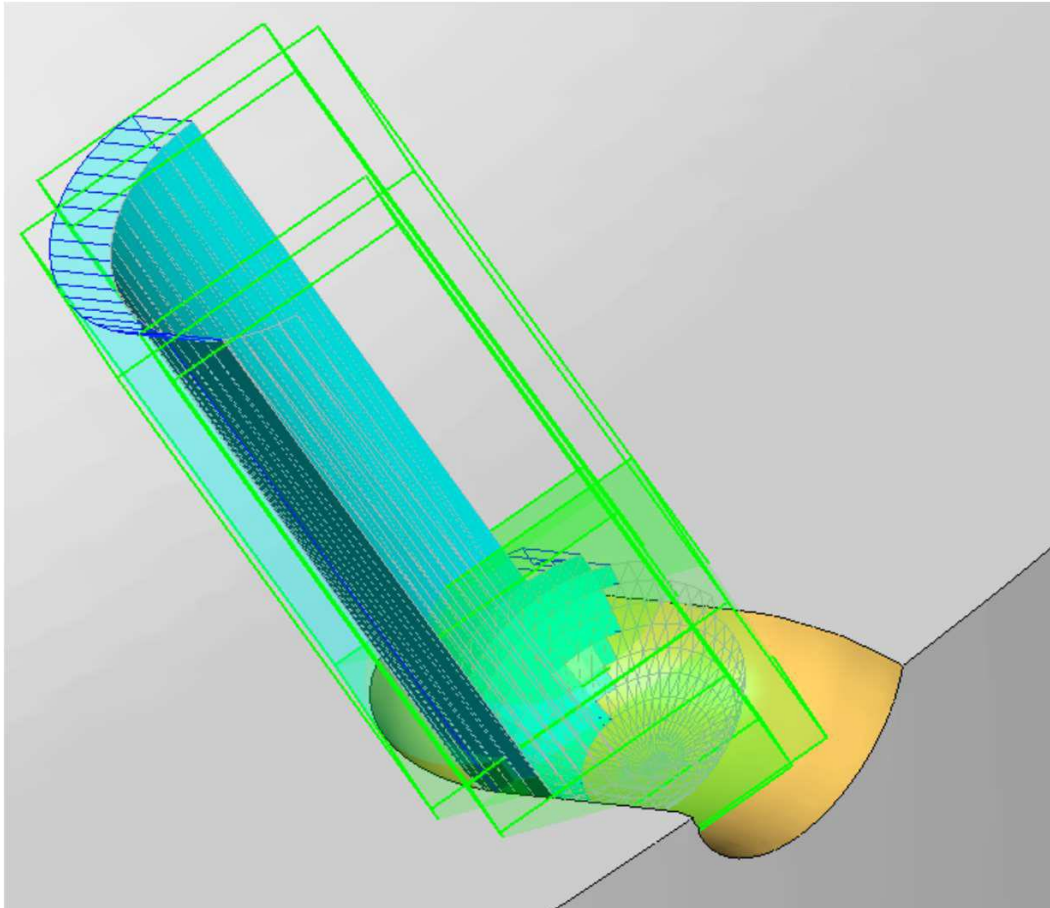


Abbildung 3: Zerlegung der Meshes des Werkzeugs.

Jedes Teilmesh wird mit einer Box überschrieben, welche den Raum repräsentieren, in dem sich die Dreiecke des Teilnetzes bei einer Werkzeugbewegung verschieben können. Anschließend wurde eine konvexe Hülle für die nicht ausgeschlossenen Dreiecke bei Start- und Endpositionen erstellt.

Angrenzende konvexe Hüllen können zusammengeführt werden, um gleichförmigere Hüllen zu bilden (entweder Dreiecke die mit dem Werkzeug verbunden sind oder Dreiecke, die am Start/Ende der Bearbeitung stehen). Daraufhin werden alle Dreiecke der konvexen Hüllen durch Raytracing in drei orthogonalen Ebenen (XYZ) gerastert und in ein Zwischenrohteil überführt (Abbildung 4).

```

// check if triangle sweep hits stock bb
if (geom::Box3IntersectF(triangleSweepBoundingBox, partOverlappingBox).Test())
{
    // ask nail groups and turning field for possible intersection
    const bool isOverlap =
        !workpiece.IsNotOverlapThreadSafe(triangleSweepBoundingBox, mmvFieldInterleaving());
    if (isOverlap)
    {
        Triangle tri;
        ImportTriangle(openMesh, openMesh.face_handle(triangleIdx), tri);
        const Triangle startTri = TransformTriangle(tri, toolTrace.StartFrame);
        const Triangle endTri = TransformTriangle(tri, toolTrace.EndFrame);

        if (DoesSweptTriangleIntersectRevolvedField(workpiece, startTri, endTri, tolerance))
        {
            result.intersectedTriangles[triangleIdx] = true;
            intersect = true;
        }
    }
}
}

```

Abbildung 4: Rasterisierung der Mesh-Dreiecke.

Anschließend werden alle sich überschneidenden Intervalle auf jeder Projektionsebene unter der Bedingung zusammengeführt, dass sich die konvexen Hüllen überschneiden. "Eingang" und "Ausgang" auf den Daxeln werden durch die Normale des Abtastpunkts definiert. Ray-Tracing (d. h. das Tridexel- Modell) und die Analyse erfolgen anhand von Rays (Daxeln). Die Informationen über die überlappenden Regionen werden über eine spezielle Datenstruktur ausgetauscht (Abbildung 5).

```

for (std::size_t i = 0; i < moveParams.toolTrace.m_linearSegments.size(); ++i)
{
    const mmvGeneralLinearToolTrace& toolTrace = moveParams.toolTrace.m_linearSegments[i];

#pragma omp single
    {
        shared.triangleExclusionResult.reset(new TriangleExclusionResult);
        shared.moveStepCount = 0;
    }

    TriangleExclusionResult& exclusionResult = *shared.triangleExclusionResult;
    TriangleExclusionCheck5x(
        workpiece,
        openMesh,
        toolTrace,
        moveParams.operation,
        cache,
        toolTolerance,
        exclusionResult);

#pragma omp barrier // wait for all threads to fill "exclusionResult"

    intersects |= exclusionResult.intersects;

    if (exclusionResult.intersects)
    {
        // PARALLEL: calculate the number of intermediate steps required to fulfill the simulation
        // tolerance
        { ... }
    }

#pragma omp barrier

    // NOT PARALLEL: fill a vector with one frame per intermediate step
#pragma omp single

```

```

#pragma omp single
{
    // PARALLEL: exclude back-sided triangles in parallel
    mwvMeshIntersection::ExcludeBacksided(exclusionResult, shared.moveFrames, openMesh);

    // NOT PARALLEL: write the precomputed values into the queuedMove structure
#pragma omp single
{
    }
}
else
{
#pragma omp barrier // wait for all threads to interpret "exclusionResult.intersects"
}
#pragma omp single
    shared.triangleExclusionResult.reset();
}

```

Abbildung 5: Datenstrukturen des Austauschs.

Die „ThreadSafe“ Variante verwendet einen Mutex, um alle Zugriffe auf die Nägel zu sperren, während sie aktualisiert oder überprüft werden. Dies ist aber sehr aufwändig und es ist deutlich weniger aufwändig, die Gruppen von Nägeln parallel zu initialisieren, ohne sie zu sperren. Mit lokaler Parallelisierung können alle Abschnitte "omp single" und "omp barrier" vermieden werden, da alles standardmäßig "shared" ist (Abbildung 6).

```

void ExcludeBacksided(
    TriangleExclusionResult& exclusionResult,
    const std::vector<Frame>& frames,
    const OpenTriMesh& openMesh)
{
#pragma omp parallel for
    for (int i = 0; i < (int)exclusionResult.intersectedTriangles.size(); ++i)
    {
        if (exclusionResult.intersectedTriangles[i] == false)
            continue;

        Triangle tri;
        ImportTriangle(openMesh, openMesh.face_handle((unsigned)i), tri);

        Triangle startTri = TransformTriangle(tri, frames[0]);

        // Check if each interpolation step is on the back side of the sweep volume. If so, we don't
        // have to simulate the triangle since the volume was already removed.
        bool isBacksided = true;
        for (std::vector<Frame>::const_iterator it = frames.begin() + 1; it != frames.end(); ++it)
        {
            const Triangle endTri = TransformTriangle(tri, *it);
            isBacksided &= mwvMeshIntersection::IsBacksidedSweep(startTri, endTri);
            if (!isBacksided)
                break;
            startTri = endTri;
        }
        exclusionResult.intersectedTriangles[i] = !isBacksided;
    }
}

```

Abbildung 6: Open MP-basierte Implementierung.

Das Arbeitspaket wurde durch den Import der CLS-Dateien des IPT in das ModuleWorks Format finalisiert. Die importierten CLS-Dateien können nun problemlos in ModuleWorks Bearbeitungsschritte übersetzt werden.

Bei der CAM-Planung der Turbinenschaufelbearbeitung kann der bearbeitete Bereich auf eine begrenzte Zone beschränkt werden, die von der Ober- und Unterseite der Schaufel begrenzt wird, wie in Abbildung 7 dargestellt.

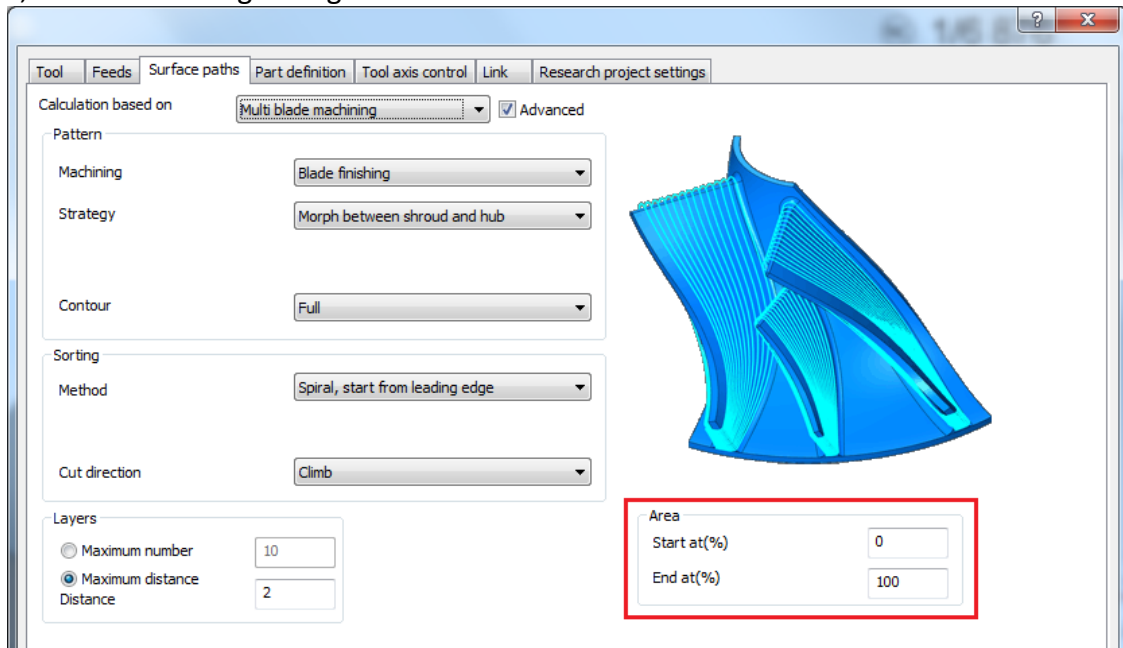


Abbildung 7: Ein Fenster mit GUI-Elementen, die den zu bearbeitenden Bereich der Turbinenschaufel angeben

### AP 3: Entwicklung des »Digital Vibration Twin«

Die Modellierung des digitalen Zwillings setzt die volumetrische Simulation des Materialabtragprozesses heraus. Ergänzend zum Arbeitspaket 2 muss der Werkzeugweg, der aus der CLS-Datei importiert wird von der CAM-Software verarbeitet werden. In der Praxis des Projektes zeigte sich dabei eine Verzerrung zwischen dem Werkzeugweg und den Koordinaten des Werkstücks (Abbildung 8). Aus algorithmischer Sicht muss entweder die Position des Werkzeugweges oder die des Werkstücks bewegt werden, um zu einem der beiden Koordinatensysteme zu passen. Abbildung 9 zeigt einen Mock-Up der CAM-Simulation der Schaufelbearbeitung durch einen Werkzeugweg des Partners TEI.

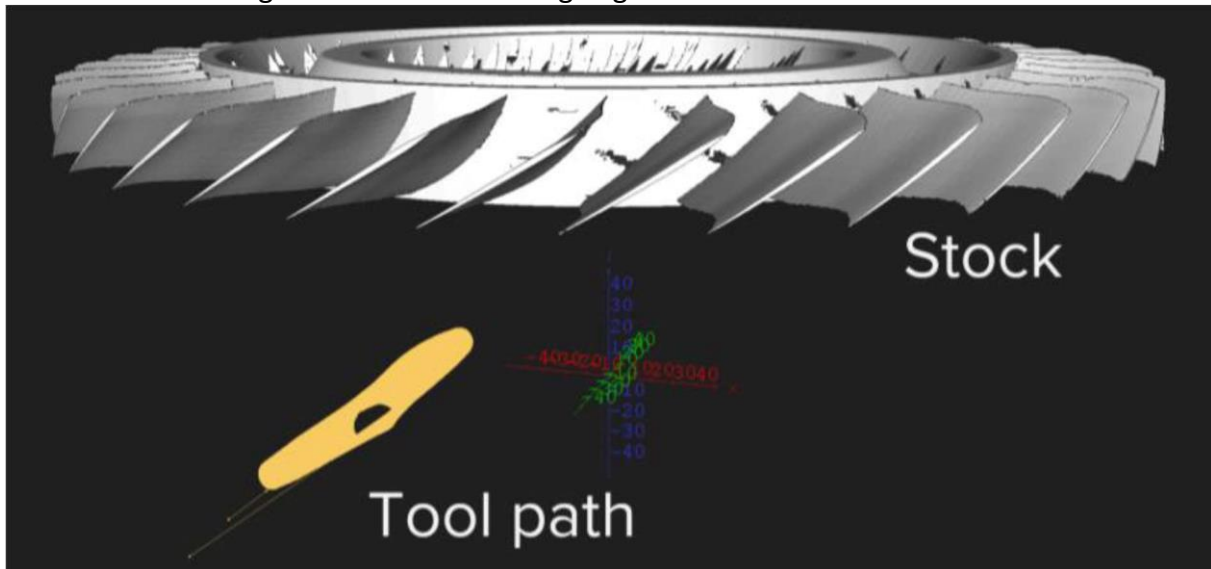


Abbildung 8: Visualisierung des importierten CLS-Werkzeugwegs und dem Design des Bauteils.

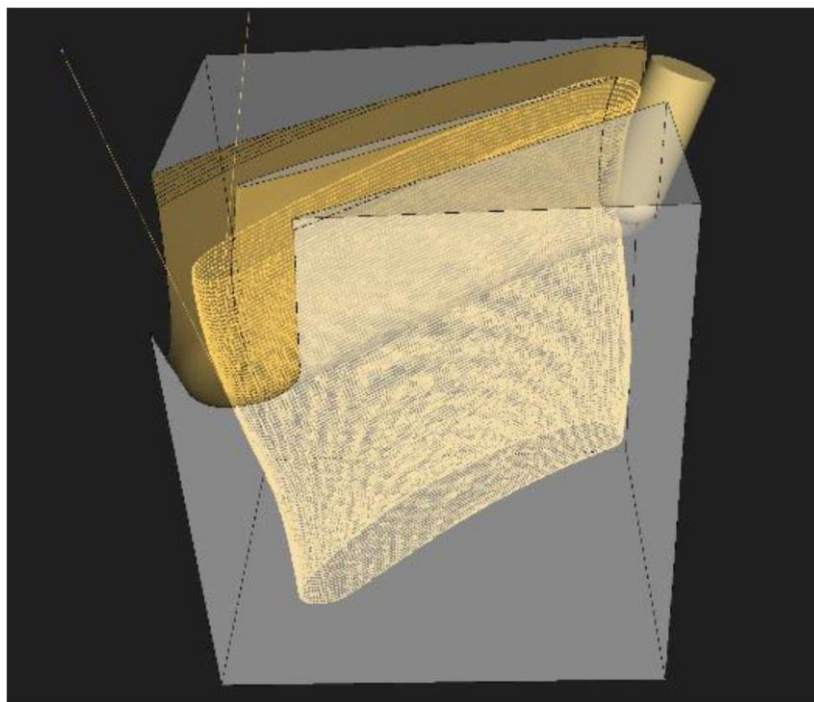


Abbildung 9: CAM-Simulation des Rohmaterials rund um den Werkzeugweg.

Außerdem können die bearbeiteten Flächen auf ihre Eigenschaften hin untersucht werden. Diese Analyse kann auf Grundlage einer digitalen Repräsentation der Simulationsergebnisse durchgeführt werden wie in Abbildung 10 zu sehen.

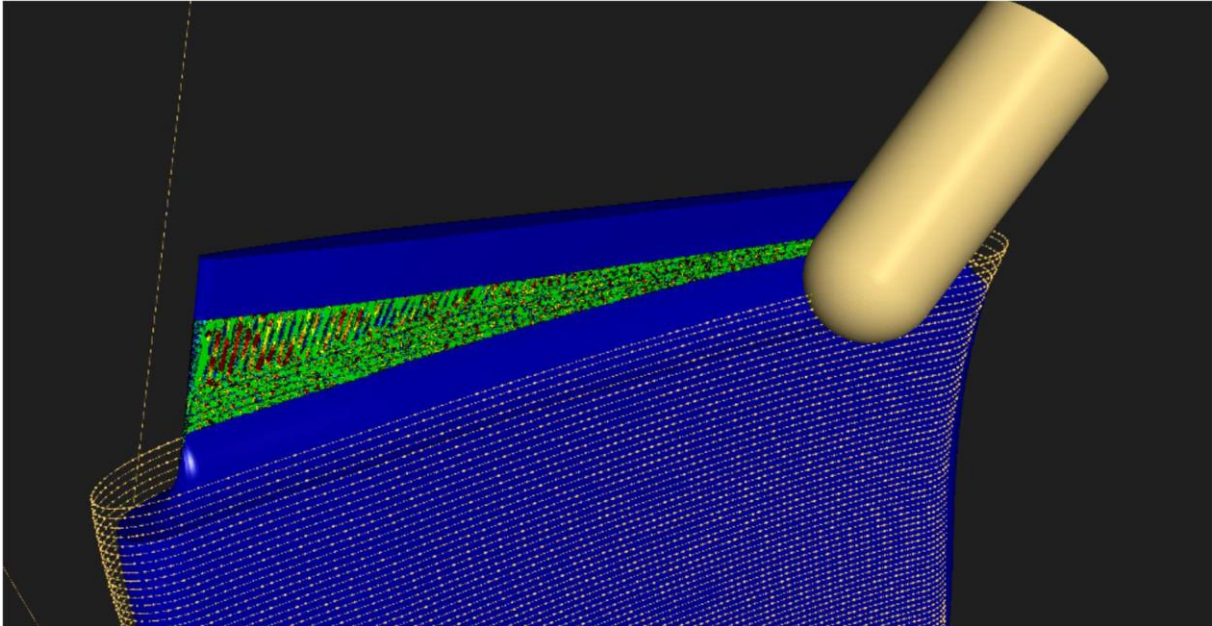


Abbildung 10: Einfärbung auf der Oberfläche mit unterschiedlichen Farben aufgrund von Fehlern bei der Linearisierung des Werkzeugwegs.

## Arbeitspaket 4: Dynamik-Zwillings-Modul

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPT und TEI hat ModuleWorks ein Softwaremodul entwickelt, das die Erstellung von Werkzeugwegen für Fräsbearbeitungen ermöglicht. Dieses Modul ermöglicht Fräsbearbeitungen mit Werkzeugwegen, die eine nicht uniforme Verteilung von Material der bearbeiteten Fläche haben. Der Algorithmus nutzt parametrische Koordinaten, um die Werkzeugposition der Turbinenschaufels zu offsetten. Durch dieses Vorgehen kann das Werkzeug weniger Material am unteren Ende der Turbinenschaufels entfernen, wodurch die Turbinenschaufels dicker und resistenter gegenüber Vibrationen werden. Der Abstand wird als Funktion „variabler Versatz“ programmiert. Er kann auf einer beliebigen Anzahl von Ebenen mit benutzerdefinierten Parametern definiert werden, die entweder manuell in der grafischen Benutzeroberfläche eingegeben oder in einem Textformat importiert/exportiert werden können, wie in Abbildung 11 gezeigt.

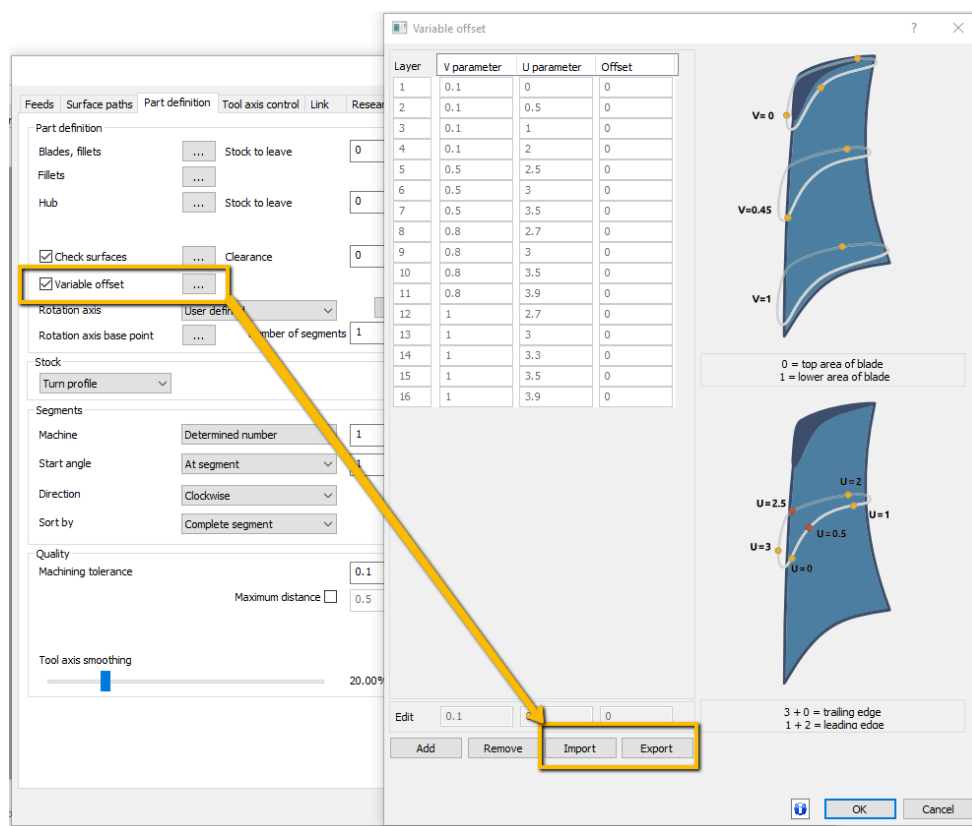


Abbildung 11: Ein Fenster mit GUI-Elementen zur Eingabe mehrerer Stufen des variablen Offsets mit der Möglichkeit, die Parameter des variablen Offsets in einem Textformat zu exportieren und zu importieren.

Nachfolgend werden die algorithmischen Features aufgezählt:

### *Variables Offset*

Dieses Parameter passt den Werkzeugweg auf den Turbinenschaufels entsprechend den Messergebnissen der Koordinatenmessmaschine an, ohne die komplexe 3D-Datei zu ändern. Es ist für das "Blisk-Modul - Schichten von Turbinenschaufels" verfügbar. Die Versatzwerte können in mehreren Punkten eingegeben werden, wobei der U-Parameter und der V-Parameter für jeden Versatz verwendet werden, wie in Abbildung 12 zu sehen.

### *V Parameter*

Das V-Parameter zeigt die Höhe der Turbinenschaufels an bei denen ein bestimmtes Offset angewendet wird. Der Wert 0 entspricht dem oberen Teil der Turbinenschaufels und der Wert 1 entspricht dem unteren Teil der Turbinenschaufels. Der Wert 0.05 entspricht der Mitte. Während des Inputs werden die V Parameter automatisch in aufsteigender Ordnung sortiert.

#### U Parameter

Das U Parameter zeigt den Punkt auf den Turbinenschaufels an, wo ein bestimmtes Offset angewandt wird. Die Werte 3 und 0 zeigen die hinteren Kanten an und die Werte 1 und 2 entsprechen der Vorderkante. Ein Wert von 0,5 entspricht der Mitte des Abschnitts (0,1). Ein Wert von 3,5 entspricht der Mitte des Abschnitts (3,0). Bei der Eingabe werden die U-Parameter automatisch in aufsteigender Reihenfolge für jeden V-Parameter angeordnet. Der Bereich für diesen Parameter ist [0,3.99].

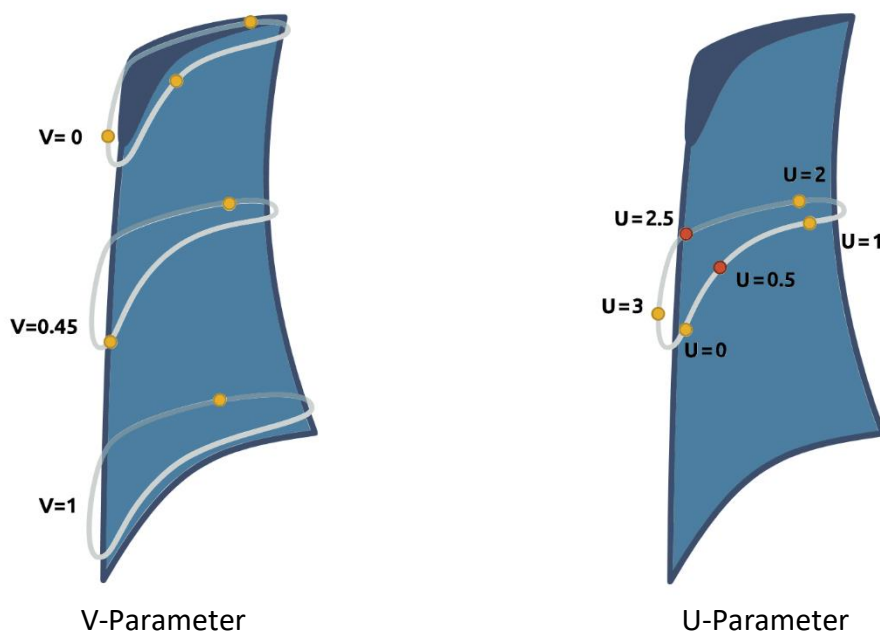


Abbildung 12: UV Space.

#### Offset

Der *Offset* zeigt an jedem Punkt die Unterschiede zwischen dem versetzten Werkzeugweg und dem ursprünglichen (nicht versetzten) Werkzeugweg an. Wenn nur ein Punkt eingegeben wird, wird der gleiche Versatz auf die gesamte Werkzeugbahn angewendet. Wenn mehrere Punkte eingegeben werden, wird eine Interpolation zwischen den Punkten durchgeführt, um eine möglichst glatte Werkzeugbahn zu erhalten. Es sind sowohl positive als auch negative Werte zulässig. Wenn die Werkzeugbahn negative Offset-Werte verwendet, kann es zu Kollisionen kommen. Der Bereich für diesen Parameter ist [-2,2] mm für metrische Einheiten und [-0,0787,0,0787] für imperiale Einheiten. Die Versatzwerte können in Form einer Tabelle angegeben werden, wie in Abbildung 13 gezeigt.

v 0.000  
u 0.000 offset 0.000

v 0.500|  
u 1.000 offset 0.010  
u 1.100 offset 0.020  
u 1.200 offset 0.050  
u 1.300 offset 0.100  
u 1.400 offset 0.050  
u 1.500 offset 0.020

Abbildung 13: Definition des Offsets innerhalb des UV-Parameterraums.

Beispiele für den Variables Offset im Turbinenschaufelbereich sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.

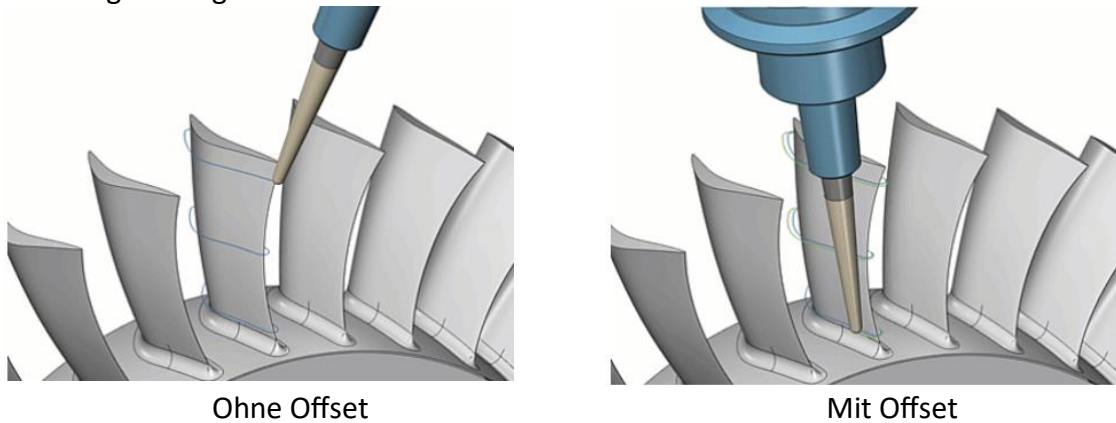


Abbildung 14: Turbinenschaufel Werkzeugbahnen

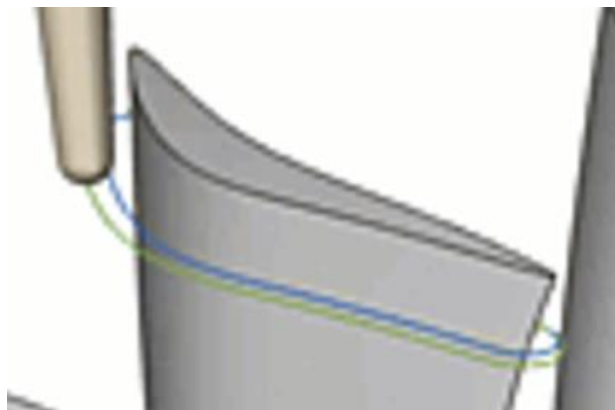


Abbildung 15: Geschlossene Ansicht von „geoffsetet“ (grün) und „nicht geoffsetet“ (blau) Werkzeugbahnen.

Die Anwendung von Signalverarbeitungsmethoden auf Verlobungsdaten und die Visualisierung der Ergebnisse wurden implementiert.

Das erwartete Ergebnis ist die Entscheidung, ob die Anwendung von Filtern und Frequenzbereichstransformation für weitere engagementbezogene Analysen von Nutzen sein könnte.

Es wurde die Plot-Bibliothek ImPlot verwendet, die sich in ImGui integriert. Nachdem ImGui auf die neueste Version aktualisiert wurde, war die Integration der ModuleWorks-Bibliothek mwVerifer.dll erfolgreich.

Die Einspeisung der „Engagement-Resultate“ in ImPlot ergibt einige ansprechende Grafiken, wie in Abbildung 16 gezeigt, die interaktiv gezoomt/verschoben werden können, was allein schon eine wesentliche Hilfe bei der Untersuchung der Daten ist.

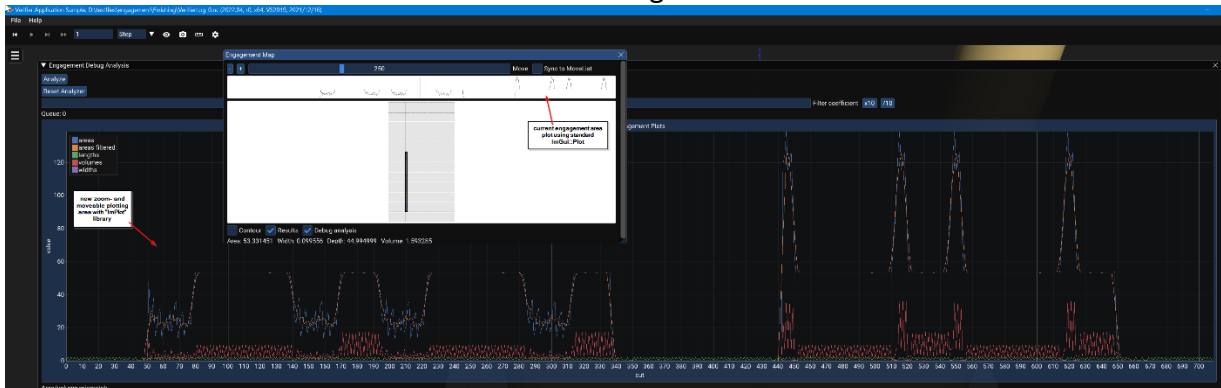


Abbildung 16: Ein Fenster mit den Daten zum Werkzeug-Werkstück-Eingriff Situation.

Ziel ist es, das „Rauschen“ in den Engagement-Ergebnissen zu erkennen bzw. zu beseitigen. Der erste Schritt dazu besteht darin, das „Rauschen“ tatsächlich zu erkennen. Dazu werden die Daten der „Bereiche“ verwendet, da wir bereits über einen Filter für den gleitenden Mittelwert und eine „Unsicherheitsheuristik“ verfügen, um verrauschte Teile dieser Felder zu erkennen, so dass wir schnell feststellen können, ob die DSP-Methoden von Vorteil sind.

Zur Klarstellung: Es gibt ein inhaltliches Problem für alle Methoden, die wir ausprobieren werden, das sich aus der Tatsache ergibt, dass unsere diskreten "Schnitte" sowohl zeitlich als auch räumlich etwas willkürlich sind. Daher ist es nicht möglich, die numerischen Ergebnisse von „Zeitbereich“- und „Frequenzbereich“-Methoden wirklich zu interpretieren.

Es könnte hilfreich sein, Testdaten mit konstanten Zeit- und/oder Längenverläufen zu erstellen - dann könnten die Zahlen tatsächlich eine gewisse Bedeutung erlangen. Derzeit arbeiten wir in einem abstrakten „Graphenraum“, der nur durch die Zahlen in den Plotkurven definiert ist. Die Begriffe „Frequenz“ und „Zeit“ beziehen sich also nur auf den „Graphen“, nicht auf einen tatsächlichen Begriff von Raum oder Zeit.

### IIR-Tiefpassfilter 1. und 2. Ordnung

Einfache rekursive Filter 1. und 2. Ordnung mit unendlicher Impulsantwort (IIR) funktionieren wie erwartet und glätten die Kurve bzw. beseitigen ein gewisses Rauschen. Sie führen aber auch ein typisches „Post-Ringing“-Artefakt ein, d. h. die Kurve sieht „schief“ nach rechts aus, wie in Abbildung 17 gezeigt. Dieser Effekt war stärker als erwartet, und es ist zu vermuten, dass er auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass wir es mit einer sehr niedrigen Abtastrate zu tun haben.



Abbildung 17: Gefilterte Kurven nach Anwendung eines IIR-Filters.

*Nicht kausale phasenlineare Filter (in der Regel FIR)*

Ein phasenlinearer Filter sollte dazu beitragen, den Verzerrungseffekt symmetrisch zu beiden Seiten der „Merkmale“ auf der Kurve „auszugleichen“. Dies wird jedoch in der Regel mit FIR-Filtern (auch bekannt als Faltung) realisiert, die sehr viel komplexer zu implementieren sind, insbesondere die Erzeugung der Filterkerne. Andererseits sind sie viel berechenbarer und stabiler, da sie nur endliche Datenblöcke verarbeiten. Dennoch kann eine „pseudo-unkausale IIR-Filterung“ den Trick bewirken, wie in Abbildung 18 gezeigt: Die Kurve wird symmetrisch in beide Richtungen geglättet.

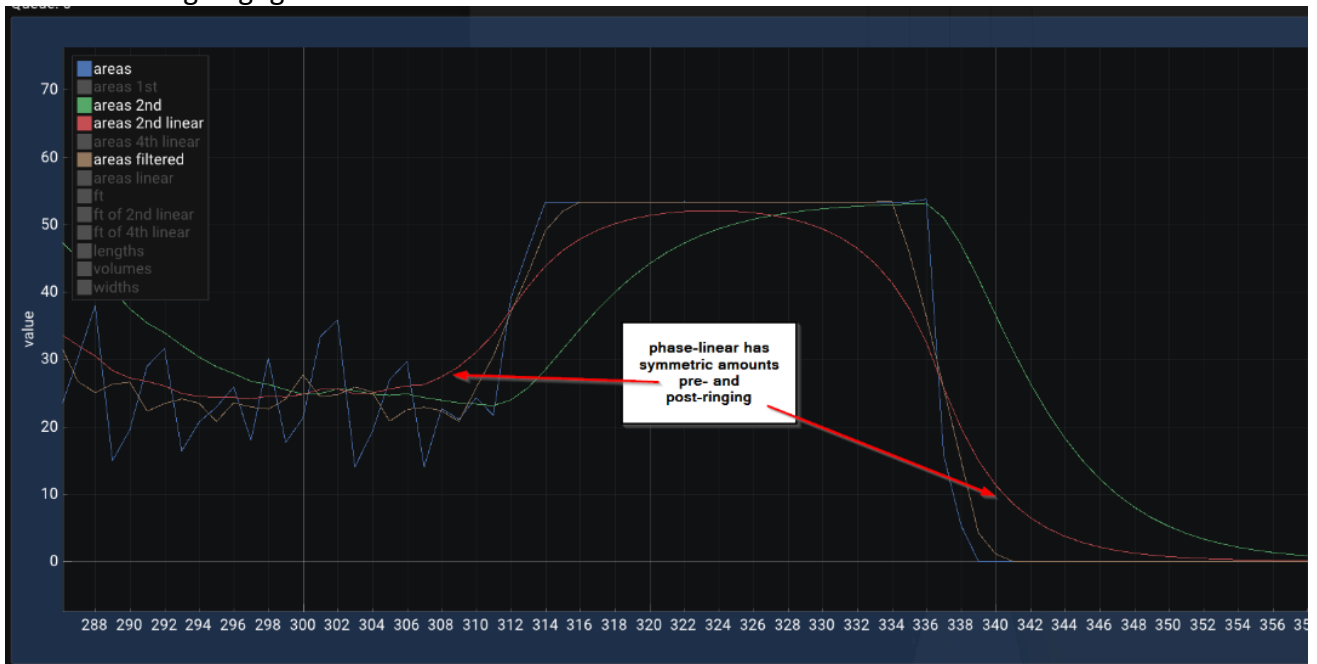


Abbildung 18: Gefilterte Kurven nach Anwendung eines FIR-Filters.

Auch einige „Resonanz“-ähnliche Verhaltensanalysen können verstärkt werden, indem der Filterkoeffizient auf eine positive Zahl geändert wird (obwohl dies keine Resonanzfilter sind), wie in Abbildung 19 gezeigt.



Abbildung 19: Geschlossene Ansicht von versetzten (grün) und nicht versetzten (blau) Werkzeugbahnen.

## AP 5: Erprobung und Optimierung der dynaTWIN-Technologie

In diesem Arbeitspaket konzentrieren sich die Tätigkeiten zunächst auf die Integration der CLS-Dateien, die durch den Partner TEI zur Verfügung gestellt wurden, da es nicht möglich ist, diese ohne weitere Implementierungen durch ModuleWorks in der Software zu laden (Abbildung 20).

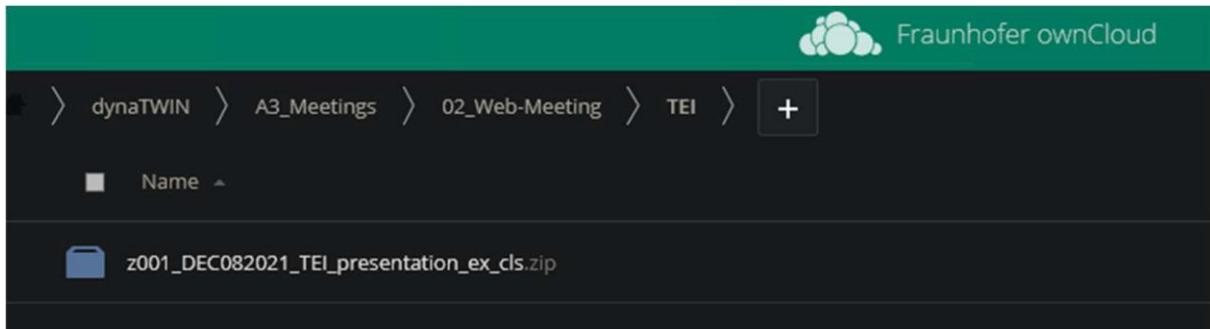


Abbildung 20: Abbildung CLS-Datei des Partners TEI. Die Datei musste daher im Anschluss manuell zu NC-Code übertragen werden (Abbildung 21).

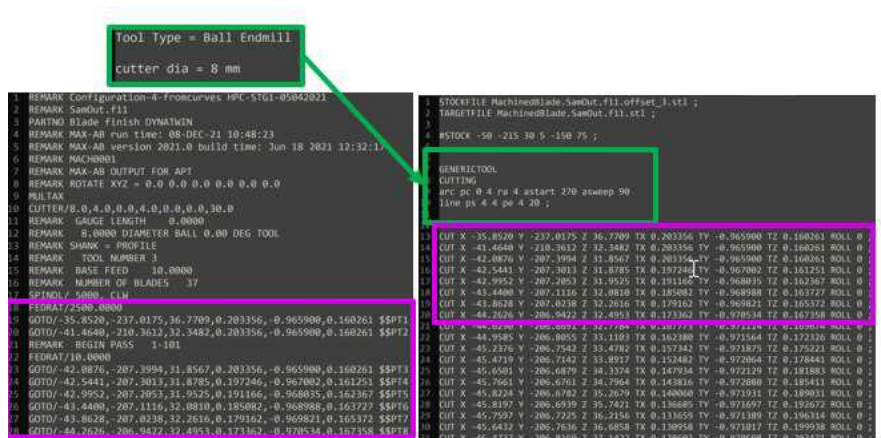


Abbildung 21: Übertragung CLS zu NC.

Zudem wurde die CLS in Grasshopper eingelesen, um das Werkzeug anzuzeigen zu lassen (Abbildung 22).

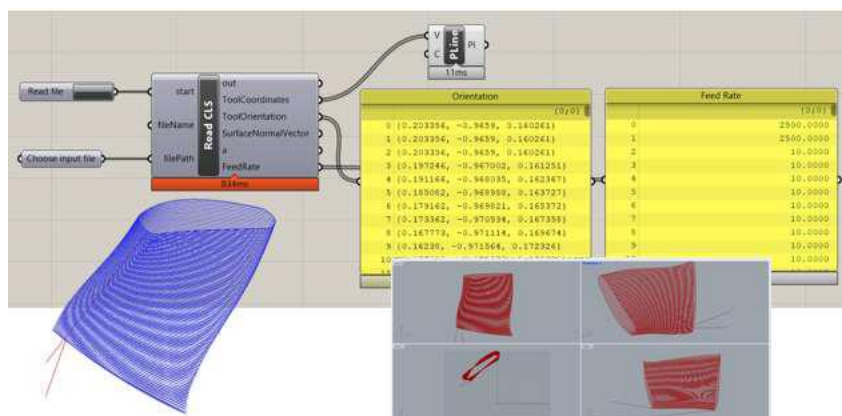


Abbildung 22: Einlesen CLS in Grasshoper.

Auf der Einführung in Grasshopper basierend konnten zudem die Vorschubgeschwindigkeit auf Basis von synthetischen Vorschubraten farblich kodiert werden (Abbildung 23).

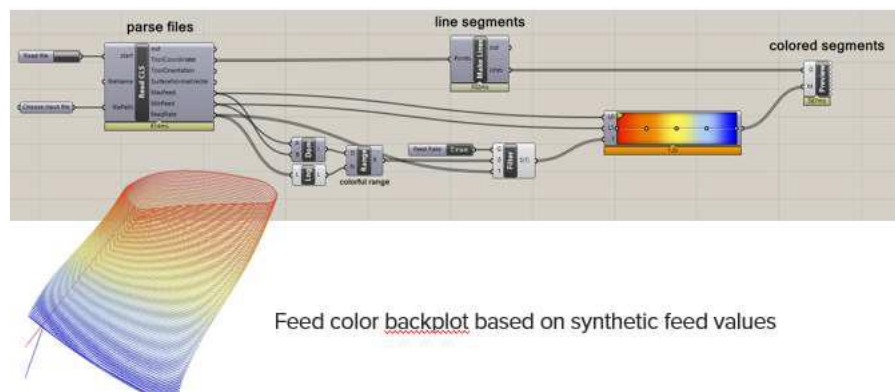


Abbildung 23: Einfärbung der Vorschubraten.

## Arbeitspaket 7: Projektmanagement

ModuleWorks war über das Projekt federführend an der Organisation und Koordination des Projektes beteiligt. Durch regelmäßig stattfindende Videokonferenzen, in denen Absprachen und Überprüfungen des Projektfortschritts stattfanden wird die dem Antrag entsprechende Durchführung sichergestellt.

### **Aussicht**

ModuleWorks ist das weltweitführende Unternehmen in der Bereitstellung von CAD/CAM Komponenten und hat tiefgreifende Erfahrungen in Frästechnologien. Daher kann zur Verwertung der ModuleWorks Kund:innenstamm über die Entwicklung informiert werden und die entwickelte Komponente für den industriellen Transfer finalisiert werden. Mit der Finalisierung ist der Vertrieb auf fachrelevanten Messen und in Kundschaftsgesprächen möglich.

### **Notwendigkeit der Arbeit**

Bisher gibt es keine vergleichbare Softwarekomponente, die die hochproduktiven Triebwerksherstellung erlaubt. Um die nun entstandene Komponente zu entwickeln, brauchte es mehrere Partner:innen, die ihr Wissen austauschen und gemeinsam weiterentwickeln. Durch diesen Austausch ist ein Wissenszuwachs sowie eine bisher nicht dagewesene Simulations- und Softwaretechnik entstanden.

### **Voraussichtlicher Nutzen**

Der voraussichtliche Nutzen der Komponente bzw. des gesamten Prozessmodells besteht in der Optimierung durch tatsächlich gemessene Schwingungsdaten und deren Berücksichtigung in Simulationsungenauigkeiten. Dieser technische Vorteil kann von Seiten ModuleWorks zum Vertrieb genutzt werden und von Seiten des IPT zur wissenschaftlichen Weiterentwicklung.

### **Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit**

Zur Information über das Projekt wurde ein Informationstext auf der ModuleWorks Seite hochgeladen: <https://www.moduleworks.com/de/dynatwin/>. Über den Text wurde außerdem mit einem LinkedIn Post informiert.