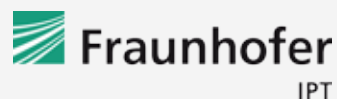




# ***Erfolgreich CAX-Prozessketten Gestalten*** **im Werkzeugbau**

2018

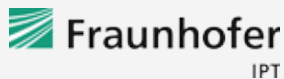
Wolfgang Boos  
Kristian Arntz  
Marcel Prümmer  
Moritz Wollbrink  
Rainer Horstkotte  
Mario Pothén  
Vincent Gerretz





## WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH

Die WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH erarbeitet in einem Netzwerk aus führenden Unternehmen des Werkzeugbaus branchenspezifische Lösungen für die nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit der Branche Werkzeugbau. Im Mittelpunkt der Aktivitäten stehen die Schwerpunkte Industrieberatung, Weiterbildung sowie Forschung und Entwicklung. Durch einen eigenen Demonstrationswerkzeugbau hat die WBA die Möglichkeit, innovative Lösungsansätze in einer Laborumgebung zu pilotieren und schnell für ihre Partnerunternehmen zugänglich zu machen. Zusätzlich werden Schwerpunktthemen in aktuellen Studien vertieft. Diese geben Auskunft über Trends und Entwicklungen von Markt und Wettbewerb.



## Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Aufgabe des Fraunhofer IPT ist die Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse in wirtschaftlich nutzbare, einzigartige Innovationen auf dem Gebiet der Produktion. Das Fraunhofer IPT fördert und betreibt anwendungsorientierte Forschung, Umsetzung von Forschungsergebnissen und Beratung mit Relevanz und Wirkung zum unmittelbaren Nutzen für die Industrie und leistet dadurch einen signifikanten Beitrag zu deren Wettbewerbsfähigkeit. Das Geschäftsfeld »Werkzeugbau« des Fraunhofer IPT bietet Unternehmen, Zulieferern und Kunden des Werkzeug- und Formenbaus ganzheitliche Lösungen, damit diese die vielfältigen Herausforderungen ihrer Branche erfolgreich bewältigen.

## Impressum

Erfolgreich CAX-Prozessketten Gestalten im Werkzeugbau  
Studie Fraunhofer IPT

Copyright © 2018

Autoren: Prof. Wolfgang Boos, Dr. Kristian Arntz, Marcel Prümmer, Moritz Wollbrink, Rainer Horstkotte, Mario Pothen, Vincent Gerretz

Gestaltung: Simona Neacsu

ISBN: 978-3-946612-31-5  
Druck: printclub, 1. Edition

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT  
Steinbachstraße 17  
D-52074 Aachen

[www.ipt.fraunhofer.de](http://www.ipt.fraunhofer.de)

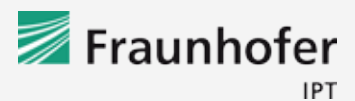
WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH  
Campus-Boulevard 30  
D- 52074 Aachen

[www.werkzeugbau-akademie.de](http://www.werkzeugbau-akademie.de)

# ***Erfolgreich CAx-Prozessketten Gestalten*** **im Werkzeugbau**

2018

Wolfgang Boos  
Kristian Arntz  
Marcel Prümmer  
Moritz Wollbrink  
Rainer Horstkotte  
Mario Pothen  
Vincent Gerretz



## Spotlight

Die Anforderungen, die heutzutage an die Branche „Werkzeug- und Formenbau“ gestellt werden, sind zahlreich. Neben der kontinuierlichen Entwicklung der Fertigungstechnologien fordern die Kunden zunehmend eine höhere Flexibilität und eine Verkürzung der Durchlaufzeiten. Der Prozess der Werkzeugherstellung ist indes komplex und erfordert eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse. Der Einsatz von CAx-Systemen entlang des Auftragsabwicklungsprozesses ermöglicht die computergestützte Planung und Durchführung der einzelnen Prozesse. Jedoch besteht bei vielen Werkzeugbaubetrieben Handlungsbedarf hinsichtlich der Gestaltung einer durchgehenden digitalen Prozesskette und bei der Anwendung neuer Funktionalitäten der CAx-Systeme.

Die Studie „Erfolgreich CAx-Prozessketten gestalten im Werkzeugbau“ gibt einen Einblick in den Status quo der CAx-Systemlandschaft im deutschsprachigen Werkzeugbau. Verschiedene Stationen der CAx-Prozesskette werden im Detail betrachtet. Darüber hinaus werden Best-Practice-Beispiele gegeben und einzelne Systeme der NC-Simulation vorgestellt. Schließlich werden aktuelle Herausforderungen beschrieben und durch einen Ausblick komplettiert.



47 %

ist der Zeitanteil  
des meistgenutzten  
CAD-Systems  
**CATIA**

43 %

der befragten Werk-  
zeugbaubetriebe nutzen  
Prozess-  
simulationen

~ 2/3

aller befragten Werkzeug-  
baubetriebe nutzen  
Steuerungen von  
**Heiden-  
hain**

22 %

ist der Zeitanteil  
des meistgenutzten  
CAM-Systems  
**Tebis**





## Executive Summary

Mit einer durchgängigen CAX-Prozesskette ist es Werkzeugbaubetrieben möglich, die vielfältigen Kundenanforderungen zu erfüllen und die Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu erhalten

---

Der deutsche Werkzeugbau ist einer Vielzahl an Herausforderungen ausgesetzt. Im Rahmen der Globalisierung treten neue Wettbewerber aus außereuropäischen Ländern auf, die mit signifikant niedrigeren Lohn- und Maschinenstundensätzen Werkzeuge herstellen. Des Weiteren werden von den Kunden zunehmend kürzere Durchlaufzeiten gefordert, um die abnehmenden Lebenszyklusdauern der Produkte zu realisieren. Der moderne Werkzeugbau muss dabei in der Lage sein, aktuelle Technologietrends in die eigene Prozesskette integrieren zu können, um langfristig erfolgreich am Markt agieren zu können. Mit einer effizient gestalteten CAX-Prozesskette kann den Herausforderungen begegnet werden.

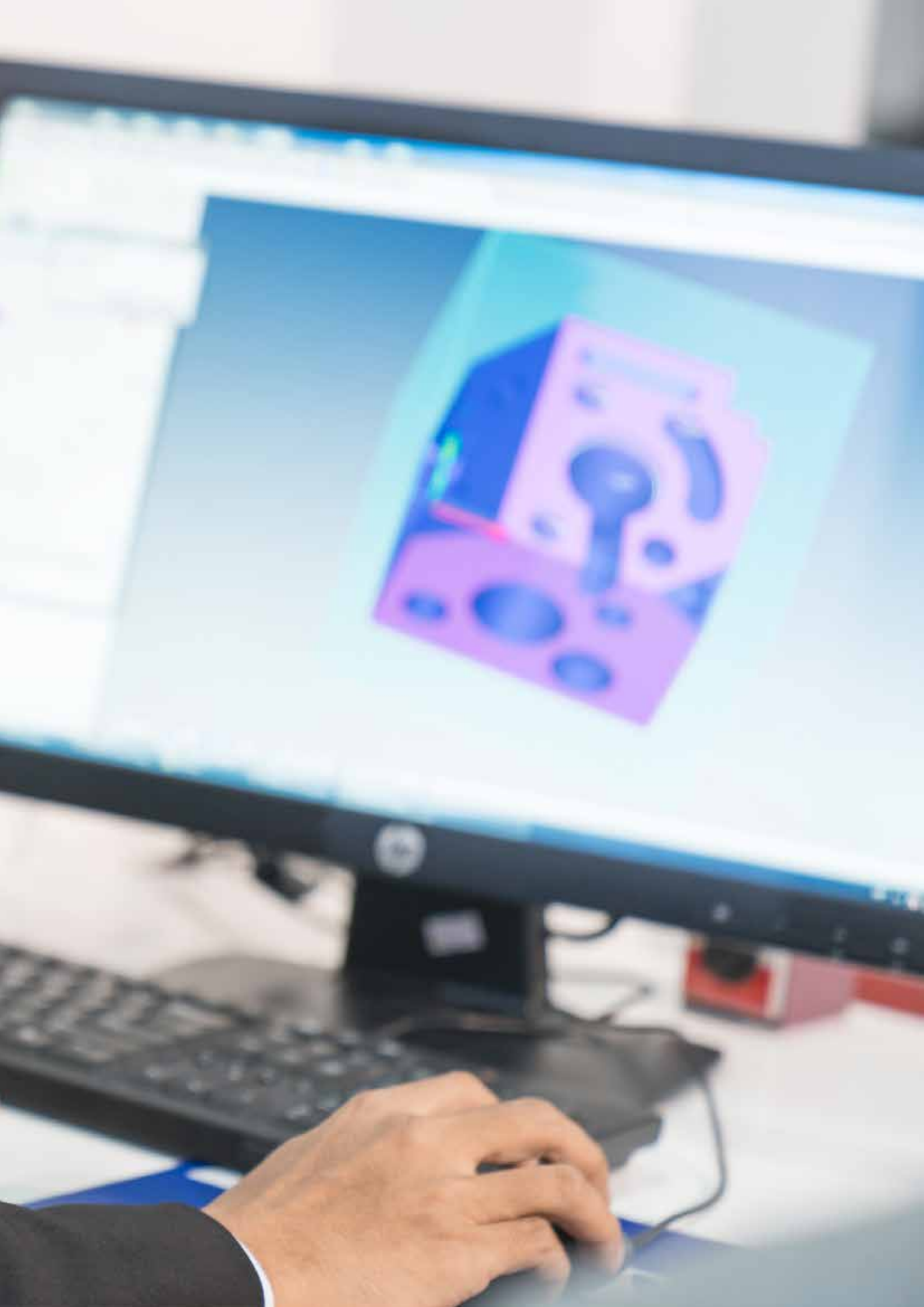
Die Herstellung komplexer Werkzeuge erfordert eine Vielzahl unterschiedlicher Fertigungsprozesse wie die spanende Bearbeitung, die Funkenerosion oder die Lasermaterialbearbeitung. Für jeden Prozess ist eine aufwendige Planung, zum Beispiel zur Realisierung einer simultanen 5-Achs-Bearbeitung, notwendig. Der Einsatz von CAX-Systemen unterstützt computerbasiert die Planung und Durchführung der Fertigungsprozesse. Mit fortschreitender Digitalisierung der Fertigung in den vergangenen Dekaden haben sich in Werkzeugbaubetrieben digitale Prozessketten entwickelt, die häufig Potentiale zur Optimierung bieten.

Die Studie „Erfolgreich CAX-Prozessketten gestalten im Werkzeugbau“ thematisiert die ganzheitliche CAX-Prozesskette und beschreibt einzelne Stationen entlang des Auftragsabwicklungsprozesses detailliert. Beginnend bei der Konstruktion werden Eigenschaften heutiger und zukünftiger CAD-Systeme beschrieben sowie auf die derzeitige Verwendung im deutschen Werkzeugbau eingegangen. Die Betrachtung der verwendeten Dateiformate zeigt beispielsweise, dass derzeit kein priorisiertes Dateiformat existiert.

Aus der Analyse des Systemeinsatzes bei der Anwendung von Simulationssystemen resultiert, dass bei den deutschsprachigen Werkzeugbaubetrieben hinsichtlich der Werkzeug- und Prozesssimulation Handlungsbedarf besteht. Zudem wird in einem Best-Practice-Beispiel aus der additiven Fertigung das Potential der Computational Fluid Dynamics-Simulation veranschaulicht.

CAM-Systeme sind fester Bestandteil jeder CAX-Prozesskette und werden deshalb im Rahmen der Studie technologiespezifisch betrachtet, sodass Besonderheiten spanender Bearbeitung und abtragender sowie additiver Fertigungsverfahren beschrieben werden. Während bei der spanenden Bearbeitung die Identifizierung von Features im Fokus steht, ist bei der Funkenerosion die Konfiguration der Parameter hinsichtlich Qualität, Verschleiß und Prozessgeschwindigkeit von größerer Relevanz.

Ein weiterer Bestandteil der CAX-Prozesskette ist die NC-Simulation. Neben einem Einblick in die im Werkzeugbau verwendeten Steuerungen werden in der Studie zwei Systeme im Detail vorgestellt: NCProfiler und SimCutPro. Der NCProfiler ermöglicht die Identifizierung von kritischen Bereichen des Werkzeugwegs und deren Verbesserung mit programmeigenen Optimierungsfunktionen. SimCutPro berücksichtigt technologische Aspekte bei der CAM-Planung. Für jeden Schneidereingriff auf der NC-Bahn wird die mikrogeometrische Durchdringung von Fräswerkzeug und Bauteil berechnet. Hiermit ist die Ermittlung von resultierenden Kräften sowie eine Abschätzung von Werkzeugverschleiß und kritischen Maschinenzuständen möglich. Abschließend werden aktuelle Herausforderungen und Optimierungspotentiale für die CAX-Prozesskette zusammengetragen sowie eine Prognose zukünftiger Entwicklungen im Bereich des Werkzeug- und Formenbaus gegeben.





# Studiendesign

Datengrundlage dieser Studie ist einerseits eine Befragung zur CAX-Prozesskette unter führenden Werkzeugbaubetrieben und andererseits der Wettbewerb „Excellence in Production“

Die WBA Aachener Werkzeugbau Akademie (GmbH) dient als zentraler Ansprechpartner für Werkzeugbaubetriebe in den Geschäftsfeldern Industrieberatung, Weiterbildung und Forschung. In Kooperation mit dem Lehrstuhl für Produktionssystematik des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen Universität und dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT wurde in den letzten Jahren eine umfangreiche Datenbank mit mehr als 1.000 Benchmarkingdatensätzen deutscher und internationaler Werkzeugbaubetriebe aufgebaut. Den Betrieben wird damit die Möglichkeit geboten eine technologische und organisatorische Bewertung der eigenen Leistungsfähigkeit im Vergleich zum Wettbewerb durchführen zu lassen.

Die Studie „Erfolgreich CAX-Prozessketten gestalten im Werkzeugbau“ wurde von der Gruppe Technologieorganisation des Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT durchgeführt. Ziel ist ein Überblick über den derzeitigen Status quo der CAX-Prozesskette im Werkzeugbau zu geben und Optimierungspotentiale aufzuzeigen.

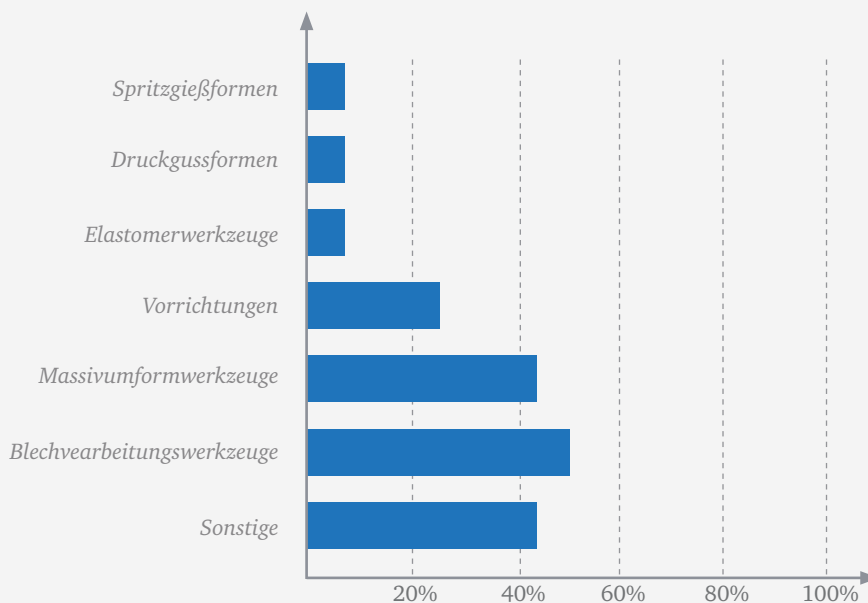
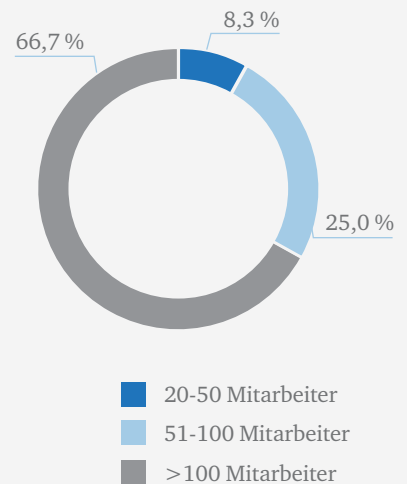
## Umfrage unter Werkzeugbetrieben

Grundlage der Studie ist eine Umfrage unter zwölf führenden Werkzeugbaubetrieben, die zu den eingesetzten CAX-Systemen und zu den Anforderungen an die CAX-Prozesskette befragt wurden. Die hergestellten Werkzeuge der befragten Unternehmen sind heterogen verteilt, wobei mit 51 % ein Fokus auf Blechverarbeitungswerkzeuge festzustellen ist. Der Marktzugang der befragten Werkzeugbaubetriebe ist zu 45 % extern und zu 55 % intern. Die Unternehmensgröße ist bei 67 % der befragten Unternehmen größer als 100 Mitarbeiter.

## „Excellence in Production“

Weitere Datengrundlage ist der Wettbewerb „Excellence in Production“, bei dem sich jährlich mehr als 300 deutschsprachige Werkzeugbaubetriebe beteiligen, mit der Chance als „Werkzeugbau des Jahres“ gekürt zu werden. Neben technologischen und organisatorischen Aspekten bezieht sich der zu beantwortende Fragebogen auf den gesamten Auftragsabwicklungsprozess. Hierdurch ist eine Ableitung von Erkenntnissen bezüglich der CAX-Prozesskette möglich.

Wie viele Mitarbeiter hat Ihr Werkzeugbau?



**In welcher Branche ist Ihr Unternehmen hauptsächlich tätig?**  
[Mehrfachnennungen möglich]

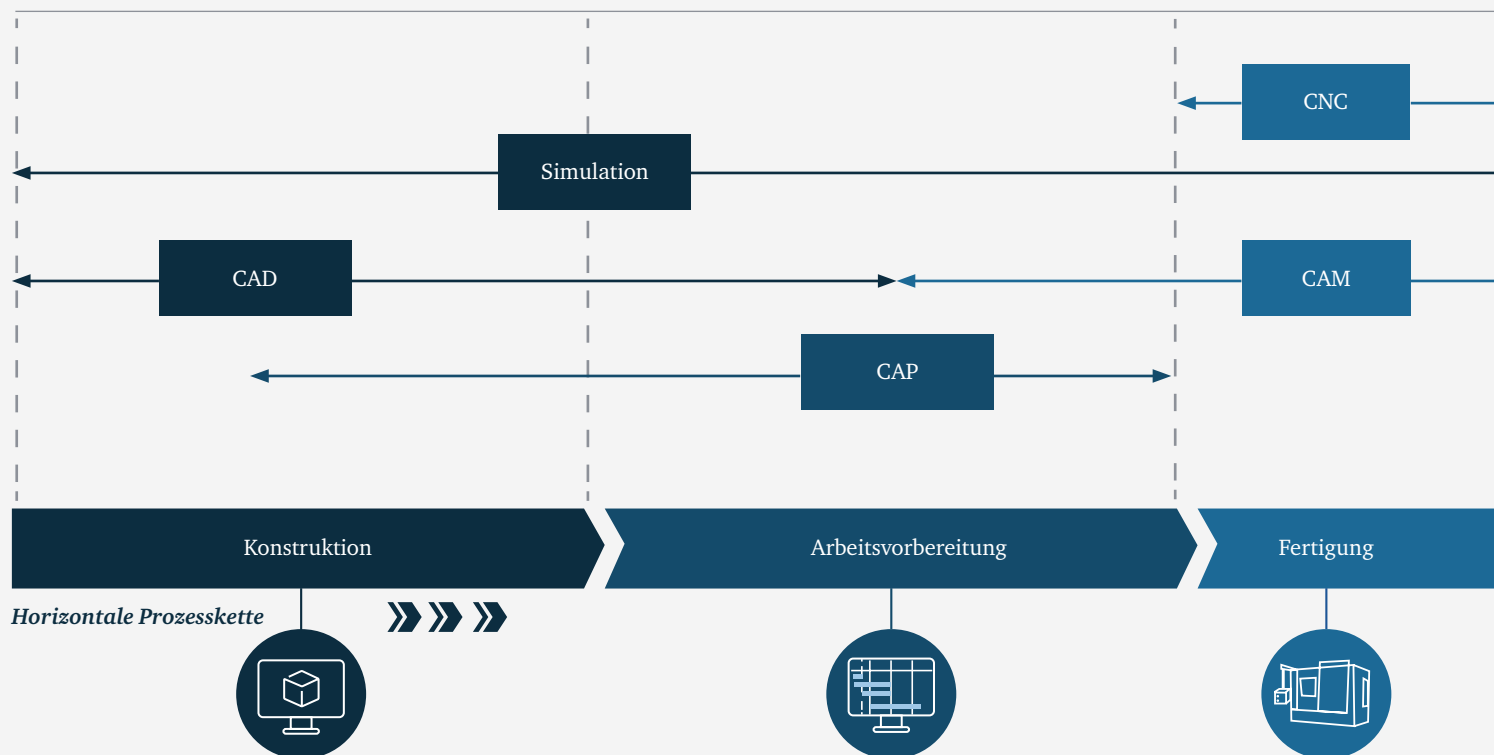
## CAX-Prozessketten gestalten – Status quo

Die CAX-Prozesskette ist eine Vernetzung verschiedener Systeme entlang des Auftragabwicklungsprozesses mit unterschiedlichen Schnittstellen

Unabhängig vom Produkt „Werkzeug“ – ob Spritzgießform, Umformwerkzeug oder Gusskokille – besteht die horizontale Prozesskette jeder Werkzeugherstellung aus den Funktionen Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung, Montage und Qualitätssicherung. Horizontale Prozesskette bedeutet dabei, dass Prozessschritte zeitlich und organisatorisch aufeinander folgen. Die horizontale Prozesskette beschreibt also das Zusammenwirken unterschiedlicher Abteilungen, Technologien und Bearbeitungsschritte. Im Gegensatz dazu beschreibt die vertikale Prozesskette die Zuarbeit für eine spezifische Technologie oder einen Arbeitsschritt. Die „Funktionen“ entlang der horizontalen Prozesskette sind in der Regel mit Abteilungen gleichzusetzen.

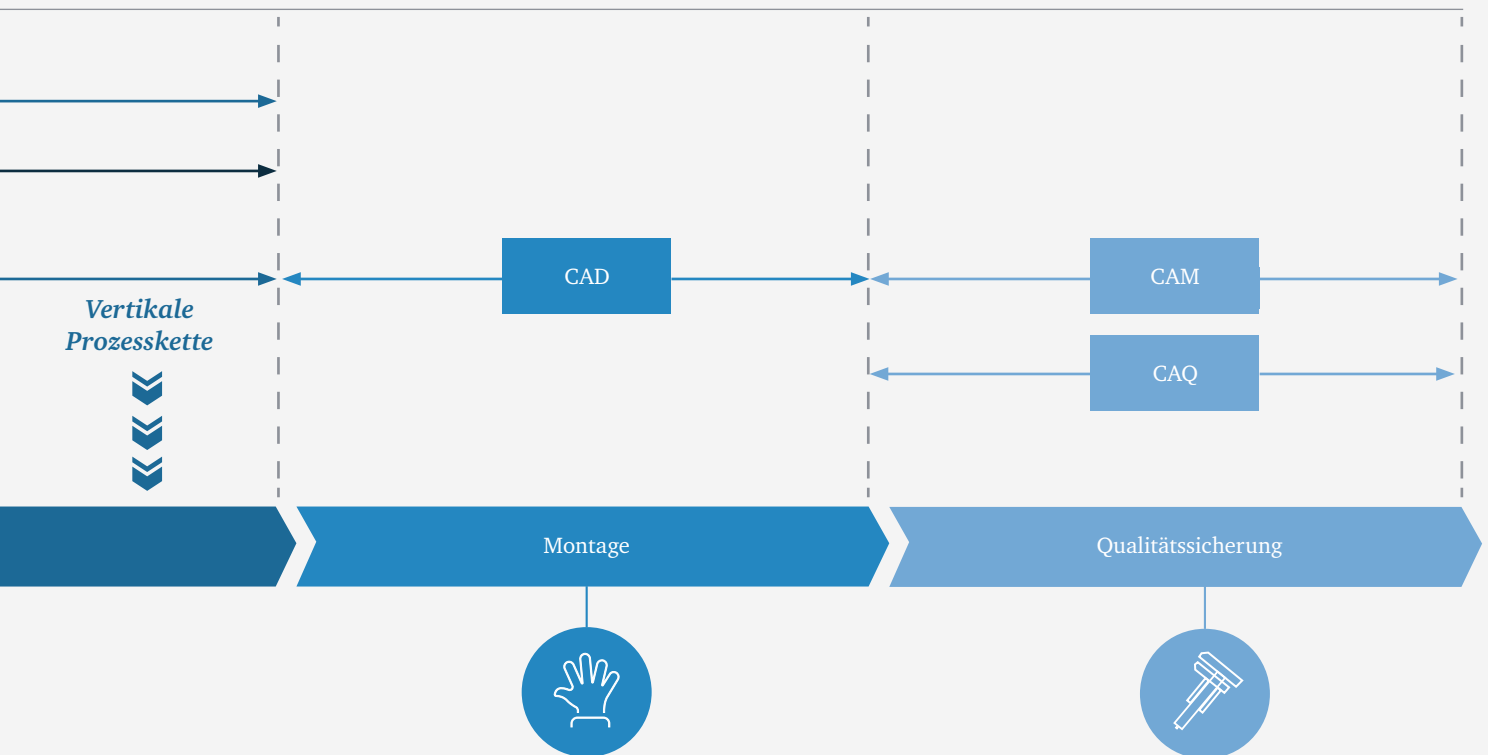
Ein Zusammenwirken von Prozessschritten erfordert die Vernetzung der verschiedenen Funktionen, respektive Abteilungen. Die Vernetzung wird durch Computer-Aided-„Everything“-Systeme (CAX) umgesetzt, also sich stetig entwickelnde, computergestützte Softwarelösungen. Die Vorteile, die durch die Nutzung von CAX entstehen, sind unter anderem die stärkere Integration von getrennten Bereichen eines Unternehmens sowie ein durchgängiger Datenfluss zwischen eben diesen Bereichen.

Zu den CAX-Systemen zählen in der Entwicklung und Konstruktion das Computer-Aided-Design (CAD) und mit zunehmender Bedeutung die computergestützte Simulation von Serienbauteilen und Werkzeugen oder



deren Komponenten. Die Arbeitsvorbereitung nutzt CAD und Simulationsergebnisse als Eingangsinformationen, wird in ihrer Kernaufgabe durch Computer-Aided-Planning (CAP) unterstützt und liefert erste Programme (Computer-Aided-Manufacturing, CAM) an die Fertigung. Diese arbeitet weiterhin in CAM-Software. Zur Erstellung von sicheren CNC-Programmen werden auch hier Simulationen eingesetzt. In der Montage kommt erneut CAD zum Einsatz, mit besonderer Bedeutung von Montage- und Zusammenbauzeichnungen. Die prozessbegleitende und abschließende Qualitätssicherung nutzt CAM zur Programmierung von Messmaschinen. Weitere Qualitätssicherungssoftware kann unter dem Begriff Computer-Aided-Quality (CAQ) zusammengefasst werden.

Die Auflistung der verschiedenen Funktionen und der eingesetzten CAX-Systeme zeigt unmittelbar, dass die angestrebte Vernetzung aufgrund der Vielfalt mit Hürden versehen ist. So werden in Werkzeugbaubetrieben CAD-Dateien in unterschiedlichen nativen Datenformaten gespeichert, für die Verwendung in der Simulation werden diese in Austauschformate wie STEP oder IGES konvertiert und an der Maschinensteuerung müssen die NC-Daten einmal mit Siemens, ein anderes Mal mit Heidenhain kompatibel sein. Immerhin: Beim externen Datenaustausch geben über 80% der Betriebe an, STEP-Dateien zu verwenden. Standardisierung ist also möglich.





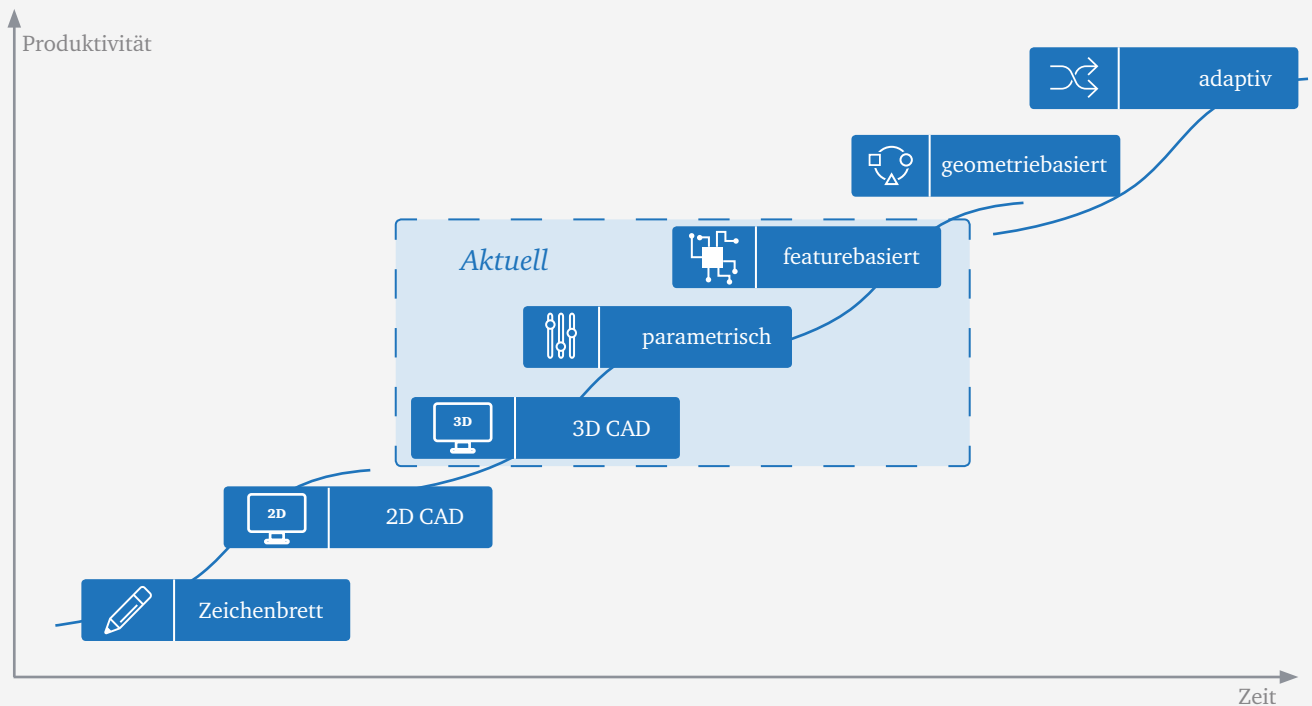
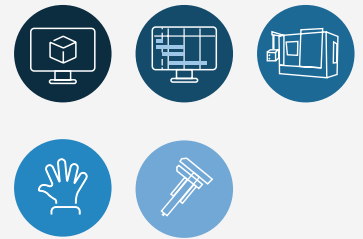
# Stationen entlang der CAX-Prozesskette-CAD

CAD-Systeme werden kontinuierlich weiterentwickelt, jedoch besteht bei den befragten Werkzeugbaubetrieben hinsichtlich der Nutzung aktueller Funktionen Handlungsbedarf

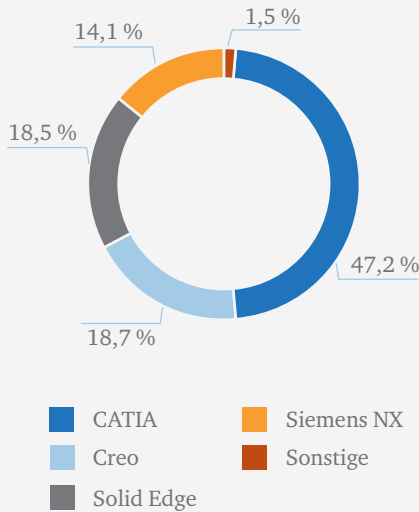
Beginn der digitalen Prozesskette im Werkzeugbau ist die Konstruktion. Entsprechend der Kundenanforderungen werden die Werkzeuge mit CAD-Systemen konstruiert. Eine Betrachtung der zeitlichen Nutzung der eingesetzten Systeme zeigt, dass eine kontinuierliche Entwicklung zugunsten einer gestiegenen Produktivität stattgefunden hat. Diese wird sich in Zukunft fortsetzen. Mit der Einführung von 2D-CAD-Systemen wurde der Grundstein für die heutige digitale Prozesskette und Systemlandschaft gelegt. Während händische Zeichnungen vom Zeichenbrett Ungenauigkeiten, schlechte Reproduzierbarkeit und einen großen Aufwand im Fall von Änderungen aufwiesen, führte die Einführung von 2D-CAD-Systemen zu einer ganzheitlichen Verbesserung in den Prozessabläufen der Konstruktion. Mit zunehmender Rechenleistung der Computersysteme wurden die 2D-CAD-Systeme um eine 3D-Funktionskomponente erweitert.

Gegenwärtige Entwicklungen bei CAD-Systemen zeigen die zunehmende Verwendung parametrischer Konstruktionen. Die Definition von Positions- und Führungsparametern ermöglicht die Anpassung von Geometrieelementen. Eine vollständige Definition des Modells ist schließlich mit geometrischen Beziehungen (bspw. coaxialen Relationen) gegeben.

Hinsichtlich der fortschreitenden Automatisierung ist durch die Identifikation bestimmter Merkmale, hinterlegten Standards und Normen, ein teilautomatisierter Konstruktionsprozess realisierbar. Bei der Entwicklung von CAD-Systemen werden kontinuierlich zusätzliche Features implementiert, sodass zukünftig eine geometriebasierte Konstruktion prognostiziert wird. Die Umsetzung einer adaptiven Konstruktion, in der mit Algorithmen eine automatische Ableitung der Konstruktion erfolgt, ist derzeit jedoch noch nicht absehbar.



Wie hoch ist der prozentuale  
Zeitanteil der Nutzung  
des jeweiligen Systems?



### Eingesetzte Systeme

Die Branche „Werkzeugbau“ ist durch verschiedene Werkzeugtypen mit jeweils spezifischen Eigenschaften gekennzeichnet. Spritzgießformen haben komplexe und filigrane Abformflächen in Form von Kavitäten, während Blechverarbeitungswerkzeuge großflächige Konturen aufweisen. Bei der Konstruktion der Werkzeuge sind somit unterschiedliche Anforderungen zu berücksichtigen. Am Markt verfügbare CAD-Systeme bieten verschiedene Funktionalitäten, sodass in Abhängigkeit des Werkzeugspektrums und anderen CAX-Systemen im Unternehmen ein CAD-System ausgewählt werden sollte. Die Befragung der Werkzeugbaubetriebe zeigt, dass gegenwärtig verschiedene CAD-Systeme eingesetzt werden. Siemens NX ist mit 58 % am häufigsten implementierte CAD-System, gefolgt von Catia (50 %) und Creo (42 %). Hinsichtlich der zeitlichen Nutzung ist CATIA mit 47,2 % das meistgenutzte System. Siemens NX dagegen weist mit einem zeitlichen Nutzungsanteil von 14,1 % einen relativ geringen Anteil auf. Begründen lässt sich dies mit dem historisch bedingten Einsatz von CATIA im Werkzeug- und Formenbau. Der Einsatz mehrerer CAD-Systeme ist hinsichtlich vertrieblicher Aspekte sinnvoll, um Kunden eine zusätzliche Datenschnittstelle offerieren zu können. Die Verteilung des Systemeinsatzes unterliegt dabei einem kontinuierlichem Wandel und wird von den Entwicklungsbestrebungen der Softwarehersteller maßgeblich beeinflusst.

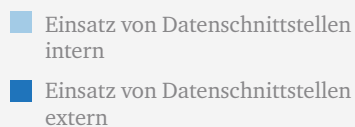
### Eingesetzte Dateiformate

Bei der CAX-Prozesskette ist neben dem eingesetzten System im Kontext von Schnittstellen zu anderen Systemen das Dateiformat von Bedeutung. Hierbei lässt sich eine Gliederung in drei Kategorien vornehmen:

1. Netzmodell: Das Modell ist ein Netz aus einzelnen Flächen. Jede Fläche wird durch Fixpunkte definiert. Es kann lediglich eine Approximation von gebogenen Oberflächen erfolgen und es liegt eine endliche Genauigkeit vor. Ein beispielhaftes Dateiformat ist STL.
2. Flächenmodell: Jedes Modell grenzt sich durch geometrische Flächen von der Umgebung ab. Ein solches 2D-Grenzflächen-Modell ist als Flächenmodell definiert. Beispiel für ein Dateiformat ist STEP.
3. Volumenmodell: Eine Komposition aus Objekten beschreibt ein Volumenmodell. Eine Relation einzelner Objekte wird mit booleschen Operationen realisiert. IGES ist ein beispielhaftes Dateiformat.

Bei den befragten Werkzeugbauunternehmen zeigt sich bei den verwendeten Dateisystemen, dass bei der internen Verwendung eine heterogene Verteilung vorliegt und kein Dateiformat priorisiert wird. Bei der externen Verwendung, bspw. bei der Zusammenarbeit mit externen Konstruktionsbüros, werden am häufigsten STEP (83 %), DWG (67 %) und IGES (58 %) genutzt.

Welche Datenschnittstellen  
setzen Sie intern bzw. extern  
ein?  
[Mehrfachnennungen möglich]





### Eingesetzte Standards

Charakteristisch für den Werkzeug- und Formenbau ist die Fertigung von Unikaten und Kleinserien. Dementsprechend müssen bei der Konstruktion von Werkzeugen stets sich ändernde Geometrien der abzuformenden Produkte berücksichtigt werden. Hinsichtlich einer effizienten Konstruktion ist es daher von Bedeutung, Werkzeuge standardisiert zu entwickeln. Hiermit wird eine schnelle Adaption der Werkzeuge an individuelle Produkte gewährleistet. Weitere Vorteile einer standardisierten Konstruktion sind die geringen Planungsaufwände in den nachfolgenden Arbeitsbereichen wie der CAM-Planung und der mechanischen Fertigung.

Bei den befragten Werkzeugbauunternehmen herrscht hinsichtlich der Standardisierung Optimierungsbedarf. 18 % der Unternehmen konstruieren Werkzeuge individuell. Methoden zur Erhöhung der Gleichteilquote und zur Verringerung des individuellen Aufwands bei der Neukonstruktion von Werkzeugen werden dagegen zu einem vergleichsweise geringen Prozentanteil eingesetzt.

Mit 46 % ist die Verwendung unternehmensspezifischer Standardelemente in den Konstruktionen verbesserungsfähig. Werkzeugkonstruktionselemente bzw. Module, die in eine neue Konstruktion übernommen werden können, werden in 18 % der befragten Unternehmen verwendet, ebenso parametrische Werkzeugkonstruktionen.

Mit einer konsequenten Fokussierung auf standardisierte Konstruktionsmethoden ist eine signifikante Erhöhung der Gleichteilquote realisierbar. Diese kann als Indikator für die Standardisierung der Werkzeuge gesehen werden. Die Gleichteilquote beschreibt die wiederholte Verwendung von gleichen Bauteilen in unterschiedlichen Werkzeugen. Die befragten Werkzeugbauunternehmen geben an, dass die Gleichteilquote eines typischen Werkzeugs derzeit bei 21 % liegt und sich zukünftig auf maximal 30 % erhöhen könnte.

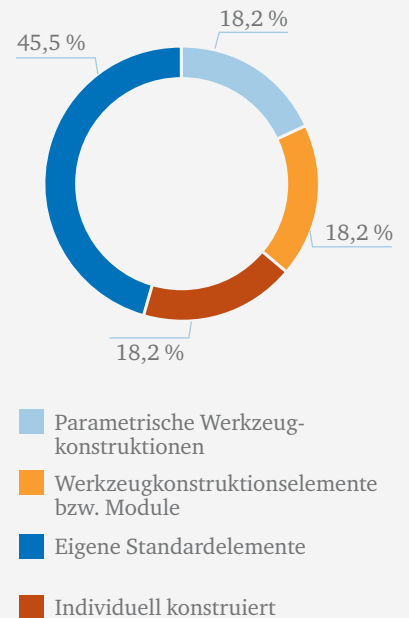
### Eingesetzte Vorgaben

Werkzeugbaubetriebe zeichnen sich durch eine Fertigung komplexer Werkzeuge bei geringer Losgröße aus. Die Werkzeugkonstruktionen werden individuell an die Bedürfnisse der Kunden angepasst. Eine einheitliche Produktarchitektur wird jedoch aufgrund der hohen Komplexität der Werkzeuge und der hohen Anzahl an Einzelteilen erschwert. Doch trotz der Produktvielfalt im Werkzeugbau ist eine standardisierte Konstruktion neben dem Einsatz entsprechender Konstruktionsmethoden durch die Verwendung von Standards und Vorgaben möglich.

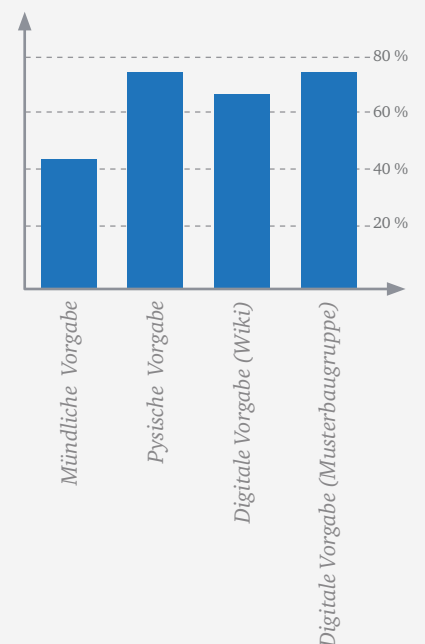
Die Befragung der Werkzeugbaubetriebe zeigt, dass in der Konstruktion bereits verschiedene Standards und Vorgaben verwendet werden. Am häufigsten werden physische (75 %) und digitale Vorgaben in Form von Musterbaugruppen (75 %) und Wikis (67 %) verwendet. Mündliche Vorgaben kommen mit 42 % seltener zum Einsatz. Hinsichtlich der Verwendung von Vorgaben besteht somit noch Handlungsbedarf bei den befragten Unternehmen des Werkzeug- und Formenbaus.

Für Werkzeugbaubetriebe sind die Vorteile bei der Verwendung von Standards und Vorgaben in der Konstruktion die Nutzung von Synergieeffekten sowie eine effizientere Produktarchitektur. Mit der Einhaltung von Konstruktionsrichtlinien ist die Basis für eine standardisierte Konstruktion mit hoher Gleichteilquote gegeben. Der verpflichtende Einsatz von Norm- und Katalogteilen, die Definition standardisierter Werkzeugkomponenten sowie die Nutzung von Werkzeugmodulen können in den Richtlinien festgelegt werden.

Welche Vorgehensweise beschreibt Ihre Werkzeugkonstruktion am besten?



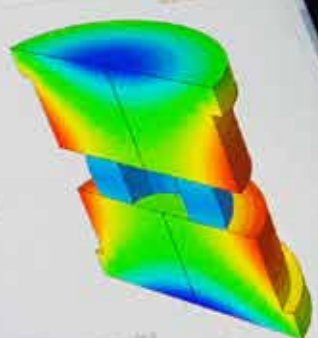
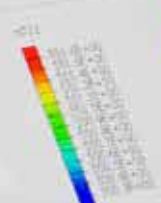
In welcher Form liegen Ihnen Ihre Standards und Vorgaben zur Konstruktion vor?  
[Mehrfachnennungen möglich]





## Live Simulation

### Live Process with Simulation



Simulation Results  
Time: 1000 s  
Stress: 100 MPa  
Temperature: 1000 K

Simulation Group

Simulation Name

Simulation Path

Run

Stop

Search

Cancel

# Stationen entlang der CAX-Prozesskette-Simulation

Die Simulation von Werkzeugen und Prozessen ist bereits etablierter Bestandteil in der CAX-Prozesskette – jedoch werden noch nicht alle Potentiale genutzt

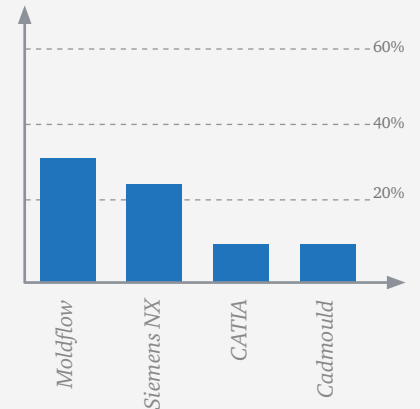
Werkzeugbaubetriebe stehen vor der Herausforderung, einerseits die hohen Qualitätsanforderungen der Kunden bei zunehmender Komplexität der Werkzeuge zu erfüllen und andererseits kostengünstige Werkzeuge bei geringer Durchlaufzeit zu fertigen. Eine Kennzahl für die Komplexität heutiger Werkzeuge ist die Geometriecharakteristik einzelner Elemente des Werkzeugs. Bei dem Wettbewerb „Excellence in Production 2018“ geben 53 % der befragten Unternehmen an, dass bei der Konstruktion von Werkzeugen hauptsächlich bzw. ausschließlich 3D-Elemente eingesetzt werden. Lediglich 10 % der befragten Unternehmen setzen dagegen hauptsächlich 2D-Elemente ein, wobei dieser Prozentanteil zukünftig weiter sinken wird. Trotz der hohen Komplexität in Form von 3D-Elementen sind die Bestrebungen der Werkzeugbaubetriebe zur Reduzierung der Durchlaufzeit sichtbar. Teilnehmende Unternehmen beim Wettbewerb „Excellence in Production“ gaben für das Jahr 2015 an, dass die Durchlaufzeit eines durchschnittlichen Spritzgießwerkzeugs 96 Tage betrug. Ein Vergleich mit der heutigen durchschnittlichen Durchlaufzeit von 86 Tagen zeigt eine Reduzierung von 10 %. Mit einer zunehmenden Beherrschung der Komplexität – bspw. durch den Einsatz von Simulationssystemen – ist in den nächsten Jahren davon auszugehen, dass die Durchlaufzeit in den Werkzeugbaubetrieben weiterhin sinken wird.

Bei der CAX-Prozesskette bietet der Einsatz von Simulationssystemen die Möglichkeit dem Spannungsfeld, bestehend aus steigender Komplexität der Werkzeuge und geforderter Qualität bei gleichzeitiger Reduzierung der Durchlaufzeit, entgegenzutreten. Simulationssysteme ermöglichen Fehler in der Werkzeugkonstruktion frühzeitig zu erkennen sowie kostengünstig das Werkzeug hinsichtlich der Prozesseigenschaften zu optimieren. Bei den eingesetzten Simulationssystemen wird zwischen Systemen für die Prozesssimulation und des Werkzeugs unterschieden.

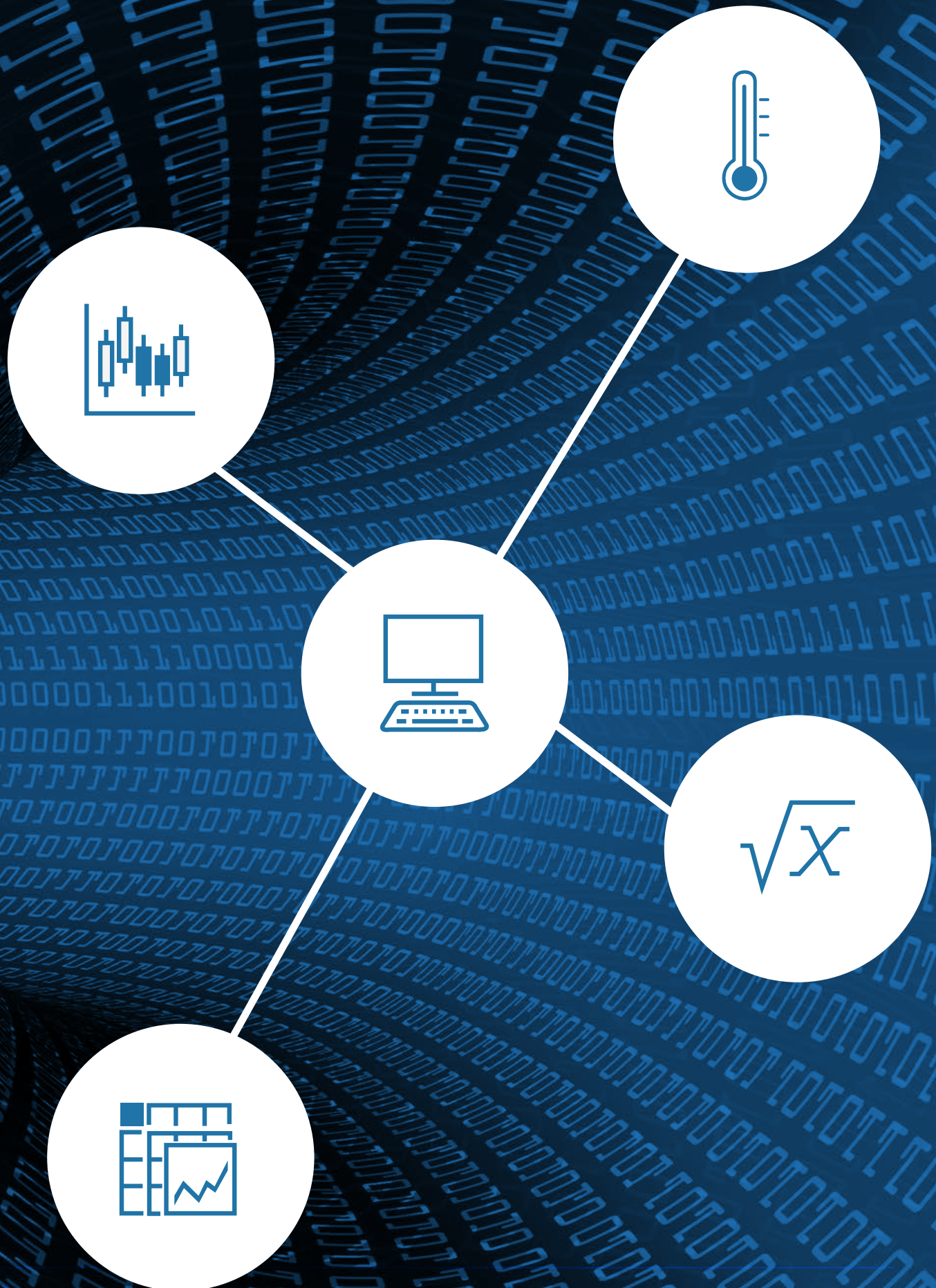
Im Rahmen des Wettbewerbs „Excellence in Production 2018“ geben 43 % der Werkzeugbaubetriebe an, dass Prozesssimulationen angewendet werden. Eine Betrachtung der eingesetzten Simulationssysteme zeigt, dass besonders bei der Fertigung von Spritzgießformen ein Einsatz von Prozesssimulationen stattfindet. Begründen lässt sich dies mit der Funktionsvielfalt aktueller Systeme. Die Simulation der Füllphase im Spritzgießprozess ermöglicht eine Prognose der resultierenden Temperaturen und des Wärmeeintrags in das Werkzeug. Mit der Simulation von Schwindungen und Verzügen, aus der Abkühlung des Polymers, ist somit eine Optimierung des Kühlsystems möglich. Weiterhin ist mit der Berechnung des Fließverhaltens und der -geschwindigkeit die Vermeidung von Lufteinschlüssen realisierbar. Die häufigsten im Einsatz befindlichen Systeme für die Prozesssimulation sind Moldflow (30,4 %) und Cadmould (14,3 %).

Eine Simulation der Werkzeuge wird von 26,7 % der teilnehmenden Unternehmen beim Wettbewerb „Excellence in Production 2018“ durchgeführt. Der Fokus bei den Simulationen liegt auf der Betrachtung von kinematischen Bewegungsabläufen zur Vermeidung von Kollisionen beweglicher Komponenten des Werkzeugs. Die Systeme zur Werkzeugsimulation, die bei den teilnehmenden Werkzeugbaubetrieben am meisten Anwendung finden, sind Siemens NX (23,2 %) und Catia (14,3 %). Die Potentiale in Form von Produktoptimierung und Prozessverbesserung werden somit nicht von allen Werkzeugbaubetrieben genutzt. Zukünftig sollte ein vermehrter Einsatz von Simulationssystemen angestrebt werden, um sicherzustellen, dass Durchlaufzeiten verkürzt werden, Fehler früh erkannt werden und eine Optimierung bereits im frühen Entwicklungsstadium durchgeführt wird.

Die häufigsten im Einsatz befindlichen Simulationssysteme







# Simulation: Best Practice „CFD for Cooling“

Simulationen ermöglichen die optimale Gestaltung von konturnahen Kühlkanälen

Additive Manufacturing (AM) bietet neue Chancen für den Werkzeugbau. Einer der entscheidenden Vorteile von AM ist der hohe Grad an Gestaltungsfreiheit. So können verschiedenste Funktionen auf unterschiedlichste Weise im Werkzeug integriert werden. Bei pulverbettbasierten AM-Technologien, wie z.B. Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), können angepasste Kühlkanäle direkt in das Werkzeug eingebracht werden, indem der Pulverwerkstoff an den Stellen nicht verschmolzen wird, an denen die Kühlkanäle verlaufen sollen.

Durch eine Neukonstruktion der Kühlkanäle kann der Wärmetransport vor allem von „Hot Spots“ iterativ optimiert werden. Ergebnisse dazu liefert eine Studie des Fraunhofer IPT in Zusammenarbeit mit Renishaw GmbH und einem Werkzeugbaubetrieb. Im Rahmen dieser Studie wurden die Kühlkanäle eines Werkzeugeinsatzes neu ausgelegt und mittels Computational Fluid Dynamics-Simulation (CFD) optimiert. Bei der CFD-Simulation wird der Wärmetransport auf Basis verschiedener Bauteile mit unterschiedlichen Temperaturen simuliert. Mittels der Strömungsbeurteilung wird die abgeführte Wärmemenge ermittelt. Die Ergebnisse der CFD-Simulation korrelieren – wie auch andere Simulationen – mit der Güte getroffener Anfangs- und Randbedingungen sowie der Modellierung der Werkstoffeigenschaften. Mit Hilfe des ermittelten Temperaturfeldes werden Aussagen über Optimierungsmöglichkeiten getroffen. Gerade für Details, die mit einer Spritzgießsimulation nicht dargestellt werden können, empfiehlt sich die CFD-Simulation.

Im Vergleich zum konventionell hergestellten Werkzeug zeigt die Simulation der ersten Neukonstruktion eine Verbesserung im Wärmeabtransport. Erste Optimierungsmaßnahmen mit Hilfe von AM-Technologien resultieren in einer Zykluszeitreduzierung beim Spritzgießen von ca. 15 % bis 30 %. In weiteren Iterationsschritten ist nach der CFD-Simulation eine zusätzliche Zykluszeitreduzierung von ca. drei Sekunden möglich.

Ausgangspunkt bildet hierfür die Ermittlung der Durchflussmenge, die sich aus der Konstruktion ergibt. Basierend darauf wird die thermische Analyse durchgeführt, indem die minimale und mittlere Temperatur des Werkzeugs, die Wassertemperatur am Auslass und die abgeführte Wärmemenge verglichen werden. Die hier beschriebene Neuauslegung hat unter konservativen Randbedingungen und für ein Produkt aus PA6 mit 50 % Glasfaseranteil stattgefunden. Die Neukonstruktion des Werkzeugs muss der mechanischen Stabilität genügen, die auch durch Kühlkanäle beeinflusst wird. Die Durchflussmenge der Kühlkanäle ergibt sich dann aus deren Geometrie und der Druckdifferenz. Mit Wandstärken von 1,5 mm, Kanaldurchmessern von 1,5 mm, einer balancierten Sechsfach-Parallelverschaltung sowie eines resultierenden Volumenstroms von 2,1 l/min wurden die Vorgaben eingehalten.

Die Ergebnisse der CFD-Simulation zeigen, dass die Unterschiede der minimalen und mittleren Temperatur zwischen erster AM-Variante und Neukonstruktion gering sind. Die Wassertemperatur am Ausgang der Neukonstruktion liegt allerdings weit über der des in einem ersten Schritt optimierten Werkzeugeinsatzes, was in einem größeren Wärmeabtransport aus dem Formkern begründet ist. Dieses Resultat erklärt die Verkürzung in den Zykluszeiten. Bei bis etwa 30 % glasfasergefüllten teilkristallinen Kunststoffen wird eine Verbesserung der Bauteilqualität bezüglich Verzug erzielt, da der Formkern gleichmäßiger abgekühlt wird. Eine problemlose Reinigung der Kanäle wird durch die Aufteilung der Kanäle kurz unterhalb der Bauteiloberfläche begünstigt.

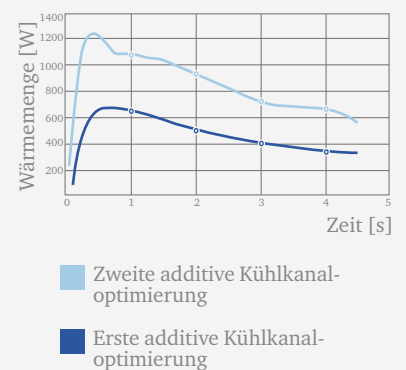
Zusammenfassend wird festgehalten, dass die Anwendung von CFD-Simulation im Zusammenspiel mit Werkzeugeinsatz, die additiv hergestellt werden, für Zykluszeitreduzierungen beim Spritzgießen geeignet ist, sollte eine konventionelle Lösung an ihre Grenzen stoßen.



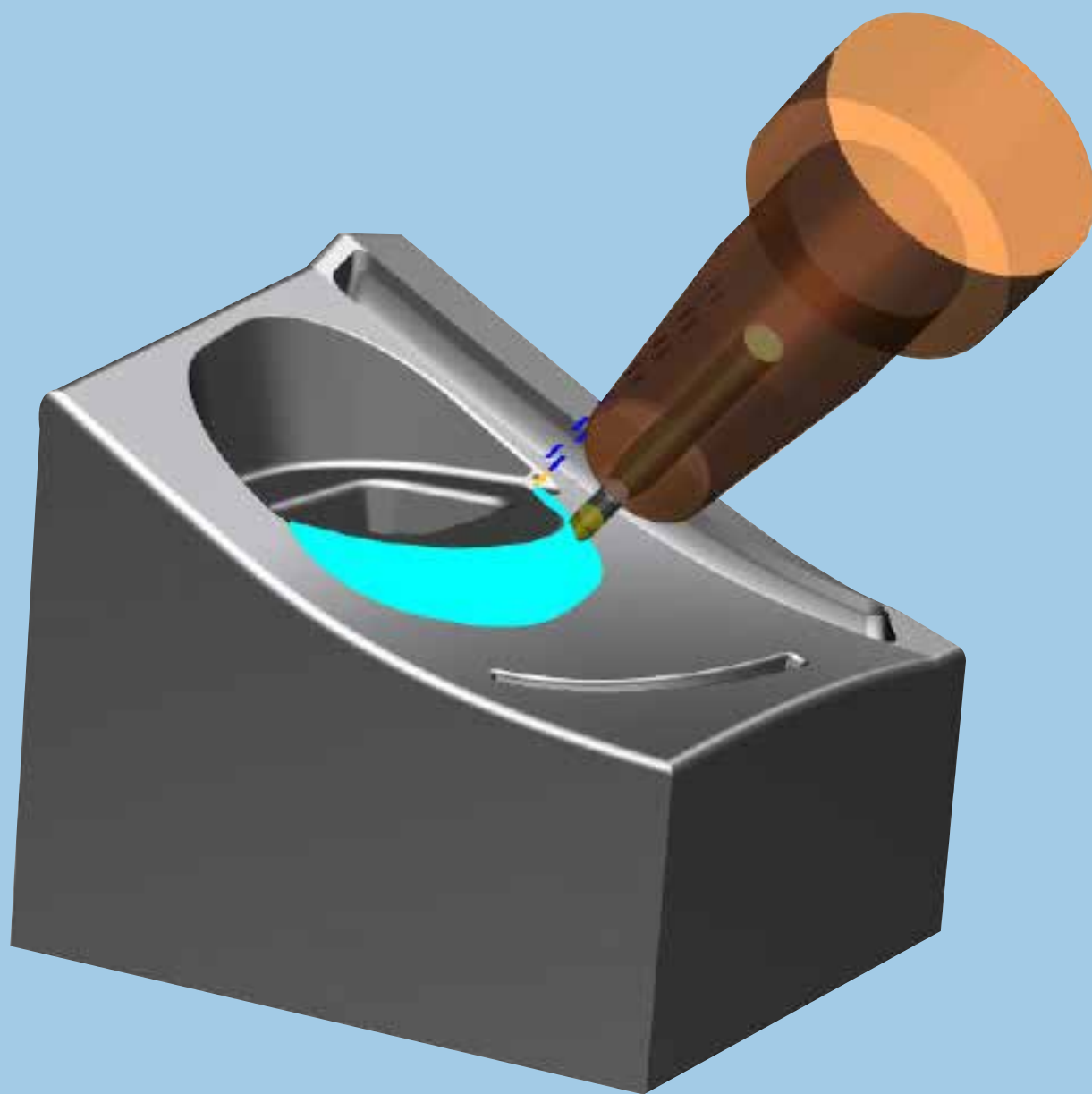
**15 %  
bis 30 %**

**Zykluszeitreduzierung  
durch additive  
Kühlkanaloptimierung**

Vergleich abgeführter Wärmemengen zwischen erster Optimierung und weiterem Iterationsschritt







# Stationen entlang der CAX-Prozesskette – CAM

Die Auswahl des CAM-Programms des Systems ist abhängig von der Leistungsfähigkeit in Bezug auf den Anwendungsfall und der jeweiligen Fertigungstechnologie

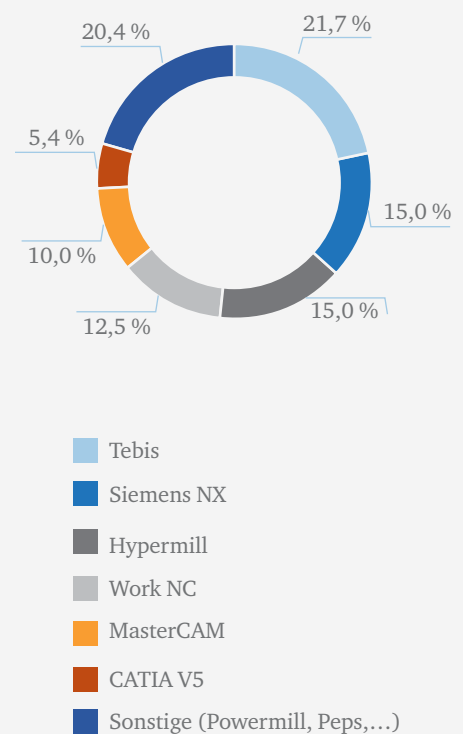
CAM-Programmierung ist bereits seit vielen Jahren etablierter Status quo im Werkzeugbau. Sie ist die Schnittstelle zwischen Design (CAD) und Fertigung. In vielen Werkzeugbaubetrieben werden CAM-Systeme eingesetzt, die auf kleine und mittlere Unternehmen zugeschnitten sind und das Bearbeiten komplexer Bauteile sehr gut beherrschen. Darüber hinaus gibt es Betriebe, zumeist interne Werkzeugbauabteilungen, die im Kontext des Gesamtunternehmens ein übergeordnetes Product-Lifecycle-Management-System (PLM) als komplettes CAX-System nutzen. Darin kann auch ein CAM-System integriert sein. Da das CAM-System die Schnittstelle zur Fertigung und damit zur Realisierung eines Bauteils darstellt, gelangen diese integrierten CAM-Systeme im Werkzeugbau mit seinen hohen Anforderungen an Genauigkeit, Aspektverhältnissen und Bedarf an unterschiedlichsten Bearbeitungsstrategien immer wieder an Grenzen. Die Datendurchgängigkeit, die PLM-Systeme als besonderen Vorteil sicherstellen, wird so oft ad absurdum geführt.

Insgesamt herrscht eine große Vielfalt bei eingesetzten CAM-Systemen im Werkzeugbau. Davon lassen sich zwei Software-Produkte übergeordneten CAX-Systemen mit PLM-Funktionalität zuordnen. Siemens NX, vormals unter UG bekannt, wird in 15 % der befragten Betriebe zur CAM-Programmierung eingesetzt und ist eines dieser Systeme. Das zweite ist CATIA V5 von Dassault Systèmes, in 5,4 % in der CAM-Abteilung der Betriebe anzutreffen. Alle weiteren CAM-Systeme dominieren den Werkzeugbau jedoch stärker. Tebis wird bei 21,7 % der Betriebe eingesetzt, Openmind Hypermill bei 15 %. Darauf folgen mit 12,5 % WorkNC von Vero und mit 10 % Mastercam von InterCAM. Mit 20,4 % macht außerdem die Gruppe der Sonstigen einen bedeutenden Anteil der Verteilung von CAM-Systemen im Werkzeugbau aus. Ein Indikator, der erneut für die breite Systemlandschaft der Branche spricht.

Brüche in der Systemlandschaft zwischen CAD und CAM haben direkten Einfluss auf die Produktivität von Programmierung und Fertigung. Kommen CAD-Modelle für die anschließende CAM-Programmierung aus einer anderen Software, wird meist das STEP-Dateiformat gewählt. Dieses wird unter anderem bei 58,3 % der Unternehmen zum internen Datenaustausch verwendet. Beim Datenaustausch mit Externen – 83 % der befragten Werkzeugbaubetriebe arbeiten mit externen Konstruktionsbüros zusammen – sind es 83,3 %. Das STEP-Dateiformat liefert jedoch viele Bauteilinformationen, sogenannte Metainformationen oder Product and Manufacturing Information (PMI), nicht mit. Damit sind Flächeneinfärbungen, Bohrungsmuster, Anmerkungen oder Toleranzinformationen in der CAM-Programmierung nicht mehr nutzbar und müssen klassisch in Fertigungsunterlagen nachgesehen oder während des Programmierens neu erstellt werden. Zunehmend intelligente Featureerkennung wird diesen Mehraufwand zukünftig reduzieren.

Neben der technischen Leistungsfähigkeit von CAM-Systemen und Schnittstellen hat die Organisation von CAM-Programmierung einen entscheidenden Einfluss auf die Produktivität der Programmierung und Fertigung. Die CAM-Programmierung wird in den Kerntechnologien des Werkzeugbaus sehr unterschiedlich organisiert. So werden Fräsen und Drahterosion zu über 56 % in zentralen CAM-Abteilungen programmiert. Gefolgt von werkstatorientierter Programmierung (WOP; Fräsen 23,3 %, Drahterosion 34,1 %), also einer CAM-Station direkt an einer Maschine. Online Programmierung an der Maschinensteuerung spielen eine untergeordnete Rolle. Mit einer reziproken Verteilung warten Drehen und Schleifen auf. Hier werden 38,5 % bzw. 48,1 % online programmiert. Senkerosionsmaschinen werden vorrangig werkstatorientiert programmiert (38,9 %).

Wie hoch ist der prozentuale Zeitanteil der Nutzung des jeweiligen Systems?

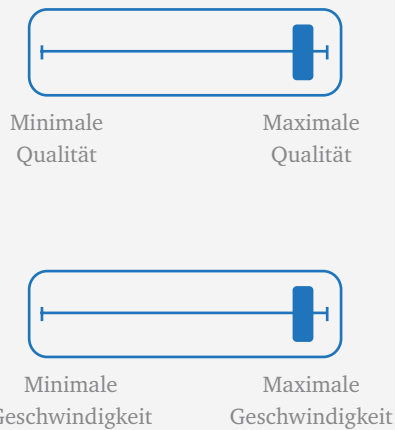




In Werkzeugbaubetrieben werden verschiedene abtragende Fertigungsverfahren eingesetzt. Die Funkenerosion wird zur Bearbeitung komplexer Geometrie und Kavitäten verwendet während die Technologie des Laserstrahlstrukturierens zur Funktionalisierung von Oberflächen sowie zur Oberflächenstrukturierung angewandt wird. Die Einfluss der Fertigungstechnologien auf die CAM-Programmierung wird im Folgenden näher beschrieben:

### Funkenerosion

Die CAM-Planung bei der funkenerosiven Bearbeitung ist maßgeblich von der gewünschten Oberflächenrauheit abhängig. Die Oberflächengüte des Werkstücks resultiert aus der Form und Tiefe der Entladungskrater. In der VDI Richtlinie 3400 werden für die Praxis Oberflächen-Vergleichsmuster definiert. Hierbei ergeben sich in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit verschiedene Klassen, die bei der CAM-Planung angegeben werden und somit eine Vorkonfiguration der Prozessparameter ermöglichen. Des Weiteren können bei der CAM-Planung Prioritäten hinsichtlich Geschwindigkeit, Verschleiß der Elektroden und Qualität festgelegt werden. Oftmals ist ein iteratives Vorgehen zur Bestimmung der optimalen Parameter notwendig.



### Laserstrahlstrukturieren

Voraussetzung zur erfolgreichen CAM-Planung beim Laserstrahlstrukturieren ist ein vollständiges Datenmodell der strukturierten Oberfläche. Dieses wird in der Konstruktionsphase des Werkzeugs generiert. Das Strukturdesign (2,5D) wird in einem CAD-System erstellt und auf das Geometriemodell des zu strukturierenden Werkzeugs verzerrungsarm übertragen.

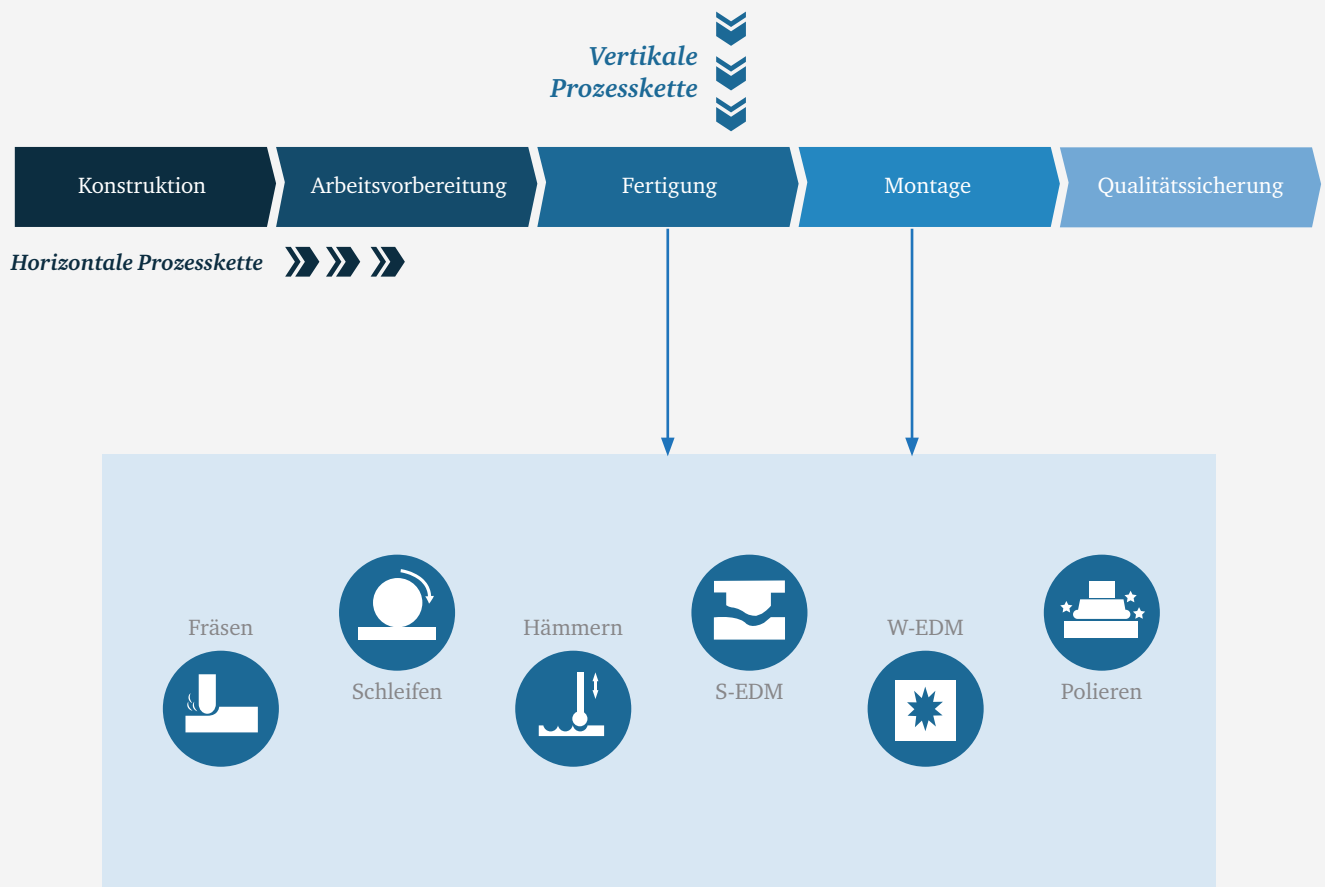
Erster Schritt der CAM-Planung ist eine Segmentierung der Bauteiloberfläche in Bearbeitungssegmente. Das Arbeitsvolumen, welches durch Laserscanner, dynamische Strahlaufweitung und F-Theta Objektiv definiert wird, ist kleiner als die zu strukturierende Oberfläche. Dies hat zur Folge, dass mehrere Arbeitsvolumina in Form sogenannter „Splitter“ definiert werden und im Prozess eine sequentielle Bearbeitung erfolgt. Nach der Segmentierung folgt die Planung der Bewegungsführung im CAM-System. Bei Laserstrahlstrukturieranlagen wird zwischen der Bewegungsführung der Werkzeugmaschine und der Bewegungsführung des Lasermoduls unterschieden. Beide Bewegungsführungen müssen bei der CAM-Planung berücksichtigt und gekoppelt werden. Abschließend kann der NC-Code generiert werden.

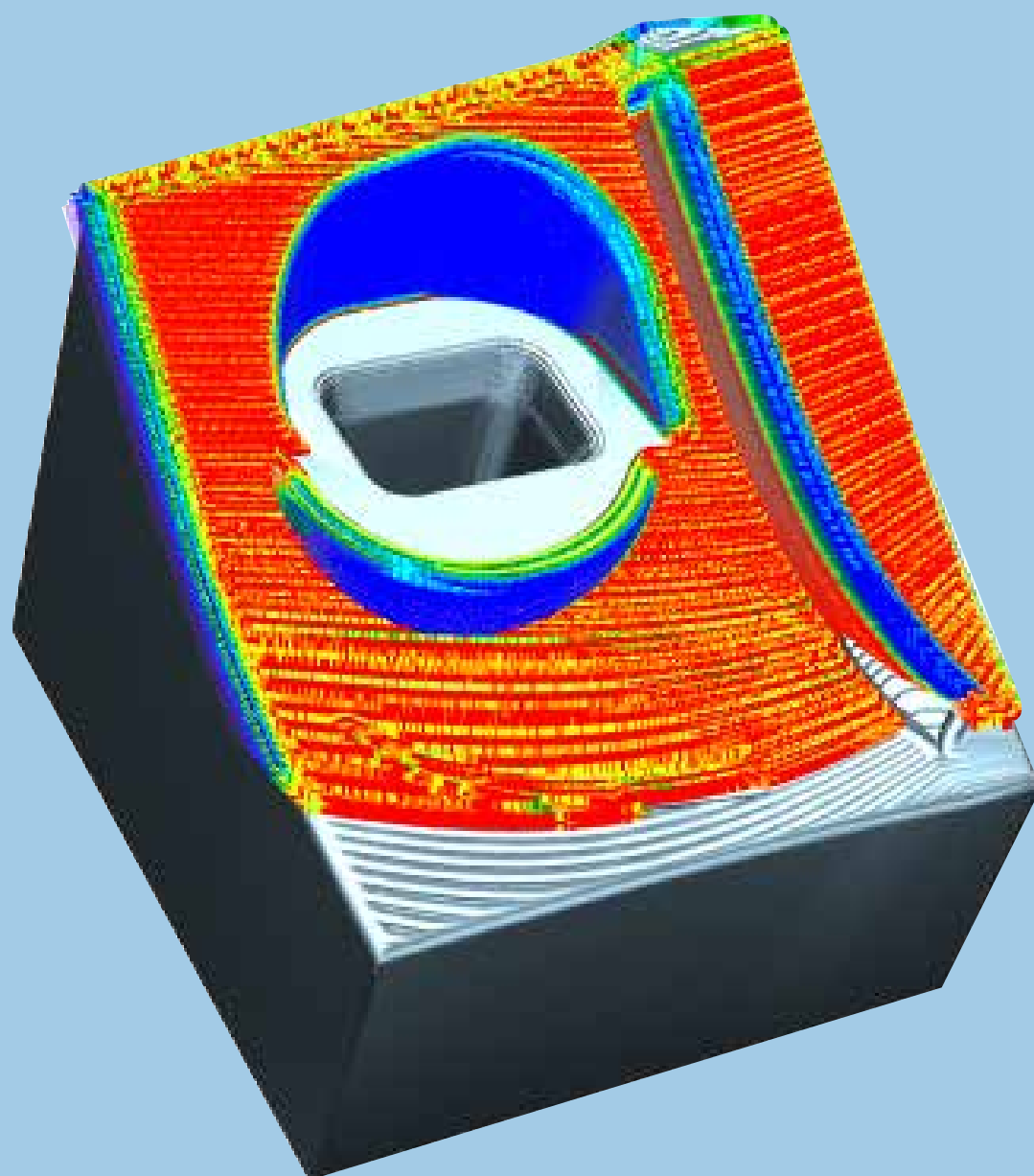
|                                                    | Fräsen | Drehen | Schleifen | Senkerosion | Drahterosion |
|----------------------------------------------------|--------|--------|-----------|-------------|--------------|
|                                                    |        |        |           |             |              |
| Anteil CAM Programmierung (zentral)                | 65,1 % | 6,9 %  | 4,8 %     | 31,9 %      | 55,7 %       |
| Anteil werkstattorientierte Programmierung (WOP)   | 23,7 % | 31 %   | 31,4 %    | 38,9 %      | 34,1 %       |
| Anteil Online-Programmierung an laufender Maschine | 4,9 %  | 23,6 % | 15,7 %    | 14,7 %      | 6,3 %        |
| Anteil Online-Programmierung an stehender Maschine | 6,3 %  | 38,5 % | 48,1 %    | 14,8 %      | 3,9 %        |

### Featurebased CAM

Durch die geringen Losgrößen im Werkzeug- und Formenbau sind die grundsätzlichen CAM-Programmieraufwände pro Stück üblicherweise wesentlich höher als in einer Serienfertigung. Gerade die Programmierzeit ist im Vergleich zur eigentlichen Bearbeitungszeit wesentlich höher. Die Automatisierung der NC-Programmierung bietet eine große Chance für die Reduzierung dieser Programmieraufwände. Dabei werden Bauteilmerkmale im CAD-Programm erkannt und anschließend eine automatisierte CAM-Bahnplanung durchgeführt. Eine vorherige Definition von Produktfertigungs-Informationen (PMI) am Bauteil, wie Maß und Toleranzen, unterstützt dabei eine präzisere CAM-Bahnplanung. Jedoch ist auch zu nennen, dass eine automatisierte CAM-Programmierung bei wiederkehrenden Bauteilmerkmalen oder Standardelementen, wie Bohrungen, besonders sinnvoll ist.

Bei regelmäßig wiederkehrenden Bauteilmerkmalen können diese bereits als CAM-Vorlagen in der CAM-Software hinterlegt werden. Dabei werden gezielt Bearbeitungsabfolgen definiert, die direkt auf das jeweilige Merkmal angewendet werden können. Ein hoher Standardisierungsgrad bei Bauteilmerkmalen, wie beispielsweise die Verwendung von definierten Bohrungsdurchmessern, vereinfacht dabei die automatisierte Programmierung. Dabei ist denkbar, dass die in der Konstruktion standardisierten Bauteilmerkmale ebenfalls als CAM-Vorlagen angelegt werden. Dazu ist ebenfalls die Definition einer Werkzeugkomponente sinnvoll. Zuletzt ist noch zu nennen, dass sich bei der automatisierten Programmierung von komplexen dreidimensionalen Oberflächen aktuell oftmals keine zufriedenstellenden Programmierergebnisse ergeben.





# Stationen entlang der CAX-Prozesskette – NC-Simulation und NC-Maschinensteuerung

Der Einsatz von Systemen zur NC-Simulation führten zu einer deutlichen Verbesserung des Prozesses

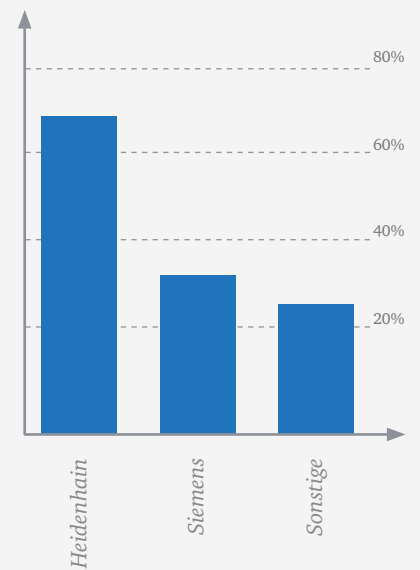
Der Einsatz von CNC-Steuerungen ist für Produkte komplexer Art absolut notwendig und gewährt die Vorteile einer höheren Produktivität durch verkürzte Nebenzeiten sowie eine höhere Qualität durch verbesserte Genauigkeit. Zudem ergibt sich die Möglichkeit, Bauteile mit komplexen Geometrien und einer hohen Reproduzierbarkeit zu fertigen. Dazu werden die Signale von Positions-, Drehwinkel- und Zustandssensoren durch eine Steuereinheit ausgewertet und die Bahnkurve zum Soll-Zustand interpoliert. Es können gleichzeitig mehrere Achsen angesteuert werden, was ein besonderes Kennzeichen der CNC-Steuerung ist. Ein Klassifikationsmerkmal ist eben diese Anzahl an gleichzeitig interpolierbarer Achsen. So wird die simultane 3D-Bearbeitung mit 5-Achs-Maschinen in Kombination mit CNC-Steuerung mehr und mehr zum Standard. Eine Umfrage unter führenden Werkzeugbaubetrieben hat ergeben, dass bereits 92 % dieser auch auf 5-Achs-Fräsmaschinen arbeiten.

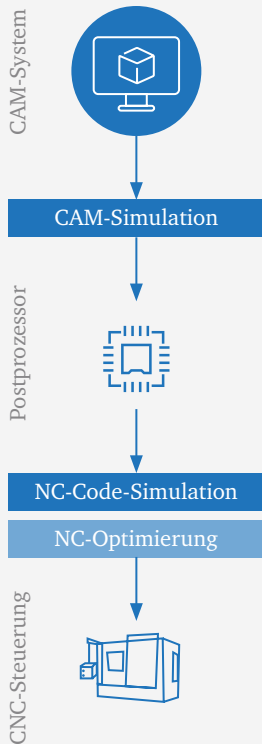
Die Steuerung ermöglicht den automatischen Ablauf. Dabei beeinflussen eine oder mehrere Eingangsgrößen basierend auf einer systemeigenen Logik eine oder mehrere Ausgangsgrößen. Anders als bei einer Regelung erfolgt bei der Steuerung keine Rückwirkung. Somit liegt ein offener Wirkungsweg vor, in dem keine Störgrößen berücksichtigt werden.

Etablierte Hersteller von NC-Steuerungen im Werkzeugbau sind Heidenhain (TNC), Siemens (SINUMERIK), Rüdgers (RMS) und Fanuc (iHMI). Dabei ist Heidenhain in der Branche mit Abstand als Marktführer zu betrachten: Zwei Drittel aller Werkzeugbaubetriebe nutzen Steuerungen von Heidenhain (Modelle TNC 430, 530, 640). Ein Drittel der Betriebe setzt Siemens-Steuerungen ein, ein weiteres Viertel setzt auch Steuerungen anderer Hersteller ein.

Grundlage aller Steuerungen einer CNC-Maschine ist ein werkstückspezifisches Programm: das NC-Programm. Im NC-Programm ist der NC-Code hinterlegt. Der Aufbau des Codes bzw. Programmiersprache ist durch den G-Code nach DIN 66025/ ISO 6983 festgelegt. Daneben existieren allerdings auch weitere Programmiersprachen mit Verschiedenen Anforderungen wie z.B. Heidenhain Klartext. Der NC-Code beschreibt die Gesamtbearbeitung mittels einer beliebigen Anzahl an Programmsätzen. Ein Satz legt Wegbedingungen, Weginformationen, Schaltfunktionen, Technologieinformationen, Interpolationsparameter sowie Hilfsfunktionen fest und stellt ein in sich geschlossene Operation dar. Mit zunehmender Nutzung von CAM-Systemen verliert der NC-Code an Bedeutung. Im CAM-System erstellte Fräsbahnen und Technologieinformationen werden durch einen Postprozessor (PP) automatisiert in NC-Code übersetzt. Damit wird für den Bediener unerheblich, mit welchem expliziten NC-Code die Maschine arbeitet.

*Mit welchen Maschinensteuerungen arbeiten Sie?  
[Mehrfachnennungen möglich]*





Abhängig von der Geometrie des zu fertigen Bauteils und der Komplexität der Bearbeitung entstehen unterschiedlich umfangreiche Programme. Die Programmierung kann je nach Umfang entweder manuell-textuell (direkt an der Steuerung), werksattori-entiert (WOP: CAM-Rechnerstation an der Maschine auf dem Shopfloor) oder CAM-basiert (zentrales CAM-Büro) erfolgen. Bei der Organisation als WOP oder CAM-Büro wird anhand des CAD-Modells gearbeitet, welches durch ein CAM-System mit Fertigungs-informationen ergänzt wird. Hier bietet sich die Möglichkeit, auf bereits bestehende Modelle oder Datenbanken zurückzugreifen, was einen hohen Grad an Standardisierung und Automatisierung erlaubt. Die Umwandlung des CAM-Programms erfolgt durch den Postprozessor (PP). Diese Rechnerprogramme berechnen arithmetische und geometrische Anweisungen sowie die Bahn des Werkzeug-bezugspunktes. Zudem werden mit Werkstoff- und Fräswerkzeugdaten Schnittwerte bestimmt.

Die Fertigung von komplexen Bauteilen ist durch das Zusammenspiel von CAM-basierter Programmierung, CNC-Steuerung und 5-Achs-Maschinen umsetzbar und zählt heute zum Standard im Werkzeugbau. Dennoch besteht ein erhöhtes Risiko von Kollisionen auf Grund fehlerhafter CNC-Programme. Durch eine Simulation ist die A-Priori-Prüfung auf etwaige Fehler möglich. Die Simulation stellt zwar einen Mehraufwand in der Arbeitsvorbereitung dar, dient aber zur Sicherheit in der Fertigung und vermeidet kostspielige Abweichungen von der Soll-Geometrie des Werkstücks oder Beschädigungen der Werkzeugmaschine.

Bei der Simulation von Bearbeitungsprozessen sind mehrere Fälle zu unterscheiden:

1. Als schnelle und direkt im Rahmen der CAM-Programmierung anwendbare Lösung bieten fast alle gängigen CAM-Systeme eine Simulation der Werkzeugpfade an. Dabei werden die Geometrien von Bearbeitungs-werkzeug inklusive des Werkzeughalters mit der Bauteilgeometrie entlang der programmierten Pfade überlagert. Somit kann kurzfristig dargestellt werden, wo Material

abgetragen oder zerspant wird und ob es zu Kollisionen kommt. Diese Kollisionsprüfung kann auch auf den gesamten Bearbeitungs-raum der Maschine ausgedehnt werden, sodass z.B. Maschinentisch und Spannvor-richtungen mit einbezogen werden. Damit ist eine schnelle, auch sukzessive, Prüfung noch während des Programmierprozesses möglich. Diese Simulation findet jedoch vor der Übersetzung des Programms in NC-Code durch den Postprozessor statt. Es findet eine geometrische Simulation statt und keine Simulation des finalen NC-Codes. Somit werden Fehler, die durch Fehlinterpretatio-nen des Postprozessors entstehen, nicht be-rücksichtigt.

2. Abhilfe schaffen hierbei spezielle Simu-lationsprogramme, die den tatsächlichen NC-Code als Basis für die Simulation nutzen. Zunehmend findet diese Funktion auch in CAM-Systeme Einzug. Vorteilhaft ist, dass der NC-Code, wie er vom Postprozessor aus-gegeben wird, und die Maschinenkinema-tik mitsamt maximalen Verfahrenswegen oder Drehwinkeln simuliert werden. Fehlerhafte Übersetzungen durch den Postprozessor werden so erkannt und „in Stahl und Eisen“ vermieden. Diese Berechnungen benötigen jedoch deutlich mehr Zeit als eine CAM-Simulation. Viele Unternehmen nutzen diese Simulation daher nur bei besonders komple-zen 5-Achs-Bearbeitungen. Ein anderer An-satz ist, lange Berechnungen automatisiert über Nacht oder parallel zum Programmier-system auf zentralen Rechnern durchzuführen.

3. Als weitere Variante gibt es Simulations-systeme, die nicht nur ein erstelltes CAM-oder NC-Programm simulieren, sondern die Möglichkeit der lokalen Optimierung von Werkzeugpfaden oder Bearbeitungsparametern bieten. Zwei dieser Systeme sind auf den folgenden Seiten unter den Titeln „NCProfil-ler“ und „SimCut Pro“ beschrieben.

Die unterschiedlich umfangreichen und auf-wändigen Simulationsvarianten für die CNC-gesteuerte Fertigung ermöglichen eine an-forderungsgerechte Vorhersage von Be-arbeitungsproblemen bei der einfachen 3-Achs-Bearbeitung bis hin zur simultanen 5-Achs-HSC-Bearbeitung.



## NCProfiler

Fehlerhafte NC-Programme für die Werkstückbearbeitung verursachen oft hohe Kosten, beispielsweise durch Werkzeugausfall oder aufwendige Nachbearbeitungsschritte. Die am Fraunhofer IPT entwickelte Software NCProfiler bietet eine maschinenspezifische Analyse und Optimierung auf Basis von NC-Daten für jeden Fertigungsprozess direkt an der Maschine. Bei der Analyse über einen stationären Computer oder über ein Mobilgerät, beispielsweise auf einem Tablet oder Smart Glasses, werden neben der Maschinenkinematik auch die dynamischen Limitierungen der einzelnen Achsen sowie Steuerungseigenschaften berücksichtigt. Durch die an die Bearbeitungsmaschine adaptierte Analyse können Defekte des NC-Codes schon vor der eigentlichen Bearbeitung erkannt und behoben werden. Typische Fehler wie treppenförmige NC-Bahnen oder Sprünge durch Flächenversätze werden zuverlässig erkannt, auf der geplanten Bahn markiert und im NC-Programm angezeigt. Der NCProfiler arbeitet direkt mit dem NC-Code und kann daher sowohl zur Kontrolle der Postprozessorausgabe als auch zur Analyse schon bestehender NC-Programme eingesetzt werden. Es werden alle gängigen NC-Formate, beispielsweise Heidenhain iTNC, Sinumerik oder ISO-NC, aber auch Zwischenformate wie APT oder CLDATA unterstützt. Für die einlesbaren Formate sind auch Codegeneratoren verfügbar, mit denen sich der NCProfiler als Postprozessor einsetzen lässt.

### Präzise Vorhersage durch kinematische Modellierung

Für die Analyse bildet der NCProfiler die Kinematik der Werkzeugmaschine ab, auf der die Bearbeitung stattfinden soll. So können die durch das NC-Programm vorgegebenen Bewegungen der einzelnen Achsen auf Überschreitungen dynamischer Grenzwerte wie Ruck und Beschleunigung sowie auf Achsumkehrpunkte untersucht werden. Solche Positionen werden dann für den Nutzer farbig auf dem Werkzeugweg markiert und auch im NC-Programm kenntlich gemacht. Außerdem sind die zeitlichen Verläufe der dynamischen Achswerte über Graphen darstellbar.

Neben dieser kinematischen Analyse berechnet der NCProfiler eine Bahnvorschubgeschwindigkeit, in der die Begrenzungen der einzelnen Achsen sowie die geometrischen Randbedingungen berücksichtigt werden. Dies ermöglicht eine Abschätzung der Bearbeitungsdauer sowie deren Aufschlüsselung in Haupt- und Nebenzeiten.

### Tracing: Aufnehmen von Maschinendaten

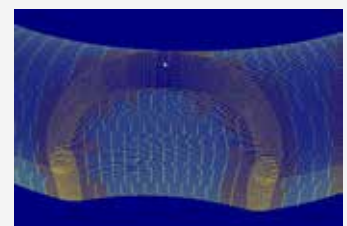
Neben den simulierten Bewegungsdaten können auch reale Daten visualisiert werden: Die Bewegungen der einzelnen Achsen können während der Bearbeitung eines Werkstücks aufgenommen und im NCProfiler dargestellt und analysiert werden. So erhält der Bediener umgehend Informationen über tatsächliche Positionen, Geschwindigkeiten und Rücke.

### Harmonischerer Bahnverlauf durch Spline-Technologie

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Bearbeitung von Freiformflächen ist die Erzeugung einer harmonischen Bahnführung. Im NCProfiler sind Funktionen zur automatisierten Glättung der Werkzeugbahn unter Einhaltung von Vorgabetoleranzen verfügbar. Dadurch lässt sich eine höhere Oberflächenqualität bei der Werkstückbearbeitung erzielen.

### Zusammenfassung

Der NCProfiler ermöglicht eine detaillierte Analyse und Optimierung der NC-Daten auf einem Arbeitsplatzrechner, bietet aber auch eine schnelle Übersicht über den NC-Code auf einem mobilen Gerät. Kritische Bereiche des Werkzeugweges können identifiziert und durch programmeigene Optimierungsfunktionen verbessert werden. Das Resultat ist eine verkürzte Programmlaufzeit, weniger Ausschuss und eine höhere NC-Programqualität.



Kritische NC-Bahn visualisiert im NC-Profil



## SimCutPro

Unternehmen der Branche Werkzeug- und Formenbau fertigen häufig kundenindividuelle Bauteile in Losgröße 1. Die Prozessauslegung erfolgt daher nach der Prämisse „First Part Right“. Moderne CAM-Systeme berücksichtigen jedoch nur geometrische Aspekte von Bauteilen. Technologische Aspekte, die Abweichungen und Fehler auf dem Bauteil verursachen, bleiben unberücksichtigt und müssen durch den Maschinenbediener oder CAM-Programmierer separat, mittels eigenem Prozesswissen berücksichtigt werden. Unter dem Namen SimCutPro entwickelt das Fraunhofer IPT eine Analyse-Software, welche CAM/NC-Pfade für 5-Achsfräsprozesse von komplexen Bauteilen hinsichtlich der technologischen Eignung prüft. Hierzu wird für jeden Zahneingriff auf der NC-Bahn die mikrogeometrische Durchdringung von Fräswerkzeug und Bauteil berechnet. Auf Basis der resultierenden Spanungsgeometrie können dann Kräfte, Überlasten und eine Abschätzung von Werkzeugverschleiß berechnet werden. Hierdurch ist es möglich, kritische Stellen sowie ungenutztes Potential direkt in der Prozessauslegung zu identifizieren und so ein „First Part Right“ zu realisieren.

Die Fräsprozesssimulation SimCutPro benötigt als Eingangsgrößen die Geometrie des Bauteils (CAD-Datei), die Werkzeugbahn (NC-Datei), die Geometrie des Werkzeugs und die Prozessparameter. Anschließend kann sowohl eine reine Eingriffssimulation, als auch eine kombinierte Eingriffs- und Spanungsgeometriesimulation durchgeführt werden. Wenn die materialspezifischen Kraftkoeffizienten für das Altintas oder Kinenzle Kraftmodell bekannt sind, kann darüber hinaus auch eine Kraftsimulation durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden in mehreren Diagrammen dargestellt. Mit den sich in Entwicklung befindenden Werkzeugabdrängungs- und Werkzeugverschleißsimulationen lassen sich in Zukunft noch weitere Prozessinformation vorhersagen.

## Usecase: Werkzeugbruch

Bei ungünstiger Auslegung der CAM-Bahn, kann das Werkzeug hohen Belastungen ausgesetzt werden und brechen. Die Kraftsimulation kann vorhersagen, an welchen Stellen der Werkzeugbahn voraussichtlich hohe Kraftspitzen auftreten. Selbst wenn die benötigten Koeffizienten für das Kraftmodell nicht bekannt sind, können Stellen von hoher Belastung bereits durch die Ergebnisse der Spanungsgeometriesimulation geschätzt werden, da die Kräfte in der Regel mit der Werkzeugdurchdringung zunehmen. Die Werkzeugbahn kann anschließend anhand der Simulationsergebnisse auf die Werkzeugbelastung hin optimiert werden.

## Usecase: Fertigungstoleranzen

Um eine aufwendige Nachbearbeitung zu vermeiden, muss der Fräsprozess die geforderten Toleranzen einhalten. Eine Herausforderung, die vor allem bei Werkzeugen auftritt, ist die Werkzeugabdrängung während Bearbeitung. Die Werkzeugabdrängungssimulation in SimCutPro ermöglicht eine Vorhersage von der Werkzeugabdrängung entlang der Werkzeugbahn. Kritische Stellen lassen sich somit identifizieren und eine Korrektur der Werkzeugbahn zur Kompensation dieser Werkzeugabdrängung ist bereits vor der eigentlichen Fräsbearbeitung möglich.

## Usecase: Werkzeugstandzeit

Die Fräswerkzeuge in der Fertigung von Werkzeugen verschleifen schnell und müssen regelmäßig getauscht werden. Dabei können Zeit und Geld gespart werden, wenn die Werkzeuge bei dem Erreichen eines kritischen Verschleißes getauscht werden statt auf konservativen Schätzungen basierend. Die Werkzeugverschleißsimulation in SimCutPro ermöglicht eine Vorhersage des Zeitpunkts, an dem das Werkzeug getauscht werden sollte. Darüber hinaus verschleifen Werkzeuge nicht zwangsweise gleichmäßig. Es ist denkbar, dass basierend auf der Verschleißvorhersage die Werkzeugbahn optimiert werden kann, sodass das Werkzeug gleichmäßiger über die gesamte Schneidlänge verschleißt und somit eine insgesamt höhere Standzeit erreicht wird.

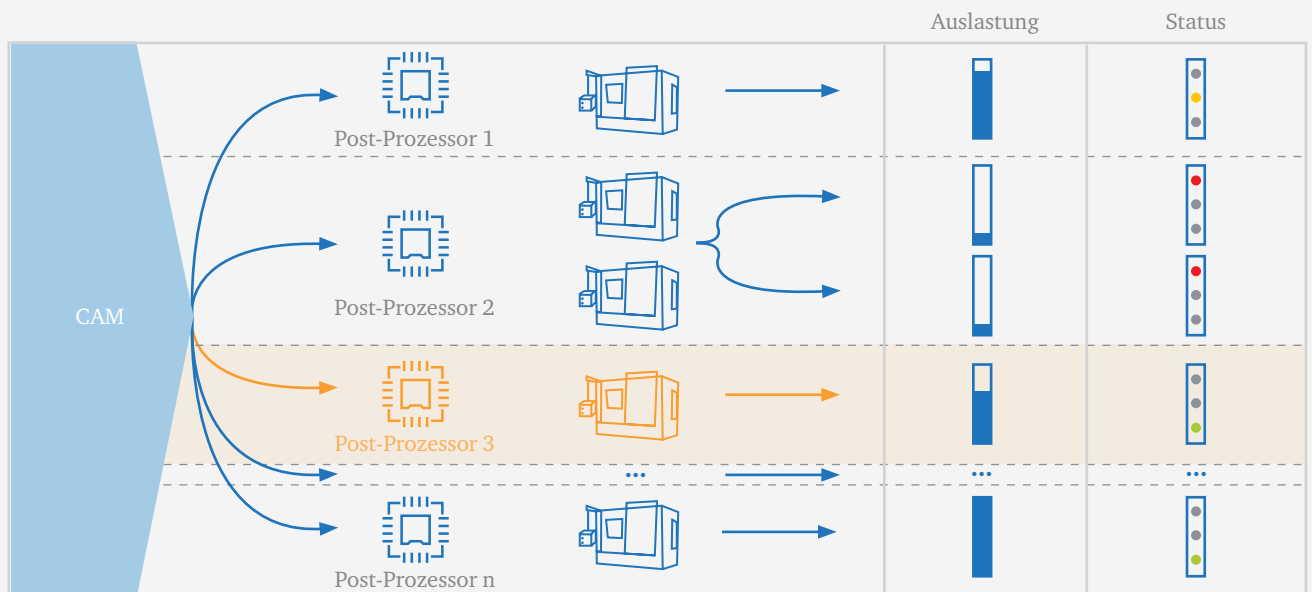
## Maschinengruppen-basierte NC-Programm-generierung

Die Ansprüche der Kunden an Unternehmen des Werkzeug- und Formenbaus sind hoch. Neben hohen Qualitätsansprüchen ist eine kurze Durchlaufzeit und die Einhaltung von Lieferterminen von Bedeutung. Oftmals werden die geplanten Tätigkeiten jedoch aufgrund gewünschter Produktänderungen des Kunden durch notwendige Konstruktionsänderungen und durch die Korrektur von Produktionsfehlern negativ beeinflusst. Im Bereich der mechanischen Fertigung können zudem Maschinenstörungen auftreten, die den Prozess der Werkzeugherstellung nachteilig beeinflussen. Um den beschriebenen Herausforderungen entgegenzuwirken, wird im Folgenden ein Vorgehen der NC-Code-Generierung beschrieben, mit dem eine erhöhte Flexibilität bei der Maschinenbelegung realisiert werden kann.

Nach Programmierung und Simulation des CAM-Programms muss ein maschinen- und steuerungsspezifischer NC-Code generiert werden. Postprozessoren erstellen basierend auf dem maschinenunabhängigen CAM-Programm ein maschinenspezifisches NC-Programm.

Im Rahmen einer flexiblen Fertigung sollten mehrere Maschinen abhängig vom Maschinentyp und verwendeter Steuerung zu Maschinengruppen zusammengefasst werden, sodass das gleiche NC-Programm innerhalb der Maschinengruppe entsprechend der aktuellen Auslastung und des Maschinenstatus verwendet werden kann. Der NC-Datensatz wird anschließend in externen Simulationsprogrammen maschinenspezifisch simuliert. Abschließend wird die Maschine festgelegt, auf welcher der Auftrag ausgeführt werden soll und die erforderlichen Daten werden der Maschine zur Verfügung gestellt.

Durch dieses Vorgehen bleibt eine prinzipielle Maschinenänderung nach der Simulation der NC-Programme ohne negative Auswirkungen, da die NC-Programme für alle Maschinen einer Gruppe vorliegen. Durch die Simulation der NC-Programme für mehrere Maschinen nach dem Postprozessor ist ein Wechsel der Maschine einfach möglich. Der Mehraufwand für diese Flexibilität und Reaktionsfähigkeit besteht lediglich in der Erstellung mehrerer NC-Programme und der Simulation dieser.





# Optimierungspotentiale der CAX-Prozesskette

Frühe Einbindung in Designprozesse und umfangreiche Dateneingangsprüfung sind Erfolgsfaktoren.

Die Herausforderungen bei der Gestaltung und fortlaufenden Optimierung der CAX-Prozesskette sind in nahezu allen Werkzeugbaubetrieben kohärent. Unabhängig davon, ob das Produkt eine Spritzgießform oder ein Stanzwerkzeug ist, externe Daten liegen in unterschiedlicher Qualität und in unterschiedlichen Formaten vor. Intern werden zum Erreichen hoher Produktivität in Einzeltechnologien spezifische CAX-Tools eingesetzt – wiederum verknüpft mit Schnittstellen. Ableiten lassen sich folglich drei übergeordnete Handlungsfelder: Schnittstellen extern (Kunde, Zulieferer), Schnittstellen intern (Systeme, Abteilungen) und schließlich Systemlandschaft. Die internen Schnittstellen und die Systemlandschaft stehen dabei in starker Abhängigkeit voneinander.

Die externen Schnittstellenformate, hin zum Kunden, sind oft gesetzt. Um Einbußen in der Datenqualität zu vermeiden, ist eine frühe Einbindung in die Kundenprozesse erforderlich. So muss es gelingen, den Produktentwicklungsprozess des Kunden beratend zu begleiten und dabei nicht nur auf fertigungs- und werkzeuggerechte Gestaltung zu achten, sondern insbesondere auch auf Designregeln. Als Beispiele ist ein einheitlicher Aufbau des Strukturbaums zu nennen oder geschlossene Flächen, die oft erst in der CAM-Programmierung, also sehr spät in der Prozesskette, bemerkt werden. Damit wird eine schnelle Anpassbarkeit des Designs möglich und Hilfsgeometrien können schneller eingebracht werden (z.B. Inaktivieren einzelner Geometrieelemente). Sind die externen Daten eingetroffen, ist eine umfassende Datenprüfung unabdingbar. Diese muss sich nach den spezifischen Anforderungen des Werkzeugbaus richten und neben den oben genannten Eigenschaften explizit die Anforderungen der internen Abteilungen Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Fertigung prüfen. Bei nicht intern weiterverwendbaren Datenformaten sollte eine frühe – also direkt nach Dateneingang – Konvertierung stattfinden.

Interne Schnittstellen entstehen durch spezifische CAX-Systeme entlang der Prozesskette. Der Auswahlprozess dieser Softwaresysteme findet in der Regel auf Basis der technischen Leistungsfähigkeit und der Lizenzkosten statt. Die Eingliederung in die bestehende Systemlandschaft wird oft nicht oder nur peripher betrachtet. Bei Investitionsentscheidungen muss zukünftig nicht nur die fachliche Einschätzung der jeweiligen Abteilung einfließen, sondern auch der übergeordnete Prozesskettengedanke. Welche nativen Schnittstellen bietet die Software? Gibt es zu vorhandenen CAX-Systemen ergänzende Module, die weitere benötigte Funktionen systemintern abdecken? Welchen technischen Nutzen haben sehr spezifische Systemeigenschaften (z.B. spezieller Fräszyklus) im Kontext einer durchgängigen Prozesskette? Wichtig ist folglich eine abteilungsneutrale Beurteilung.

Ein Konsortialprojekt mit zwölf führenden Werkzeugbaubetrieben, darunter interne und externe Betriebe, hat gezeigt, dass großes Potential in der Optimierung der CAX-Prozesskette liegt. Dieses bezieht sich zunächst maßgeblich auf die organisatorische Ebene der Prozesskette, d.h. das Zusammenwirken von Prozessschritten, Verantwortlichkeiten und Iterationsschleifen. In dem beschriebenen Projekt wurde dazu eine generische CAX-Prozesskette erarbeitet, die Elemente aus allen Werkzeugbaubetrieben enthält. Somit konnten die Fälle interne und externe Datenzulieferung, externe Auftragsvergabe und dies für unterschiedliche Werkzeugtypen abgedeckt werden. Daraus ist eine ideale Soll-Prozesskette entstanden, die als Zielbild für individuelle CAX-Prozesskettenoptimierungen geeignet ist.

Die generische CAX-Prozesskette hat klares Optimierungspotential gezeigt: Insgesamt 15 Prozessschritte wurden optimiert, fünf Konvertierungen sind entfallen und acht Iterationsschleifen sind nicht mehr erforderlich.









# Ausblick

Potentiale vorhandener Funktionalitäten der CAX-Systeme werden aktuell von den befragten Werkzeugbauunternehmen nicht vollständig genutzt

Im deutschen Werkzeugbau kann die Industrialisierung als handlungsleitendes Paradigma für die Entwicklung der Branche gesehen werden. Ausgehend von einem handwerklich geprägten Werkzeugbau mit hohen Beständen und geringer Transparenz werden etablierte Wertschöpfungsstrategien hinterfragt und eine flussorientierte Fertigung mit getakteten Fertigungs- und Montageabläufen in den Werkzeugbaubetrieben etabliert. Bedeutender Baustein des industriellen Werkzeugbaus ist dabei eine durchgängige CAX-Prozesskette mit dem Einsatz aktueller Systeme und Nutzung aller verfügbaren Funktionalitäten.

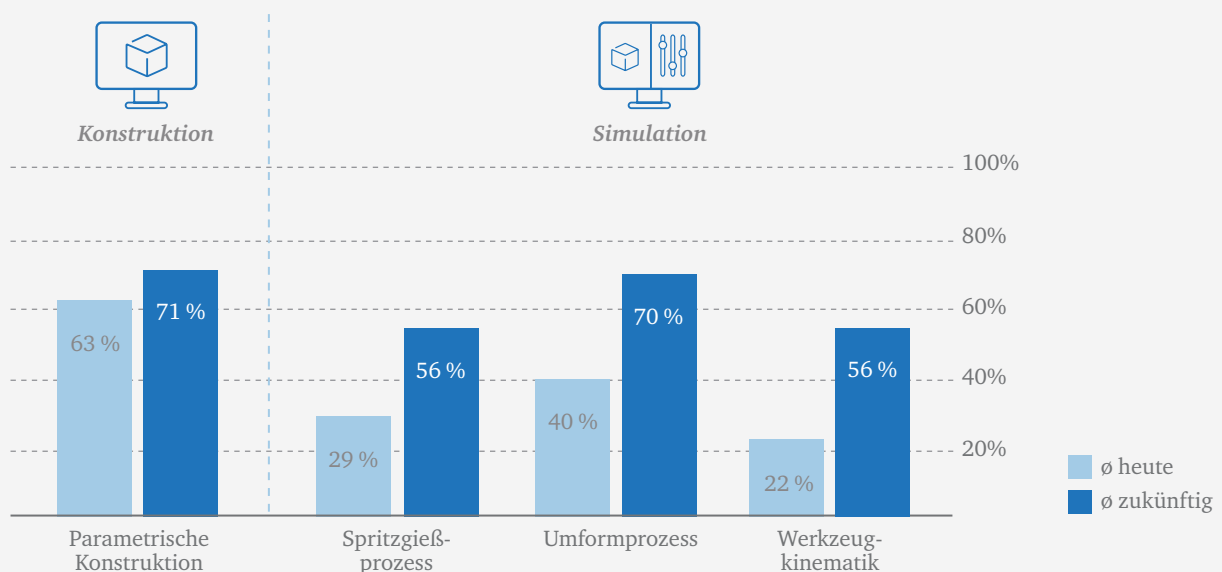
Auffällig ist jedoch, dass deutsche Werkzeugbaubetriebe zurückhaltend bei der gegenwärtigen und zukünftigen Nutzung der Funktionalitäten von CAX-Systemen sind, obwohl sie sich der Relevanz einer durchgängigen CAX-Prozesskette bewusst sind. So zeigt die Befragung der Werkzeugbauunternehmen, dass innerhalb der nächsten fünf Jahre in der Konstruktion eine parametrische Werkzeugkonstruktion priorisiert (Steigerung um 8 Prozentpunkte) wird. Beim Einsatz von Simulationssystemen wird die Simulation von Umformprozessen um 40 Prozentpunkte auf 70 % zunehmen wird. Des Weiteren wird zu-

künftig die Werkzeugkinematik bei 56 % der befragten Unternehmen simuliert, um potentielle Kollisionen einzelner Werkzeugkomponenten zu vermeiden. Zukünftig sollte die Nutzung aller Funktionalitäten der CAX-Systeme forciert werden.

Hinsichtlich der Relevanz einer durchgängigen CAX-Prozesskette sind sich die befragten Werkzeugbaubetriebe indes einig, dass mit einer durchgängigen digitalen Prozesskette zukünftig eine Reduzierung der Durchlaufzeiten, aber auch der potentiellen Fehlerquellen, realisiert werden kann. Hierfür sollten, laut den führenden Werkzeugbaubetrieben, die Ziele der Systementwicklungen einheitliche Schnittstellen und eine bessere Datennutzung sein. Denn hiermit ist der Grundstein für ein holistisches System sowie eine durchgängige Vernetzung der gesamten Fertigung gelegt. Die Befragung der Werkzeugbaubetriebe zeigt zudem, dass die zunehmende Digitalisierung des Informationsflusses und die fortschreitende Datendurchgängigkeit im Rahmen der Industrie 4.0-Entwicklungen signifikante Auswirkungen auf den deutschen Werkzeugbau, und damit auch auf die CAX-Prozesskette, haben werden.

## Fazit

Im Rahmen der Studie „Erfolgreich CAX-Prozessketten Gestalten im Werkzeugbau“ wurde entlang des Auftragsabwicklungsprozesses der Status quo bei der Verwendung von CAX-Systemen im Werkzeugbau aufgezeigt. Die Betrachtung einzelner Stationen entlang der digitalen Prozesskette angereichert mit Best-Practice-Beispielen und ausführlichen Vorstellungen einzelner Softwaresysteme ermöglicht eine detaillierte Analyse der notwendigen Voraussetzungen für zukünftige Entwicklungen im Werkzeugbau.



# Autoren

---



## **Prof. Dr. Wolfgang Boos**

Geschäftsführer

WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH

---



## **Dr. Kristian Arntz**

Abteilungsleiter Nichtkonventionelle Fertigungsverfahren und Technologieintegration

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

---



## **Marcel Prümmer**

Gruppenleiter Technologieorganisation

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

---



## **Moritz Wollbrink**

Geschäftsfeldleiter Werkzeugbau

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

---



## **Rainer Horstkotte**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Technologieorganisation

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

---



## **Mario Pothen**

Kompetenzfeldleiter Digitalisierung und Vernetzung

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

---



## **Vincent Gerretz**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Grundlagen und Technologieentwicklung in der Hochleistungszerspanung

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

---

# Unsere Studien – Strategische Entwicklung

---



*Intelligente Werkzeuge  
und datenbasierte  
Geschäftsmodelle*  
2018



*Corporate Tooling –  
Agile Tool  
Development*  
2017



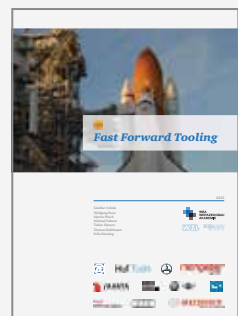
*Corporate Tooling –  
Flexible Tooling  
Organization*  
2017



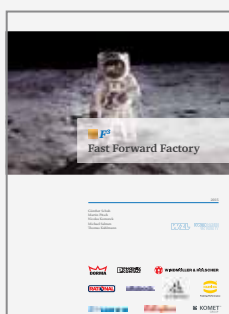
*Corporate Tooling –  
Intelligent  
Tool Manufacturing*  
2017



*Smart Tooling*  
2016



*Fast Forward Tooling*  
2015



*F3 Fast Forward  
Factory*  
2015

# Unsere Studien – Erfolgreich...

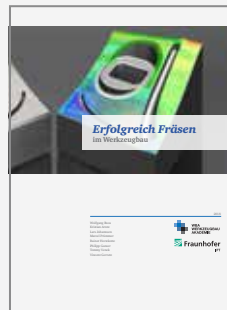
---



**Erfolgreich  
Lieferanten Managen**  
2018



**Erfolgreich  
CAX-Prozessketten  
Gestalten**  
2018



**Erfolgreich  
Fräsen**  
2018



**Erfolgreich  
Automatisieren**  
2017



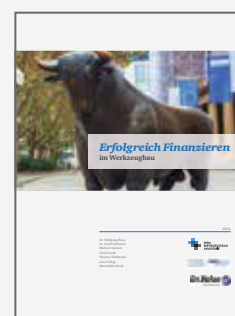
**Erfolgreich  
Restrukturieren**  
2017



**Erfolgreich  
Performance Messen**  
2017



**Erfolgreich  
Fertigungstechnologien  
Einsetzen**  
2017



**Erfolgreich  
Finanzieren**  
2016



**Erfolgreich  
Digital Vernetzen**  
2016



**Erfolgreich  
Mitarbeiter Motivieren**  
2016



**Erfolgreich  
Kalkulieren**  
2015



**Erfolgreich  
Planen**  
2015

# Unsere Studien – Tooling in...

---



*World of Tooling*  
2018



*Tooling in Czech Republic*  
2018



*Tooling in Germany*  
2018



*Tooling in China*  
2016



*Tooling in Turkey*  
2016



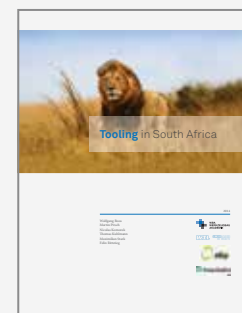
*Tooling in Germany*  
2016



*World of Tooling*  
2015



*Tooling in China*  
2015



*Tooling in South Africa*  
2014





---

## ***Herausgeber***

### **WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH**

Campus-Boulevard 30  
D-52074 Aachen

[www.werkzeugbau-akademie.de](http://www.werkzeugbau-akademie.de)

### **Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT**

Steinbachstraße 17  
D-52074 Aachen

[www.ipt.fraunhofer.de](http://www.ipt.fraunhofer.de)

978-3-946612-31-5



9 783946 612315