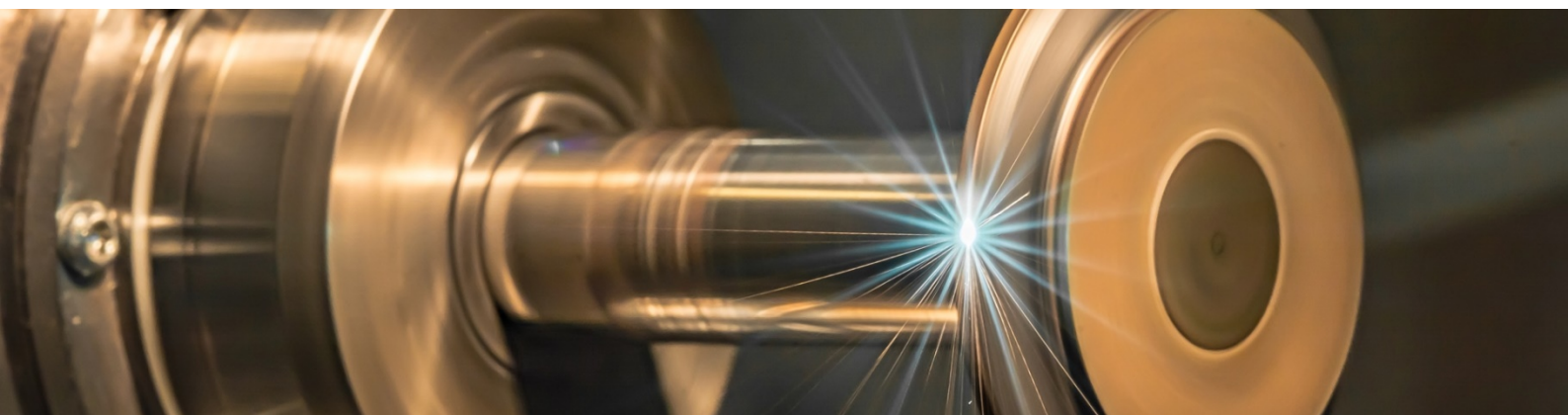
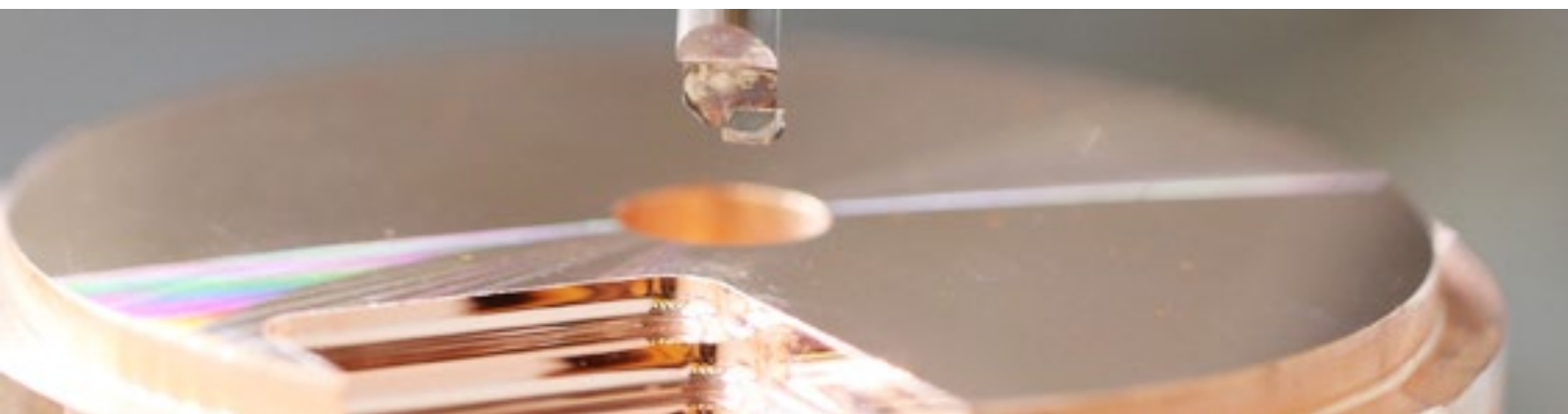




Wissenschaftlich-technischer Jahresbericht 2020



Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser

Das Jahr 2020 war für die inspire AG trotz der Corona-Situation ein sehr erfolgreiches. inspire setzte sich stark für den Wissens- und Technologietransfer zur Schweizer Industrie ein, indem viele für die Industrie wichtige bilaterale oder von der öffentlichen Hand geförderter Projekte durchgeführt wurden. Das Ziel hiervon ist letztlich die Stärkung der Innovationskraft von Schweizer Industrieunternehmen.

Die Anzahl der bearbeiteten Industrieprojekte hat gegenüber dem Vorjahr erneut zugenommen und lag Ende 2020 bei 83 grösseren Projekten, davon 38 Innosuisse-Projekte, 5 EU-, BFE- und Interreg-Projekte und 40 grössere bilaterale Projekte (> CHF 15'000).

Insbesondere in den Bereichen Prozessoptimierung und Digitalisierung haben die Aktivitäten stark zugenommen. Die sehr gute Projektsituation erforderte die Anstellung zusätzlicher Mitarbeitender. Ende 2020 hatte inspire 102 Mitarbeitende (89.8 Vollzeitäquivalente).

Die im Rahmen der strategischen Partnerschaft mit der ETH Zürich etablierte, enge Forschungs-kooperation mit inzwischen acht ETH-Instituten/Professuren ist zentral für die inspire-Fachbereiche Werkzeugmaschinen und Fertigung, Additive Manufacturing, Composite Structures, Mechanical Integrity, Virtual Production (Umformtechnik), Product Design und Konstruktion, Automatisierung und Optimierung, Advanced Manufacturing sowie Intelligent Maintenance. Dadurch hat inspire Zugang zum Know-how und den neusten Entwicklungen an den jeweiligen ETH-Instituten. Im Gegenzug erbringen inspire-Mitarbeitende für die ETH-Institute erhebliche Lehrleistungen in Form von Vorlesungen und Betreuung von studentischen Arbeiten und führen eine grosse Zahl vom Bund geförderter Projekte mit Schweizer KMU durch, die von den ETH-Instituten in dieser Anzahl und Ausrichtung nicht bewältigt werden könnten.

Die guten, in den vergangenen Jahren aufgebauten Kontakte zur EPFL, zur Empa, zu CSEM zu RhySearch und zu diversen Fachhochschulen wie BFH, FHNW, HSLU, OST, SUPSI, ZHAW und seit 2019 auch zu HES-SO Fribourg und HE-Arc wurden weiter gepflegt und vertieft. Aus diesen Kontakten sind in den vergangenen Jahren diverse Kooperation entstanden, die meisten davon auf Projektbasis, ein paar jedoch mündeten erfreulicherweise in eine längerfristige strategische Zusammenarbeit.

Die von inspire aktiv geförderte interdisziplinäre und gruppenübergreifende Zusammenarbeit in Projekten unter mehreren Gruppen oder ETH-Instituten wurde weiter intensiviert und hat zu diversen neuen Projekten geführt. Die gemeinsamen Kompetenzen und Ressourcen ermöglichen die erfolgreiche Umsetzung von komplexen Projekten beispielsweise im Bereich der Digitalisierung.

Ein solides Ergebnis hatte trotz der Corona-Situation auch die inspire Academy. Der Schulungsbereich mit Schwergewicht auf Lean Six Sigma / Operational Excellence konnte 2020 unter Einhaltung der Hygiene- und Verhaltensvorschriften des BAG alle öffentlichen Kurse durchführen, allerdings mit einer eingeschränkten Teilnehmeranzahl. Die meisten Firmenkurse mussten hingegen ins Jahr 2021 verschoben werden.

Dieser wissenschaftlich-technische Jahresbericht 2020 zeigt die grosse Kompetenz der Mitarbeitenden auf den verschiedenen Fachgebieten und gibt einen Einblick in ausgewählte Projekte der inspire AG.

Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre!

8005 Zürich, Mai 2021

inspire AG

Dr. Ralf Gerdes, CEO

Dr. Martin Stöckli, COO

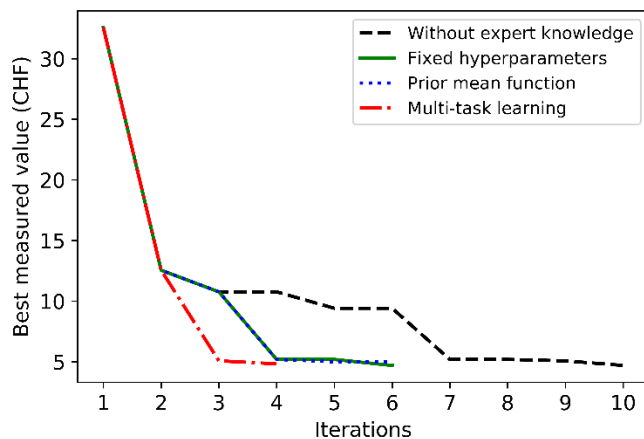
Inhaltsverzeichnis

Fachbereich: Maschinenkonzepte
Leitprofessor: Prof. Dr. Konrad Wegener
Gruppe: inspire-iwf – Maschinen
Leitung: Lukas Weiss

1. Schwergewichte Forschung und WTT

1.1 Modellbasierte Prozessoptimierung

Durch die Trends in der Fertigung hin zu kleineren Losgrößen und höheren Anforderungen an die Qualität von immer komplexeren Werkstücken und gleichzeitig anhaltendem Kostendruck steigen die Anforderungen an den Einrichtprozess. Das Einrichten eines Zerspansungsprozesses wie Schleifen oder Drehen hängt heute stark von den Kenntnissen und Verfügbarkeit des Bedieners ab. Die automatische Prozessoptimierung hingegen scheitert daran, dass regelbasierte oder physikalische Ansätze nur einen beschränkten Anwendungsbereich abdecken und somit für neue Fertigungsaufträge ungeeignet sind.



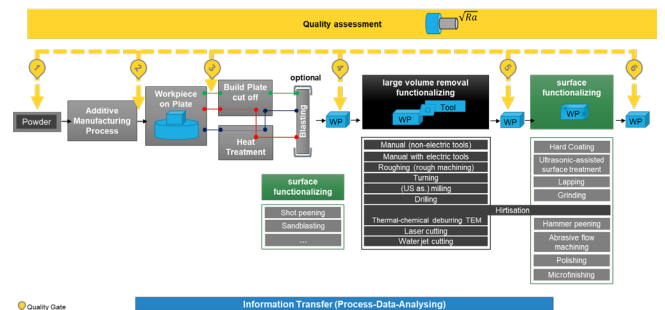
Konvergenzverhalten für Modelle ohne und mit Vorwissen. Modelle mit Vorwissen (grüne, blaue und rote Kurve) reduzieren die Anzahl Versuche bis zum Finden des Optimums stark gegenüber einem Modell ohne Vorwissen (schwarz).

In der Vergangenheit wurden bei inspire zum Bestimmen der Prozessparameter bei Dreh- und Schleifprozessen erfolgreich ein Gauss-Prozess-Modell mit einer Bayes'schen Optimierung kombiniert. Verglichen mit bestehenden Lösungen erwies sich der gewählte Ansatz als sehr dateneffizient und universell einsetzbar. Um die Dateneffizienz weiter zu erhöhen, wurden verschiedene Methoden zum Einbinden von Vorwissen und für den Transfer von Wissen am Drehprozess getestet. Alle getesteten Methoden waren in der Lage, die Zahl der Experimente gegenüber dem Standardansatz um 40% zu reduzieren. Das Einbinden von Vorwissen führte zu einer Performance, welche mit einem erfahrenen Bediener vergleichbar ist, der im Prinzip gleich vorgeht: Auch er kombiniert sein Vorwissen aus vergleichbaren Anwendungen und/oder physikalischen Zusammenhängen, also sein implizites Modell, mit Feedback welches er durch Experimente erhält.

1.2 Ressourceneffizienz in der Fertigung

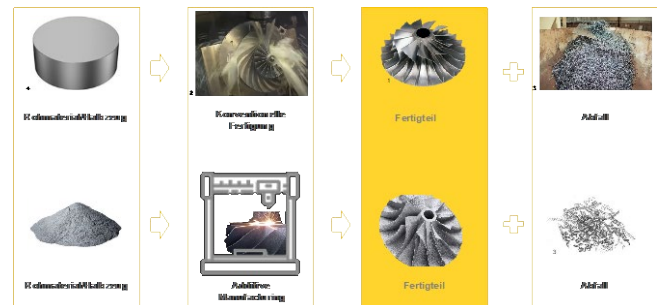
Additive Manufacturing (AM) ist in der Metallverarbeitung eine Nischentechnologie, die in den letzten Jahren sehr viel Aufmerksamkeit erfahren hat, stark beforscht wird und in ausgewählten Anwendungen grosse Vorteile geltend machen kann.

Allerdings erlaubt AM in aller Regel nicht die Herstellung von fertigen Teilen, sondern von Rohlingen, die in der Folge mit konventionellen Verfahren, also subtraktiv durch Materialabtrag ihre endgültige Form und Funktion erhalten. Die Frage, welchen Einfluss AM auf die Energie- und Ressourceneffizienz hat, wird als ein Aspekt im Rahmen eines Konsortiums mit 13 europäischen Hochschulen und Forschungsinstituten breiter untersucht. Dabei werden komplette Prozessketten betrachtet, welche AM, Wärmebehandlungen, formgebende und oberflächenbezogene Bearbeitungen einschliessen.



Additiv-subtraktive Prozessketten von der additiven Rohlingherstellung, über Wärme- und Oberflächenbehandlungen, funktionserzeugende Prozesse wie Fräsen bis hin zu den Oberflächenbearbeitungen wie Polieren

Obschon der grosse Vorteil von AM darin besteht, direkt einen Rohling herzustellen, der schon weitgehend dem Fertigteil entspricht (sog. *Near Net Shape*), wird die Prozesskette nicht signifikant verkürzt. Aus energetischer Sicht ist festzuhalten, dass die konventionelle subtraktive Herstellung eines Rohlings relativ wenig Energie benötigt, im Gegensatz zu Wärmebehandlungen und zu Oberflächenbearbeitungen. Bedeutend sind hingegen die beiden Fragen der Materialeffizienz und der resultierenden Bauteileigenschaften.

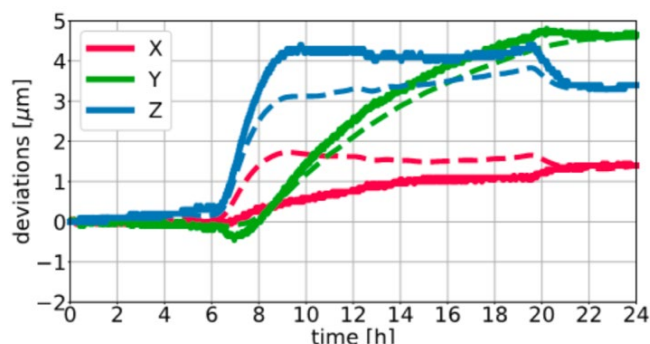


Der direkte Vergleich konventionell subtraktiver, d.h. zerspanender Fertigung und AM wie hier dargestellt wird oft versucht, ist aber von begrenzter praktischer Relevanz. Für viele Werkstücke kommt aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nur eine der beiden Fertigungsstrategien in Frage

Die Betrachtung der Materialeffizienz zeigt auf, dass AM trotz *Near Net Shape* in vielen Fällen keine Vorteile aufweist. Anders sieht es aus bei den Bauteileigenschaften, die durch erhöhte Gestaltungsfreiheit oder extremen Leichtbau in den Anwendungen zu Ressourceneinsparungen führen können, welche den Aufwand bei der Herstellung um Größenordnungen übertreffen können.

1.3 Thermische Stabilisierung von Werkzeugmaschinen durch den Einsatz von Latentspeicherdispersionen

In vorangehenden Projekten war es gelungen, die Temperaturgradienten und damit die thermische Stabilität von Bearbeitungsspindeln in Werkzeugmaschinen durch konstruktive Massnahmen substanziell zu verbessern. Hingegen blieb die erreichte Temperaturstabilisierung durch die Nutzung der latenten Wärmekapazität von Dispersionen, die am Kompetenzzentrum Thermal Storage der Hochschule Luzern entwickelt werden, hinter den Erwartungen zurück. Die beharrlich weitergeführte Entwicklung dieser Dispersionen brachte im Berichtsjahr den Durchbruch. Bei der Einsatztemperatur von beispielsweise 23°C konnte die Wärmekapazität der Kühlflüssigkeit auf ein Vielfaches von Wasser gesteigert werden. Damit sind Maschinenkühlungen möglich, die praktisch keine Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf aufweisen.



Beispiel der thermischen Verlagerungen am TCP (Tool Center Point) einer Werkzeugmaschine in den Richtungen X, Y, Z, bei Änderung des Betriebszustands nach 6 und nach 20 Stunden; gestrichelt ist das vorab simulierte Verhalten, ausgezogen sind die Messwerte; vertikal ist ein Teilstrich eine Veränderung resp. eine Abweichung von 1 Mikrometer

Die Auswirkungen der verbesserten Kühlung und von konstruktiven Änderung auf die mechanischen Verlagerungen – und damit auf die Fertigungsgenauigkeit – konnten in der Simulation bis auf einzelne Mikrometer genau vorhergesagt werden. Dabei kam das Softwaretool MORE zum Einsatz, dessen Anwendung bei den Industriepartnern im Rahmen des Projekts praktisch erprobt und dabei das notwendige Applikations-Know-how transferiert wurde. Die verbesserten Simulationsmöglichkeiten können nicht nur genutzt werden, um während der Entwicklung die Konstruktion thermisch zu optimieren. Sie dienen später im Betrieb auch dazu, die Abweichungen durch Kompensation zu minimieren.

2. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|-------------------|---|------------------------|----------------|
| KTI 26551 | Robuster Hochleistungsflachriemen mit signifikant verbesserter Lebensdauer | 1.11.2017 – 31.10.2020 | M. Zogg |
| Innosuisse 32791 | DeltaZero 4 SYS: Optimierung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen | 1.1.2019 – 30.6.2021 | L. Weiss |
| Innosuisse 31695 | DISG: Data-driven insights for smart grinding | 1.3.2019 – 31.7.2021 | A. Rupenyan |
| BFE SI/501939-01 | EE-Proc-Add: Energieeffiziente Bearbeitung von Additiv-Bauteilen | 15.9.2019 – 31.10.2021 | L. Weiss |
| Innosuisse 37896 | ACTIV: Adaptive Coating Tracker & In-situ Verification | 1.11.2019 – 31.10.2022 | L. Weiss |
| Innosuisse 38190 | Recycling von Prepregabfällen zu neuen und hochwertigen Produkten | 1.11.2019 – 31.7.2021 | M. Zogg |
| Innosuisse 40150 | BigValve 2.0 | 1.1.2020 – 31.12.2021 | L. Weiss |
| Bilateral | Mineralguss: Materialforschung und Applikationsentwicklung (Fortsetzung) | 1.1.2020 – 31.12.2020 | L. Weiss |
| Bilateral | Digitale Fabrik: Innovative MES Implementierung | 1.1.2020 – 31.12.2020 | T. Gittler |
| Multilateral ARCM | Inoxidage: Zerspanung von nickelfreien rostfreien Stählen | 1.1.2020 – 31.12.2020 | L. Weiss |
| Innosuisse 32835 | Décolleteur 4.0 | 1.5.2019 – 30.4.2021 | A. Rupenyan |
| Innosuisse 43052 | Turbopredictions | 1.8.2020 – 31.7.2022 | L. Weiss |

3. Publikationen im Berichtsjahr

| Autoren | Titel | Erschienen in |
|--|---|--|
| M. Maier, A. Rupenyan, C. Bobst, K. Wegener | Self-optimizing grinding machines using Gaussian process models and constrained Bayesian optimization | The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(1): p. 539-552 |
| M. Maier, A. Rupenyan, S. Scholze, K. Wegener | Einrichten von Schleifmaschinen auf der Basis der Bayesschen Optimierung | Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 2020 |
| E. Relea, V. Urundolil, A. Sanchez, C. Geschnitzer Bärnthaler, M. Zogg, L. Weiss, K. Wegener | Utilization of CFRP in high-speed stamping presses and its gigacycle fatigue testing at resonance frequency | Int. J. of Automation Technology, 2020, vol. 14, issue 2 |
| R. Lorenz, T. Gittler | Help me to help you – The role of AI in supporting manufacturing workers | The 2020 WorldManufacturing Report: Manufacturing in the age of Artificial Intelligence, 2020, World Manufacturing Foundation, ISBN: 978-88-94386-13-4 |
| T. Gittler, S. Scholze, A. Rupenyan, K. Wegener | Machine Tool Component Health Identification with Unsupervised Learning | J. Manuf. Mater. Process. 2020, 4, 86; doi:10.3390/jmmp4030086 |
| T. Gittler, F. Stoop, D. Kryscio, L. Weiss, K. Wegener | Condition monitoring system for machine tool auxiliaries | Procedia CIRP 88 (2020) 358–363 |

Fachbereich: Simulatin und Messtechnik
Leitprofessor: Prof. Dr. Konrad Wegener
Gruppe: inspire-iwf – Maschinenmesstechnik / Simulation
Leitung: Dr. Sascha Weikert

1. Schwergewichte Forschung und WTT

1.1 Analyse von Werkzeugmaschinen, Simulation und Messtechnik

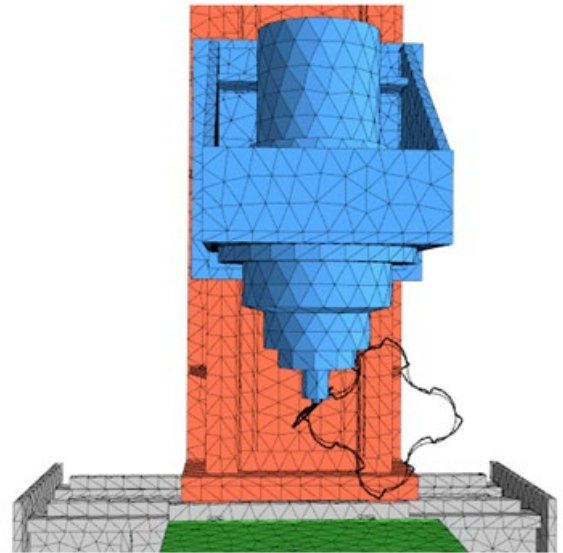
Die Simulation des statischen, dynamischen und thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen erlaubt die umfassende Überprüfung und Optimierung dieser Systeme bereits in der Designphase, aber auch im Fall von Störungen oder bei auftretenden Abweichungen im Betrieb. Von ausschlaggebender Bedeutung ist hierbei das Verhalten zwischen Werkzeug und Werkstück am TCP (Tool Center Point). Die Bahn des TCP wird beeinflusst durch das Zusammenspiel der Strukturkomponenten und der geregelten Antriebe. Für das Regelverhalten ist die Anordnung der Messsysteme von zentraler Bedeutung. Der Einfluss der aktuellen Achskonfiguration (Achspeditionen) auf das Verhalten am TCP ist bei der Analyse zu berücksichtigen und somit vom einzusetzenden Simulationswerkzeug abzubilden.

1.2 MORE – Digitale Zwillinge von Werkzeugmaschinen

inspire stellt mit MORE (www.more-simulations.ch) sowohl Software als auch Support und Simulationsdienstleistungen für die Industrie zur Verfügung. Damit wird den Werkzeugmaschinenherstellern jeglicher Grösse ein Zugang zu virtuellen Prototypen und digitalen Zwillingen von Werkzeugmaschinen in Bezug auf das mechanische, mechatronische und thermomechanische Verhalten ermöglicht.

Im Berichtsjahr wurden der Ausbau und die Verbesserung der Dienste, sowie die Weiterführung der Entwicklung und Forschung mit der Gründung eines dedizierten Teams in der Gruppe Maschinenmesstechnik / Simulation beschlossen.

Aus technischer Sicht wurden einige Verbesserungen erzielt. Einerseits konnte mit einer erweiterten Modellreduktion eine Beschleunigung der Simulationszeit für typische Anwendungen um Faktor 10 erzielt werden. Des Weiteren wurde der Grundstein für nichtlineare Kopplungen von Komponenten gelegt. Als erste konkrete Anwendung steht dem Benutzer neu die Haftreibungsmo- dellierung zur Verfügung. Zudem wurde die Software MORE mit zahlreichen Anpassung weiter in der Bedienerfreundlichkeit verbessert.



Ergebnis einer Simulation mit Haftreibung in den Linearführungen. An der vom TCP gezeichneten Kurve erkennt man den durch die Haftreibung hervorgerufenen Umkehrspiegeffekt an den Achsumkehrpunkten.

1.3 Optimierung einer Stickmaschine

Ein KTI-Projekt zur dynamischen Analyse und Optimierung von Stickmaschinen wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Inhalt der Arbeiten war die mechatronische Modellierung einer Stickmaschine mit der Zielsetzung, durch ein verbessertes Systemverständnis konstruktive Massnahmen zu finden, um die Hubzahl der Maschine deutlich zu steigern. Als zusätzliche Anforderung hat sich im Rahmen des Projekts die Schallemission der Maschine herausgestellt.

Als Modellierungswerkzeug kommt MORE zum Einsatz. Die Spezifika von Stickmaschinen (sehr grosse Anzahl von Teilen, Kurvenscheiben und zyklische Bewegungen) erforderte die Implementation einer Reihe zusätzlicher Funktionalitäten.

Basierend auf einer eingehenden Analyse der Stickmaschine konnten Ansatzpunkte für eine dynamische Verbesserung des Verhaltens lokalisiert werden. Durch Modifikation der Kurvenscheibenprofile konnte bei gleichzeitiger Beibehaltung der Stickqualität die Maschinenanregung signifikant reduziert und als Verbesserung bereits in der Serie umgesetzt werden.

1.4 Laser Scraping

Das 2019 gestartete Innosuisse-Projekt zur patentierten Kombination von geometrischer Messtechnik, Simulation und Bearbeitung mittels Ultra-Kurz-Puls (UKP)-Laser zur Korrektur von Abweichungen an Linearführungen von Werkzeugmaschinen mit dem Titel «Laser Scraping», wurde 2020 weiterhin intensiv bearbeitet. Das Konzept besteht darin, auf Basis gemessener Bauteilabweichungen und berechneter elastischer Durchbiegungen infolge von Schwerkraft, Korrekturen zu bestimmen, die dann mittels UKP-Laser auf Führungsschienen, Folien oder Strukturkomponenten aufgebracht werden. Der Vorteil des hier gewählten

Verfahrens liegt darin, aufwändige manuelle Schabbearbeitung zu eliminieren.

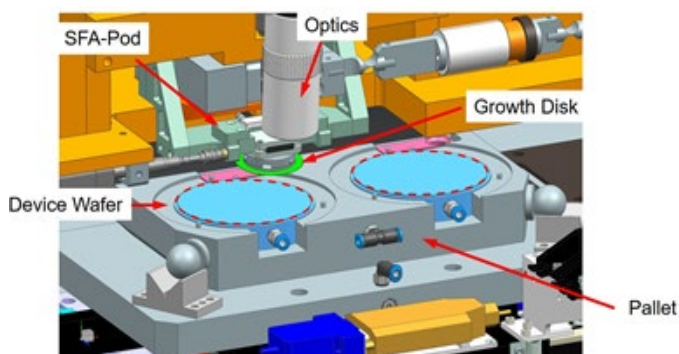
Das Innosuisse-Projekt beinhaltet die Vorbereitung der industriellen Umsetzung des Verfahrens. In der Zwischenzeit konnten die Umsetzung prototypisch durchgeführt werden. Die praxistaugliche Softwareimplementierung des Verfahrens, die Entwicklung spezifischer Messverfahren und die Optimierung der Laserbearbeitung bilden neben der Untersuchung von anwendungsspezifischen Teilaspekten den Schwerpunkt der Arbeiten.

1.5 SFA-AM, Nano Assembly

Ein ETH-Projekt im Rahmen der Strategic Focus Area - Advanced Manufacturing (SFA - AM) der ETHZ beinhaltet die Automatisierung der Montage (Platzierung) von Nanoröhrchen (Single Walled Nanotubes, SWNTs) zur Erstellung von Gas-Sensoren.

Nanoröhrchen mit ca. 15 μm Länge und 10 nm Durchmesser werden zunächst auf einer Growth Disk wachsen gelassen und mittels Raman Spektroskopie lokalisiert. Anhand der festgestellten SWNT-Positionen werden dann die einzelnen SWNTs an speziellen Orten auf dem Device Wafer abgestreift. Growth Disk und Device Wafer sind hierfür in vier Raumrichtungen im μm -Bereich gegeneinander automatisch auszurichten. Für den Montagevorgang wurde ein massgeschneidertes Maschinenkonzept mit insgesamt 9 Achsen für einen vollautomatischen Ablauf entwickelt und realisiert. Kernelemente des Maschinenkonzepts sind die eingesetzte optische Referenzierung und die aufgabenspezifisch realisierte Parallelkinematik (SFA-Pod) für drei Freiheitsgrade. Eine XY-Kinematik zur Positionierung des Wafers (Device Wafer) auf einer Vakuumpalette erlaubt hierbei eine grosse Autonomie der Anlage. Die Growth Disk, mit einem Durchmesser von 39 mm ihrerseits erlaubt das Handling von bis zu 6'000 SWNTs.

Die Zielsetzung des Systems ist schlussendlich die Platzierung von 1'000 SWNTs pro Stunde. Weitere Optimierungen des Anlagenkonzepts, der Regelung und der Bewegungsführung in der weiteren Dauer des Projekts sind hierfür jedoch erforderlich.



Gesamtdarstellung des Systems zur Montage von SWNTs mit den Elementen SFA-Pod, Optics, Device Wafer, Growth Disk, Pallet und XY-stage (unter Pallet angeordnet)

2. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|-----------|---|----------------------|----------------|
| KTI 28319 | Schiffli 900 - Die nächste Generation der Hochleistungs-Stick-Bearbeitung | 1.4.2018 – 31.5.2020 | S. Weikert |
| KTI 35785 | LaserScraping | 1.5.2019 – 31.7.2021 | S. Weikert |
| MORe | Transfer von MORe in der Industrie (Schulung / Support) | laufend | D. Spescha |
| SFA-AM | Nano-Assembly | 1.4.2018 – 31.7.2022 | S. Weikert |

3. Publikationen im Berichtsjahr

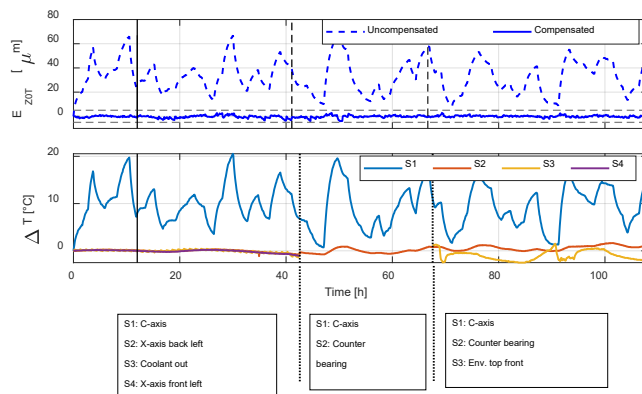
| Autoren | Titel | Erschienen in |
|---|--|--|
| P. Hernández Becerro | Efficient Thermal Error Models of Machine Tools | Diss. ETH Zürich Nr. 267766 https://doi.org/10.3929/ethz-b-000449279 |
| P. Hernández Becerro, D. Spescha, K. Wegener | Model order reduction of thermo-mechanical models with parametric convective boundary conditions: focus on machine tools | Computational Mechanics https://doi.org/10.1007/s00466-020-01926-x |
| P. Hernández Becerro, J. Purtschert, J. Konvicka, C. Buesser, D. Schranz, J. Mayr, K. Wegener | Reduced-order model of the environmental variation error of a precision 5-axis machine tool | ASME Journal Manufacturing Science and Engineering, https://doi.org/10.1115/1.4047739 |
| P. Hernández Becerro, J. Mayr, K. Wegener | Reduced thermo-mechanical model of a rotary table of a 5-axis precision machine tool | ASPE Spring Topical Meeting Design and Control of Precision Mechatronic Systems, Cambridge MA, USA, https://doi.org/10.3929/ethz-b-000424410 |
| P. Hernández Becerro, J. Mayr, K. Wegener | Efficient thermo-mechanical model of a precision 5-axis machine tool | euspens Special Interest Group Meeting on Thermal Issues, Aachen, Germany |
| T. Semm, D. Spescha, N. Ceresa, M. Zaeh, K. Wegener | Efficient Dynamic Machine Tool Simulation with Included Damping and Linearized Friction Effects | Procedia CIRP, 93, 1442–1447, https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.141 |
| D. Spescha, S. Weikert, K. Wegener | Simulation in the Design of Machine Tools | Yan XT., Bradley D., Russell D., Moore P. (eds) Reinventing Mechatronics. Springer, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-29131-0_11 |

Fachbereich: Thermische Simulation
Leitprofessor: Prof. Dr. Konrad Wegener
Gruppe: inspire-iwf – Therm. Simulation
Leitung: Dr. Josef Mayr

1. Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen

1.1 Adaptive Modelleingangsauswahl zur thermischen Kompensation

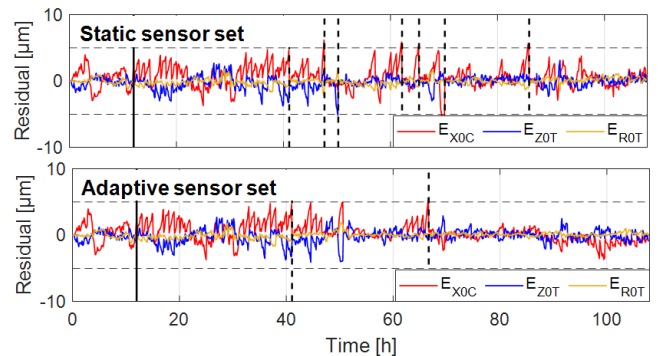
Modellbasierte thermische Kompensationsstrategien sind ein vielversprechender Ansatz, um eine effiziente und kostengünstige Produktion von hochpräzisen Bauteilen auf 5-Achs-Werkzeugmaschinen zu realisieren. Insbesondere empirische Kompensationsmodelle, die einen Zusammenhang zwischen den gemessenen Temperaturen und den daraus resultierenden thermischen Fehlern herstellen, sind geeignet, um die thermischen Fehler von Werkzeugmaschinen zu modellieren und zu kompensieren. Die adaptive thermische Kompensation, die empirische Kompensationsmodelle mit In-Prozessmessungen kombiniert, ermöglicht durch automatische Modellupdates auch bei sich ändernden thermischen Randbedingungen robuste Kompensationsergebnisse.



Kompensationsergebnisse für die axiale Tischausdehnung bei Verwendung der adaptiven thermischen Kompensation in Kombination mit der adaptiven Modelleingangsauswahl

Die Kompensationsgüte von empirischen Kompensationsmodellen ist stark von den verwendeten Modelleingängen abhängig. Aus diesem Grund wird eine Methode zur adaptiven Auswahl von Modelleingängen entwickelt, die neben den Parameterupdates auch eine automatische Rekalibrierung der Modelleingänge ermöglicht. Diese neu entwickelte Methode realisiert eine individuelle und automatisierte Auswahl der relevanten Modelleingänge für jedes Kompensationsmodell aus den Sensoren, die auf der betrachteten Werkzeugmaschine zur Verfügung stehen. Die Kompensationsergebnisse für die axiale Tischausdehnung unter Anwendung der adaptiven thermischen Kompensation und der adaptiven Modelleingangsauswahl sind in der nachfolgenden Abbildung illustriert. Die durchgeführten Experimente zeigen, dass die Robustheit der thermischen Kompensation durch die adaptive Modelleingangsauswahl deutlich gesteigert werden kann. Dies

ist in der folgenden Abbildung beispielhaft für die translatorischen thermischen Fehler einer C-Achse dargestellt. Bei Kompensationsmodellen mit einem statischen Sensorset werden die Modelleingänge nur einmalig in der Parameteridentifikationsphase ausgewählt und bei einer Toleranzbandüberschreitung werden lediglich die Modellparameter angepasst. Verwenden die Kompensationsmodelle hingegen ein adaptives Sensorset, werden bei einer Toleranzbandüberschreitung die Modelleingänge und die Modellparameter rekalibriert. Durch die Verwendung von Kompensationsmodellen mit einem adaptiven Sensorset, kann die Anzahl der Toleranzbandüberschreitungen deutlich reduziert werden. Der Produktivitätsverlust aufgrund der benötigten Messungen kann somit um 45% reduziert werden.



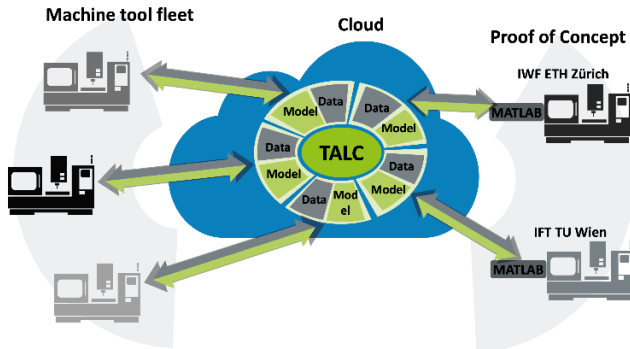
Kompensationsergebnisse für die translatorischen thermischen Fehler einer C-Achse für Modelle mit statischen und adaptiven Modelleingängen

Die neu entwickelte Methode zur adaptiven Modelleingangsauswahl resultiert in einem hohen Automatisierungsgrad beim Erstellen von thermischen Kompensationsmodellen und bildet die Grundlage für selbstlernende Kompensationsmodelle, die sich effizient an ort- und situationsbezogenen Gegebenheiten adaptieren können.

1.2 Flottenlernen bei der thermischen Kompensation von Werkzeugmaschinen

Die thermische Fehlerkompensation in Werkzeugmaschinen fördert eine nachhaltige Produktion. Die am inspire/IWF entwickelte Thermal Adaptive Learning Control (TALC) und maschinelles Lernen sind erforderliche Prinzipien dafür. "Flottenlernen" und "föderales Lernen" sind Schlüsselressourcen zur Entwicklung nachhaltiger Werkzeugmaschinenflotten in Bezug auf thermisch induzierte Fehler. Das Ziel ist es, jede Maschine der Flotte in ein lernendes Netzwerk zu integrieren und zwar durch den Einsatz von zentralisierten Cloud-Servern und dediziertem Edge-Computing. Die Herausforderung besteht darin, die Unabhängigkeit der einzelnen Werkzeugmaschinen hoch zu halten und das Lernen der gesamten Flotte zu nutzen. Das erstmalig in einer Kooperation mit der TU Wien realisierte System wird mit der Kompensation der Umgebungseinflüsse für zwei Werkzeugmaschinen desselben Typs validiert, von denen sich eine in Zürich und die andere in Wien befindet. Bei der Kommunikation zur zentralen TALC-Cloud wird zwischen maschinen-agnostischen und ma-

schinen-spezifischen Daten unterschieden. Die folgende Abbildung veranschaulicht den allgemeinen Kommunikationsaufbau. Auf der rechten Seite sind die Proof-of-Concept-Werkzeugmaschinen aus Zürich und Wien dargestellt. Die grünen Teile verdeutlichen die Modellparameter-Kommunikation zwischen dem zentralen TALC-Modell und dem Edge-Device auf jeder Maschine dar. Die grauen Teile sind die maschinenspezifischen Temperatur- und Fehlerdaten, die optional in der Cloud zur weiteren Analyse gespeichert werden können.



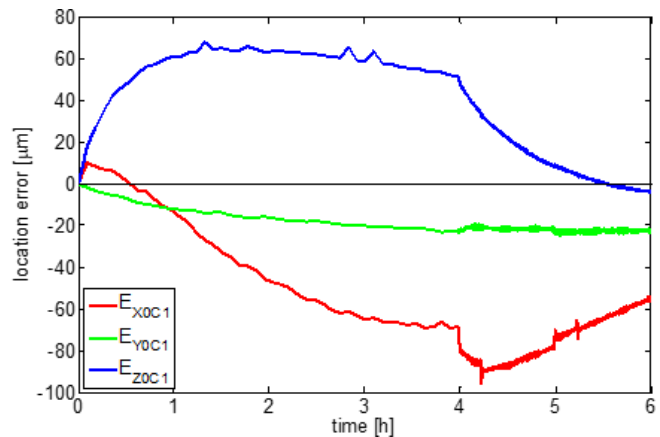
Cloud-Kommunikationskonzept mit maschinenspezifischen und maschinen-agnostischen Daten

Die Verbindung von der Werkzeugmaschinensteuerung zur Cloud wird durch eine Distributed Numerical Control (DNC) Schnittstelle auf der Maschinenseite realisiert. Diese DNC erfasst Informationen über den Maschinenstatus, TCP-Fehler und allgemeine Prozessinformationen über das FOCAS 2-Protokoll. Diese Informationen werden mit dem Edge-Node kommuniziert, der durch einen PC repräsentiert wird, auf dem MATLAB läuft und der mit der ThingSpeak-Cloud kommuniziert. Darüber hinaus werden die Temperaturdaten auch von Temperatursensoren erfasst, die in einem Busnetzwerk angeordnet sind. Der Vorteil dieses Edge-Node-Aufbaus liegt in der Zuverlässigkeit und Sicherheit des vorgeschlagenen Ansatzes. Die Werkzeugmaschine ist auch bei einem Verbindungsverlust zum zentralen Server noch in Betrieb. Dies ist ein wichtiger Aspekt für die Robustheit in der Anwendung unter realen Bedingungen. Auch die Sicherheit der sensiblen Daten über den Zustand der Werkstatt und des NC-Programms ist gewährleistet, denn entsprechende Daten verlassen die Umgebung des MT-Benutzers nicht.

1.3 Thermisches Verhalten von Dreh-Fräs-Zentren

Für die Untersuchungen zum thermischen Verhalten von Dreh-Fräs-Zentren, wird ein neuer Messaufbau, abgeleitet von dem in der ISO 230-3 angegebenen Aufbau, entwickelt. Für den erweiterten Messaufbau wird die Messunsicherheit in Anlehnung an den Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement berechnet und minimiert. Der Aufbau ermöglicht die Messung der Relativverlagerungen aller drei Spindeln zueinander. Mit dem Messaufbau wird sowohl der Einfluss der Umgebung mit dem Environmental Variation Error Test als auch der Einfluss sich drehender Spindeln zueinander untersucht. Die Werkzeugmaschine befindet sich in einer nicht klimatisierten Fertigungshalle mit Tages Temperaturschwankungen von bis zu 12 K über 24 h.

Es treten bei der untersuchten Maschine durch die sich gegenseitig beeinflussenden Spindeln nichtlineare TCP-Verlagerungen auf.



Thermische Positionfehler gemessen an Hauptspindel S1 bei einer Rotationsgeschwindigkeit von $5'000 \text{ min}^{-1}$

2. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|--------------------|--|-------------------------|----------------|
| Innosuisse 47799.1 | Kombination von Luft- und Magnetlagern für den Einsatz in hochpräzisions Werkzeugmaschinen | 1.11.2020 – 31.10.2022 | J. Mayr |
| ACDP | MFP Thermisches Verhalten an der NMV 5000 | 01.06.2020 – 31.03.2021 | J. Mayr |

3. Publikationen im Berichtsjahr

| Autoren | Titel | Erschienen in |
|---|---|--|
| J. Mayr, P. Schöni, K. Wegener | Thermal behavior of a Mill-Turn-Centre | The Proceedings of MTTRF 2020 Meeting |
| N. Zimmermann, S. Lang, P. Blaser, J. Mayr | Adaptive input selection for thermal error compensation models | CIRP Annals 2020 |
| N. Zimmermann, J. Mayr, K. Wegener | Extended discrete R-Test as on-machine measurement cycle to separate the thermal errors in Z-direction | Euspen Special Interest Group Meeting on Thermal Issues 2020, Aachen |
| N. Zimmermann, S. Ibaraki | Self-calibration of rotary axis and linear axes error motions by an automated on-machine probing test cycle | The International Journal of Advanced Manufacturing Technology |
| P. Hernandez-Becerro, J. Purtschert, J. Konvicka, C. Buesser, D. Schranz, J. Mayr, K. Wegener | Reduced-order model of the environmental variation error of a precision 5-axis machine tool | Journal of Manufacturing Science and Engineering |
| P. Hernández-Becerro, J. Mayr, K. Wegener | Reduced thermo-mechanical model of a rotary table of a 5-axis precision machine tool | ASPE Spring Topical Meeting Design and Control of Precision Mechatronic Systems, Cambridge MA, USA |
| P. Hernández-Becerro, J. Mayr, K. Wegener | Efficient thermo-mechanical model of a precision 5-axis machine tool | Euspen Special Interest Group Meeting on Thermal Issues 2020, Aachen |
| P. Blaser, J. Mayr, K. Wegener | Simulation based comparison of thermal error modelling methods for machine tools, euspen Special Interest Group Meeting | Euspen Special Interest Group Meeting on Thermal Issues 2020, Aachen |

Fachbereich: Fertigungsprozesse
Leitprofessor: Prof. Dr. Konrad Wegener
Gruppe: inspire-iwf – Prozesse
Leitung: Dr. Michal Kuffa

1. Schwergewichte Forschung und WTT

1.1 Übersicht

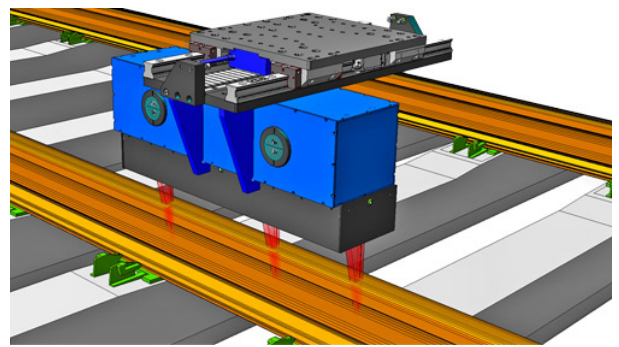
Die Forschungsschwerpunkte der Gruppe „Prozesse“ blieben im Jahr 2020 erhalten. Es handelt sich um Zerspanung mit bestimmter Schneide, Zerspanung mit unbestimmter Schneide, Erodieren und Zerspanungssimulation.

1.2 Messsystem für Schienen Akustische Rauheit

Seit einigen Jahren wird festgestellt, dass Lärm mit verschiedenen Krankheiten in Verbindung gebracht werden kann und somit als Gesundheitsbedrohung betrachtet werden kann. Es ist nun klar, dass einer der Hauptfaktoren für den Gesamtlärm der Züge das Rollgeräusch ist. Dieser Lärm hängt von der Rauheit der Schiene ab, daher muss dieser Wert exakt gemessen werden. Bis heute wird eine sehr spezifische Massnahme zur Beurteilung der Qualität der Schiene in Bezug auf den abgestrahlten Lärm verwendet: die so genannte akustische Rauheit. Diese Rauheit wird als Mittelwert in einer Terzansicht der spektralen Leistungsdichte der Rauheit bewertet. Deshalb wird es ein Sensor zur Durchführung solcher Messungen entwickelt. Im Idealfall sollte er in der Lage sein, auf dem Zug montiert während der Fahrt bei hohen Geschwindigkeiten zu messen, was zu mehreren Herausforderungen führt. Das erste Hauptproblem ist die Art und Weise, wie die Massnahmen ergriffen werden: es gibt keine feste Referenz, auch aufgrund der durch die Zugbewegung induzierten Schwingungen des Sensorarrays selbst. Es soll dann eine Methodik zur vollständigen Kompensation dieses Fehlers untersucht werden. Das zweite Problem erfolgt aufgrund den Schwingungen den Schienen, die durch den Zug induziert werden.

Im Rahmen dieses Projekts ist es das Ziel, die akustische Rauheit mit einem direkt am Zug montierten Sensor zu messen. Die Messungen sollten eine gute Genauigkeit für Züge mit mittleren bis hohen Geschwindigkeiten haben, so dass der Zustand des Schweizer Schienennetzes leicht verfolgt werden kann. Dadurch wird es möglich sein, beschädigte Schienenabschnitte schnell zu erkennen und mögliche gefährliche Situationen zu vermeiden. Dadurch werden sich Möglichkeiten im Bereich der «Predictive Maintenance» eröffnen, die das Schleifen von Schienen auf ein neues Niveau bringen könnte. Später wird ein Prüfstand entwickelt, um die vorgeschlagenen Lösungen zu evaluieren. Anschliessend wird das Sensorarray auf Zügen montiert, um seine Leistung unter Beweis zu stellen.

In den letzten Jahren wurden bereits mehrere verschiedene Ansätze entwickelt. Meistens verwenden sie mehrere Abstandssensoren, um eine Bewegungskompensation zu ermöglichen. Man kann auch Ähnlichkeiten zwischen diesem Problem und der Gerademessung eines Werkstücks sehen. Innerhalb dieses Themas verfolgten sie den Ansatz, mehrere nebeneinander angeordnete Abstandssensoren zu verwenden, um die Fehler zu kompensieren. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Beschleunigungssensoren, die am Achsgehäuse des Zuges montiert sind, obwohl diese aufgrund der sehr schwierigen Signalverarbeitung, die nur das Rauheitsprofil herausfiltern muss, keine zufriedenstellenden Ergebnisse zu liefern scheinen. Ein Versuch, bei dem verschiedene Sensortypen kombiniert werden, wurde nie versucht, daher die Idee, Beschleunigungssensoren in Kombination mit Abstandssensoren zu verwenden. Der Zweck dieses Aufbaus besteht darin, einen Sensor, der den Abstand messen kann (z.B. Laser Triangulationssensor), mit mehreren Beschleunigungssensoren zu kombinieren, die an spezifische Positionen platziert werden, um die externen Störungen zu kompensieren.



Beispiel eines Schienenrauheitmessgeräts, Quelle: Matisa

1.3 Schleifen von Glaskanten mit hohem Vorschub

In der Produktion von Glasscheiben für Anwendungen im Bereich Automotive ist das Schleifen der Kanten oft ein kritischer Schritt der die finale Produktqualität, Produktionsrate und Effizienz bestimmt. In der Industrie werden in der Regel Vorschübe von 15-30 m/min angewendet.

Höhere Vorschübe führen zu schlechterer Oberflächenrauheit, Materialabbrüchen vom Glas und höherem Verschleiss des Werkzeugs. Es sind keine systematischen Ansätze bekannt, welche das gesamte System bestehend aus Maschine, Kühlmittelversorgung, Schleifscheibe und Prozesskinematik weiterentwickeln. Bisher wurden nur individuelle Aspekte der Maschine optimiert, welche jedoch eine gegenseitige Beeinflussung haben.

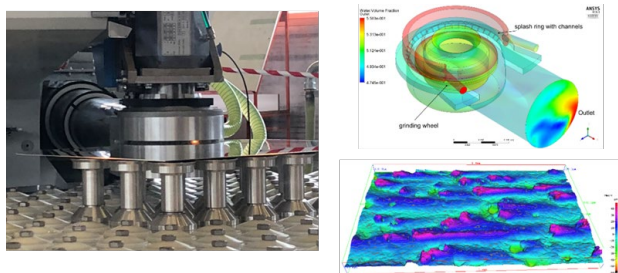
Grundlegende Forschung und Prozessverständnis fehlte im Bereich Glaskantenschleifen bislang. Die Definition und Modellierung der thermischen Eigenschaften des Prozesses, die Simulation der Kühlbedingungen, die Optimierung und Messung der Wirkung der Kühlung und die Materialabtragungsmechanismen in

Hochgeschwindigkeitsschleifen sind wesentliche Lücken im Verständnis. Methoden zum maschinenintegrierten Abrichten auch während des Schleifprozesses wurden nicht untersucht. Ebenso fehlen Parameter um die Lebensdauer von Schleifscheiben zu vorhersagen.

Das Ziel dieses Projektes war die Steigerung des Vorschubs um mindestens 50% (oder auf mindestens 45 m/min) ohne Einbussen oder sogar Verbesserung der Glaskantenqualität bezüglich Rauheit, sichtbarer Schäden und Werkzeuglebensdauer.

Das Projekt verfolgte einen Ansatz, der Experimente und Simulationen für das Verständnis des Glaskantenschleifprozesses kombiniert. Dadurch müssen verschiedenste Aspekte des Prozesses inklusive der Werkzeug-Werkstück Verbindung, Materialabtragmechanismen, Prozesskinematik, Kühlmittelversorgung und Zuführung (Düseneigenschaften und Kühlmittelparater), thermische Interaktionen, Schleifscheibeneigenschaften, Schleifscheibenverschleiss sowie Werkstückoberflächenqualität untersucht werden. Durch die Validierung mithilfe von Experimenten können Werkzeugverschleiss, Kühlmittelzufuhr und thermische Modelle entwickelt werden. Aufgrund der Strömungseigenschaften des Kühlmittels werden die Bedingungen im Schleifspalt mittels Simulationen erforscht und so ein neues leistungsstarkes Kühlmittelzufuhrsystem entwickelt. Zuletzt wurde in der Maschine integriertes Abrichten der Schleifscheibe untersucht.

Der komplette Ansatz mit Prozess, Werkzeug und Maschine erlaubt ein besseres Verständnis dieser Materialbearbeitung und ermöglicht damit weitere Innovationen in technischen, wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Aspekten für die Projektpartner. Ausserdem können mithilfe der entwickelten Prozessüberwachungs- und Simulationswerkzeuge die Kunden unterstützt werden.



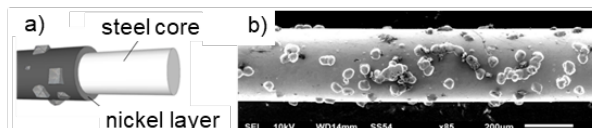
Schleifmaschine (links), CFD-Modell des Spritzrings (oben rechts) und 3D-Mikroskopie der Schleifscheibenoberfläche (unten rechts)

1.4 Diamantdrahtsägen von Silizium für Solarzellen

In 2020 ging im vierten Jahr in Folge mehr Leistung von Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien als von konventionelle Anlagen neu an die Netze, davon wiederum entfiel mehr als die Hälfte auf Photovoltaikanlagen. Weit über 90% davon basiert auf Siliziumtechnologie, welches neben seinen technischen

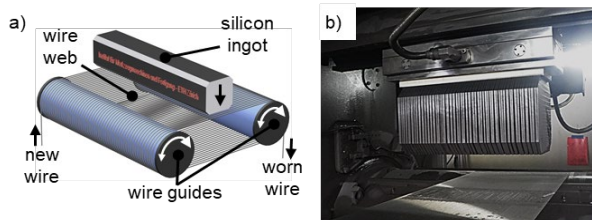
Eigenschaften vor allem wegen des hohen Vorkommens weit verbreitet ist. Die Verarbeitung von Silizium gestaltet sich jedoch schwierig.

Für die Herstellung von Wafern aus Silizium werden Siliziumblöcke, so genannte Ingots, mit Diamantdrahtsägen geschnitten. Moderne Maschinen nutzen einen 50 bis 100 km langen Stahldraht mit einem Durchmesser zwischen 60 und 120 µm. Dieser ist mit Diamantkörnern besetzt, wie in Bild unten ersichtlich.



a) Struktur, b) REM Aufnahme eines Diamantdrahtes

Ein einzelner Draht wird 600 bis 800-mal um zwei Führungsrollen gewickelt und mit bis zu 35 m/s um einige hundert Meter vor- und einige Meter weniger zurückbewegt, während der Ingot in das Drahtnetz gesenkt wird, siehe Bild a unten. So werden alle Wafer gleichzeitig getrennt, wie in Bild b unten dargestellt.



a) Prozessprinzip, b) in Wafer getrennter Ingot auf einer Meyer Burger Drahtsäge

Zur Verbesserung der Produktivität und der Effizienz des Prozesses wurde der Drahtdurchmesser reduziert. Weiteres Optimierungspotential liegt vor allem in der Verbesserung der Oberflächenqualität der Wafer, sodass diese weniger aufwändig nachbehandelt werden müssen, und in einer weiteren Reduktion der Waferdicke, die derzeit etwa bei 180 µm liegt. Dieses ist nur möglich, wenn die Formabweichung und die Schädigung der Oberfläche minimiert wird.

Ziel des Projekts ist es, die Prozesskinematik zu modellieren und den Übergang zwischen sprödem und duktilem Materialverhalten, wie er unter bestimmten Voraussetzungen bei sprödharten Materialien auftritt, zu untersuchen. So wird ein wichtiger Beitrag zum grundsätzlichen Prozessverständnis geleistet.

Um den Prozess im Labor untersuchen zu können, wurde die in Bild unten abgebildete Versuchs-Diamantdrahtsäge entwickelt, die mit einer einzelnen Drahtschleife arbeitet. So kann die hohe Schnittgeschwindigkeit realisiert werden ohne grosse Mengen an Draht und Silizium zu verbrauchen. Es können der Verschleiss einzelner Körner verfolgt, Prozesskräfte gemessen und die Kinetik der Prozesse im Detail untersucht werden. Entwickelte Prozessmodelle werden mit der Drahtsäge validiert.



Selbstentwickelte Versuchs-Drahtsäge

Das Materialverhalten, insbesondere der spröde-zu-duktil Übergang, wird anhand von Einzelkornkratzversuchen experimentell analysiert und mit Partikelmethoden und heuristisch-empirischen Ansätzen modelliert.

1.5 Bohren von CFK/Al-Stacks für die Luftfahrtindustrie

Die zivile Luftfahrtindustrie zeigt eine zunehmende Substitution von metallischen Werkstoffen durch Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK). Bedingt durch die hohen spezifischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften zeigt CFK ein hohes Leichtbaupotential und eignet sich deshalb hervorragend für Leichtbauanwendungen in der Luftfahrtindustrie.

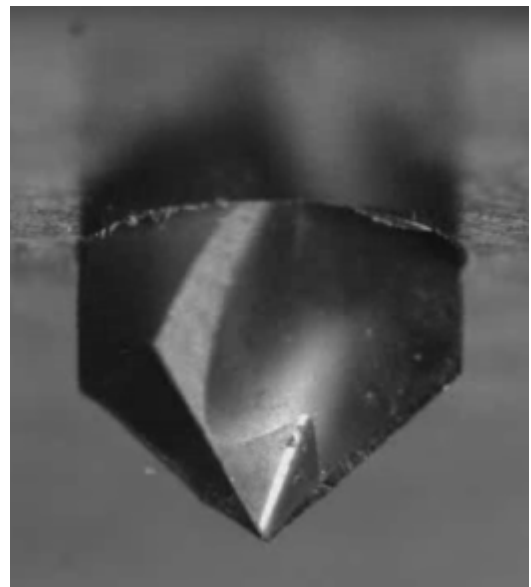
Die mechanische Bearbeitung dieser Bauteile bereitet bisher massive Probleme. Zum einen treten bei der Bearbeitung immer wieder Bauteilschäden wie Delamination, Risse, Faserauszug und unzureichende Oberflächen auf. Zum anderen wirken die Kohlenstofffasern während der Bearbeitung höchst abrasiv und verursachen starken Werkzeugverschleiss und damit hohe Werkzeugkosten. Einzig Diamant zeigt eine hinreichende Standzeit.

Eine grosse Anzahl von Bohroperationen erfolgen nicht in reinem CFK, sondern in Kombination mit Aluminium oder Titan in Form von Stacks. Diese werden bedingt durch Qualitätsaspekte und die Fertigungsrealisation üblicherweise in sogenannten one-shot Bohroperationen durchgeführt. Diese Art der Bearbeitung führt zu weiteren Schwierigkeiten, da beispielsweise heisse Metallspäne durch den CFK-Bohrungskanal transportiert werden müssen, wodurch ein hohes Risiko für mechanische und thermische Schäden resultiert. Da Bohroperationen in der Luftfahrt im Zusammenhang mit CFK meist trocken durchgeführt werden müssen, kommt es zu weiteren Herausforderungen wie beispielsweise ungenügender Spantransport und thermische Zersetzung des Matrixmaterials.

Im Rahmen des Projektes soll in Kooperation mit den Projektpartnern ein leistungsfähiger und effizienter Bohr- und Entgratprozess für die Bearbeitung von CFK/Al-Stacks entwickelt werden. Qualitätsanforderungen betreffen den Bohrereintritt im CFK, den Bohrertritt im Aluminium und die Abweichung des Bohrungsdurchmessers in beiden Materialien. Aus wissenschaftlicher Sicht soll das Prozessverständnis für den Zerspanungsprozess von CFK und CFK/Al-Stacks erweitert werden.

Ausgangsbasis bilden ausführliche Versuchsreihen mit unterschiedlichen Bohrergeometrien um den Einfluss einzelner Hauptgeometrieaspekte zu evaluieren. Weiter soll der Prozess der Werkstoffabtrennung während des Bohrens beobachtet und analysiert werden. Hierbei sollen insbesondere unterschiedliche Einflussfaktoren wie Geometrie und zunehmender Werkzeugverschleiss isoliert betrachtet werden. Zur Analyse der Werkstoffschädigungen und der Bohrungsqualität werden sowohl in der Luftfahrt etablierte Prüfverfahren evaluiert, als auch möglichst umfangreiche Detektion aller Werkstückschäden durchgeführt.

In einem zweiten Schritt wird das gewonnene Prozessverständnis für die Entwicklung von anwendbaren Zerspanungslösungen eingesetzt. Dabei sollen alle Prozessschritte für die Vorbereitung einer Nietverbindung in CFK/Al-Stacks entwickelt werden; Dies schliesst die Prozesse Bohren, Senken und Entgraten ein. Entwicklungsfelder sind Prozessführung, Werkzeuggeometrie und Werkzeugbeschichtung.



Bohreraustritt \varnothing 6.35 mm in unidirektionalem Material

2. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|------------------------|--|------------------------|----------------|
| KTI 17852 | Erforschen der Einflüsse von konventionellen und Nano-Additiven in Kühlschmierstoffen für Titanbearbeitung | 1.11.2015 – 30.04.2020 | M. Kuffa |
| KTI 25966 | HiFeeG: High-feed grinding of glass edges: A holistic approach to the development of a new process | 1.9.2017 – 31.8.2020 | M. Kuffa |
| KTI 27558 | Modellierung und Optimierung des Materialabtrags beim Diamant-Kernbohren von stahlar-miertem Beton | 1.3.2018 – 31.5.2021 | M. Kuffa |
| KTI 26200 | Enabling series production HP & UP machining process by means of new compensation technology | 1.7.2017 – 31.03.2020 | M. Kuffa |
| Innosuisse 28789 | Wire-EDM improvements by spark detection on machine (WISDOM) | 1.6.2019 – 31.3.2022 | M. Kuffa |
| SNF 2000021_1 62611 | Experimental Analysis and Process Modelling of the Process Behaviour of Compliantly Supported Diamond Grains and grain-Surface Interactions in Brittle Materials | 1.6.2016 – 31.5.2020 | M. Kuffa |
| SNF 200020_19 7361 / 1 | Simulation models and supporting experiments for machining of brittle-hard materials like monocrystalline silicon | 1.10.2020 – 30.4.2023 | M. Kuffa |
| Bilateral | Projekt zum Schienenschleifen | 1.9.2017 – 31.12.2020 | M. Kuffa |
| Innosuisse 32334 | Model-supported identification of stability model input parameters and model correction through machine learning | 1.1.2020 – 30.6.2022 | M. Kuffa |
| Innosuisse 29514 | One-Pass-Grinding (OPG) of railway tracks | 1.10.2019 – 31.09.2022 | M. Kuffa |

| | | |
|--|--|---|
| H. Büttner, K. Michael, J. Gysel, P. Gugger, S. Saurenmann, G. de Bortoli, J. Stirnimann, K. Wegener | Innovative micro-tool manufacturing using ultra-short pulse laser ablation | Journal of Materials Processing Technology |
| M. Postel, N. Bugdayci, F. Kuster, K. Wegener | Neural network supported inverse parameter identification for stability predictions in milling | CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology |
| M. Postel, N. Bugdayci, K. Wegener | Ensemble transfer learning for refining stability predictions in milling using experimental stability states | The International Journal of Advanced Manufacturing Technology |
| U. Pala, S. Süssmaier, K. Wegener | Schnelltest für die Eignung von Diamantdraht zum Wafering | Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren: Verfahren und Maschinen 69. Aufgabe |

3. Publikationen im Berichtsjahr

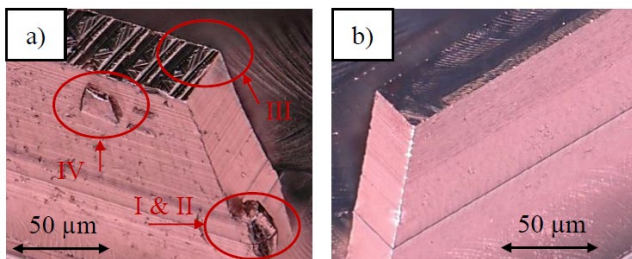
| Autoren | Titel | Erschienen in |
|---|---|---|
| M. Afrasiabi, K. Wegener | 3D Thermal Simulation of a Laser Drilling Process with Meshfree Methods | Journal of Manufacturing & Materials Processing |
| M. Afrasiabi, L. Meier, M. Röthlin, H. Klippel, K. Wegener | GPU-Accelerated meshfree simulations for parameter identification of a friction model in metal machining | International Journal of Mechanical Sciences |
| M. Afrasiabi, E. Chatzi, K. Wegener | A Particle Strength Exchange Method for Metal Removal in Laser Drilling | CIRP Manufacturing Systems |
| M. Afrasiabi, M. Röthlin, H. Klippel, E. Chatzi, K. Wegener | Beyond FEM: Meshfree Simulations of Manufacturing Processes on GPU | ECCOMAS Newsletter |
| M. Afrasiabi, M. Röthlin, K. Wegener | Thermal simulation in multiphase incompressible flows using coupled meshfree and particle level set methods | Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering |
| M. Afrasiabi, M. Röthlin, E. Chatzi, K. Wegener | A Robust Particle-Based Solver for Modeling Heat Transfer in Multiphase Flows | ECCM-ECFD Proceedings |

Fachbereich: Mikro- & Laserbearbeitung
Leitprofessor: Prof. Dr. Konrad Wegener
Gruppe: inspire-iwf – Mikro/Laser
Leitung: Josef Stirnimann

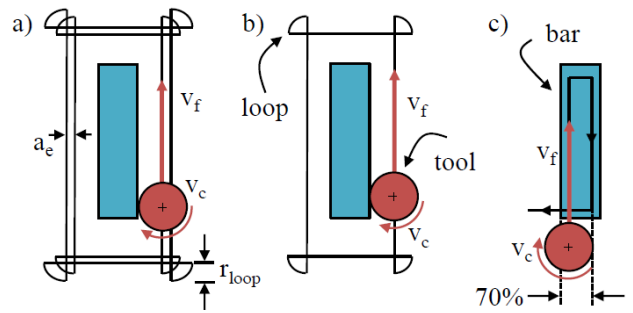
1. Schwergewichte Forschung und WTT

1.1 Mikrofräsen und Herstellung von Mikro-Werkzeugen mittels UKP-Laser im Kontext einer Prozesskette

Bei der stetig wachsenden Nachfrage nach Bauteilen mit immer kleineren Abmessungen und Merkmalen gewinnt die Mikrofertigung immer mehr an Bedeutung. Für die Massenproduktion von Kunststoffbauteilen mit Mikromerkmalen ist das Spritzgiessen besonders geeignet und immer noch üblich, um die Zielkosten zu halten. Aufgrund der hohen Anforderungen an Lebensdauer und Verschleissfestigkeit werden die Formen aus gehärtetem Stahl hergestellt. Die Formgebung dieser Formen erfolgt durch Funkenerosion (EDM). Dieses Verfahren ermöglicht die Erzeugung von Mikrostrukturen im Mikrometerbereich mit kleinen Innenradien, hoher Masshaltigkeit und extremen Aspektverhältnissen unabhängig von der Werkstückhärte. Als Arbeitsmittel für das Erodieren werden üblicherweise Elektroden aus reinem Kupfer (Cu) und wolframverstärktem Kupfer (WCu) eingesetzt. Die Formgebung der Elektroden erfolgt durch Mikrofräsen. Für ein Gesamtverständnis dieser Prozesskette muss das Zusammenspiel von Mikrofräsen, Mikro-EDM und Mikro-Spritzgiessen bewertet werden. Das vorliegende Projekt liefert Erkenntnisse über die Grenzen der einzelnen Verfahren in Bezug auf Gratbildung, Formgenauigkeit, Strukturgrösse und Aspektverhältnis. Viele Faktoren in der Prozesskette beeinflussen die Grösse der erreichbaren Mikrostruktur eines Endprodukts. Die richtige Auswahl des Elektrodenmaterials ist ein Schlüsselfaktor in der Prozesskette. Da die Featuregrösse der Elektrode die Dimension der endgültigen Produktform definiert, müssen beim Mikrofräsen möglichst kleine Strukturen erzeugt werden können. Die Dimension der erodierten Kavität wird durch die Featuregrösse der Elektrode in Kombination mit dem seitlichen Arbeitsspalt definiert. Erodierete Kavitäten mit kleinen inneren Eckradien und steilen Flanken lassen sich unter Verwendung von fehlerfreien und gratfreien Elektroden erzeugen.



Gratbildung beim Mikrofräsen von Cu: a) Beobachtung von vier Grattypen; b) gratfreie Mikrostruktur



Frässtrategie zur gratfreien Bearbeitung: a) Schruppen zum Erreichen des Endmasses, b) Entgraten der Seitengrater, c) Entgraten der oberen Grater

Die Qualität und Zuverlässigkeit des Endproduktes wird in hohem Masse durch die Gestaltung des Spritzgiessprozesses bestimmt. Durch das entstehende Vakuum beim Evakuieren der Restluft im Werkzeug wird die einströmende Schmelze gleichmässig verteilt. Es muss gewährleistet sein, dass während des Spritzgiessens das Werkzeug thermisch kontrolliert wird. Dies verhindert ein vorzeitiges Erstarren. Durch die Kombination dieser beiden Strategien wird ein Formfüllungsgrad in Mikroavitäten von bis zu 100% realisiert. Durch die Ableitung einer perfekt angepassten Prozesskette kann ein präzises Mikro-Spritzgiessen durchgeführt werden. Dies führt zu der Fähigkeit, Stege auf einem fertigen Kunststoffteil mit einer Breite und Höhe von nur 55 µm x 100 µm und einer Länge von 2 mm herzustellen.

Die Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte können wie folgt zusammengefasst werden:

- Mittels Mikrofräsen sind fehlerfreie und gratfreie Mikrostege in Cu und WCu bearbeitbar. Für beide Werkstoffe kann ein Aspektverhältnis bis 6 erreicht werden. Dies entspricht einer Breite 50 µm und einer Höhe 290 µm. Ein Mikrowerkzeug mit einem Durchmesser von 150 µm und einer Schnittkantenlänge 300 µm ermöglicht eine Teilung von 250 µm. Qualität und Formgenauigkeit der Mikrostrukturen bestimmen in hohem Masse die Form einer erodierten Kavität. Aufgrund der hohen Flankensteilheit der Stege ist eine Konizität von < 2 µm auf die Elektrodenlänge von 300 µm erodierbar. Bei der Verwendung von zwei Cu-Elektroden bzw. fünf WCu-Elektroden sind Inneneckradien von 7 und 3 µm realisierbar.

- Die Replikation beim Mikrospritzgiessen ist neben anderen Faktoren von der Temperatur der Schmelze und der Art des Kunststoffs abhängig. Durch die Anwendung der Variothermtechnik ist bei der Verwendung von ABS ein Formfüllungsgrad von 100% für Mikrostrukturen erreichbar.

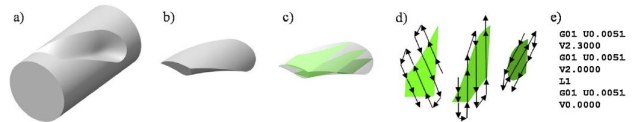
1.2 Herstellung von Mikro-Werkzeugen mittels UKP-Laser

Der stetig wachsende Bedarf an mikro-elektromechanischen Systemen (MEMS) mit immer kleiner werdenden Strukturgrössen erfordert angepasste Fertigungslösungen. Mikrofräsen erfüllt die hohen Anforderungen an Präzision und Zuverlässigkeit an das Endprodukt. Die eingesetzten Werkzeuge haben Durchmesser im

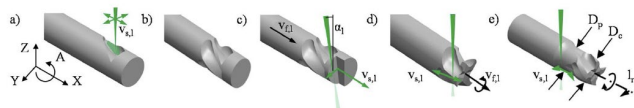
Bereich von 50-300 μm und werden üblicherweise durch Schleifen hergestellt. Eine Verringerung des Werkzeugdurchmessers führt jedoch zu einer Abnahme der Steifigkeit in der vierten Potenz und die eingebrachte Belastung beim Schleifen verursacht eine hohe Ausschussrate. Ausserdem ist die Flexibilität bei der Werkzeuggestaltung auf die Eigenschaften der Schleifscheibe beschränkt. Diese Einschränkungen bei der Herstellung von Mikrowerkzeugen können durch den Einsatz des Ultrakurzpuls-Laserabtrags (UKP) vermieden werden. Dieser Prozess ermöglicht eine kraftfreie 2-D- und 3-D-Bearbeitung über einen weiten Bereich von Materialien ohne Verschleissbildung. Durch den Einsatz eines UKP-Lasers kann eine breite Palette von kundenorientierten Anwendungen im Mikrometerbereich abgedeckt werden. Ausserdem führt er zu einem präzisen Abtrag mit minimaler thermischer und mechanischer Schädigung. Das vorliegende Projekt vermittelt Erkenntnisse über die Herstellung von Mikrowerkzeugen aus Wolframkarbid mit kleinen Durchmessern und hohem Aspektverhältnis. Für die gewünschten Werkzeuggeometrien werden notwendige Prozessparameter evaluiert und deren physikalische Grenzen aufgezeigt sowie diskutiert. Ein innovatives CAM-System wurde programmiert, das die Herstellung fortschrittlicher Geometrien auf einem 4-Achsen-Lasermaschinenprüfstand der ETH Zürich ermöglicht. Mit Laserstrahllicht von der Wellenlänge 515 nm ist man in der Lage, Werkzeuge mit Durchmessern von 50 μm und Aspektverhältnissen bis zu 6 herzustellen. Durch eine präzise Kalibrierung wird der Werkzeuggrundlauf auf $\ll 5 \mu\text{m}$.

Die Generierung mehrerer Schneiden bei kleinen WZ-Durchmessern und die individuelle Formgebung jeder Schneide ist mit einem Strahlradius $< 10 \mu\text{m}$ und einer Pulsdauer von 1 ps möglich. Eine Formabweichung zur Sollgeometrie unter 5 μm beweist eine hohe Wiederholgenauigkeit. Im Querschnitt konnte ein Schneidkantenradius von $< 3 \mu\text{m}$ ermittelt werden. Durch die Beherrschung des mehrachsigen Laserabtragsprozesses können Mikro-Werkzeuge für die Bearbeitung von duktilen und hartspröden Werkstücken hergestellt werden. Die Adaptierung der Werkzeuggeometrie an die zu zerspanenden Materialien führt zu einem leistungsfähigeren Werkzeug als bisher üblich und der Ersatz des Schleifprozesses durch einen Laserprozess bei der Werkzeugherstellung erlaubt eine grosse Geometrievielfalt. Die laserbearbeiteten Werkzeuge erweitern den Bereich der Mikrostrukturierung bei der Elektrodenherstellung. Teilungsabstände von Strukturen werden im Bereich des Werkzeugdurchmessers und mit extremen Aspekt-Verhältnissen in duktilen und spröden Materialien realisiert. Die Leistungsfähigkeit der Mikro-Werkzeuge wird in anschliessenden Fräsversuchen analysiert. Die Schritte im Herstellverfahren eines Mikro-Werkzeugs mittels Laser unten dargestellt. Der Werkzeugrohling kann entweder durch Schleifen oder durch Laserablation vorbereitet werden. Das Abtragen der Spannuten erfolgt in der radialen Ausrichtung des Laserstrahls. Der Laserstrahl ist grün eingezeichnet

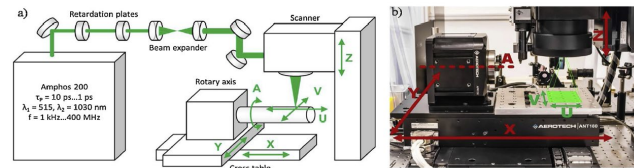
und wird von zwei Galvanomotoren im Scanner abgelenkt. Der Einsatz eines F-Theta-Objektivs erlaubt, unabhängig von der Ausrichtung der Spiegel im Scanner, den Fokus des Lasers immer in der Bearbeitungsebene zu halten. Der Scankopf ist in Z-Richtung verfahrbar und ermöglicht die Fokussierung des Laserstrahls auf unterschiedlich hohe Werkstücke. Der Zylinderrohling wird in einer rotierenden A-Achse eingespannt, welche in X- und Y-Richtung verfahrbar ist.



Verfahren zur Berechnung der Werkzeugbahn; a) CAD-Modell der gewünschten Werkzeugform, b) Definition des abzutragenden Materials, c) Abtragsvorgang; d) Berechnung der Bahnkurven, e) Generierung von NC-Code



Herstellungsverfahren für Mikrowerkzeug: a) radiales Abtragen der Spannuten, b) Rotation entlang A-Achse; c) tangentiale Formgebung der Nebenschneiden, d) tangentiale Formgebung der Hauptschneiden Kanten, e) tangentiale Reduzierung des Durchmessers



Laseraufbau: a) Laserstrahlführung, b) Bearbeitungsraum

2. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|-----------|--|-----------------------|----------------|
| KTI 26379 | Prozesskette für präzise Mikro-Strukturen auf Spritzgussteilen | 1.11.2017 – 30.4.2021 | J. Stirnimann |
| KTI 34642 | CeraMach | 1.11.2020 – 31.5.2022 | J. Stirnimann |

3. Publikationen im Berichtsjahr

| Autoren | Titel | Erschienen in |
|--|---|--|
| N. Ackerl, M. Putzer, K. Wegener | Geometry assessment of ultra-short pulsed laser drilled micro-holes | The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020 |
| H. Büttner, K. Michael, J. Gysel, P. Gugger, S. Seraina, J. Stirnimann, K. Wegener | Innovative micro-tool manufacturing using ultra-short pulse laser ablation | Journal of Materials Processing Technology, 2020 |
| N. Ackerl, P. Gugger, M. Warhanek, J. Gysel, K. Wegener | Ultra-short Pulsed Laser Marking and Coloration of Metals with Segmented Pixel Parameter Transformation | Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2020, ISSN 1880-0688, Band 15, Nr. 1, Seiten 1-6 |
| N. Ackerl, M. Warhanek, J. Gysel, K. Wegener | Ultra-short pulsed laser conditioning of metallic-bonded diamond grinding tools | Materials & Design, 2020 |

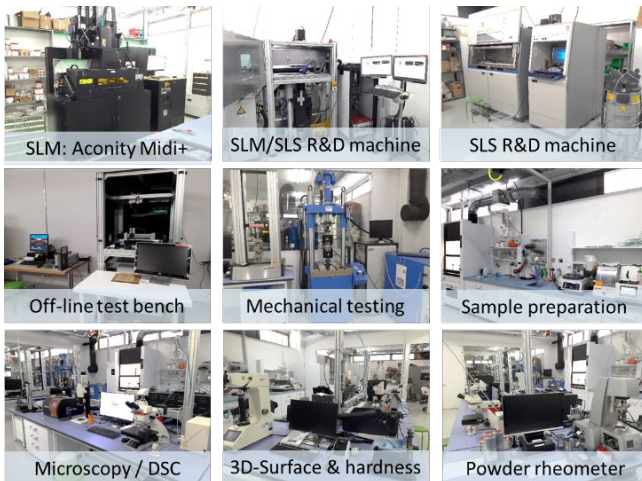
Fachbereich: Additive Manufacturing

Leitprofessor: Prof. Dr. K. Wegener
Gruppe: inspire-icams
Leitung: Dr. A. Spierings (SLM),
 Dr. M. Schmid (SLS)

1. Schwergewichte Forschung und WTT Bereich

1. Räumlichkeiten und Anlagen

Ein Meilenstein bei der Entwicklung von inspire icams in St. Gallen konnte im Herbst 2020 mit dem Bezug neuer Labor- und Büroräumlichkeiten erreicht werden. Die neuen und grösseren Forschungslaboratorien sind als hervorragend zu bezeichnen. Diese wurden nach Vorgabe von icams, basierend auf der langjährigen Erfahrung mit additiven Prozessketten, gestaltet und aufgebaut. Spezielles Augenmerk wurde dabei auf Sicherheitsaspekte zum Umgang mit pulverförmigen Ausgangsmaterialien gelegt. Neben einer Eingangschleuse zum Wechseln der Laborkleidung wurden die Bereiche für Metall- und Kunststoffmaschinen getrennt, um Querkontamination der unterschiedlichen Substrate zu vermeiden. Zwischen den beiden Bereichen befindet sich das Labor für Pulver- und Bauteilanalysen, welches sowohl von der Metall- als auch von der Kunststoffseite zugänglich ist. In allen Räumen findet ein kontinuierlicher Raumluftaustausch statt, um die Luftbelastung mit Feinstaub zu minimieren. Gleichzeitig wurden alle Mitarbeiter mit zwangsbelüfteten persönlichen Schutzmasken der höchsten Sicherheitsstufe (FFP3) ausgestattet.



Neue SLM-, SLS- und Analyselabore

1.1 Aconity Midi+ SLM Anlage

Im letzten Jahr konnte eine neue SLM-Anlage vom Typ Aconity Midi+ in Betrieb genommen werden. Die neue Anlage bietet verbesserte Forschungsmöglichkeiten, insbesondere mehr Flexibilität beim Prozessmonitoring und gestattet mit einer Heizeinrichtung bis 1000°C die

Verarbeitbarkeit problematischer, zum Beispiel rissanfälliger Legierungen oder auch keramischer Materialien. Das Baufeld mit Ø250 mm erlaubt zudem die Fertigung von Demonstratoren für industrielle Anwendungen.



Neue Aconity Midi+ Forschungsanlage

1.2 Pulver Rheologie

Die erfolgreiche Verarbeitung von Pulversubstraten in der pulverbettbasierten additiven Fertigung (PBF) hängt sehr stark von Faktoren wie Fließfähigkeit und Spreadability ab. Im Zuge des Ausbaus der dafür benötigten analytischen Untersuchungsmöglichkeiten, speziell bei erhöhten Temperaturen wie diese unter Prozessbedingungen vorliegen, wurden zwei neue Pulver-Rheometer zur Messung der Fließfähigkeit installiert. Die beiden Pulver-Rheometer arbeiten nach unterschiedlichen, aber komplementären Messprinzipien (rotierende Trommel versus rotierender Propeller) und werden zur Qualifizierung von kommerziellen und Forschungsmaterialien eingesetzt.



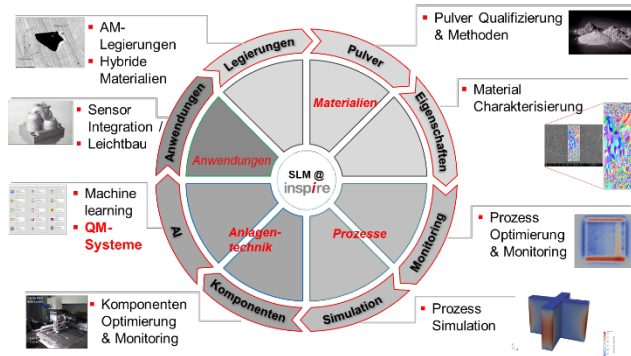
Neues RPA und heizbares Rheometer (Anton-Parr)

2. Schwergewichte Forschung und WTT

A) Gruppe Metall (A. Spierings)

Schwerpunkt der Forschung im Metallbereich ist der Aufbau von Expertise entlang der SLM-Prozesskette. Darauf aufbauende QM-Systeme und Methoden sollen erarbeitet werden. Dies basiert auf der Erkenntnis, dass die Qualität eines additiv erzeugten Produktes in allen Prozessschritten massgeblich beeinflusst werden kann. Somit muss die Frage nach der Identifikation und Bewertung der entscheidenden Parameter innerhalb der Prozessschritte diskutiert werden, sowie wie diese quantitativ gemessen, und in einen qualitätsrelevanten

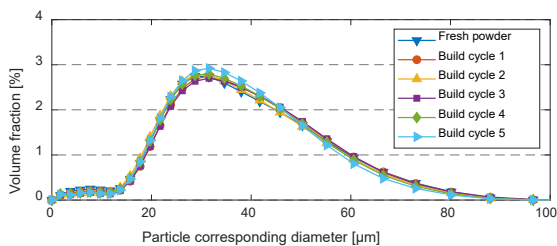
Gesamtkontext zu bringen sind. Die Forschungsthemen adressieren damit die Qualifizierung von Materialien (Pulver, Legierungen, additiv aufgebaute Komponenten), den SLM-Prozess (insb. Monitoring), Anlagentechnik (Komponenten und Steuerung) sowie die Entwicklung innovativer Anwendungen mit Fokus auf Sensor- und Aktuator Integration und Leichtbau.



Forschungsfokus im Metallbereich bei inspire-icams

2.1 Energieeffiziente Bearbeitung von Additiv-Bauteilen (EE-Proc-Add)

inspire untersucht im Rahmen von «Energieeffiziente Bearbeitung von additiv-Bauteilen (EE-Proc-Add)» den Energieverbrauch in additiven Prozessketten. Ein Treiber für den Energieverbrauch ist das Rohmaterial Pulver. Die Wiederverwendung des nicht verbauten Pulvers hat einen grossen Einfluss auf den Energieverbrauch in der gesamten Prozesskette. Falls das Pulver sich während des SLM-Prozesses so verändert, dass es nicht mehr wiederverwendet werden kann, würde die Entsorgung des Pulvers den Energieverbrauch extrem steigern. Die Veränderung der Partikelgrössenverteilung des untersuchten Aluminiumpulvers über fünf identische Baujobs hinweg ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Dabei wurde das Pulver nach jedem Baujob gesiebt, um grosse Schweissspritzer zu entfernen, während feinere Partikel im Pulver verbleiben.



Veränderung der Partikelgrössenverteilung nach 5 Baujobs (build cycle) für AlSi10Mg Pulver.

Die Ergebnisse zeigen nur eine sehr geringe Änderung des Pulvers, die im Bereich der Messunsicherheit liegt. Auch die anderen Pulvereigenschaften wie die Fließfähigkeit, sowie die Kerbschlageigenschaften der resultierenden Bauteile zeigen einen geringen Einfluss durch die Pulver Wiederverwendung. Die Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass das Pulver im Prinzip unbegrenzt wiederverwendet werden kann, was im Kontext zum Energieverbrauch der SLM-Prozesskette als sehr gute Nachricht aufgefasst werden darf.

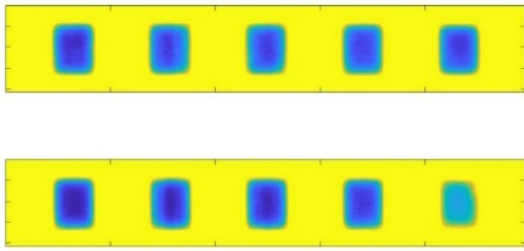
2.2 Digital Workflow for Additive Manufacturing (Innosuisse)

Das Projekt "Digital Workflow for Additive Manufacturing", verfolgt die Einführung neuer Fertigungstechnologien innerhalb der Design- und Produktionsschritte eines Uhrenherstellers. Das Projekt vereint die komplementären Kompetenzen von vier Partnern, ausgehend von Design und Testing von mikroskaligen Komponenten (HE Arc), bis hin zur Industrialisierung durch den Uhrenhersteller. Weitere Kompetenzen werden durch die Topologie-Optimierung und AM-Prozess-Simulation (CADFEM, inspire) sowie das AM-prozessbezogene Wissen (inspire) abgedeckt. Das Projektziel ist die Entwicklung einer konsistenten Methodik für das Re-Design und die Herstellung von Komponenten mit Hilfe der additiven Fertigung in Form eines digitalen Workflows. Das Re-Design von Uhrenkomponenten unter Berücksichtigung deren mechanischen Belastungen wird mittels Topologie-Optimierung erreicht, womit neue, auch nicht-triviale Designs ermöglicht werden. Des Weiteren wird mit Hilfe der AM-Prozesssimulation der am besten geeignete Weg für die Herstellung mittels AM identifizieren.

2.3 In-line part quality control for metal additive manufacturing (Innosuisse)

inspire-icams entwickelt gemeinsam mit Industriepartnern eine neue Sensortechnologie für das SLM-Prozessmonitoring. Die Qualifizierung von SLM-Bauteilen erfordert derzeit einen grossen Kosten- und Zeitaufwand, da eine grosse Anzahl von Bauteilen zur Feststellung ihrer Belastbarkeit mit zerstörenden und zerstörungsfreien Werkstoffprüfmethoden untersucht werden muss.

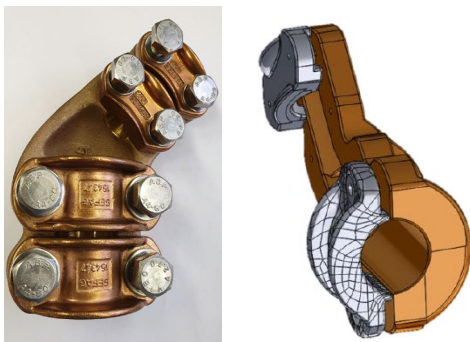
Die zu entwickelnde Sensortechnologie soll deshalb bereits während des Bauprozesses prozessbedingte Materialdefekte ermitteln und so die Qualifizierung von SLM-Bauteilen direkt nach Beendigung des Bauprozesses ermöglichen. Die Dichte eines SLM-Bauteils ist eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale, und Prädiktor für mechanische Eigenschaften. Während der Vorbereitung eines SLM-Baujobs werden üblicherweise passende Prozessparameter hinsichtlich der resultierenden Dichte, und je nach Anwendung hinsichtlich weiterer Materialeigenschaften, entwickelt und optimiert. Hierfür werden Proben mit unterschiedlichen Kombinationen von Prozessparametern hergestellt und deren Dichten gemessen. Aus den Ergebnissen werden dann die für die Anwendung passenden Prozessparameter ausgewählt, wobei diese aufwändige Prozedur bis heute für jedes neue Material für jeden Anlagentyp durchgeführt werden muss. Mit der entwickelten Sensortechnologie ist es dem Kon 2020 gelungen, die Bauteildichte zuverlässig für verschiedene Metalle während des SLM-Prozesses zu messen. Die Technologie hat das Potential, einen wichtigen Beitrag zur Ermittlung passender Prozessparameter zu leisten.



Mittels der Sensorik erhaltenes Bild von 10 Bauteilen aus AlSi10Mg mit unterschiedlicher Dichte

2.4 Ersatzteilerfertigung mittels additiver Fertigung

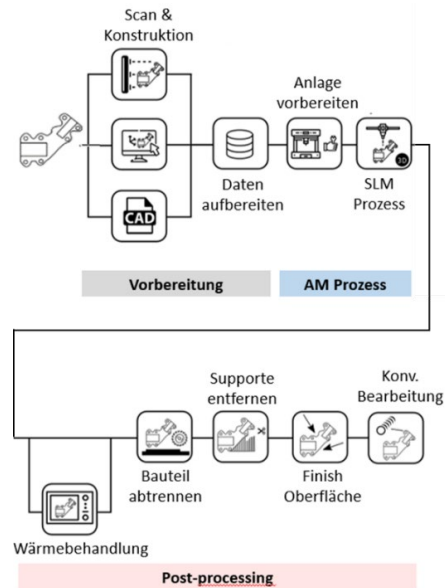
Additive Fertigungsverfahren können nicht nur genutzt werden, um Leichtbaustrukturen und komplexe Geometrien zu fertigen, sondern erlangen auch eine wachsende Bedeutung in der Ersatzteilversorgung, und werden je länger je mehr auch als interessante Business-Alternativen in Betracht gezogen. Die Verfahren bieten erhebliche Vorteile wie Kosten- und Platzeinsparungen in der Lagerhaltung, einfaches Daten und Produktbehandlung, u.U. auch raschere Verfügbarkeit von Ersatzteilen insbesondere bei nicht mehr erhältlichen Komponenten, sowie die Möglichkeit der Anpassungen von Bauteilgeometrien an geänderte Anforderungen. Als grösster Schweizer Stromversorger unterhält AXPO ein grosses, wartungsintensives Stromnetz. Zur Sicherstellung einer ausfalllosen Stromversorgung ist eine wesentliche Hauptanforderung an das Stromnetz die sogenannte "n+1"-Redundanz. Kommt es dennoch zum Ausfall von Schlüsselkomponenten, ist eine kurze Reaktionszeit zur Wiederherstellung der Redundanz aus wirtschaftlicher und sozialer Sicht entscheidend. Dies erfordert den möglichst raschen Ersatz der ausgefallenen Komponenten. Da etliche Komponenten bereits seit Jahren oder gar Jahrzehnten im Einsatz stehen, kann deren Ersatz unter Umständen nicht über die Ersatzteilerhaltung erfolgen, und auch die Beschaffung über Lieferanten kann problematisch oder gar unmöglich sein.



Links: Serien Stromklemme, rechts: 3D Modell

Die Studie untersuchte in wieweit die additive Reproduktion einer kritischen Komponente ablaufen kann, und ob die geforderten Qualitätsmerkmale erreicht werden können. Als Referenzkomponente wurde die unten gezeigte Hochspannungsstromklemme gewählt. In einem ersten Schritt wurde die Serienklemme mittels 3D-

Scanner erfasst und digital aufbereitet, um anschliessend additiv in Aluminium reproduziert zu werden. Der gesamte Prozessablauf inklusive Nacharbeit dauerte rund 65h und damit weniger als drei Tage.



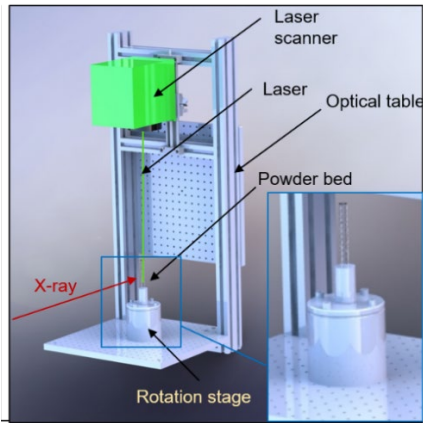
Additive Prozesskette für die Ersatzteilerproduktion am Beispiel der Stromklemme

Die Ergebnisse im Rahmen von Feldversuchen sowie zusätzlichen Materialtests haben gezeigt, dass die Funktionstauglichkeit additiv hergestellter Komponenten im Vergleich zu Serienkomponenten in allen Aspekten gegeben ist. Damit ist das Potential additiver Fertigung auch für die Ersatzteilerproduktion bestätigt.

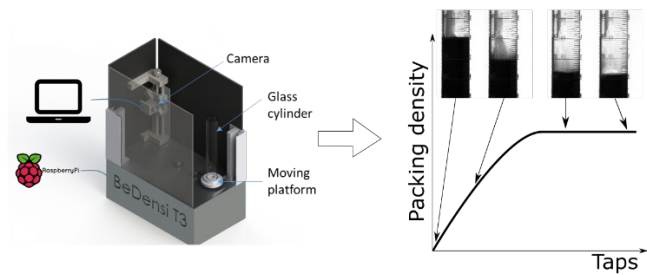
B) Gruppe Kunststoff (M. Schmid)

2.5 In situ tomography AM (SPARK)

Gemeinsam mit dem Paul-Scherrer-Institut arbeitet inspire am Verständnis der Schmelzbaddynamik bei Laser Melting Prozessen von Keramiken. Ziel der laufenden Experimente ist die Anwendung der operando-Synchrotron-Tomographie zur Visualisierung und quantitativen Beschreibung der Schmelzbaddynamik und der damit verbundenen Defektbildung während der Laser-Bearbeitung von keramischen Materialien, insbesondere von Aluminiumoxid (Al₂O₃). Die gewonnenen Daten werden unschätzbare Informationen liefern, die bisher nicht zugänglich waren. Sie sind ein Schlüssel zum Fortschritt unseres Verständnisses des laserbasierten Pulverbettssmelzens. Zu diesem Zweck wurde eine bei inspire selbst gebaute miniaturisierte Maschine für das SLM von Aluminiumoxid an der TOMCAT-Beamline installiert und für die entsprechenden Experimente verwendet. Diese Experimente sind herausfordernd, da sich das Pulverbett mit einer Winkelgeschwindigkeit mit bis zu 700 RPM dreht. Das Arbeiten mit Pulverwerkstoffen erschwert das System zusätzlich. Wir haben Systeme implementiert, um den Zentrifugalkräften entgegenzuwirken und neue Scan-Strategien, um das Scannen von geraden Linien auf einem schnell rotierenden Objekt zu ermöglichen.



CAD model of the setup used for the in situ tomography



SmartTap mit Messkurve der zeitabhängigen Verdichtung

2.6 Prozessentwicklung SLS (TPU)

Im Auftrag eines grossen Herstellers von TPU-Kunststoffen (thermoplastische Elastomere) wurde an zwei Mustern dieses Materials eine Studie zur Prozessfähigkeit mit Laser-Sintern LS durchgeführt. Die TPU-Pulver waren ursprünglich für das Multi-Jet-Fusion Verfahren von HP entwickelt worden und sollten in dieser Untersuchung auf ihre mögliche Eignung für LS geprüft werden. Es zeigte sich dabei, dass die bei LS tendenziell höheren Prozesstemperaturen und der höhere Energieeintrag bei den Materialien zu massiver, im Prozess nicht akzeptabler Rauchbildung führt.



Rauchbildung beim Laser-Sintern von TPU

Eine Verbesserung des Prozessverhaltens durch Mehrfachbelichtungsstrategien konnte gezeigt werden, wird aber derzeit vom Auftraggeber aus wirtschaftlichen Überlegungen nicht weiterverfolgt.

2.7 SmartTab

Der SmartTap ist ein bei inspire entwickeltes Gerät zur Messung des Verdichtungsverhaltens von pulverförmigen Stoffen. Es ermöglicht die Erstellung von zeitaufgelösten Verdichtungskurven, die einen bedeutenden Fortschritt im Vergleich zum Hausner-Verhältnis darstellen, das normalerweise zur Messung der Verdichtung eines Pulvers verwendet wird. Mit einem zusätzlich entwickelten Aufsatz konnten zudem erstmals Daten zur Wärmeleitfähigkeit von Polymerpulvern als Funktion des Verdichtungszustandes veröffentlicht werden.

3. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|------------------|---|------------------------|-------------------------|
| Innosuisse 35395 | Novel manufacturing process for high-precision lens systems with smart functionality | 1.6.2019 – 31.8.2021 | A. Spierings |
| Innosuisse 33657 | In-line quality control for metal additive manufacturing | 1.4.2019 – 30.6.2021 | A. Spierings |
| Innosuisse 37170 | Digital Workflow for AM | 1.11.2019 – 31.10.2020 | A. Spierings |
| CoreNet Projekt | Energieeffiziente Bearbeitung von Additiv-Bauteilen (EE-Proc-Add) | 1.9.2019 – 31.8.2021 | L. Weiss, A. Spierings |
| EU-GA 768775 | Additive ManufacturABLE (AMABLE) | 1.9.2017 – 31.8.2021 | A. Spierings, M. Schmid |
| Innosuisse 49534 | Retrofit von AM-Anlagen mit high-performance Steuerungen und schichtweiser Prozesskontrolle | 1.12.2020 – 30.5.2023 | A. Spierings |
| Innosuisse 46246 | AM simulation scale-up for process optimization | 1.7.2020 – 31.12.2020 | A. Staub |
| Innosuisse 46964 | Leistungssteigerung und Kostensenkung von Kollektoren für Hochleistungswärmetauscher durch AM | 1.9.2020 – 6.3.2021 | A. Spierings |
| Innosuisse 48367 | Materials with Improved Reusability and Adaptive Chemistry for Layer-manufacturing of Eyewear | 1.12.2020 – 30.11.2022 | M. Schmid |

4. Publikationen im Berichtsjahr

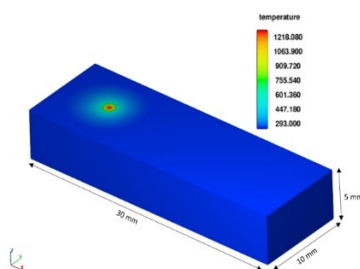
| Autoren | Titel | Erschienen in |
|---|--|--|
| L. Haferkamp, A. Spierings, M. Rusch, D. Jermann, M. Spurek, K. Wegener | Effect of Particle size of monomodal 316L powder on powder layer density in powder bed fusion | Progress in Additive Manufacturing (2020) |
| K. Rierer, N. Albrecht, S. Ziegelmeier, R. Ramakrishnan, L. Haferkamp, A. Spierings, G. Leichtfried | Influence of particle size distribution and morphology on the properties of the powder feedstock as well as of AISi10Mg parts produced by laser powder bed fusion (LPBF) | Additive manufacturing, 34 (2020) |
| P. Stoll, M. Schmid, M. Schmock von Ohr, K. Wegener | Integration of acceleration sensors in polymer parts produced with selective laser sintering | AIP Conference Proceedings 2205, 020063 (2020) |
| P. Stoll | Functionality integration in powder bed based additive manufacturing processes | Dissertation ETH Zurich |
| P. Stoll, A. Spierings | Funktionsintegration für Digitalisierung - Beim generativen Fertigen Sensoren integrieren | Schweizer Maschinenmarkt, 10.08.2020 |
| L. Haferkamp, A. Spierings | Metallpulver für das LPBF Verfahren | Technische Rundschau, 5/2020 p. 38-39 |
| A. Raymann, J. Kottmann, T. Stiefel, A. Spierings, R. Weber | Ersatzklemme aus dem 3D-Drucker | 50.2 Magazine, 6/2020, p. 36-37 |

Fachbereich: Additive Manufacturing
Leitprofessor: Prof. Dr. Konrad Wegener
Gruppe: inspire-iwf
Leitung: Josef Stirnimann (DMD)

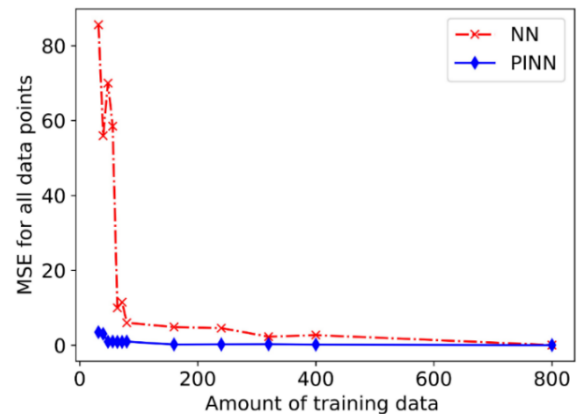
1. Schwergewichte Forschung und WTT

1.1 Prozessmodellierung mittels Physics Informed Neural Networks

Die steigenden Anforderungen an Qualität, Effizienz und Flexibilität von Produktionsmaschinen erfordern ein tiefgehendes Prozessverständnis. Einen wichtigen Beitrag zur Ermittlung von optimierten Prozessparametern liefern Prozessmodelle. Heutige Ansätze basieren beispielsweise auf der Finite Elemente Methode, welche für grössere Bauteile oder komplexe Prozesse mit einem hohen Rechenaufwand verbunden sind. Ein weiterer Nachteil sind aufwändige Messungen um Modellparameter zu bestimmen und mangelnde Möglichkeiten, diese Modelle in die Maschine zu integrieren. Eine vielversprechende Methode, um Prozesse mit wenig Daten zu modellieren sind Physics Informed Neural Networks (PINN). Dabei werden die Vorteile von Neuronalen Netzen (NN) mit dem bereits vorhanden Prozesswissen vereint. Dies führt dazu, dass weniger Datenpunkte notwendig sind und gleichzeitig Prozessunsicherheiten abgebildet werden können. Weiterhin können bereits trainierte Modelle mit neuen Messungen an die aktuelle Maschine angepasst werden. Diese Methode bringt vielversprechende Eigenschaften mit sich, um dynamische und komplexe Fertigungsprozesse wie etwa Direct Metal Deposition (DMD) abzubilden. Einer der fundamentalen Parameter zur Modellierung von additiven Fertigungsprozessen bildet die Temperatur. Daher wurde in einem ersten Schritt der Ansatz zur Modellierung der Temperaturverteilung angewandt. Bei diesem theoretischen Modell wurde eine rechteckige Platte mit einem Laser mit konstanter Geschwindigkeit an der Oberfläche erwärmt. Anschliessend wurde mit den Ergebnissen des Simulationsmodells ein herkömmliches neuronales Netz und ein PINN trainiert. Die Ergebnisse sind in veranschaulicht und zeigen, dass mit Hilfe des PINN signifikant weniger Daten notwendig sind, um vergleichbare Vorhersagegenauigkeiten zu erzielen. Weiterführende Arbeiten zielen darauf ab, die gewonnenen Modelle zur Beschreibung von Direct Metal Deposition zu erweitern.



3D Wärmefeldmodell mit einer bewegten Wärmequelle



Vergleich des mittleren quadratischen Fehlers für PINN und NN mit zunehmender Menge an gelabelten Daten

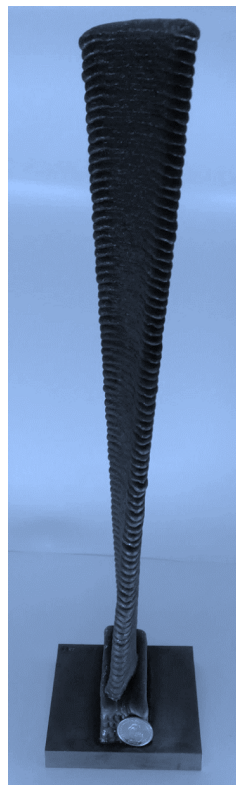
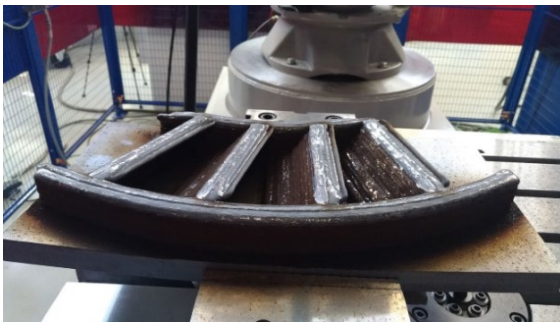
1.2 Anwendung des Cold Metal Transfer (CMT)-Verfahrens für Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Einer der Hauptkostentreiber in der additiven Fertigung ist die Auftragsrate, d.h. die Rate, mit der neues Material aufgetragen werden kann. Die maximal erreichbare Auftragsrate wird hauptsächlich durch die verfügbare Leistung und den Materialverlust beim Auftragsprozess begrenzt. Je mehr Energie zur Verfügung steht und je weniger Material verlorengeht, desto grösser ist die Menge an Material, die pro Zeiteinheit aufgeschmolzen und aufgetragen werden kann. Unter den möglichen Energiequellen, die für die additive Fertigung verwendet werden können, zeichnet sich der elektrische Lichtbogen durch hohe Effizienz und ein niedriges Kosten/Leistung Verhältnis aus. Die Verwendung eines elektrischen Lichtbogens zum Schmelzen von metallischem Drahtmaterial wird seit Jahrzehnten als Schweisverfahren eingesetzt. Wird der Prozess statt zum Fügen von Teilen zum Auftragen von Material verwendet, spricht man heute von Wire Arc Additive Manufacturing, kurz WAAM. Unter den verschiedenen Lichtbogenschweisverfahren, die für WAAM eingesetzt werden können, sticht der Cold Metal Transfer (CMT) Prozess von Fronius speziell durch seine Fähigkeit eines vergleichsweise kühlen Materialauftrags hervor. Das resultiert in geringerem Materialverzug als bei konventionellen MIG- oder TIG-Aufschweisverfahren. Zudem ist der Prozess gut steuerbar und weist eine hohe Auftragsrate bei minimalstem Materialverlust auf. All diese Eigenschaften machen das CMT-Verfahren zu einem hervorragenden Kandidaten für WAAM.

Im Gegensatz zu laserbasierten Systemen, kann das beim CMT-Verfahren erzielte Schmelzbad eine Breite von 10 mm überschreiten. Um den Einfluss der Prozessparameter auf die Spurengeometrie zu verstehen, wurden Wände mit verschiedenen Parameterkombinationen hergestellt und die erreichte Dicke und Oberflächenwelligkeit gemessen. Zusätzlich wurden Volumen erzeugt, um die Auswirkung von Prozessparametern, wie Wärmeeintrag und Überlappungsgrad der Spuren, auf die erreichbare Dichte zu verstehen. Obwohl die Oberflächenwelligkeit im Vergleich zum laserbasierten

System schlechter ist, konnte mit der getesteten Konfiguration eine sehr hohe Dichte und eine Auftragsrate über 3.5 kg/h erreicht werden. Der verwendete Draht war Edelstahl 316L mit einem Durchmesser von 1.0 mm.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in ein eigens entwickeltes CAM-Tool für WAAM mit CMT integriert. Das Tool erlaubt die Verwendung von angepassten Prozessstrategien und die automatische Anpassung der Werkzeugbahn für verschiedene Prozessparameter, was eine einfache, aber dennoch effektive Bahnplanung ermöglicht. Schliesslich wurden Demonstrationsteile hergestellt und über diese die Methode unter Beweis gestellt.



Mittels CMT-WAAM-Verfahren hergestellte Demonstrationsbauteile

2. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|-----------|---|------------------------|----------------|
| KTI 25498 | Advanced Laser DMD-Process | 1.5.2017 – 30.7.2020 | J. Stirnimann |
| KTI 19177 | Laserhartbeschichten | 1.12.2016 – 30.6.2020 | J. Stirnimann |
| KTI 27436 | Manufacturing of large scale components using additive manufacturing (AM) | 1.3.2018 – 31.5.2021 | J. Stirnimann |
| KTI 50844 | TurboDMD | 1.11.2020 – 31.10.2024 | J. Stirnimann |

3. Publikationen im Berichtsjahr

| Autoren | Titel | Erschienen in |
|--|--|--|
| D. Eisenbarth, A. Menichelli, F. Soffel, K. Wegener | Adaptive Slicing and Process Optimization for Direct Metal Deposition to Fabricate Exhaust Manifolds | AMPA 2020: Industrializing Additive Manufacturing, 2020, Zürich |
| D. Eisenbarth, P. Stolla, C. Klahn, T. Heinis, M. Meboldt, K. Wegener | Unique coding for authentication and anti-counterfeiting by controlled and random process variation in L-PBF and L-DED | Elsevier 2020, Open Access |
| D. Eisenbarth | Buildup strategies for additive manufacturing by direct metal deposition | DISS. ETH NO. 26907, 2020 |
| M. Dalaei, F. Cheaitani, A. Arabi-Hashemi, C. Rohrer, B. Weisse, C. Leinenbach, K. Wegener | Feasibility study in combined direct metal deposition (DMD) and plasma transfer arc welding (PTA) additive manufacturing | The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020 |
| S. Pfeiffer, M. Makowska, K. Florio, D. Sanchez, F. Marone, X. Zhang, G. Aneziris, S. Van, K. Wegener, T. Graule | Selective laser melting of thermal pre-treated metal oxide doped aluminum oxide granules | Open Ceramics, 2020 |
| F. Verga, M. Borlaf, L. Conti, K. Florio, M. Vetterli, T. Graule, M. Schmid, K. Wegener | Laser-based powder bed fusion of alumina toughened zirconia | Additive Manufacturing, 2020 |

Fachbereich: Composite Structures
Leitprofessor: Prof. Dr. Paolo Ermanni
Gruppe: inspire-ics
Leitung: Dr. Markus Zogg

1. Main research focus and WTT

1.1 Competences and Research Topics

Innovative Composite Structure (ics) is a research group for science and technology issues of inspire AG that is linked to the Laboratory of Composite Materials and Adaptive Structures of ETH Zürich.

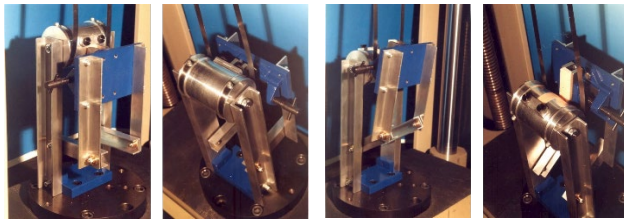
The group's core competence is the development and optimization of **lightweight structures made of fiber reinforced polymers**.

To reach highly efficient lightweight structures we are concurrently considering:

- Lightweight materials
- Lightweight design
- Manufacturing processes
- Integration of functions

Characterization of lightweight materials

Standardized as well as tailored tests and evaluation procedures for the investigation of material performance are our basis to develop the best combination of reinforcement fibers and polymer matrix for each application. Additional combined experimental and analytical investigations help us to improve the basic understanding of the structural behavior of lightweight fiber reinforced polymer materials.



Peeling test for sandwich specimen according to the internal test standard "inspire-ics T103"; starting position (first and second picture from left) and test in progress (third and fourth picture)

Lightweight design

Our own efficient laminate optimization algorithms allow the arrangement of the fiber reinforced polymers at the best location and to orient them in the optimal direction. Based on this we develop lightweight and cost efficient patched laminate structures that can be manufactured with a minimum of cut-offs as well as outstanding lightweight designs made from the combination of fiber reinforced polymers with additively manufactured elements.

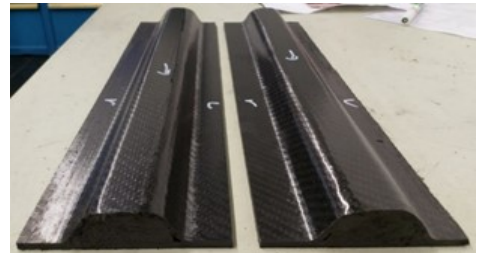


CFRP patches for structural reinforcement placed on the base CFRP structure of the hip component of a lower-limb exoskeleton

Manufacturing processes for fiber reinforced polymer structures

In our research projects, we are supporting the development and optimization of robust and fast processes for lightweight fiber reinforced polymer structures with thermoplastic as well as with thermoset matrix systems. This includes the investigation of novel processing routes for the recycling of production cut-offs and end-of-life FRP materials.

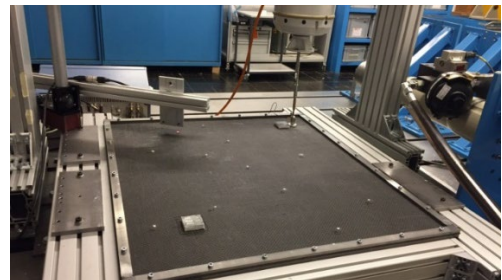
Ongoing research at inspire-ics as well as at the chair of our lead professor Prof. Paolo Ermanni at ETH Zurich is focusing on high performance fiber reinforced polymer structures with thermoplastic matrix systems. This includes processing routes to manufacture complex mono-material lightweight structures in an integral design as well as pultrusion processes.



CFRP mono-material sandwich Ω -rib specimen with thermoplastic matrix

Integration of functions

Fiber reinforced polymer components show an outstanding potential to integrate functions directly into the structure, which is an elegant way to reduce the weight and the costs at the same time. Our current research is focusing on passive damping approaches like particle dampers, which allow a robust and lightweight damping of structural vibrations.

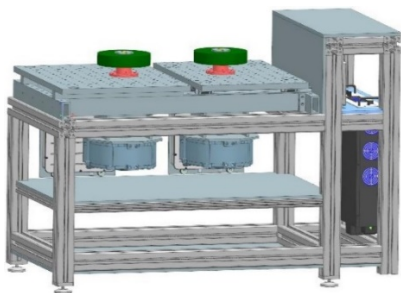


CFRP panel with particle dampers on vibration test-rig

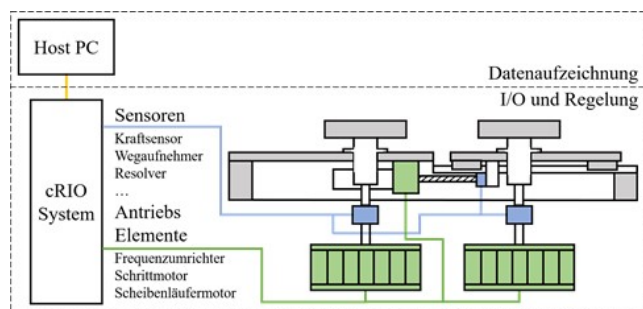
1.2 Innovative test stand for the lifetime assessment of flat belts in power transmission

An example of the cooperation between inspire groups, an innovative test stand for the lifetime assessment of flat belts in power transmission was developed. This combines the fiber reinforced polymer design of the flat belt with the process understanding required in design and manufacturing of an innovative test bench.

Flat belts are machine elements used for the power transmission between rotating elements. Compared to chain or gear drives, belt drives express advantages such as low-noise, and shock- and vibration-damping characteristics. Additionally, the simple, low maintenance and cost effective setup as well as high energy efficiency up to 98% make them an attractive choice. Since they transfer power based on friction, they are subject to wear and consequently are consumables. Hence, there is a demand to increase the service lifetime of power transmission flat belts to decrease cost and downtime due to belt failure. This requires a deeper understanding on the fundamental transmission mechanics of flat belts as well as the failure mechanism limiting their lifetime. Experimental investigation is key in achieving both goals.



CAD drawing of the final design for the test stand



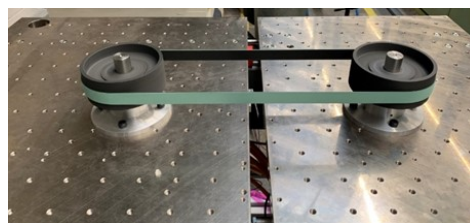
Schematic drawing of the test stand with data acquisition and control strategy visualized

Existing test stands were not able to replicate high performance applications and accelerating the lifetime assessment of flat belts due to limited capabilities in belt force and speed. Therefore, an innovative test stand was designed and established, with a maximum belt tension of 1500 N and a maximum belt speed of 50 m/s, enabling the transfer of 75 kW. The design of the test stand was governed by modularity regarding multiple aspects. Firstly, a variety and range of reproducible adjustable parameters were required. Secondly, the test stand had to be flexible regarding the emulation of

possible drive configurations. Lastly, auxiliary instrumentation had to be installed on the test stand and linked to its data acquisition system.



Test stand including protective cover



Power transmission belt during test

2. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|------------------|--|------------------------|----------------|
| KTI 25650 | Neuartige Faserverbundhalbzeuge mit thermoplastischer Matrix für Monomaterial-Sandwichstrukturen | 1.4.2017 – 31.1.2020 | Markus Zogg |
| KTI 26551 | Robuster Hochleistungsflachriemen mit signifikant verbesserter Lebensdauer | 16.10.2017 – 31.7.2021 | Markus Zogg |
| Innosuisse 38190 | Recycling von Prepregabfällen zu neuen und hochwertigen Produkten | 1.11.2019 – 30.4.2021 | Markus Zogg |

3. Publikationen im Berichtsjahr

| Autoren | Titel | Erschienen in |
|--|--|---|
| V. Urundolil, M. Zogg, L. Weiss, K. Wegener | Design of a Test Stand for Lifetime Assessment of Flat Belts in Power Transmission | 30th CIRP Design 2020; online, 6 to 8-May-2020 ; Periodica CIRP 91 (2020) 356 - 361 |
| E. Relea, V. Urundolil, A. Sanchez Cebrian, C. Gschnitzer-Bärthaler, M. Zogg, L. Weiss, K. Wegener | Utilization of CFRP in high-speed stamping presses and its gigacycle fatigue testing at resonance frequency | International Journal of Automation Technology, Vol.14, No.2, 2020 |
| F. Filotto, F. Runkel, G. Kress | Cross section shape optimization of wire strands subjected to purely tensile loads using a reduced helical model | Advanced modelling and Simulation in Engineering Science (2020) 7:23 |

Fachbereich: Virtual Production
Leitprofessor: Prof. Dr. Dirk Mohr und Prof. Dr. Markus Bambach
Gruppe: inspire-ivp
Leitung: Dr. Jörg Heingärtner

1. Main research focus and WTT

Nowadays, complex manufacturing systems and processes are designed in a virtual environment before their realization. To advance this trend, inspire-ivp generates in-depth knowledge of material behavior and develop advanced modeling and manufacturing techniques. From standard methodologies to Digitization and Artificial Intelligence, the group deals with the engineering of virtual systems, which are beneficial to these design processes. These virtual methods are then used at different modelling scales depending on the respective application. The implementation and optimization of the designed processes as well as in-line data acquisition of the relevant process parameters and the development process control systems are current research areas. Therefore, the core competences of inspire-ivp are:

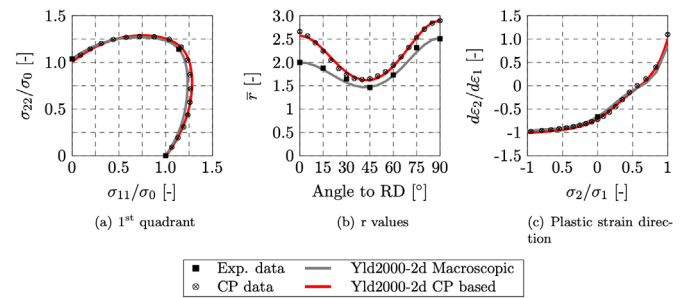
- Material modeling and development of failure criteria
- Numerical simulations
- Process design and optimization
- Metamodeling of processes
- In-line data acquisition and process control

When implemented in a production environment the combination of virtual methods, data acquisition and process control leads to smart production systems in Industry 4.0 applications.

1.1 Material modeling

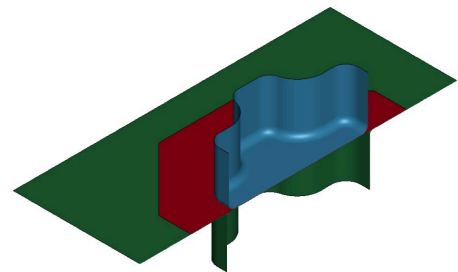
The accuracy of the simulation results in terms of metal sheet forming strongly depends on the capability of modelling the anisotropic material behavior. In addition, predictive capabilities of the models are strongly influenced by the way how the constitutive model parameters are calibrated. Macroscopic models lean towards to become more complex in order to map the material behavior more precisely. As consequence the amount and complexity of the experiments is increasing as well. In addition, it is well known that, some of the experiments, for example the equibiaxial compression test, are difficult to perform and therefore, a reasonable coupling of crystal plasticity (CP) modelling and macroscopic models was developed in an Innosuisse project. Virtually created simulation results by CP are used to improve the model parameter estimation. The method is applied on the widely used deep drawing steel DC05. The novel methodology to calibrate the constitutive model parameters is tested in the prediction of strain

distribution for selected Nakajima samples and is validated by predicting strain patterns on a deep drawn part.



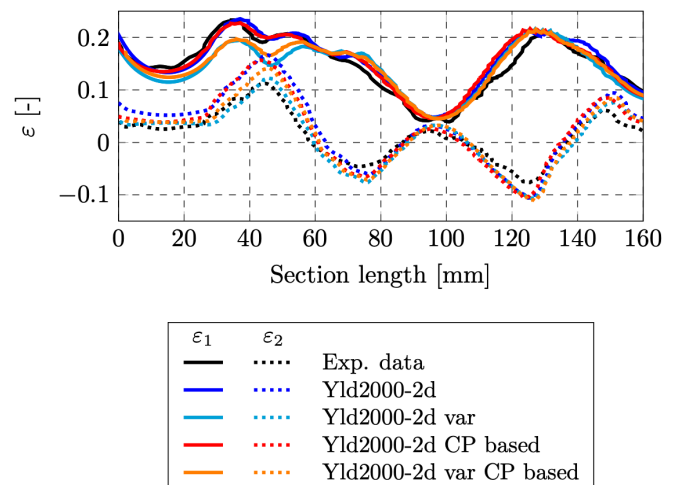
Response of calibrated Yld2000-2d model for DC05

The calibrated macroscopic yield criteria are validated in terms of strain distribution prediction in finite element (FE) simulations. Their results and the performance of the classically derived model parameters are compared to the ones obtained by the virtual experiments.



Model illustration of deep drawing processes with a cruciform geometry, with faded out blankholder

The model performance is tested using a deep drawing process with a cruciform shaped die geometry.

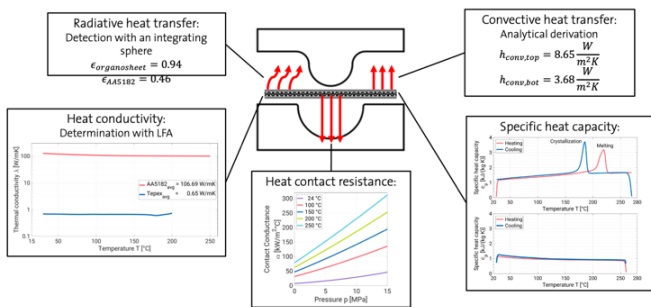


Simulation results for DC05 from a section parallel to punch head surface, 5.0mm above the base

It is seen that the biggest differences occur when the minor strain component is positive. This coincidences with the range, where the predicted plastic flow direction on the yield locus has the biggest difference between both model variants.

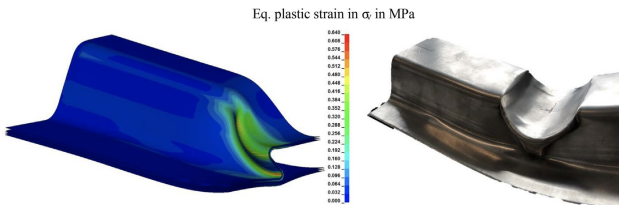
1.2 Numerical Simulation - Hybrid Thermoforming of Body in White Parts

In the EU proect ALLIANCE new advanced materials (steel, aluminum, hybrid) and manufacturing technologies to achieve a target weight reduction of 25% of the vehicle body at a production rate of 100'000 units / year and additional costs below 3 € / kg were developed. Together with Centro Ricerche Fiat, an innovative, single-stage thermoforming process was developed in which a sandwich sheet made of aluminum and GFRP is formed simultaneously. The virtual design of the process, taking into account optimal process parameters, e.g. heat transfer, saved resources and time.

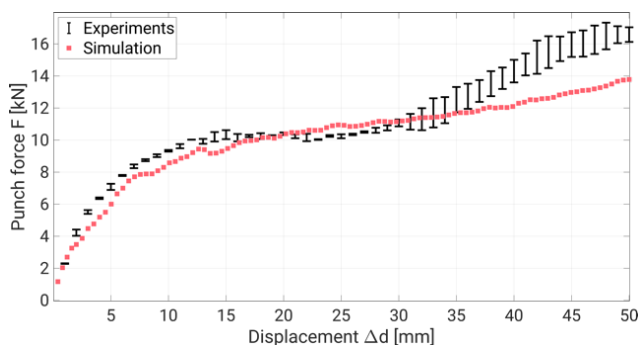


Heat transfer mechanisms that influence the thermoforming process

Adhesion between the outer aluminum layers and the GFRP core layer could be guaranteed with a three-layer film solution from the company Nolax.



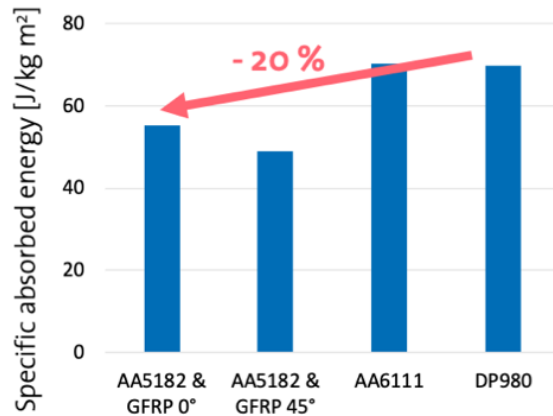
Comparison of component deformation in the three-point bending experiments after the punch displacement of 50 mm in the simulation (left) and experiment (right)



Force comparison of experiments and simulation of the three-point testing

To validate the results of the digital twin, the component was subjected to a three-point bending test. It was shown that the real tests corresponded very well with

the simulations. To demonstrate the lightweight potential, a component made of DP980 with 1.5 mm sheet thickness was crashed and the specific absorbed energy per areal density was compared. The hybrid component was able to absorb only 20% less energy with the 60% weight savings compared to the ultra-high strength steel solution.

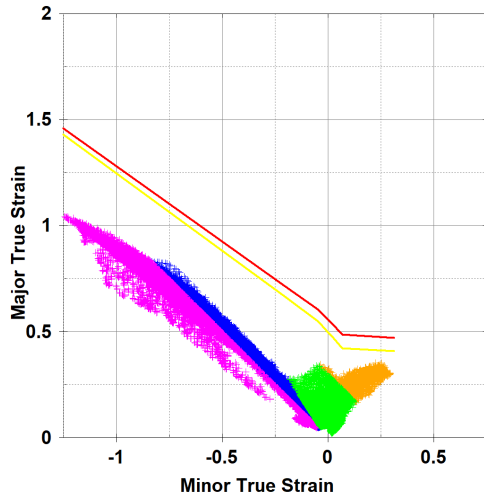


Comparison of specific absorbed energy of different materials

To determine the optimum process parameters to achieve the best possible adhesion between aluminum and GFRP, the influence of forming temperature and closing pressure on the shear strength of the bonded joint was investigated. It was shown that at the highest possible temperature of 260°C and relatively low closing pressure of 0.1 MPa, an average shear strength of 8 MPa could be achieved. To describe the deformation behavior of twill-reinforced PA6, tensile and bias extension tests could be performed on a tensile test rig. The very strongly temperature-dependent bending stiffness of the material was determined by specimens clamped on one side under dead weight. The virtual mapping of the very low bending resistance at forming temperature could be exactly reproduced by shifting the integration points in the thickness direction of the sheet.

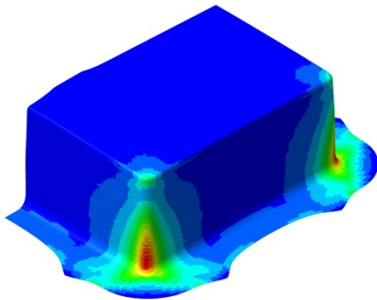
1.3 Innovative process design

In a current Innosuisse project the goal is to find innovative forming technologies for kitchen sink production made out of stainless steel as the marketing trend for kitchen sinks goes into the direction of small radii. The production of those radii using deep drawing is challenging and requires heat treatment to change the materials microstructure. The perfect balance between edge radii, danger of wrinkles, and stretching of the side wall has to be found. Now the selection of possible processes for forming a kitchen sink with sharp radii without annealing is completed. To obtain realistic feedback from the following simulation, a typical stainless-steel material used for kitchen sinks was analyzed.



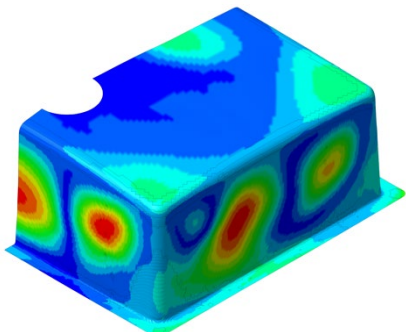
Forming limit curve of 1.4301 (red, yellow) and simulation results of new process

Tensile tests at different temperatures, bulge tests and Nakazima experiments were performed to get the flow curve, yield locus and forming limit of the material. In addition, the heat transfer between the stainless steel and the tool material was analyzed for different lubrication system since martensite formation during plastification depends on the blank temperature. The simulations of the possible processes showed which process is capable of producing crack-free parts.



Simulation results of the new process design, critical areas are the corners with a high martensite content

In addition to the forming limit, a novel wrinkling criterion was also developed to evaluate the potential of the process. An advanced deep drawing process was selected and the process parameters were improved in subsequent iterations.

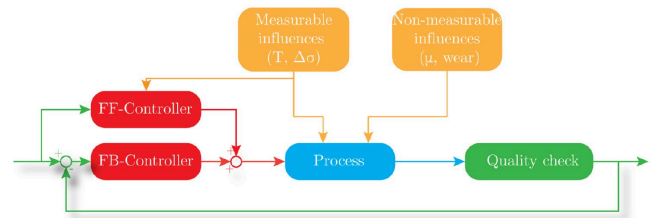


Results of the wrinkling criteria in the sidewalls of the sink

The final process has the potential to bypass annealing and even improve cycle time at the press itself. The construction of the tools will be completed in April 2021. Then the tools will be released for production testing.

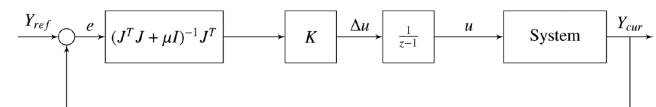
1.4 Process control

The complexity of deep drawn parts is continually increasing, partly in response to the requirement for more sophisticated designs, but also because improved accuracy of simulations during the design process allows more complex parts to be manufactured. However, this increasing complexity has the effect of reducing the operating window in which parts are manufactured reliably and accurately. The influences that affect the process can be split into two main categories. The first category includes external variations, such as changes in the material properties or the blank thickness, and changes in the dimensions of the cut blank. The control scheme consists of a feed-forward compensator and a feedback loop.

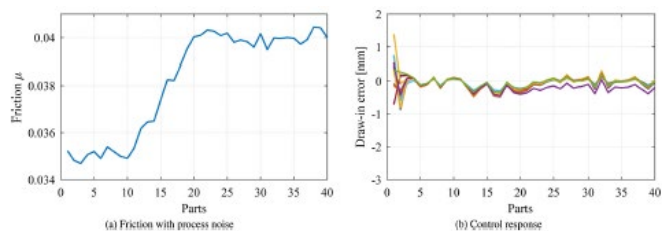


Basic structure of the control scheme

In the simplest case, the feed-forward control does not make use of measurements and therefore is a form of open-loop control, which applies a pre-determined schedule for the machine settings. In the current project the focus is on the design of a feedback control loop, which is operated in conjunction with the feed-forward compensator. In closed-loop control, a measurement of part quality is obtained from a sensor (or several sensors), compared with a reference value and the controller makes adjustments to the machine settings to compensate for the difference. The approach taken is to consider the design of a feedback controller as an optimal control problem and it is shown that this results in the same form of controller as an iterative learning control approach. The benefit of considering the controller in terms of optimal control is that it means that the closed loop poles of the feedback loop can be identified, which allows the effect of model uncertainties on the stability of the system to be evaluated. In addition, it shows that integral action is included inherently within these controllers, which explains why the effect of disturbances can be reduced.



Optimal control approach used for deep drawing processes



| | | |
|--|---|--|
| J. Heingärtner, M. Veldhuis, M. Kott, P. Hora | Process Control of Forming Processes to Compensate Temperature Induced Friction Changes | 23rd International Conference on Material Forming (ESAFORM 2020) |
|--|---|--|

Controller response to changes in friction (e.g. due to an increase in temperature during production)

The control system based on the optimal control approach already showed very good results in real production of automotive body in white parts.

2. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|---------------------|--|-----------------------|------------------|
| Interreg NWE 220 | ASPECT: Advanced Simulation and Control of Tribology in Metal Forming Processes for the North-West European Consumer Goods and Transport Sectors | 17.5.2016 – 16.6.2021 | Jörg Heingärtner |
| KTI 26515 | Produktion und Modellierung einer innovativen Generation von duktilen und hochfesten Al-Legierungen für den Automobilbau | 1.11.2017 – 28.2.2021 | Bekim Berisha |
| KTI 30801 | BeRG: Einsatz hybrider Umformverfahren zur gezielten Verschiebung der Verfahrensgrenzen bei Tiefziehteilen aus rostfreiem Stahl | 1.12.2019 – 31.5.2022 | Jörg Heingärtner |
| Bilaterales Projekt | Innovationsprojekt Daimler | 1.3.2016 – 31.5.2021 | Jörg Heingärtner |

3. Publikationen im Berichtsjahr

| Autoren | Titel | Erschienen in |
|--|--|---|
| P. Fischer, J. Heingärtner, S. Duncan, P. Hora | On part-to-part feedback optimal control in deep drawing | Journal of Manufacturing Processes Volume 50, February 2020, Pages 403-411 |
| H. Hippke, S. Hirsiger, B. Berisha, P. Hora | Optimized and validated prediction of plastic yielding supported by cruciform experiments and crystal plasticity | International Journal of Material Forming, vol. 13: no. 5, pp. 841-852, Paris: Springer, 2020 |
| S. Hirsiger, B. Berisha, H. Hippke, P. Hora | Crystal plasticity as complementary modelling technique for improved simulations results of anisotropic sheet metal behaviour in forming processes | 39th International Deep-Drawing Research Group Conference (IDDRG 2020) (virtual), Seoul, South Korea, pp.012067 London: Institute of Physics, October 26-30, 2020 |
| H. Hippke, B. Berisha, P. Hora | A full-field optimization approach for iterative definition of yielding for non-quadratic and free shape yield models in plane strain | 39th International Deep Drawing Research Group Conference (IDDRG 2020) (virtual), Seoul, South Korea, pp.012084 Bristol: Institute of Physics, October 26-30, 2020 |
| T. Fischer, M. Grubenmann, M. Harhash, W. Hua, J. Heingärtner, P. Hora, H. Palkowski, G. Ziegmann | Experimental and numerical investigations on the quasi-static structural properties of fibre metal laminates processed by thermoforming | Composite Structures, vol. 258, pp. 113418, Kidlington: Elsevier, 2020 |

Fachbereich: Product Design
Leitprofessor: Prof. Dr. M. Meboldt
Gruppe: inspire-ipdz
Leitung: Dr. Christoph Klahn

1. Schwergewichte Forschung und WTT

Neue Technologien können für Unternehmen gleichermaßen Chance und Bedrohung sein. Sie sind eine Chance, wenn es gelingt mit ihnen einen zusätzlichen Nutzen für das Unternehmen oder seine Kunden zu schaffen. Zu einem Risiko werden neue Technologien, wenn es ein Unternehmen im Gegensatz zu seinen Konkurrenten nicht schafft, diesen Nutzen für sich zu erschliessen oder wenn die neuen Technologien das bisherige Geschäftsmodell als Ganzes in Frage stellt.

Die inspire-Gruppe ipdz Design for New Technologies unterstützt Firmen beim Wissensaufbau für die Additive Fertigung (Additive Manufacturing, AM) und die Digitalisierung von Montageprozessen.

1.1 Additive Fertigung

Eine Betrachtung der AM-Produkte und AM-Anwendungen in der industriellen Realität zeigt, dass sich AM-Verfahren in immer mehr Serienanwendungen etabliert haben.

Die inspire ipdz-Gruppe trägt zur Erweiterung des AM-Wissens über die Integration der Additiven Fertigung in die Prozessketten von Supply Chain, Konstruktion und Nachbearbeitung bei.

Zur Förderung des wissenschaftlichen Austauschs haben inspire und ETH pd|z im September 2020 die zweite internationale Konferenz Additive Manufacturing in Products and Applications AMPA2020 durchgeführt. Über 2 ½ Tage erfolgte ein reger Austausch der über 100 Teilnehmer aus Wissenschaft und Industrie. In 3 Keynotes, 35 wissenschaftlichen und 18 industrievorträgen haben Redner ihre Erkenntnisse zu unterschiedlichen Aspekten von Design Tools & Methods, Manufacturing Process Chain, Process Chain Integration, Quality Assurance, Unique Customer Benefits und Teaching & Training vorgestellt. Eine Wiederholung der Konferenz ist im Rhythmus von 3 Jahren geplant.

Das Fachbuch «Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung» wurde 2018 veröffentlicht und hat erfolgreich zu einem Technologietransfer an ein grösseres Publikum beigetragen. Die zweite, überarbeitete Auflage wurde 2020 vorbereitet und ist seit Anfang 2021 im Handel.

1.1.1 Bridge Manufacturing of High-End Imaging Equipment with Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting

Der Einsatz von AM für Endnutzerprodukte im Bereich Foto- & Videografie wurde im Rahmen des Projekts "Bridge Manufacturing of High-End Imaging Equipment

with Selective Laser Sintering (SLS) and Selective Laser Melting (SLM)" untersucht. Das Projekt wurde umgesetzt durch ALPA Capaul & Weber AG, ETH Zürich und inspire AG. Aus der Zusammenarbeit sind mehrere Produkte entstanden, welche von ALPA kommerzialisiert wurden. Dazu gehören zum Beispiel ein additiv gefertigter Kamerakäfig und Batteriehalter für Videografiesysteme.

Die AM Bauteile sind funktional hoch integriert und beinhalten z.B. elektronische Komponenten wie Steuerungsplatinen und Lüfter. Die geometrische Formfreiheit von AM wurde ausgenutzt um Nutzern hoch individualisierte Bauteile anzubieten. Additiv gefertigte Handgriffe können mithilfe eines Design Konfigurators automatisiert auf die Anatomie der Nutzer angepasst werden.

Zusätzlich zu den AM-Produkten wurden unterstützende Systeme und Tools aufgebaut. Dazu gehört zum Beispiel eine Bestellschnittstelle für AM Prototypen & Produkte, welche es ALPA ermöglicht, direkt aus dem CAD System Bauteile zu bestellen. Das AM-Konstruktionwissen wurde in einer Feature-Datenbank formalisiert. Diese ermöglicht es allen Designern, die Formfreiheit von AM anzuwenden. Die Ergebnisse des Projekts wurden in drei wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht. Zudem wurden die Resultate auch auf mehreren Industriekonferenzen (z.B. von Autodesk) und Veröffentlichungen (Swiss AM Guide, Innosuisse Magazin) präsentiert.



ALPA Videografiesystem

1.1.2 Additiv gefertigte Hydraulikventile AMminiHyd

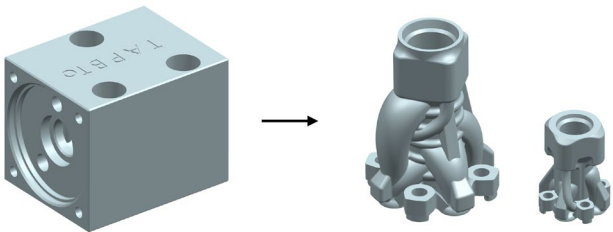
Im Rahmen des Projektes AMminiHyd wurde ein mittels SLM gefertigtes Kolbenschieberventil entwickelt, welches von der Konzeptphase bis hin zur Validierung umgesetzt wurde.

In einem ersten Schritt wurde die Funktionsweise des konventionell gefertigten Ventils hinterfragt, um herauszufinden, welche Merkmale funktionsgetrieben und welche produktionsbedingt sind. Dies ist notwendig, um sich vom Konstruieren für konventionelle Verfahren zu lösen und das Maximum aus den Möglichkeiten der additiven Fertigung herauszuholen. Des Weiteren wurden Ideen gesammelt, wie mittels SLM zusätzlich

Mehrwert geschaffen werden kann, beispielsweise durch Oberflächentexturierung oder Sensorintegration.

Das daraus abgeleitete Konzept verbindet die verschiedenen Ideen. In einem nächsten Schritt wurden Detailkonzepte entwickelt und iterativ simuliert, um den Einfluss von Faktoren wie der Anzahl an Einströmkanälen, dem Einströmwinkel und der Kammerform zu untersuchen.

Parallel zu der Entwicklung der Idealgestalt des Fluidvolumens wurden die Integration eines Sensors zur Überprüfung der Kolbenposition untersucht. Ein weiteres Ziel war es, die Notwendigkeit einer Gushülse zwischen Kolben und Ventilkörper zu umgehen. Dazu wurden ausgiebige Untersuchungen zu verschiedenen Materialkombinationen, Beschichtungen und Oberflächenadaptionen durchgeführt. Es wurde ausserdem ein Prüfstand entwickelt, um diese Untersuchungen zu ermöglichen.



Konventioneller Ventilkörper und additiver Körper in zwei Nenngrössen

Über die geplanten Projektinhalte hinaus wurde eine miniaturisierte Variante des als NG 3 bezeichneten Ventils konstruiert und getestet. Mit dem Ventil der Nenngrösse 1.5 wurde der Grundstein für eine Nutzung von Kolbenschieberventilen in sehr kompakten Systemen mit geringem Ölvolumenstrom gelegt.



Additiver Ventilkörper in NG 1,5 und NG 3

Zwei Kennzahlen des NG 3 Ventil zeigen das grosse Potential der additiven Fertigung in Hydraulikanwendungen: Im Vergleich zum konventionellen Design wurde der Druckverlust um rund 60% und das Gewicht um 50% reduziert.

1.1.3 Spannsysteme für eine automatisierte und wirtschaftlichere Prozesskette von additiv gefertigten Metallbauteilen

Ein Hauptkostentreiber bei der SLM Technologie ist die Nachbearbeitung. Grund dafür sind die manuellen Nachbearbeitungsschritte. Um eine Kostenreduzierung zu schaffen, benötigt es eine durchgängig automatisierte Prozesskette, inklusive Post-Processing. Um dies zu ermöglichen, benötigt es standardisierte Schnittstellen zwischen SLM Bauteil und Bearbeitungsprozessen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts plant die Firma Gressel den Einzug in den wachsenden Bereich der additiven Metallfertigung zu erhalten. Gressel plant seine Kompetenzen aus der CNC-Fräsmaschinen-Spanntechnik gewinnbringend in die SLM-Technologie zu integrieren.

Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung von zwei standardisierten Spannschnittstellen für SLM-Bauteile. Die universellen Schnittstellen ermöglichen die automatisierte Handhabung und Einspannung von komplexen, individualisierten Bauteilen.

Die erste Lösung besteht aus integrierten Bolzen als universelle Schnittstelle. Die zweite Lösung für eine Schnittstelle sind dünnwandige Bleche. Diese Schnittstellen bilden die Grundlage für eine automatisierte Prozesskette.



Integrierte Bolzen als universelle Schnittstelle für Spannsysteme

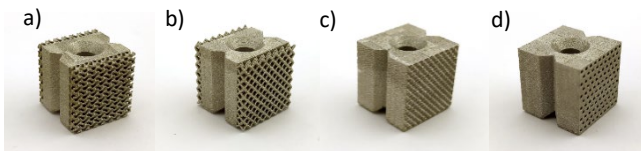


Additive Fertigung auf universellen Blechstreifen

Gegenüber bisherigen Spannsystemen bieten die neu entwickelten Lösungen den folgenden Mehrwert: Beide Spannsysteme ermöglichen ein SLM-Bauteil von 5-6 Seiten fräsend nachzubearbeiten. Es benötigt durch die integrierten Spannschnittstellen keine separate Herstellung von individuellen Spannbacken. Beide Spannsysteme sind besonders gut geeignet für Leichtbauteile, da keine zusätzlichen Kräfte in das Bauteil eingebracht werden. Eine Positionsabtastung des SLM-Bauteils in der Fräsmaschine ist nicht notwendig, da vom Digitalen Zwilling die Position in der Fräsmaschine übernommen werden kann. Das Blechspannsystem ist besser für kleine Bauteile geeignet, während das Bolzenspannsystem für grössere Bauteile geeignet ist.

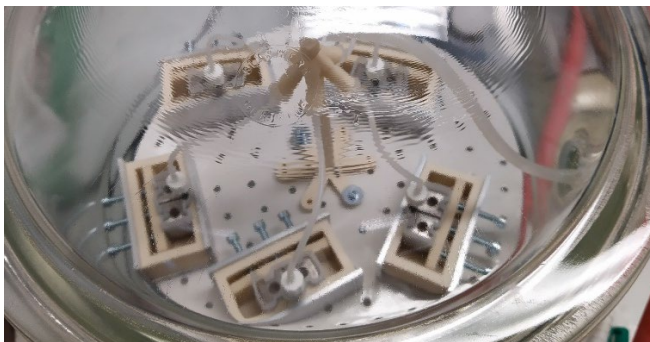
1.1.4 Verbesserung der Klebeverbindung in supra-leitenden Beschleunigermagneten MagAM

Im Projekt MagAM wird eine verbesserte adhäsive Verbindung zwischen metallischen Strukturen und mit Epoxidharz verklebten, supraleitenden Kabeln angestrebt. In einem ersten Schritt werden dazu vereinfachte Samples unter Zug- und Scherbeanspruchung und bei kryogenen Temperaturen geprüft. In der explorativen Studie werden verschiedene Oberflächenstrukturen und deren Effekt auf die Festigkeit der adhäsiven Verbindung untersucht: Triply periodic minimal surface Strukturen (TPMS, Gyroid), Gitterstrukturen (octet ohne horizontale trusses) und Oberflächenstrukturen (sinusoidale dimples, hinterschnittige Ankerstruktur). Die Designs verfolgen unterschiedliche Ansätze zur Verstärkung der adhäsiven Verbindungen wie etwa die Abschwächung des Übergangs der mechanischen Eigenschaften durch interpenetrating phase layers (IPL), eine vergrößerte Bindungsfläche und eine verstärkte mechanische Verschränkung.



Prüfkörper für die explorative Studie strukturierter Oberflächen: a) TPMS Gyroid Struktur, b) Gitterstruktur Octet ohne horizontale trusses, c) sinusoidale dimple Struktur, d) hinterschnittige Ankerstruktur

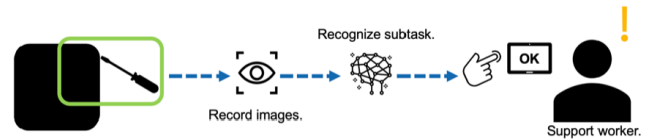
Zur Herstellung der Prüfkörper wurde ein Imprägnierungsprozess entwickelt, der es erlaubt die Metallstrukturen unter Vakuum mit Epoxidharz zu infiltrieren und so die Anzahl Luftblasen zu reduzieren.



Imprägnierungsprozess zur Infiltrierung der Prüfkörper mit Epoxidharz unter Vakuum

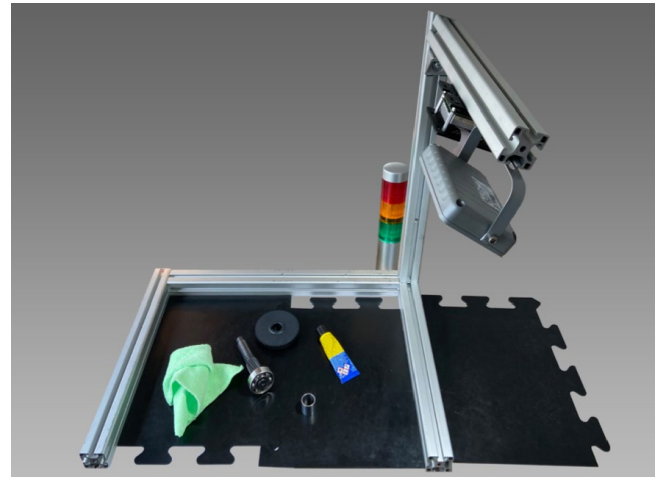
1.2 Smart Cameras in der Montage

Die Digitalisierung von Produkten und Prozessen bietet viele Möglichkeiten im Kontext von Internet of Things und Industrie 4.0. Eine konkrete Technologie mit vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten sind sogenannte Smart Cameras. Dies sind Kameras, die mit einer integrierten Auswerteeinheit nicht nur Bilder aufzeichnen, sondern diese gleich analysieren und mit einer Bedeutung versehen. Eine Smart Camera liefert somit kein Bild oder Video, sondern die Information was sie sieht.



Smart Camera Prozessablauf vom erkannten Objekt zur Montageunterstützung

Als wirtschaftlich relevante Leitanwendung für Smart Cameras wurde die intelligente Überwachung von Montageprozessen identifiziert. Die Smart Camera beobachtet den Montageprozess, erkennt Objekte und vergleicht die Information mit einem vorgegebenen Montageprozess. 2020 wurden mehrere Pilotsysteme entwickelt. Mit der aufgebauten Expertise wurden bilaterale Projekte mit Industriepartnern umgesetzt und mehrere Innosuisse-Anträge vorbereitet. Das Innosuisse-Projekt «Smart Cameras in der manuellen Montage – Ein Unterstützungssystem zur frühzeitigen und automatischen Erkennung von vermeidbaren Fehlern» startet im Februar 2021. Ein weiteres Projekt ist noch in der Begutachtung.



Versuchsaufbau zur Montageunterstützung mit Smart Camera und typischen Objekten

2. Projekte im Kampf gegen CoVid19

Im Rahmen der HelpfulETH-Initiative hat die ipdz Gruppe an zwei Projekten zur Unterstützung der Spitäler in der CoVid-19 Pandemie initiiert.

2.1 Proning Taco

Intubierte Covid-19 Patienten müssen täglich zweimal gewendet werden. Dies erfordert viel Zeit für das medizinische Fachpersonal. Pro Wendeprozess werden 4 Krankenpfleger und ein Arzt benötigt. Im Rahmen von HelpfulETH hat ein 20-köpfiges Team ein Wendesystem entwickelt. Dieses Wendesystem reduziert den Personalaufwand um bis zu 30%. Das Wendesystem wurde am USZ validiert und die Ergebnisse in einem Whitepaper publiziert. Auf Basis der Publikation wurde das Konzept von zwei Schweizer Industriepartnern übernommen.,



Test des Proning Taco Prototypen im USZ

2.2 PACID

Das PACID-System (Pathogen Containment for Interactive Devices) ermöglicht es, tragbare elektronische Geräte (wie Telefone oder Pager) durch eine transparente Hülle vor Keimen abzuschirmen. Das medizinische Personal kann damit weiterhin auf die Funktionen des Telefons zugreifen, ohne eine Kontamination der Oberfläche zu riskieren. Das PACID-System besteht aus einem Beutelöffner und einer Schleuse, in der das elektronische Gerät aufbewahrt wird, bis es vom Benutzer entnommen wird. Ausgehend von einer dringenden Anfrage des Universitätsospitals Zürich wurde das System innerhalb von fünf Wochen in drei aufeinanderfolgenden kurzen Entwicklungszyklen (Sprints) in enger Zusammenarbeit mit medizinischen Fachleuten entwickelt. Nach 18 Tagen wurde eine erste Produktversion für den täglichen Einsatz ausgeliefert.



PACID Schleuse und Beutelöffner

3. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|-------------------------|---|-----------------------|----------------|
| KTI 27654 | Bridge Manufacturing of High-End Imaging Equipment with Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting | 7.01.2018 – 7.07.2020 | C. Klahn |
| Innosuisse Impuls 35194 | Spannsysteme für eine automatisierte und wirtschaftlichere Prozesskette von Additiv Gefertigten Metallbauteilen | 05.2019 – 01.2021 | C. Klahn |
| Innosuisse Impuls 35720 | AM-Minihydraulikventil für die Robotik unter rauen Umgebungsbedingungen «AMminiHyd» | 05.2019 – 01.2021 | C. Klahn |
| CHART | Additive Manufacturing for Structural Components in Superconducting Coils “MagAM” | 05.2020 – 04.2023 | C. Klahn |

4. Publikationen im Berichtsjahr

| Autoren | Titel | Erschienen in |
|---|---|--|
| M. Meboldt, C. Klahn (Eds.) | Industrializing Additive Manufacturing: Proceedings of AMPA2020 | Springer, ISBN 978-3-030-54334-1 |
| A. Danun, P. Dalla Palma, C. Klahn, M. Meboldt | Building Block Synthesis of Self-Supported Three-Dimensional Compliant Elements for Metallic Additive Manufacturing | Journal of Mechanical Design, vol. 143: no. 5, pp. 053301, 2021. |
| C. Klahn, F. Fontana, B. Leutenecker-Twelsiek, M. Meboldt | Mapping value clusters of additive manufacturing on design strategies to support part identification and selection | Rapid Prototyping Journal, vol. 26: no. 10, pp. 1797-1807, 2021. |
| D. Eisenbarth, P. Stoll, C. Klahn, T. Heinis, M. Meboldt, K. Wegener | Unique coding for authentication and anti-counterfeiting by controlled and random process variation in L-PBF and L-DED | Additive Manufacturing, vol. 35, pp. 101298, 2020. |
| J. Ferchow, H. Baumgartner, C. Klahn, M. Meboldt | Model of surface roughness and material removal using abrasive flow machining of selective laser melted channels | Rapid Prototyping Journal, vol. 26: no. 7, pp. 1165-1176, 2020. |
| C. Klahn, K. Bühner, R. Engeli, M. Meboldt | Design Automation and Additive Manufacturing for Anatomically Diversified Medical Simulators | 30th CIRP on Design (CIRP Design 2020), Pretoria, South Africa, pp.458-463, 2020. |
| D. Omidvarkarjan, P. Balicki, H. Baumgartner, R. Rosenbauer, F. Fontana, M. Meboldt | The AM Dowel – A Novel Insert for the Integration of Threads into Additive Manufactured Polymer Components | Industrializing Additive Manufacturing: Proceedings of AMPA2020, pp.391-398, 2020. |
| D. Omidvarkarjan, J. Conrad, C. Herbst, C. Klahn, M. Meboldt | Bender – An Educational Game for Teaching Agile Hardware Development | Procedia Manufacturing, vol. 45, pp. 313-318, 2020. |
| D. Omidvarkarjan, R. Rosenbauer, D. Kirschenbaum, D. Cipriano, D. Ochsner, H. Woodfin, C. Klahn, M. Meboldt | Prototyping Strategies for the Agile Development of Additive Manufactured Products: A Case Study from the COVID-19 Pandemic | 31st Symposium Design for X (DFX 2020), pp.161-168, 2020. |
| J. Ferchow, L. Scazziga, H. Keel, F. Waldern, G. Engelberger, N. Deubelbeiss, T. Dysli, T. Laenzlinger, P. Durrer | Proning TACO Facilitating the Proning of Patients with ARDS | Whitepaper, ETH Research collection |

Fachbereich: Automatisierung / Optimierung

Leitprofessor: Prof. Dr. John Lygeros

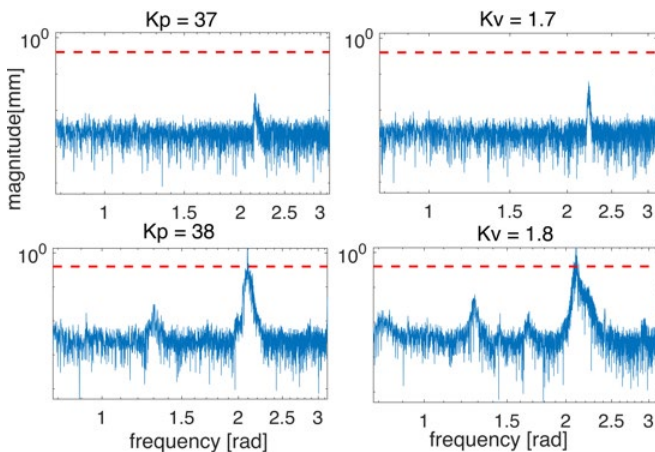
Gruppe: inspire-ifa

Leitung: Dr. Alisa Rupenyan

1. Schwergewichte Forschung und WTT

1.1 Implementation project "DISG"

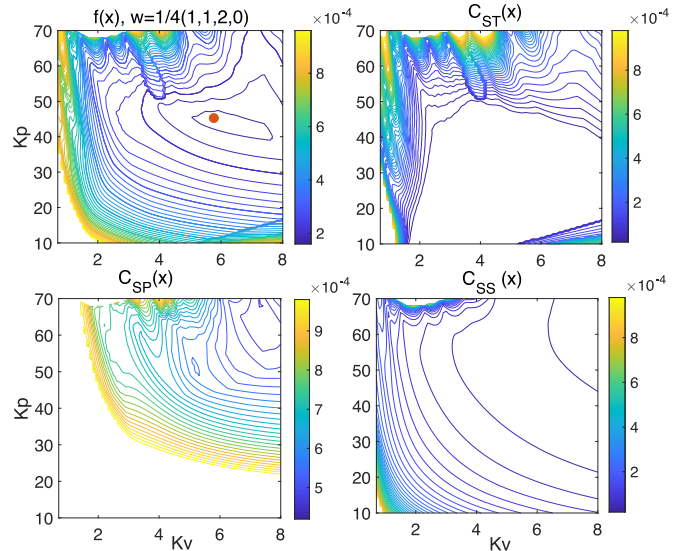
Two inspire groups are involved in the DISG project, inspire-ifa and inspir-iwf/Machinen. The activities of inspire-ifa were concentrated on the development of standardized solutions for controller tuning and condition monitoring, and partially in the development of optimization methods for maintaining the process within safe boundaries with minimal configuration of sensors. Remote (cloud-based) implementation is currently being integrated and demonstrated to multiple machines. An automated data-driven method for the tuning of PID cascade controller gains based on Bayesian optimization has been developed in the frame of the DISG project. The method was used to automate the tuning of the controllers of several axis drives in a CNC grinding machine. To ensure safety, a constraint capturing stability requirements from the system data was introduced. The implementation of the algorithm on the real system presents challenges due to additional grinding forces that lead to instabilities. A method for automatic detection of the critical gains was therefore integrated, and the optimization objective was extended with a penalization component, which depends on the proximity to critical gains of the current candidate points.



Critical gains can be avoided by monitoring data-driven features; once a threshold is exceeded, the corresponding controller gains are avoided in the optimization

The corresponding optimization objective was modeled using Gaussian process regression, based on data-driven performance indicators collected at different configurations of the controller gains. The proposed method for automated and standardized tuning procedures achieves the same grinding performance as with nominal tuning. The methodology can be further

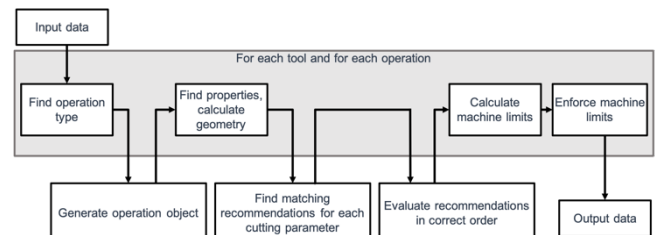
extended to adaptive control, and to optimization of multiple parameters at the same time. It is strongly connected to condition monitoring as the extracted performance indicators can be also used for the purpose of deducing the health state of the corresponding components. The method has been tested on multiple machines and adapted accordingly. It can be applied also remotely.



Data-driven performance metrics used in the controller tuning algorithm, and tuning result (top left panel)

1.2 Implementation project "Décolleteur 4.0"

The goal of the Deco 4.0-project is the automatic generation of CNC-code for machining parts on Swiss type lathes. inspire-ifa contributes the algorithm to select the cutting parameters for each operation. A recommendation engine was designed to select matching parameters from available data. Recommendations from different sources, such as tool manufacturers or experienced operators, are collected in a database. The recommendation engine then selects the best recommendations based on the properties of each operation. The operations are handled differently according to their type. The capabilities of the machine are also taken into consideration, to prevent recommending invalid cutting parameters. To further improve the recommended parameters, Bayesian optimization is applied. To avoid wasting time and material, ideally only good parts should be produced during the necessary experiments. The existing SafeOpt algorithm is well suited to this task. It takes quality constraints and the estimated uncertainty into consideration when selecting the next experiment to perform.

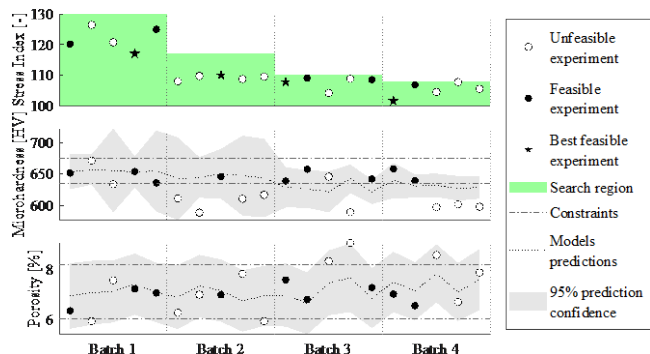


Software structure of the recommendation engine

An adapted version of the SafeOpt algorithm was successfully tested on a lathe to optimize the feed rate, while maintaining a sufficient surface quality. After 10 experiments the costs per part could be reduced by 24%, from 5.74 CHF down to 4.32 CHF.

1.3 Implementation project "ACTIV"

This project for data-driven control of the thermal plasma spraying process is a collaboration between inspire-ifa and inspire-iwf/Maschinen groups. inspire-ifa is currently developing data-driven models that connect different sub-systems in the process. The final goal is to develop a control solution to continuously adjust the input parameters in the thermal spray process (current, gas pressure) with respect to quality parameters measured online or between batches. Currently a data-driven model that connects process inputs to intermediates that define a state of the system is being build, and the connection between these state variables and quality parameters is modelled separately. The results achieved so far are promising. In a context where we often face a limited budget of batches and experiments, our research focuses on the dynamical selection of the batches size to optimize the set-up procedure. Our goal is to design an algorithm that is aware of the available evaluations' budget and maximizes the amount of collected information with a look-ahead approach.

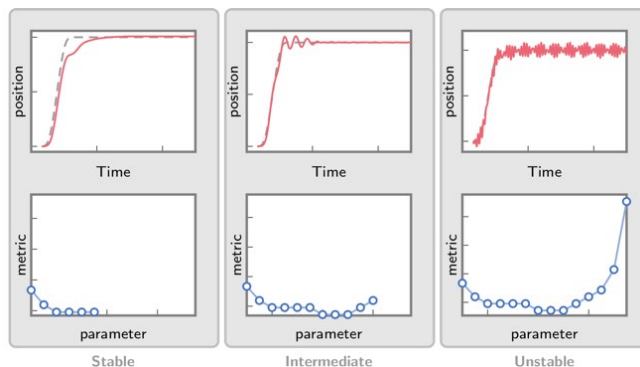


Data-driven process optimization: optimized process inputs with minimum experiments (batch optimization); quality indices (microhardness and porosity) are included as constraints; only samples that respect both constraints are considered when designing every subsequent batch

1.4 Implementation project "Data-driven Adaptive Control for High-end motion stages"

In the context of data-driven tuning and control algorithms, the tuning and the adaptive control phases are thought as an optimization problem with respect to the system's parameters the algorithm acts on. Bayesian Optimization built upon Gaussian process regression is used as major tool for solving this optimization problem in which the relation between the cost function and the parameters is unknown. A crucial part in the successful application of such algorithms, is the definition of suitable cost and constraint functions that can be computed from data at each iteration. As it resulted effective in previous work, we adopt cost function and constraints in the form of linear combination of certain performance

and stability metrics. In order to favor the optimization, the latter has to be efficiently computable from the available measurements and, most importantly, they should be representative of the features of the system with respect to the different parameters configurations. The analysis and evaluation of such metrics is object of this first part of the project, with the goal of defining a satisfactory cost function.



Example of performance metrics (bottom) computed from the position trajectory (top) for different conditions of the system; as the system goes towards instability, the metrics contribute to penalization in the cost function

2. Liste der WTT-Projekte im Berichtsjahr

| ID | Titel | Start – Ende | Leitung intern |
|------------------|--|-------------------------|------------------------|
| Innosuisse 46716 | Data-driven adaptive control for high-end motion systems | 01.09.2020 – 01.04.2022 | A. Rupenyan |
| Innosuisse 31695 | DISG, Data-driven insights for smart grinding | 01.02.2019 – 01.08.2021 | A. Rupenyan |
| Innosuisse 37896 | ACTIV | 01.08.2019 – 01.11.2022 | L. Weiss / A. Rupenyan |
| Innosuisse 32835 | Décolleteur 4.0 | 01.05.2019 – 01.06.2021 | A. Rupenyan |

3. Publikationen im Berichtsjahr

| Autoren | Titel | Erschienen in |
|---|---|---|
| M. Khosravi, A. Rupenyan, J. Lygeros, et al. | Cascade control: Data-driven tuning approach based on Bayesian optimization | IFAC World Congress 2020 |
| M. Khosravi, A. Rupenyan, J. Lygeros et al. | Performance-driven cascade controller tuning with Bayesian optimization | IEEE Transactions on Industrial Electronics, doi: 10.1109/TIE.2021.3050356. |
| M. Maier, A. Rupenyan, C. Bobst, K. Wegener | Self-optimizing grinding machines using Gaussian process models and constrained Bayesian optimization | International Journal of Advanced Manufacturing Technology 108, 539–552 |
| T. Gittler, S. Scholze, A. Rupenyan, K. Wegener | Machine Tool Component Health Identification with Unsupervised Learning | J. Manuf. Mater. Process. 2020, 4, 86 |



inspire AG
Technoparkstrasse 1
CH-8005 Zürich

info@inspire.ethz.ch
www.inspire.ethz.ch