



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**  
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 31.10.2022

---

## EE-Therm-MT

### Energy efficiency of thermally compensated machine tools

---





**Datum:** 31.10.2022

**Ort:** Zürich

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger/innen:**

inspire AG  
Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich  
<https://www.inspire.ethz.ch/>

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung IWF  
Department Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
ETH Zürich, LEE L214  
Leonhardstrasse 21, 8092 Zürich  
<https://www.iwf.mavt.ethz.ch/>

**Autor/in:**

Sebastian Lang, inspire AG, [lang@inspire.ethz.ch](mailto:lang@inspire.ethz.ch)  
Josef Mayr, inspire AG, [mayr@inspire.ethz.ch](mailto:mayr@inspire.ethz.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Carina Alles, Head of the research domain “Industrial Processes”, [Carina.Alles@bfe.admin.ch](mailto:Carina.Alles@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502305-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**



## Zusammenfassung

Die Schweiz verfügt über eine bedeutende und im internationalen Vergleich sehr hochwertige metallverarbeitende Industrie. So schätzen z.B. Kunden als Qualitätsmerkmal die weltberühmten Schweizer Uhren für ihre hohe Präzision. Die gesamte Industrie ist daher durch die immer grösser werdenden Anforderungen an die Präzision geprägt. Dies zeigt sich sehr deutlich daran, dass gemessen an der Bevölkerungszahl in der Schweiz die meisten Werkzeugmaschinen (WZM) installiert werden. Die Schweiz ist zudem eine der grössten Werkzeugmaschinenherstellernationen weltweit. Den grössten Einfluss auf die erreichbaren Bauteiltoleranzen haben die thermischen Abweichungen der WZM. Die klassische Massnahme zur Reduktion der thermischen Maschinenabweichungen ist das Temperieren der Maschinenhalle und der WZM selbst. Hinzu kommen lange Aufwärmzyklen, in denen die Maschine unproduktiv warmgefahren wird, um die geforderte Präzision zu erreichen. Alle diese Massnahmen treiben den Energieverbrauch der Branche in die Höhe und beeinflussen daher Produktivität und Effizienz negativ.

Durch eine intelligente thermische Kompensation könnten sowohl teure Klimatisierungen, wie auch Warmlaufzyklen eingespart werden. Im Projekt wurde dieses Energie- und Ressourceneinsparpotential erstmals quantitativ beurteilt. An fünf verschiedenen WZM wurde die Leistungsaufnahme parallel zu den thermischen Fehlern und der Temperatur untersucht. Vier davon bei zwei verschiedenen Industriepartnern und eine direkt bei inspire, an der auch ein externes Leistungsmesssystem installiert ist. Bei all diesen Maschinen lassen sich durch thermische Kompensation deutliche Genauigkeitssteigerungen erzielen. Insbesondere in der Aufwärmphase kann die Genauigkeit deutlich gesteigert werden, sodass die WZM produktiv statt unproduktiv genutzt werden kann. Die Energieeffizienz des Gesamtsystems kann deutlich erhöht werden, da die Leerlauf-Leistungsaufnahme der untersuchten Systeme typischerweise im Bereich von 2-3 KW liegt und die Aufwärmzeit, je nach Maschine, zwischen 2-6 Stunden beträgt. Darüber hinaus wurde ein erheblicher Energieverbrauch für die Kühlung der WZM selbst und für die Klimatisierung der Umgebung festgestellt.

Eine direkte Reduzierung des Energieverbrauchs, neben der Produktivitätssteigerung, erfordert die Integration der WZM-Kompensation in die Maschinensteuerung und kann nicht über die reine digitale Lageregelung erfolgen, wodurch eine Zusammenarbeit mit dem WZM-Hersteller zwingend notwendig wird. Eine Senkung des Energieverbrauchs der Umgebungstemperaturregelung muss in das Konzept der Produktionsumgebung integriert werden, z. B. kann der sekundäre Energieverbrauch der kompensierten WZM nicht direkt gesenkt werden, wenn die thermische Kompensation nicht bei allen empfindlichen WZM angewendet wird, was eine enge Zusammenarbeit mit dem Anwender und sein Bewusstsein für thermische Probleme erfordert.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass in der Schweiz ein jährliches Einsparpotential von 25-50 GWh Kühlleistung von WZM durch thermische Kompensation vorliegt

## Résumé

La Suisse dispose d'une industrie de transformation des métaux importante et de très haute qualité en comparaison internationale. Les clients apprécient par exemple, comme gage de qualité, les montres suisses mondialement connues pour leur grande précision. L'ensemble de l'industrie se caractérise donc par des exigences de précision toujours plus grandes. Cela se traduit très clairement par le fait que, par rapport au nombre d'habitants, c'est en Suisse que sont installées le plus grand nombre de machines-outils (MO). La Suisse est en outre l'une des plus grandes nations productrices de machines-outils au monde. Ce sont les écarts thermiques des machines-outils qui ont la plus grande influence sur les tolérances de pièces réalisables. La mesure classique pour réduire les écarts thermiques de la machine consiste à tempérer la salle des machines et la machine-outil elle-même. A cela s'ajoutent de longs cycles de chauffe pendant lesquels la machine est chauffée de manière imprudente afin



d'atteindre la précision requise. Toutes ces mesures font grimper la consommation d'énergie du secteur et ont donc une influence négative sur la productivité et l'efficacité.

Une compensation thermique intelligente permettrait d'économiser à la fois des climatisations coûteuses et des cycles de chauffe. Dans le cadre du projet, ce potentiel d'économie d'énergie et de ressources a été évalué pour la première fois de manière quantitative. La puissance absorbée a été étudiée sur cinq machines-outils différentes, parallèlement aux erreurs thermiques et à la température. Quatre d'entre elles ont été installées chez deux partenaires industriels différents et une directement chez Inspire, sur laquelle est également installé un système externe de mesure de la puissance. Sur toutes ces machines, la compensation thermique permet d'obtenir de nettes améliorations de la précision. La précision peut notamment être nettement améliorée pendant la phase de réchauffement, ce qui permet d'utiliser le MO de manière productive plutôt qu'improductive. L'efficacité énergétique de l'ensemble du système peut être nettement améliorée, car la puissance absorbée à vide des systèmes étudiés est typiquement de l'ordre de 2 à 3 KW et le temps de préchauffage est de 2 à 6 heures, selon la machine. En outre, une consommation d'énergie considérable a été constatée pour le refroidissement de la machine-outil elle-même et pour la climatisation de l'environnement.

Une réduction directe de la consommation d'énergie, en plus de l'augmentation de la productivité, nécessite l'intégration de la compensation du MO dans la commande de la machine et ne peut pas se faire par la seule régulation numérique de la position, ce qui rend obligatoire une collaboration avec le fabricant du MO. La réduction de la consommation d'énergie du contrôle de la température ambiante doit être intégrée dans le concept de l'environnement de production ; par exemple, la consommation d'énergie secondaire des machines-outils compensées ne peut pas être réduite directement si la compensation thermique n'est pas appliquée à toutes les machines-outils sensibles, ce qui nécessite une étroite collaboration avec l'utilisateur et sa sensibilisation aux problèmes thermiques.

Les résultats de l'étude montrent qu'il existe en Suisse un potentiel d'économie annuel de 25 à 50 GWh de puissance de refroidissement des machines-outils grâce à la compensation thermique.

## Riassunto

La Svizzera ha un'industria metallurgica importante e, per gli standard internazionali, di altissima qualità. Ad esempio, i clienti apprezzano gli orologi svizzeri, famosi in tutto il mondo, per la loro alta precisione come segno di qualità. L'intero settore è quindi caratterizzato da esigenze di precisione sempre maggiori. Lo dimostra chiaramente il fatto che, in rapporto alla popolazione, il maggior numero di macchine utensili (MU) è installato in Svizzera. La Svizzera è anche uno dei maggiori produttori di macchine utensili al mondo. Le deviazioni termiche delle macchine utensili hanno la massima influenza sulle tolleranze ottenibili dei componenti. La misura classica per ridurre le deviazioni termiche della macchina consiste nel temprare la sala macchina e la macchina utensile stessa. Inoltre, ci sono lunghi cicli di riscaldamento in cui la macchina viene riscaldata in modo improduttivo per ottenere la precisione richiesta. Tutte queste misure fanno aumentare il consumo energetico dell'industria e quindi influenzano negativamente la produttività e l'efficienza.

Grazie alla compensazione termica intelligente, è possibile risparmiare i costosi cicli di condizionamento e riscaldamento. Nel progetto, questo potenziale di risparmio energetico e di risorse è stato valutato quantitativamente per la prima volta. Su cinque diversi MU, il consumo di energia è stato esaminato in parallelo con i guasti termici e la temperatura. Quattro di essi presso due diversi partner industriali e uno direttamente presso l'ispettore, su cui è installato anche un sistema di misurazione della potenza esterno. Con tutte queste macchine, è possibile ottenere un significativo aumento della precisione grazie alla compensazione termica. Soprattutto MU fase di riscaldamento, la precisione può essere aumentata in modo significativo, in modo che il MU possa essere utilizzato in modo produttivo anziché improduttivo. L'efficienza energetica del sistema complessivo può essere aumentata in modo significativo, poiché il consumo di energia a vuoto dei sistemi analizzati è tipicamente dell'ordine di 2-3 KW e il tempo di riscaldamento è compreso tra 2 e 6 ore, a seconda della macchina. Inoltre, è stato riscontrato un



consumo energetico significativo per il raffreddamento del MU stesso e per la climatizzazione dell'ambiente.

Una riduzione diretta del consumo energetico, oltre all'aumento della produttività, richiede l'integrazione della compensazione MU nel controllo della macchina e non può essere effettuata tramite il puro controllo digitale della posizione, il che rende obbligatoria la collaborazione con il produttore di MU. La riduzione del consumo energetico del controllo della temperatura ambiente deve essere integrata nel concetto di ambiente di produzione, ad esempio il consumo di energia secondaria degli MU compensati non può essere ridotto direttamente se la compensazione termica non viene applicata a tutti gli MC sensibili, il che richiede una stretta collaborazione con l'utente e la sua consapevolezza dei problemi termici.

I risultati dello studio mostrano che in Svizzera esiste un potenziale di risparmio annuale di 25-50 GWh di capacità di raffreddamento di MU attraverso la compensazione termica.

## Summary

Switzerland has a significant and, by international standards, very high-quality metalworking industry. For example, customers value the world-famous Swiss watches for their high precision as a sign of quality. The entire industry is therefore characterized by the ever-increasing demands on precision. This is very clearly demonstrated by the fact that, measured against the size of the population, the largest number of machine tools (MT) are installed in Switzerland. Switzerland is also one of the largest machine tool manufacturing nations in the world. The thermal deviations of the machine tools have the largest influence on the component tolerances that can be achieved. The standard measure to reduce thermal machine deviations is to temper the machine shop and the MT itself. In addition, there are long warm-up cycles in which the machine is warmed up unproductively in order to achieve the required precision. All these measures drive up the energy consumption of the industry and therefore negatively affect productivity and efficiency.

Intelligent thermal compensation could save both expensive air conditioning and warm-up cycles. In the project, this energy and resource saving potential was quantitatively assessed for the first time. On five different MT, power consumption was investigated in parallel with thermal faults and temperature. Four of them at two different industrial partners and one directly at inspire, on which an external power measurement system is also installed. In all of these machines, significant increases in accuracy can be achieved through thermal compensation. Especially in the warm-up phase, the accuracy can be significantly increased so that the MT can be used productively instead of unproductively. The energy efficiency of the overall system can be significantly increased, as the no-load power consumption of the systems studied is typically in the range of 2-3 KW and the warm-up time is between 2-6 hours, depending on the machine. In addition, significant energy consumption was found for cooling the MT itself and for air conditioning the environment.

A direct reduction of the energy consumption, besides the increase in productivity, requires the integration of the MT compensation into the machine control and cannot be done via the pure digital position control, which makes a cooperation with the MT manufacturer mandatory. Reducing the energy consumption of the ambient temperature control must be integrated into the concept of the production environment, e.g., the secondary energy consumption of the compensated MT cannot be directly reduced if thermal compensation is not applied to all sensitive MT, which requires close cooperation with the user and his awareness of thermal problems.

The results of the study show that in Switzerland there is an annual savings potential of 25-50 GWh of cooling capacity of MT through thermal compensation.



## Take-home messages: Deutsch

- WZM benötigen für ihre thermische Stabilisierung viel elektrische Energie für die Maschinen- und Hallenklimatisierung. Die Temperierung ist oft der limitierende Faktor der Genauigkeit der WZM.
- Ein signifikanter Anteil der produktiven Arbeitszeit (>5%) wird typischerweise für Warmlaufzyklen verwendet, welche die Energieeffizienz der Produktion direkt signifikant beeinträchtigen.
- Thermische Kompensation erlaubt diesen Energieaufwand zu reduzieren und statt eines ressourcenbasierten Ansatzes eine intelligenzbasierte Reduktion der thermischen Fehler vorzunehmen, also die Steigerung der Maschinengenauigkeit ohne zusätzlichen bzw. mit insgesamt reduziertem Energieaufwand und kann die thermischen Fehler um 70-90% reduzieren.
- Der energetischen Break-even Punkt, also der energetischen Aufwand relativ zur Energieeinsparung, wird typischerweise nach 20-50 Wochen erreicht. Für besonders komplexes Maschinenverhalten oder stark dynamische Umgebungen kann dies jedoch nicht gewährleistet werden was durch einen Modelltransfer verbessert werden könnte.

## Messages à retenir:

- Les machines-outils nécessitent beaucoup d'énergie électrique pour leur stabilisation thermique des sources de chaleur internes et externes, comme la climatisation de l'atelier, qui est souvent le facteur limitant de la précision.
- Une partie importante du temps de production (>5%) est généralement utilisée pour les cycles de réchauffement, ce qui réduit directement l'efficacité énergétique de la production.
- La compensation thermique permet de réduire cette dépense d'énergie et de procéder à une réduction des erreurs thermiques basée sur l'intelligence au lieu d'une approche basée sur les ressources, c'est-à-dire d'augmenter la précision de la machine sans dépense d'énergie supplémentaire ou avec une dépense d'énergie globalement réduite et peut réduire les erreurs thermiques de 70 à 90%.
- Le seuil de rentabilité énergétique, c'est-à-dire la dépense énergétique par rapport aux économies d'énergie, est généralement atteint après 20 à 50 semaines. Cependant, cela ne peut être garanti pour des comportements de MO particulièrement complexes ou des environnements très dynamiques, qui pourraient être améliorés par un transfert de modèle.

## Messaggi da portare a casa:

- Le macchine utensili richiedono molta energia elettrica per la stabilizzazione termica delle fonti di calore interne ed esterne, come l'aria condizionata dell'officina, che spesso è il fattore limitante della precisione.
- Una parte significativa del tempo di produzione (>5%) è tipicamente utilizzata per i cicli di riscaldamento, che riducono direttamente l'efficienza energetica della produzione.
- La compensazione termica consente di ridurre questo apporto di energia e, invece di un approccio basato sulle risorse, di ridurre gli errori termici in modo intelligente, ossia di aumentare la precisione della macchina senza un apporto aggiuntivo di energia o con un apporto complessivo ridotto e può ridurre gli errori termici del 70-90%.



- Il punto di pareggio energetico, ovvero il dispendio energetico relativo al risparmio energetico, viene tipicamente raggiunto dopo 20-50 settimane. Tuttavia, ciò non può essere garantito per un comportamento della MU particolarmente complesso o ambienti altamente dinamici, che potrebbero essere migliorati mediante un trasferimento del modello.

## Take-home messages: English

- Machine tools require a lot of electrical energy for their thermal stabilization of internal and external heat sources such as shop floor air conditioning which is often the limiting factor of accuracy.
- A significant portion of productive time (>5%) is typically used for warm-up cycles, which directly reduce the energy efficiency of production.
- Thermal compensation allows to save this energy expenditure and is an intelligence-based instead of a resource-based approach to the reduction of thermal errors and can reduce these around 70-90%.
- The energy break-even point, i.e. the energy expenditure relative to energy savings, is typically reached after 20-50 weeks. However, this cannot be guaranteed for particularly complex MT behavior or highly dynamic environments, which could be improved by a model transfer.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>10</b>
1.1	Ausgangslage und Hintergrund .....	10
1.1	Motivation des Projektes .....	11
1.2	Projektziele .....	12
<b>2</b>	<b>Literaturrecherche .....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>Experimentelle Methoden .....</b>	<b>19</b>
3.1	Anlagenbeschrieb .....	19
3.1.1.	Messung der elektrischen Leistungsaufnahme .....	22
3.1.2	Messung der thermischen Fehler .....	24
3.1.3	Messungen der Temperatur .....	26
3.2	Kompensationsmodelle für thermische Fehler .....	27
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>29</b>
4.1	Messungen auf der NMV5000DCG .....	29
4.2	Berechnungen zur energetischen Effizienz der thermischen Fehlerkompensation .....	36
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen und Fazit .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>Ausblick und zukünftige Umsetzung .....</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>Nationale und internationale Zusammenarbeit .....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>Publikationen .....</b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>47</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>51</b>



## Abkürzungsverzeichnis

ARX: Auto-Regressive model with eXogenous input

HVAC: Heizung, Lüftung und Klimatisierung (eng. Heating, Ventilation and Air Conditioning)

IPC: Industrial Personal Computer

IWF: Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung

MEM: Maschinen-, Elektro- und Metallindustrie

MWF: Kühlsmiermittel (engl. metalworking fluid)

NC: Numerische Steuerung (engl. numerical control)

NG: Not Good (mode)

P2P: Peak to Peak Error (Fehlerbandbreite)

RMSE: Root Mean Square Error (Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)

TCP: Werkzeugbezugspunkt (engl. Tool center point, TCP)

THG: Treibhausgas (Emissionen typischerweise in CO<sub>2</sub> Äquivalenten)

WZM: Werkzeugmaschine (engl. MT machine tool)



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

WZM sind ein unverzichtbarer Bestandteil der Industrie und in der modernen Produktionslandschaft. Gerade die Schweizer Metallverarbeitungsindustrie ist weltbekannt für ihre Präzision und Zuverlässigkeit. Gleichzeitig ist die Schweiz auch der weltweit achtgrösste Hersteller und sechstgrösste Exporteur von WZM, hinter Deutschland, Japan, China, Italien und Taiwan vor Südkorea und den USA, die grössere Produzenten aber kleinere Exporteure sind [1]. Daher ist die Maschinenindustrie für die Schweiz von sehr grosser volkswirtschaftlicher Bedeutung. Die gesamte MEM Industrie beschäftigt etwa 318'900 Mitarbeiter davon 79'369 in der reinen Maschinenindustrie, dies entspricht jedem 64ten Angestellten in der Schweiz [2]. Die Fachgruppe WZM des Verbandes Swissmem aus deren Reihen sich das Industrial advisory board zusammensetzt beschäftigt allein in der Schweiz 11'500 Mitarbeiter, die direkt wirtschaftlich von dem Wettbewerbserfolg der in der Schweiz produzierten und international verkauften WZM leben [3]. Die Metallverarbeitende Industrie ist gleichzeitig aber auch ein grosser Energieverbraucher, sowohl in Form von elektrischer als auch thermischer Energie und für ihre Wettbewerbsfähigkeit auch auf tiefe Gesamtenergiekosten angewiesen. Etwa 68% des elektrischen Energieverbrauchs der Industrie entfällt auf diesen Wirtschaftszweig [4].

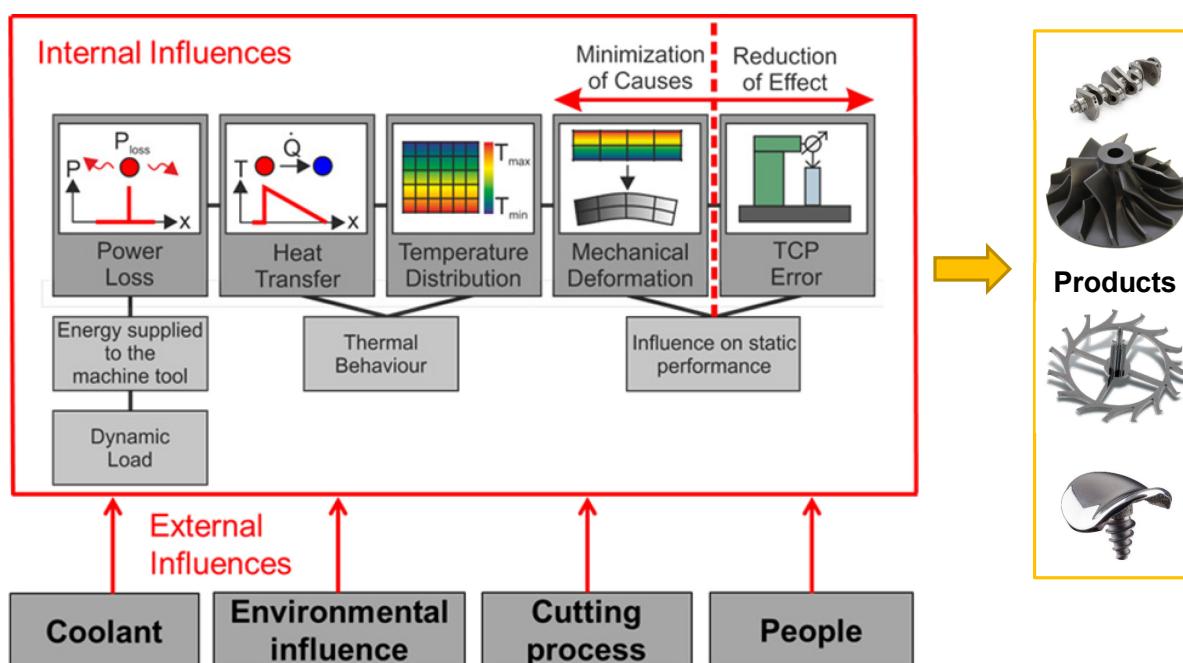


Abbildung 1 Thermische Wirkkette und Auswirkungen auf Fehler am TCP, adaptiert nach [5]

Abbildung 1 beschreibt die Entstehung thermischer Fehler. Jede Bewegung und Energieumwandlung führt zu einer Abwärme, welche sich über die Maschine verteilt und zu einem räumlich und zeitlich inhomogenen Temperaturfeld führt. Diese Temperaturvariation hat unweigerlich eine Dichteänderung aller Materialien zufolge. Diese Verformung beeinflusst unmittelbar die relative Position zwischen Werkzeug und Werkstück (also den Werkzeugbezugspunkt TCP). Diese Abweichung finden sich dann auf allen gefertigten Produkten, die zu diesem Zeitpunkt gefertigt wurden. Die thermischen Fehler tragen typischerweise den grössten Beitrag zu Fehlern auf Bauteilen einer Serie von bis zu 75% bei [6]. Um diese Auswirkungen zu reduzieren, gibt es vor allem drei Ansätze [7]. Im ersten Ansatz können die



Ursachen minimiert werden: reduzierte Verluste der Energieumwandlung, optimierte Wärmeflüsse, konstruieren entlang der thermischen Symmetrieebene, was typischerweise bereits so weit wie möglich angewendet wird [8]. Diese Massnahmen können vor allem in der Konstruktionsphase einer WZM zum Tragen kommen und sind danach nahezu nicht mehr umsetzbar. Der zweite Ansatz ist die Temperierung der Maschine selbst und der Umgebung, mit dem Ziel die Temperaturgradienten zu reduzieren und die dynamischen thermischen Effekte zu dämpfen und zu regeln. Der Nachteil ist der signifikante kontinuierliche Energieaufwand. Der dritte Ansatz ist die steuerungsseitige Kompensation mithilfe von modellbasierten Vorhersagen oder direkten Messungen. Diese Ansätze beeinflussen einander gegenseitig. Das Potential ermöglicht es den Kühlungsaufwand zu reduzieren in dem z.B. thermische Kompensation eingesetzt wird.

## 1.1 Motivation des Projektes

Um eine hohe Präzision während der Produktion sicherzustellen, muss die WZM selbst, die Umgebung und der Prozess aktiv temperiert werden. Dies ist je nach Maschine variabel, typischerweise sind die maschineninternen Kühlaggregate für etwa 25% [9] des gesamten elektrischen Energieverbrauchs der Maschine verantwortlich. Neben der elektrischen Energie, die die WZM und ihre Aggregate direkt zur Kühlung verbrauchen, muss häufig die Produktionsumgebung aktiv temperiert werden. Das heisst, dass die thermische Energie präzise kontrolliert zu und abgeführt wird. Da typischerweise sehr strenge Temperaturlgrenzen eingehalten werden müssen stellt sich die Nutzung der abgeführten Wärme als schwierig und ist mit elektrischem Energieverbrauch für Ventilatoren und Kühlaggregate verbunden. Gleichzeitig ist trotz dieses Kühlungsaufwandes ein verbleibender thermischer Fehler vorhanden, der die Masshaltigkeit der produzierten Bauteile direkt beeinflusst. Thermische Fehlerkompensation anhand von selbstlernenden Modellen bietet die Möglichkeit die Genauigkeit der Produktion über eine intelligenzbasierte, anstelle von einer ressourcenbasierten, Methode zu steigern. Diese benötigt jedoch Trainingsmessungen auf jeder verwendeten Maschine, was auch zu einem Zeitaufwand und damit verursachten Kosten und verbrauchter Energie führt. Des Weiteren sind Sensoren und ein Messartefakt auf der Maschine selbst notwendig, was auch mit einem zusätzlichen Aufwand verbunden ist. Daher ist es notwendig den genauen Vorteil aufzuzeigen, den thermische Kompensation bietet und die Anwendungsfelder zu identifizieren in denen die energetischen Vorteile den Aufwand übersteigen und diesen Vorteil zu quantifizieren.

Abbildung 2 stellt diesen Stand der Industrie und Forschung exemplarisch dar. Putz et al [10], [11] analysierten den aktuellen Stand der Beziehung zwischen Energieeffizienz der WZM und ihrer thermischen Stabilität. Der aktuelle Trend geht zu Ungunsten der Energieeffizienz aus, da eine hohe Fertigungsgenauigkeit und Wiederholbarkeit, gerade auch für die Automatisierbarkeit, entscheidend ist.

Forschung zur Verbesserung der aktuellen Kompensationsansätze wird aktuell auch am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF) und der inspire AG durchgeführt. Namentlich ein von der Innosuisse gefördertes Projekt: «Digital twin enabled transfer learning for thermal error compensation». Das Ziel Messungen mit Simulationen anzureichern, ermöglicht robustere Kompensationsmodelle sowie kürzere benötigte Trainingszeiten. Um diesen zusätzlichen Modellierungsaufwand, sowie die thermische Kompensation überhaupt für die Industrie vertretbar zu machen, muss klar quantifiziert werden können, was der direkte Mehrwert ist.

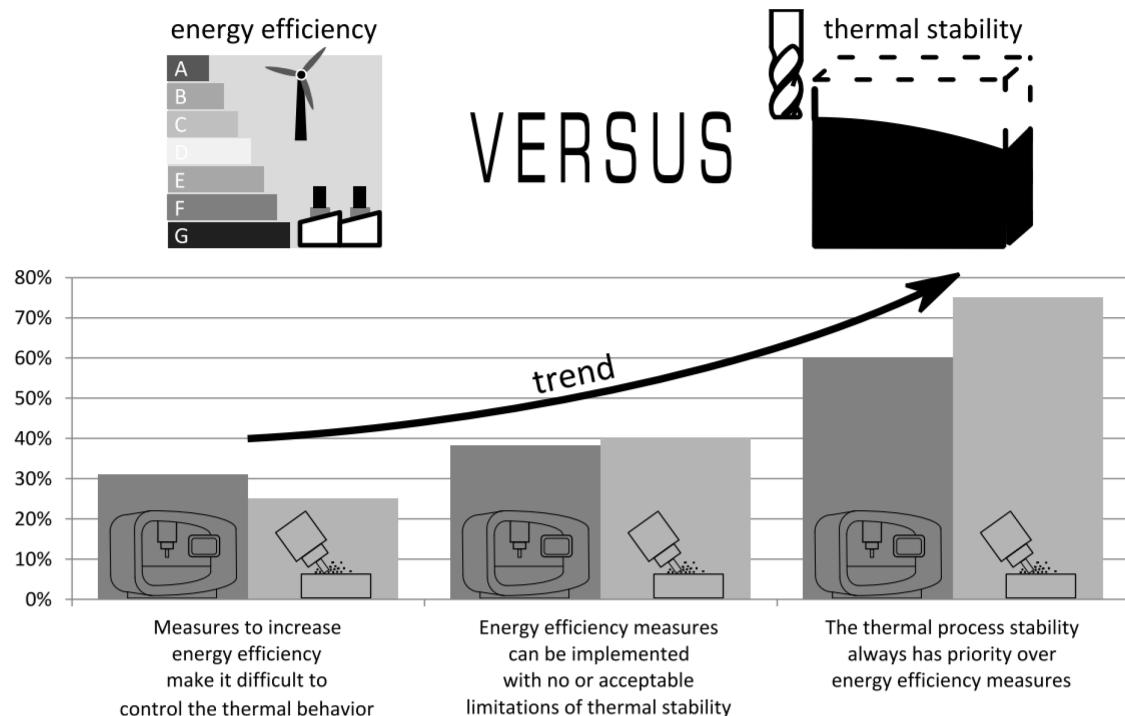


Abbildung 2 Stand der Industrie nach Putz et al. [10].

Thermische Kompensationsmodelle können auf allen in der Schweiz verwendeten numerisch gesteuerten WZM eingesetzt werden und somit den elektrischen Energieverbrauch der Maschinen senken und gleichzeitig die Qualität der produzierten Bauteile erhöhen, welches die Ausschussrate und unproduktiven Maschinenzeiten reduziert. Des Weiteren sinken die Anforderungen an die Klimatisierung der Produktionsumgebung, was den Energieverbrauch der Gebäude reduziert. Es sind jedoch auch Einsparungen auf in der Schweiz produzierten und im Ausland verwendeten WZM zu erwarten, davon profitiert die Schweiz einerseits dadurch, dass die graue Energie, die in den Produkten steckt, die auf diesen Maschinen produziert werden, sinkt, welche teilweise wieder in die Schweiz importiert werden. Andererseits profitiert die Schweiz wirtschaftlich, da die thermische Kompensation zur Wettbewerbsfähigkeit beiträgt und die starken Maschinenexporte volkswirtschaftlich sehr bedeutsam sind.

## 1.2 Projektziele

Das Gesamtziel des Projekts besteht darin, die Energieeinsparungen zu quantifizieren, die bei einer WZM mit thermischer Kompensation erzielt werden können. Die am IWF entwickelten modernen thermischen Kompensationsansätze zeigen ein großes Potenzial bei der Kompensation thermischer Fehler. Die bestehenden thermischen Kompensationsansätze können erweitert werden, um energieintensive Prozesse im Zusammenhang mit dem Fertigungsprozess wie Aufwärmzyklen, Klimatisierung und Maschinenkühlung zu kompensieren. Um die Weiterentwicklung der Kompensationsansätze, insbesondere für eine rasche Industrialisierung, optimal zu ermöglichen müssen die Aufwände und das Ersparnispotential der thermischen Fehlerkompensation quantifiziert werden.

- Quantifizierung des Energieeinsparungspotenzials durch Reduzierung oder Ersetzung der Aufwärmzyklen.



- Quantifizierung des Energieeinsparpotenzials durch den Wegfall der bisher, für die gewünschte Genauigkeit, erforderlichen Hallenklimatisierung.
- Quantifizierung des Energieeinsparpotenzials durch die Reduktion der Maschinenkühlung.
- Quantifizierung der Maschinenparkreduzierung durch die erhöhte Produktivität, bzw. der reduzierten Maschinenzeiten.
- Quantifizierung der Platz einsparung durch die erhöhte Produktivität und den dadurch reduzierten Maschinenpark.
- Quantifizierung der Ausschussreduzierung und der damit verbundenen Energieeinsparung bei der Produktion in unterschiedlichen Szenarien.
- Quantifizierung des Energieaufwands für die Generation eines thermischen Fehlerkompensationsmodells und die Kosten-Nutzen-Analyse der Robustheit dieser.

## 2 Literaturrecherche

Die Stromerzeugung ist mit der Gebäudewärme zusammen derzeit einer der Hauptverursacher des Klimawandels, neben Sektoren wie der Mobilität, die in diesem Projekt nicht betrachtet werden. Die Verringerung des elektrischen Energieverbrauchs liegt nicht nur im Interesse der Gesellschaft, sondern auch im Interesse der Betreiber von Anlagen aller Art, insbesondere WZM, da der Energieverbrauch direkt Kosten verursacht. Energieeffizienz wird gemäß ISO 14955-1 [12] als das Verhältnis oder die quantitative Beziehung zwischen einem Output an Leistung, Dienstleistung, Waren oder Energie und einem Input an Energie definiert. Für WZM heißt dies also Gutteile geteilt durch den totalen Energieaufwand, inklusive Rüst- und Warmlauf-zeiten. Für die Schweiz ist daher entscheidend möglichst effiziente WZM zu verwenden und WZM von möglichst hoher Effizienz zu exportieren, da dies teilweise die hohen Schweizer Lohnstückkosten kompensieren kann, da der Endkunde Energie und damit Kosten während der Verwendung einsparen kann. Für die Schweiz hat das zwei Vorteile. Einmal wird die Wettbewerbsfähigkeit des Exportsektors gestärkt bzw. erhalten. Andererseits werden anderswo Emissionen reduziert, was die graue Energie von importierten auf diesen Maschinen hergestellten Gütern senkt und dem weltweiten Ziel, die Erderwärmung möglichst auf 1.5°C zu begrenzen, Vorschub verleiht.

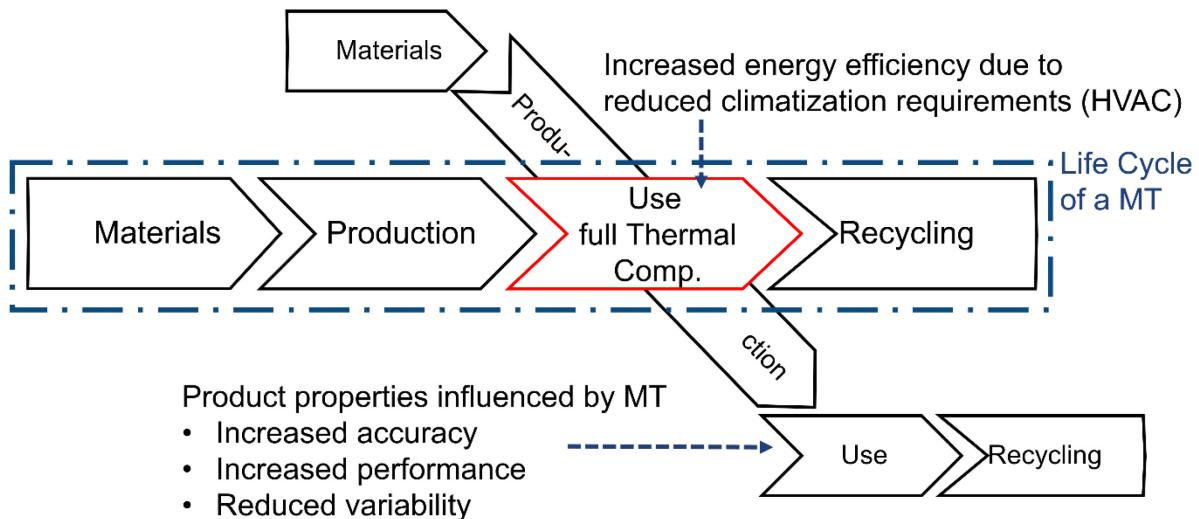


Abbildung 3 Lebenszyklus einer WZM und möglicher Einfluss der thermischen Kompensation adaptiert von [13].

Für eine umfassende Bewertung muss der gesamte Lebenszyklus einer WZM betrachtet werden [14], wie in Abbildung 3 dargestellt ist. Die Nutzungsphase einer WZM ist in der Regel die eindeutig dominierende Phase, da WZM oft eine sehr lange Lebensdauer von manchmal sogar Jahrzehnten haben [15]. Cao et al. [16] analysierten zwei verschiedene WZM hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen, in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) im Lebenszyklus und kamen zu dem Schluss, dass bei beiden WZM mehr als 95% aller Kohlenstoffemissionen (die stark mit dem Energieverbrauch korrelieren) während der Nutzungsphase entstehen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen, welche in Abbildung 4 gezeigt sind. Neben dem Energieverbrauch der WZM selbst bestimmt die WZM die Eigenschaften aller hergestellten Produkte. Die Produkteigenschaften sind direkte Ergebnisse der Genauigkeit in der Nutzungsphase, die durch thermische Kompensation beeinflusst werden kann, um eine gleichmäßige Verteilung der Eigenschaften der produzierten Teile zu gewährleisten. Jedes produzierte Teil kann wiederum den Energieverbrauch in den nachgelagerten Phasen beeinflussen. So könnten beispielsweise präzisere Turbomaschinenteile ihren Wirkungsgrad während ihrer Lebensdauer erhöhen, wie Abbildung 5 beispielhaft aufzeigt ist, was zu einer erheblichen Steigerung der Energieeffizienz des Produktes führt.

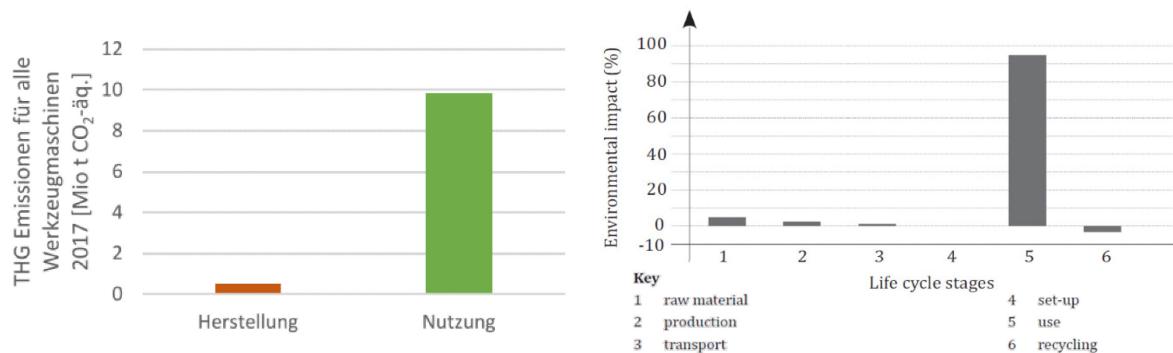


Abbildung 4 Beitrag der Unterschiedlichen Lebensphasen einer WZM zu ihrem Gesamtenergieverbrauch und Umwelteinfluss. Links Schweizer Daten nach [17], rechts ISO 14955 [12] nach [18].



## Auswirkungen thermische Fehler auf den Energieverbrauch gefertigter Produkte

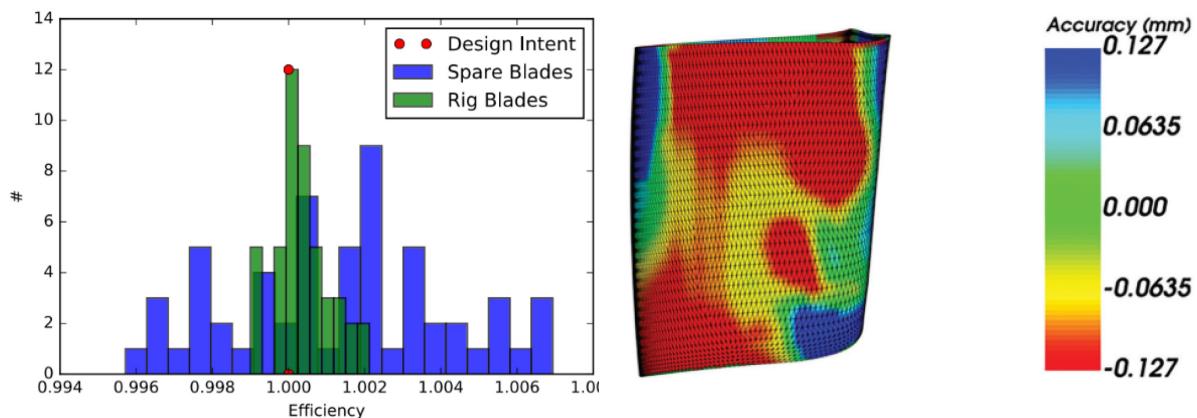


Abbildung 5 Auswirkungen von Fertigungsvariationen auf den Wirkungsgrad von Turbinenschaufeln von Jet-Triebwerken der US Air Force[19], [20].

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die typischen Auswirkungen von Produktionsschwankungen auf die instationäre Effizienz von Turbinenschaufeln des amerikanischen Air Force Research Laboratory (AFRL). Die Abweichungen der hergestellten Turbinenschaufeln sind beträchtlich, mit Werten, die bis zu 127 µm von der Entwurfsabsicht abweichen, aber immer noch im Bereich der akzeptablen Toleranzen des AFRL [20]. Diese Fertigungsvariabilität führt dann zu einer Variabilität im Wirkungsgrad von bis zu 10%, was eine beträchtliche Bandbreite darstellt. Bei den ausgewählten Turbinenschaufeln ist die Variabilität mit Abweichungen von bis zu 5 % etwas geringer, da nur die besseren Schaufeln für den Prüfstand verwendet wurden. Dies zeigt eine große Schwankungsbreite innerhalb einer Serie von produzierten Turbinenschaufeln. In der gegenwärtigen Praxis führt dies zu großen Mengen an Ausschuss, die verschwendetes Material sind. Außerdem sorgt dies für einen erheblichen Messaufwand, um die Turbinen in die erwünschten ausgewählten Schaufeln und die Reserveschaufeln einzuteilen. Dafür wurde ein Ersatzmodell (Surrogat model) verwendet, um die Turbinenschaufeln einfacher zu klassifizieren. Dies ist jedoch nur ein Teil einer idealen Lösung. Idealerweise werden alle Teile direkt auf geeignete Weise hergestellt, ohne dass eine umfangreiche Modellierung erforderlich ist, wenn das Teil bei bestimmten Abweichungen noch geeignet ist. Die thermische Fehlerkompensation wäre ein geeignetes Mittel, um die Abweichungen innerhalb der Serie deutlich zu reduzieren, da die WZM in der Lage ist, nahezu ideale Teile zu produzieren. Ohne ausreichende Kompensation kann diese Prozessfähigkeit jedoch möglicherweise nicht gewährleistet werden.

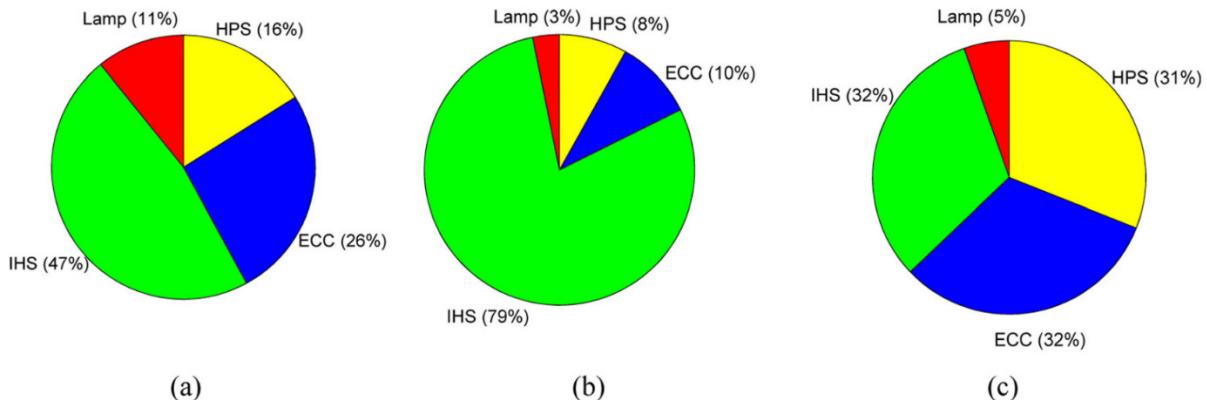


Abbildung 6 Einfluss der unterschiedlichen externen Wärmequellen auf den thermischen Fehler in X- (a), Y- (b) und Z- (c) Richtung [21].

Abbildung 6 zeigt den Einfluss von unterschiedlichen Wärmequellen auf den volumetrischen thermischen Fehler in X-, Y- und Z-Richtung nach Weng et al. [21]. Der Term IHS in Abbildung 6 stellt die internen Wärmequellen der WZM dar. Die Beleuchtung wird als Lamp beschrieben, die Hydraulikpumpe wird mit dem Term HPS und der Schaltschrank mit ECC beschrieben. Lamp, HPS und ECC stellen die untersuchten äusseren Wärmequellen dar. Der Einfluss dieser externen Wärmequellen variiert zwischen 21 % und 68 % was daher einen beachtlichen Einfluss hat. Daher ist typischerweise für eine Präzisionsfertigung ein signifikanter Energieaufwand nötig, um die Umgebungstemperatur konstant zu halten.

### Elektrischer Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen

Die Industrie ist mit 34'438'971 TJ für 41.87% des globalen elektrischen Energieverbrauchs verantwortlich [22]. Die Schweiz weist mit einem elektrischen Energieverbrauch von 62'170 TJ der Industrie, 30.19% des Schweizer Gesamtverbrauchs [22] ein global etwas unterdurchschnittliches Verhältnis aus, in absoluten Zahlen pro Kopf jedoch einen 62% höheren elektrischen Energieverbrauch aus als der globale Durchschnitt. Im Zuge der Dekarbonisierung sowie der Elektrifizierung anderer Sektoren wie dem Transportwesen durch Batterie-Elektroautos oder der Gebäudeheizung durch Wärmepumpen muss die Industrie ihren gesamten und besonders den elektrischen Energieverbrauch reduzieren [23]. Insbesondere eine Steigerung des Wirkungsgrads des Gesamtsystems ist ideal, da so der gleiche (gesellschaftlich benötigte) Output mit weniger Energieaufwand erreicht werden kann [24]. Unterschiedliche Schätzungen quantifizieren den Anteil von WZM auf 5-10 % des elektrischen Energieverbrauchs des Industrie Sektors [25], [26]. Da zerspanende WZM im deutschen Markt 70-80 % des Umsatzes verkaufter WZM ausmachen, lässt sich der globale elektrische Energieverbrauch von zerspanenden WZM mit 1-3 % des globalen Elektrizitätsverbrauch quantifizieren [26], was etwa 200-700 TWh entspricht.

Maschinenkühlsysteme sind essenziell für das Funktionieren von WZM, sei es um thermisch induzierte Verlagerungen zu reduzieren, aber auch um den erlaubten Temperaturbereich von Motoren und Schmiersystem zu erhalten [6], [26]-[28]. Maschinenkühlsysteme sind typischerweise der grösste individuelle Verbraucher unter allen Komponenten [29], die Prozesskühlung und Schmierung wird typischerweise von einem anderen System übernommen. Je nach Maschinentyp und Maschinenanwendung macht es typischerweise zwischen 15-30 % des elektrischen Gesamtenergieverbrauchs einer WZM aus [26], [30], [31]. Damit ist die prozessunabhängige Maschinenkühlung global für 30 bis 210 TWh elektrischen Energieverbrauch verantwortlich, was im unteren Bereich in etwa dem totalen Schweizer Elektrizitätsverbrauch entspricht.



Tabelle 1 nach [32] mit dem Energieverbrauch von zwei beispielhaften WZM in drei unterschiedlichen Produktionsszenarien, von leichter Auslastung im Werkstattbetrieb, zur typischen Lohnfertigung bis zum Einsatz in der Serienproduktion.

ENERGY CONSUMPTION PER PART SURING USE PHASE (KJ/PART)

	Community Shop		Job Shop		Commercial Facility	
	Bridgeport	MoriSeiki	Bridgeport	MoriSeiki	Bridgeport	MoriSeiki
Part Production	600	1'000	600	1'000	600	1'000
Maintainance	1	14	8	75	4	40
HCAC	880	1'300	460	710	310	480
Lightning	290	460	170	260	140	220
Total:	1'771	2'774	1'238	2'045	1'054	1'740

Energy consumption of machining processes

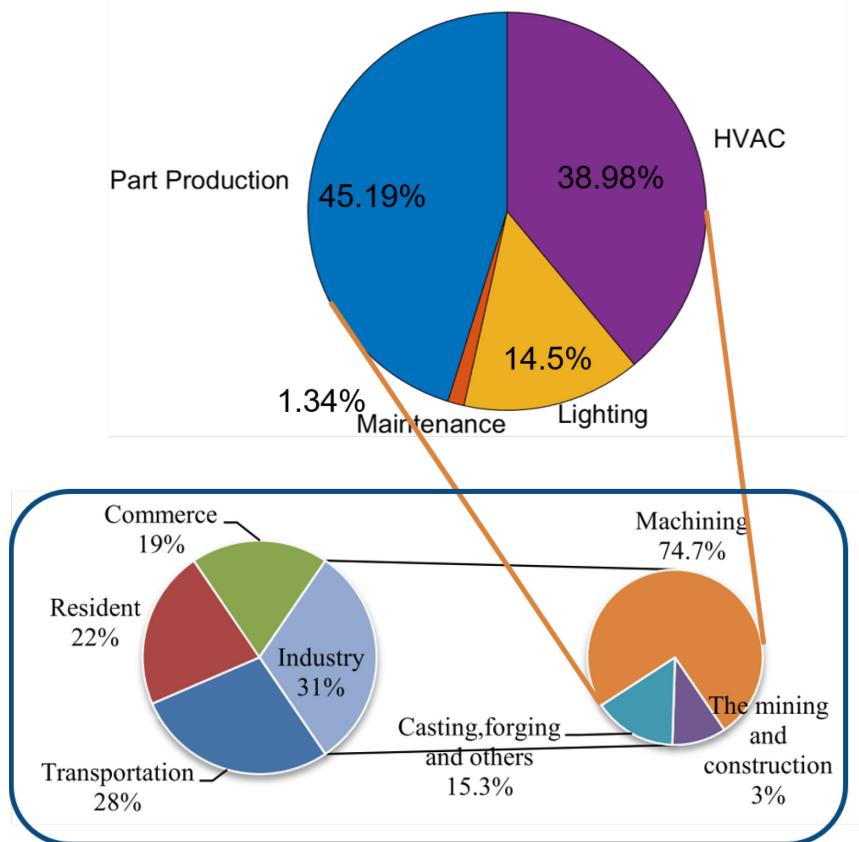


Abbildung 7 Energieverbrauch nach [33] (US Mix) kombiniert mit Mittelwerten von [32].

In unterschiedlichen Bottom-up Ansätzen wird der elektrische Energieverbrauch von WZM in unterschiedlichen Szenarien quantifiziert. Der hervorgehobene blaue Kasten in Abbildung 7 zeigt den Stromverbrauch der USA laut der Energy Information Administration [34] nach Sektoren im Jahr 2011 [33]. "Machining" (Zerspanung/Metallbearbeitung) verbraucht mit 74.6% den Löwenanteil des industriellen elektrischen Energieverbrauchs. Da den Autoren keine separierten Daten vorliegen, wird davon ausgegangen, dass der gesamte Energieverbrauch in der spanenden Bearbeitung der Energieverbrauchsverteilung der fräsenden WZM pro Teilprozess folgt. Diaz et al. [32] analysierten den



Energieverbrauch von zwei verschiedenen Fräsmaschinen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen von der Einzelfertigung bis zur Serienproduktion. Die gemittelten Energieverbräuche pro Teilprozess sind in Tabelle 1 dargestellt. Heizung, Lüftung und Klimatisierung (HVAC) machen mehr als ein Drittel des Stromverbrauchs des Bearbeitungsprozesses aus, was etwa 9.02 % des gesamten Stromverbrauchs in den USA entspricht, für die für die Zwecke dieser Arbeit ein grob ähnliches Verbrauchsprofil wie für den Rest der Welt angenommen werden kann [35] was vermutlich die tatsächliche Ziffer etwas überschätzt.

Dieser HVAC-Bedarf könnte drastisch gesenkt werden, wenn die WZM in der Lage wären, schwankende Umgebungsbedingungen auszugleichen und daher keine exakte Temperaturregelung auf 20°C erfordern würden, was wiederum den Energieverbrauch stark reduzieren würde. Ein gewisser Energieaufwand für die Klimatisierung wäre zwar immer noch erforderlich, da die Arbeitnehmer immer noch eine rudimentäre Klimakontrolle benötigen, aber die zulässigen Schwankungen wären viel größer, wenn die Genauigkeit der WZM von den Temperaturschwankungen der Umgebung entkoppelt werden könnte. Dies ist ein starker Anreiz für eine thermische Fehlerkompensation, die in der Lage sein muss, Umweltschwankungen gut auszugleichen, da deren Kontrolle sehr energieintensiv ist. Sie einfach zu ignorieren und die Umgebung nicht zu kontrollieren, würde jedoch zu einer schlechteren Produktgenauigkeit führen, was nicht akzeptabel ist. Daher ist der thermische Fehlerausgleich mit der WZM-NC-Steuerung die umweltfreundlichste Lösung, da der Energieverbrauch sowohl für den Produktionsprozess als auch für die Produktnutzung minimiert wird.



## 3 Experimentelle Methoden

### 3.1 Anlagenbeschrieb

Messungen werden auf unterschiedlichen WZM und Prüfständen durchgeführt. Für eine Mehrkanal-Leistungsmessung nach der ISO 14955 steht eine 5-achsige WZM mit Drehoption zur Verfügung. Die WZM ist eine MoriSeiki NMV5000DCG und im Folgenden detaillierter beschrieben.

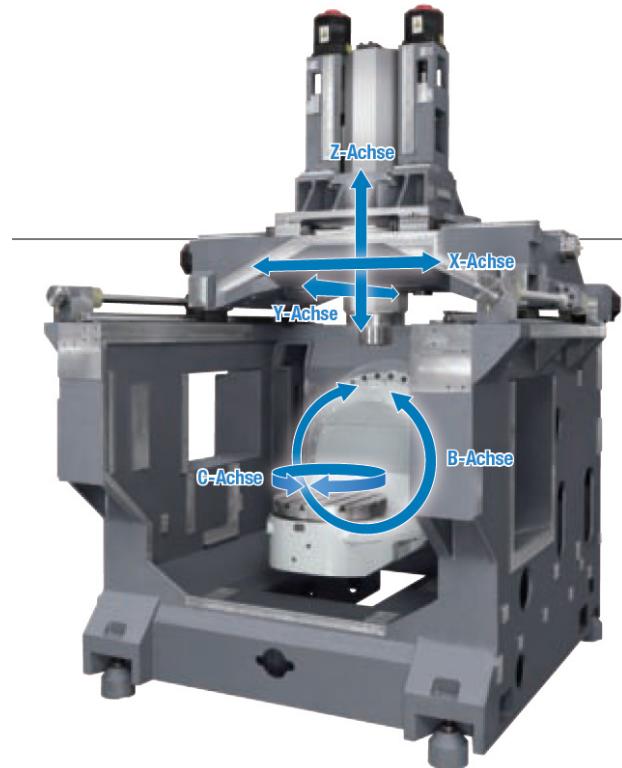


Abbildung 8 Aufbau der MoriSeiki NMV5000DCG an der die Mehrkanal-Leistungsmessungen durchgeführt werden.

Die Kinematische Kette der WZM nach ISO 10791-2 [36] ist:

$$V [w - C' - B' - b - [Y1, Y2] - X - [Z1, Z2] - (C) - t]$$

Tabelle 2 zeigt die technischen Daten der verwendeten WZM. Das Bearbeitungszentrum ist die grösste Bauart der Maschinen, die der Hersteller als «Hochpräzises 5-Achsen Vertikal-Bearbeitungszentrum» verkauft. Sie ist repräsentativ für in der Schweiz verwendete WZM durch ihre durchschnittliche Grösse und vielseitige Verwendbarkeit. Durch die integrierte Drehoption in der C-Achse lassen sich auch komplexe und Bauteile mit hohen Qualitätsanforderungen wirtschaftlich in einer Maschine und Aufspannung fertigen.

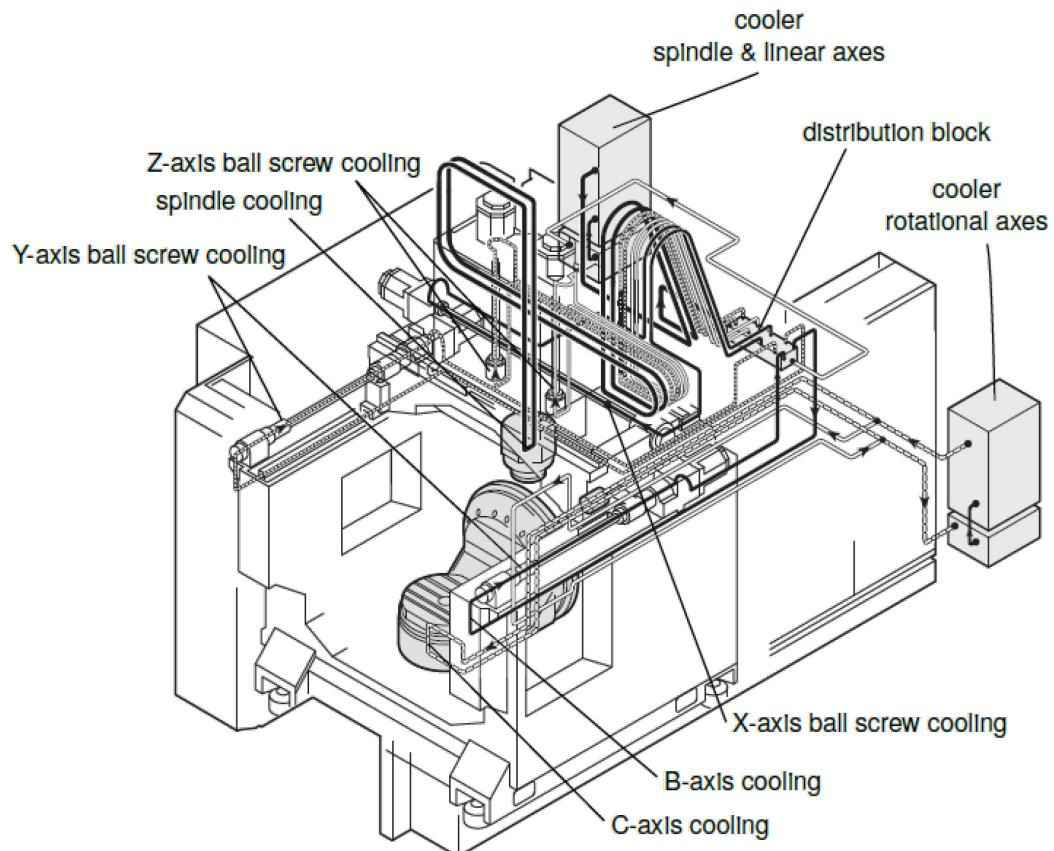


Tabelle 2 Technische Daten der MoriSeiki NMV5000DCG

Achse	Verfahrbereich	Max. Vorschub	Positioniergenauigkeit
X	730 mm	50'000 mm/min	1 µm
Y	510 mm	50'000 mm/min	1 µm
Z	510 mm	40'000 mm/min	1 µm
B	-180° bis +160°	50 min <sup>-1</sup>	0,001°
C	Unbeschränkt	1200 min <sup>-1</sup>	0,001°
Spindel	Unbeschränkt	12'000 min <sup>-1</sup>	-

### Maschinenkühlung NMV5000DCG

Des Weiteren wird die Maschine aktiv mit zwei geschlossenen und geregelten Kühlkreisläufen temperiert. Die Trennung in einen spindelseitigen und einen werkstückseitigen Kühlkreislauf ist nicht die Standardausführung. Da die vorliegende WZM mit einer Drehoption ausgestattet ist, ist für diese ein eigens regelbarer Kühlkreislauf nötig und wird als Teil der Drehoption standardmäßig ausgeliefert. Abbildung 9 zeigt den Aufbau der beiden Kühlkreisläufe. Für die Werkzeugseite führt er durch die Kugelgewindetriebe der Linearachsen bis in die Werkzeugspindel und von dort wieder zurück. Der werkstückseitige Kühlkreislauf führt durch die Aufhängung in den Tisch und dort um den Drehmotor. Wie bei vielen Werkstattmaschinen üblich, gibt es kein Wärmenetz oder zentrale Kühlaggregate. Die warme Abluft wird unmittelbar neben der Maschine an die Umgebung abgegeben, was wiederum den thermischen Fehler der WZM und anderer beeinflusst.



(c) Machine cooling

Abbildung 9 Aufbau des geschlossenen Kühlkreislauf für die Maschinenkühlung der NMV5000DCG [13].



### 3.1.1. Messung der elektrischen Leistungsaufnahme

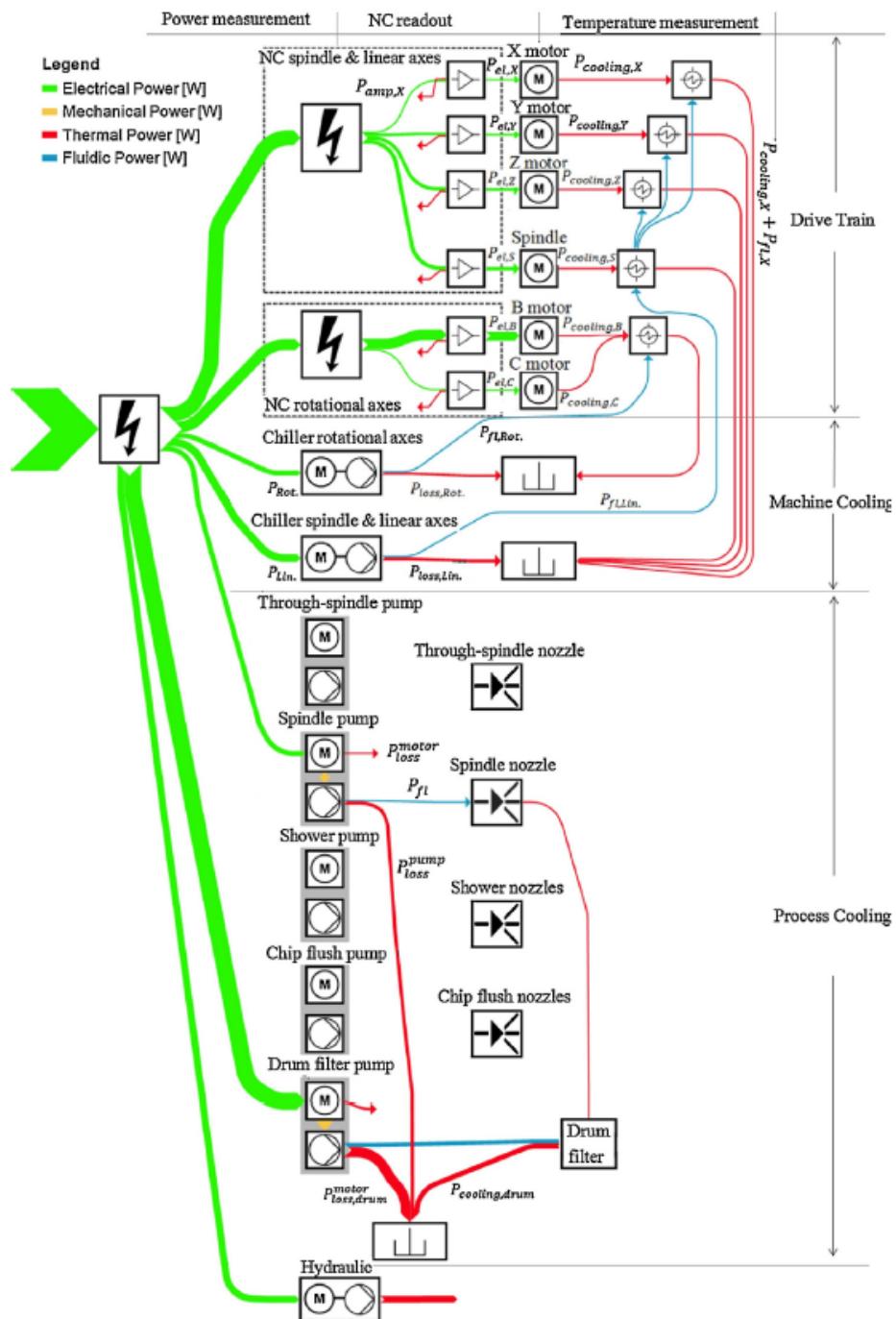


Abbildung 10 Sankey Schema über die elektrischen Leistungsaufnahme der NMV5000DCG für die Hauptkomponenten, adaptiert von [37].



Abbildung 11 Messpunkte zur elektrischen Leistungsmessung von sechs unterschiedlichen Verbrauchern.

Abgebildet sind die jeweiligen Messpunkte zur Messung der Leistungsaufnahme. Neben den vier Messungen für die Leistungsaufnahme der Rotationsachsen, der Linearachsen, inklusive Spindel und der beiden jeweils dafür vorgesehenen Kühlkreisläufen, wird auch die Leistungsaufnahme für den Hydraulikkreislauf gemessen, welcher dazu dient, dass das jeweils eingewechselte Werkzeug in der Spindel zu klemmen. Zu guter Letzt, wird auch der Gesamt-Leistungsaufnahme der NMV5000DCG gemessen, um über die Differenz zu den definierten Komponenten über die Leistungsaufnahme der sonstigen Komponenten, wie zum Beispiel die der Kühlenschmiermittel (MWF) Pumpen und des Spanförderers, schliessen zu können.

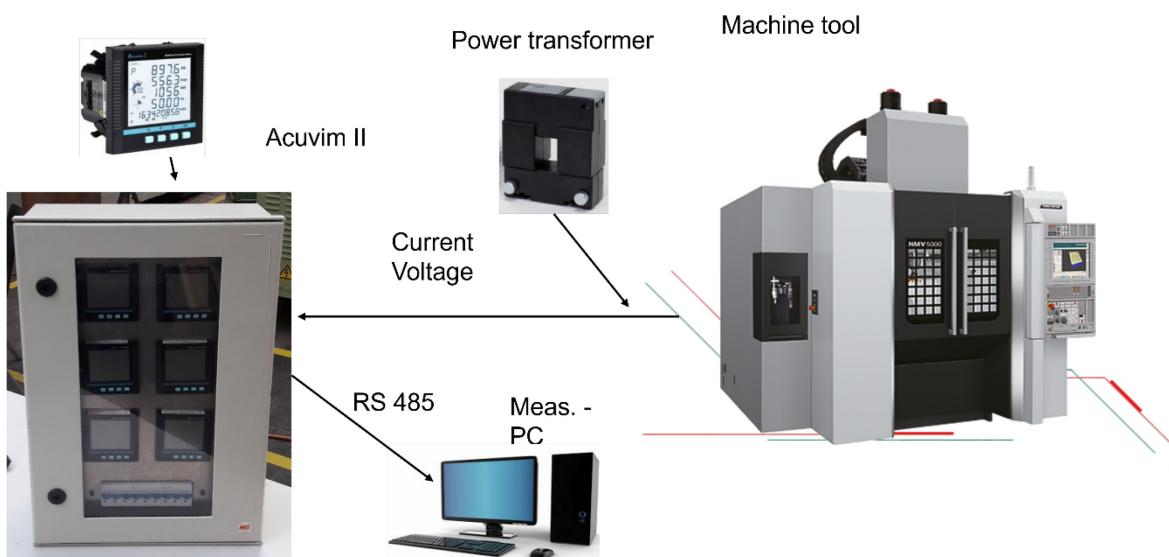


Abbildung 12 Der Ablauf der Mehrkanal-Messung der elektrischen Leistungsaufnahme der WZM.

Das Leistungsmesssystem, das im Rahmen dieser Untersuchung verwendet wird, ist in Abbildung 12 skizziert. In das Messsystem sind sechs Leistungsmessgeräte Acucim II von Acuenergy integriert. Durch die Messung von Strom und Spannung berechnet das Messsystem die Wirkleistung der betrachteten Komponenten und speichert diese in einem .txt-File ab. Das Messgerät erreicht eine Genauigkeit von 0.2 % bezüglich der Strom-, Spannungs- und Leistungsmessung [38]. Für die Strommessung werden Transformatoren verwendet, die den Strom auch auf den maximal zulässigen Eingangsstrom des Leistungsmessgeräts von 5 A skalieren. Die Displays der Leistungsmessgeräte



erlauben das Ablesen der aktuellen Leistungsaufnahme der einzelnen Messpunkte. Zudem werden die Messdaten über eine RS485-Schnittstelle an einen Mess-PC, der die Daten aufzeichnet, übermittelt. Dort können die Daten in Echtzeit visualisiert werden, als Modellinput verwendet, oder zur späteren Nutzung abgespeichert, werden.

Insgesamt wird die Leistungsaufnahme an sechs Messpunkten aufgezeichnet. Einmal die totale Leistungsaufnahme der gesamten WZM, sowie an den fünf Hauptkomponenten. Die Differenz zwischen den fünf Hauptkomponenten und der totalen Leistungsaufnahme ermöglicht es auch die Leistungsaufnahme aller sonstigen Komponenten zu berechnen. Diese setzt sich vor allem aus den Pumpen für die Prozesskühlung, die Spanförderung und den Werkzeugwechsler zusammen, welche allerdings keine signifikante Grundlastleistungsaufnahme aufweist.

Die MoriSeiki NMV5000DCG umfasst zwei Antriebseinheiten, in denen die Achsen der WZM integriert sind. In der ersten Antriebseinheit sind die drei Linearachsen und die Spindel zusammengefasst. Die zweite Antriebseinheit umfasst die beiden Rotationsachsen. Dies ermöglicht eine separate Messung der Leistungsaufnahme der Linear- und Rotationsachsen. Jede der beiden betrachteten Antriebseinheiten beinhaltet einen Teil der NC-Steuerung, Verstärker und Elektromotoren.

Des Weiteren wird die elektrische Leistungsaufnahme beider Kühlkreisläufe separat gemessen. Dies ermöglicht die Zuordnung der Kühlleistung lokalisiert nach Kühlkreislauf. Außerdem ist ein hydraulischer Kreislauf für die Lösung der Klemmfedern der Werkzeuge in der Spindel in der WZM integriert. Die Hauptkomponente dieses Kreislaufes ist die Hydraulikpumpe deren elektrische Leistungsaufnahme auch separat gemessen wird.

### 3.1.2 Messung der thermischen Fehler

Für die Modellierung und Kompensation der Verlagerungen am TCP ist eine Beschreibung, Separierung nach Verursacher und Messung dieser notwendig. Die analysierte NMV5000DCG ist ein 5-Achs-Bearbeitungszentrum, bei dem aufgrund der Konstruktionsweise der Fehler der Rotationsachsen dominiert [39]–[42]. Das heisst nicht, dass nur Rotationsfehler kompensiert werden, sondern dass der idealisierte geometrische Ursprung dieser Fehler nur in der Rotationsachse liegt. Ein translatorischer Fehler in X-Richtung z.B. wird als Positionsverschiebung der Rotationsachse angenommen, der Längenabhängige X-Fehler wird nicht der X-Achse zugeordnet, sondern nur teilweise in den Rotationsfehlern berücksichtigt. Allerdings ist dieser Größenordnungen kleiner als die Nullpunktverschiebungen (z.B. 5 µm/m bei Achsverfahrwegen von 730 mm resp. 510 mm, verglichen mit 30 µm Nullpunktverschiebung). Daher müssen primär die geometrischen Fehler der Rotationsachsen beschrieben werden. Die geometrischen Abweichungen einer Rotationsachse können wie folgt beschrieben werden:

- **A0C:** Drehung der C-Achse um die X-Achse
- **B0C:** Drehung der C-Achse um die Y-Achse
- **C0C:** Nullpositionswinkelfehler der C-Achse
- **X0C:** X-Positionsfehler der C-Achse
- **Y0C:** Y-Positionsfehler der C-Achse
- **ROT:** Radiale Ausdehnung des Tisches
- **ZOT:** Axiale Verlagerung des Tisches

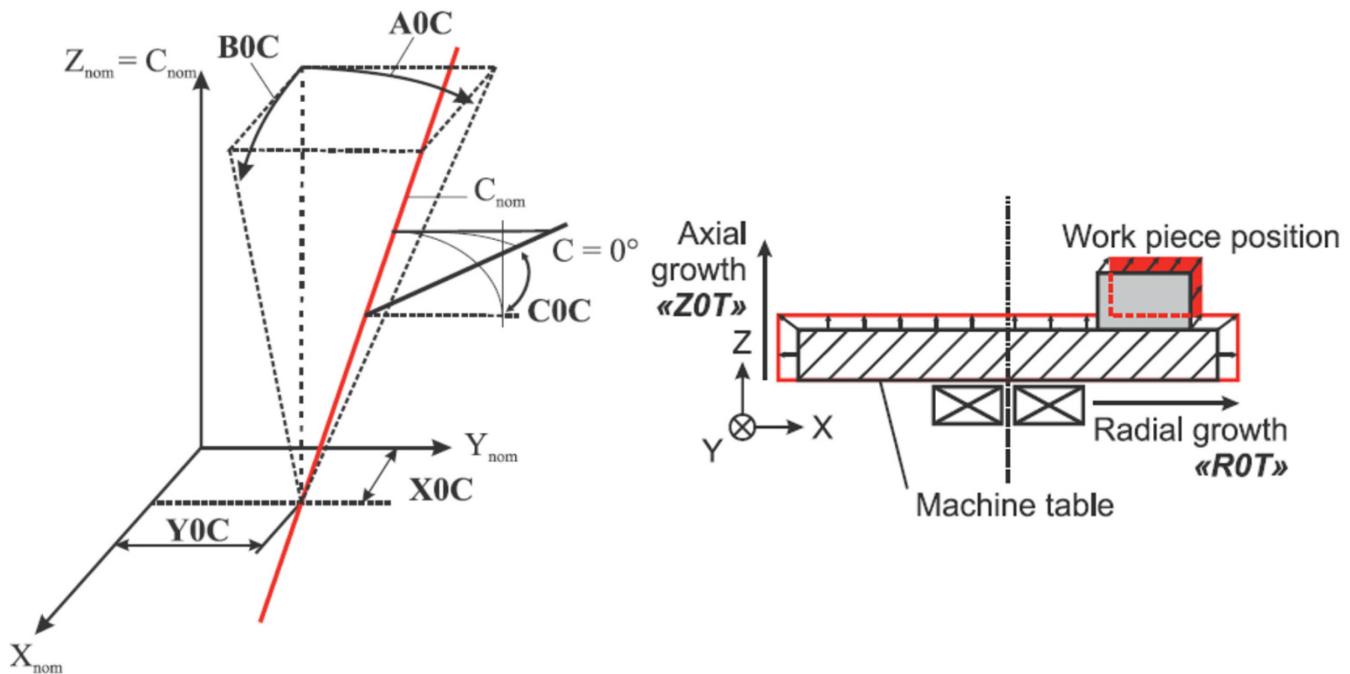


Abbildung 13 Die sieben geometrischen Fehler einer Rotationsachse.

Um die thermisch bedingten Positions- und Orientierungsfehler einer Rotationsachse, wie in Abbildung 13 gezeigt, möglichst zeiteffizient bestimmen zu können, wird ein In-Prozess Messverfahren verwendet. Dazu wird eine Präzisionskugel exzentrisch auf dem Rotationstisch und ein OMP 60 Renishaw Messtaster auf der WZM installiert. Abbildung 14 zeigt, dass die Position der Präzisionskugel jeweils durch fünf Messpunkte bestimmt wird. Um die Positions- und Orientierungsfehler zu bestimmen, wird die Position der Präzisionskugel bei den vier Winkelstellungen  $C = 0^\circ$ ,  $C = 90^\circ$ ,  $C = 180^\circ$ ,  $C = 270^\circ$  des Rotationstisches gemessen. Insgesamt werden somit 20 Messpunkte innerhalb eines Messzyklus betrachtet. Dies resultiert in einer Zyklusdauer inklusive Werkzeugwechsel von etwa 100 Sekunden. Während einer solchen Messung kann der thermische Fehler, der während der Messdauer entsteht, nicht vom geometrischen Fehler separiert werden, das heisst Zeitskalen unter der Messlänge können nicht aufgelöst werden und längere Messzyklen beeinflussen die Messunsicherheit. Der Vorteil eines solchen In-Prozess Messverfahrens ist eine direkte produktionsbegleitende Messung des Maschinenzustands. Des Weiteren wird nur ein Messartefakt wie die Referenzkugel und ein Messtaster, welcher typischerweise bereits auf der Maschine vorhanden ist, um Werkstücke einzurichten, benötigt. Daher eignet sich dieser Messansatz für breite Verwendung und die Nachrüstung auf bestehenden Maschinen. Der Nachteil ist die durch die Messgeschwindigkeit und den Messtaster begrenzte Messgenauigkeit. Je nach Anwendung kann auch das Messartefakt durch die Einschränkung des Arbeitsraumes nachteilig wirken.

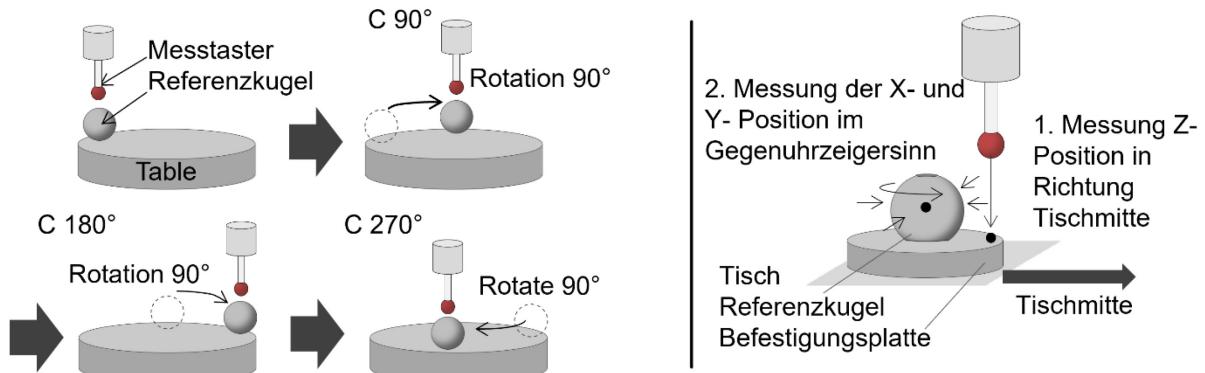


Abbildung 14 Verwendeter Messzyklus mit Maschinenmesstaster und Messartefakt in Form eines diskreten R-Tests.

Der thermische Fehler ist nun die zeitliche Variation des geometrischen Fehlers. Dieser stammt vor allem von der zeitlichen Änderung der thermischen Deformation, aber auch z.B. Abrieb würde mitgemessen werden, dies ist aber typischerweise nicht relevant. Für diese zeitliche Variation wird die erste durchgeführte Messung als Referenzpunkt definiert. Das heisst alle zu diesem Zeitpunkt vorhandenen statischen geometrischen Fehler werden zusammen mit dem thermischen Zustand als Referenz definiert. Um aus den Messwerten die thermisch bedingten Abweichungen zu bestimmen, werden die folgenden Gleichungen verwendet. X, Y oder Z beschreibt die Richtung des gemessenen Kugelmittelpunktes. Die Indizes act, beschreibt den aktuellen tatsächlichen Messwert, i beschreibt die i-te Messung, analog beschreibt 1 die erste Messung die als Referenz verwendet wird. Der letzte Index 0, 90, 180 oder 270 beschreibt die C-Achsenstellung, an der sich die Kugel zum Messzeitpunkt befand.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X0C}_i &= -\frac{1}{4}(X_{act_{i,0}} + X_{act_{i,90}} + X_{act_{i,180}} + X_{act_{i,270}}) + \frac{1}{4}(X_{act_{1,0}} + X_{act_{1,90}} + X_{act_{1,180}} + X_{act_{1,270}}) \\
 \mathbf{Y0C}_i &= -\frac{1}{4}(Y_{act_{i,0}} + Y_{act_{i,90}} + Y_{act_{i,180}} + Y_{act_{i,270}}) + \frac{1}{4}(Y_{act_{1,0}} + Y_{act_{1,90}} + Y_{act_{1,180}} + Y_{act_{1,270}}) \\
 \mathbf{Z0T}_i &= -\frac{1}{4}(Z_{act_{i,0}} + Z_{act_{i,90}} + Z_{act_{i,180}} + Z_{act_{i,270}}) + \frac{1}{4}(Z_{act_{1,0}} + Z_{act_{1,90}} + Z_{act_{1,180}} + Z_{act_{1,270}}) \\
 \mathbf{ROT}_i &= \frac{1}{4}(X_{act_{i,180}} + Y_{act_{i,90}} - X_{act_{i,0}} - Y_{act_{i,270}}) - \frac{1}{4}(X_{act_{1,180}} + Y_{act_{1,90}} - X_{act_{1,0}} - Y_{act_{1,270}}) \\
 \mathbf{A0C}_i &= \frac{1}{d}(Z_{act_{i,270}} - Z_{act_{i,90}}) - \frac{1}{d}(Z_{act_{1,270}} - Z_{act_{1,90}}) \\
 \mathbf{B0C}_i &= \frac{1}{d}(Z_{act_{i,0}} - Z_{act_{i,180}}) - \frac{1}{d}(Z_{act_{1,0}} - Z_{act_{1,180}}) \\
 \mathbf{C0C}_i &= \frac{1}{2d}(Y_{act_{i,180}} + X_{act_{i,270}} - Y_{act_{i,0}} - X_{act_{i,90}}) - \frac{1}{2d}(Y_{act_{1,180}} + X_{act_{1,270}} - Y_{act_{1,0}} - X_{act_{1,90}})
 \end{aligned}$$

### 3.1.3 Messungen der Temperatur

Das Temperaturfeld der Maschine wird gemessen um es als Modellinput zu verwenden, um die thermischen Verlagerungen vorherzusagen, ohne die Produktivität mit Messungen zu unterbrechen. Dafür werden zwölf Temperatursensoren des Typs DS18S20 [43] an unterschiedlichen Positionen angebracht. Die nominale Genauigkeit ist +/- 0.5°C in einem Messbereich von -10 bis 60°C, welcher die typischen in einer Produktionsmaschine zu erwarteten Temperaturen mehr als abdeckt. Die Sensoren werden mithilfe von Schaumstoff, an der den Komponenten abgewandten Seite, isoliert. Ziel ist es alle relevanten Wärmequellen und senken und ihr Verhalten in Echtzeit messen zu können.



- S1: Ausserhalb der Maschine  
(Umgebungstemperatur Werkstatt)
- S2: Maschinenbett rechter Bereich
- S3: Maschinenbett linker Bereich
- S4: Arbeitsraum rechter Bereich
- S5: Arbeitsraum linker Bereich
- S6: C-Achse vorderer Bereich
- S7: C-Ache hinterer Bereich
- S8: B-Achse
- S9: Kühlenschmiermittel an der Spindel
- S10: Zulauf des Kühlmittels der Linearachsen
- S11: Zulauf des Kühlmittels der Rotationsachsen
- S12: Rücklauf des Kühlmittels

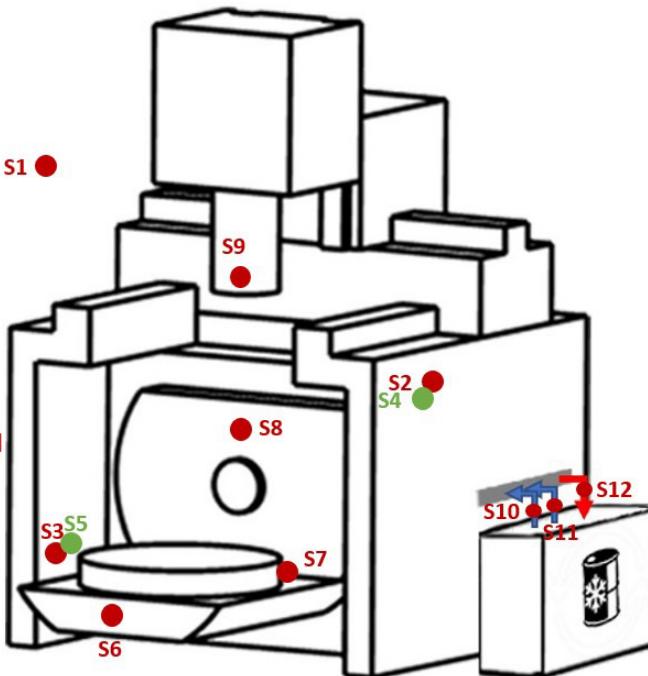


Abbildung 15 Temperatursensoren und ihre Positionierung an der untersuchten WZM NMV5000DCG.

In Abbildung 15 sind die Positionen der insgesamt zwölf Temperatursensoren abgebildet. Die Sensoren S2 und S4, respektive S3 und S5, versuchen dabei, jeweils möglichst nahe beieinander einmal die Temperatur im Arbeitsraum und einmal die Temperatur des Maschinenbetts zu ermitteln.

### 3.2 Kompensationsmodelle für thermische Fehler

Um thermische Fehler präzise kompensieren zu können, müssen sie genau und in Echtzeit modelliert werden, damit die tatsächliche Kompensation des jeweiligen Fehlers durchgeführt wird, wenn dieser auftritt [44]. Es gibt verschiedene Ansätze zur Modellierung des thermischen Verhaltens einer WZM. Phänomenologische Modelle haben sich sowohl als effizient als auch als hinreichend genau bei der Beschreibung des thermischen Verhaltens von WZM erwiesen, wie von Weck et al. gezeigt wurde [7]. Das thermische Verhalten von WZM kann aufgrund ihrer Komplexität und Systemunsicherheiten nicht einfach analytisch beschrieben werden [45]. Da thermische Verformungen durch ein variierendes Temperaturfeld entstehen, können einige kritische Temperaturpunkte auf der WZM als Input für eine thermische Fehlervorhersage verwendet werden [46]–[49]. Es wurde gezeigt, dass diese empirische Annäherung tatsächlich ein valider Ansatz für die Kompensation thermischer Fehler in WZM ist [50], [51].

$$y[n] + a_{\{1\}} \cdot y[n - 1] + \cdots + a_{\{n_{\{a\}}\}} \cdot y[n - n_{\{a\}}] = b_{\{0\}} \cdot u[n] + b_{\{1\}} \cdot u[n - 1] + \cdots + b_{\{n_{\{b\}}\}} \cdot u[n - n_{\{b\}}]$$

Die obenstehende Formel beschreibt ein allgemeines lineares, dynamisches und zeitinvariantes System. Um thermische Fehler vorherzusagen, wird dies durch ein ARX Modell (**A**uto-**R**egression with **e**Xogenous inputs) beschrieben. Der Modellausgang  $y$  beschreibt in unserer Anwendung den thermischen Fehler, den es zu kompensieren gilt.  $u$  beschreibt die Modelleingänge, wie in unserem Fall Temperaturmessungen. Es können aber auch gemittelte Leistungsmessungen oder andere Messwerte als Modelleingang verwendet werden.  $a$  beschreibt die Parameter die autoregressiv, also auf vorherige Messungen oder Fehlervorhersagen, wirken.  $n_a$  ist die Anzahl vorheriger Vorhersagen, die berücksichtigt werden.  $b$  beschreibt die Parameter, die mit den Inputs multipliziert werden und  $n_b$  die Anzahl vorheriger Messungen des jeweiligen Inputs die berücksichtigt werden. Dieses Modell wird zur thermischen Fehlerkompensation in diesem Projekt nicht nur als SISO (single input, single output)



angewendet, sondern typischerweise als MISO (multiple input, single output). Das heisst es gibt für jeden thermischen Fehler einen eigenen Parametersatz/ein eigenes Modell mit mehreren Inputs also Temperatursensoren.

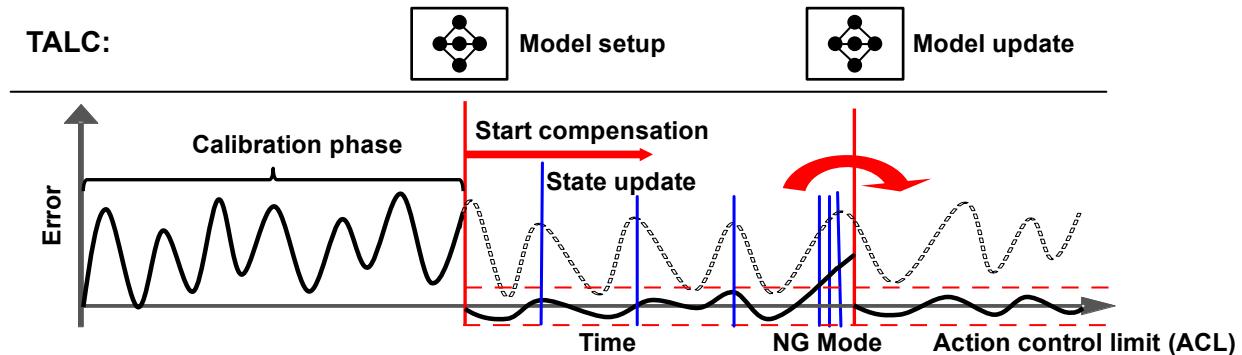


Abbildung 16 Trainingsphase und kontinuierliche Anpassungen des Kompensationsmodells adaptiert nach [5].

Abbildung 16 zeigt ein Flussdiagramm eines thermischen adaptiven Lernkontrollmodells (TALC), das zur Kompensation der thermischen Fehler einer WZM integriert ist. Das Modell wird nach der Trainingsphase initialisiert, in der wiederholt Messungen durchgeführt werden, wie in Abbildung 17 dargestellt. Für den Fall von unregelmässigen Messintervallen wird ein gewichtetes Verfahren der Methode der kleinsten Fehlerquadrate nach Blaser et al. verwendet [52]. Diese Messungen werden verwendet, um die Beziehung zwischen den Modelleingängen (Temperaturmessungen) und den Ausgaben (thermische Fehler) zu bestimmen. Die Modelleingänge können automatisiert bestimmt werden und nach Zimmermann et al. [53] adaptiv über die Messung angepasst werden.

Die Qualität der Modellvorhersagen kann, während der Nutzung der WZM beobachtet werden und das Modell nötigenfalls adaptiert werden, um die Robustheit auch in neuen Situationen zu erhöhen. In den Fällen, in denen ein State update ausgelöst wird, wird eine reale Messung durchgeführt und mit den Vorhersagen verglichen. State updates können in regelmässigen Intervallen z.B. stündlich oder dynamisch nur bei neuen Temperaturzuständen nach Zimmermann et al. ausgelöst werden [54].

Der Fehler, den unser Modell nicht vorhersagen konnte, also die Differenz zwischen Vorhersage und realer Messung, ist der Restfehler. Überschreitet der Restfehler das Toleranzband (typischerweise 5 µm für translatorische und 15 µm für thermische Positionierungs- und Winkelfehler), wird ein NG-Modus (Not Good) gestartet. Dieses Toleranzband kann auch dynamisch gesetzt werden anhand des maximalen während den Trainingsphasen aufgetretenen Eigenfehlern nach Zimmermann et al. [55]. In diesem NG-Modus werden für eine festgelegte Dauer, in der Regel zwei Stunden, Messungen wiederholt, die dann zur Rekalibrierung des Modells verwendet werden. Diese Messungen können auch für das weitere Modelltraining genutzt werden. Nach dem NG-Modus werden die Parameter des Modells in der Regel aktualisiert, und im Falle eines adaptiven Sensorsatzes werden die Eingänge neu ausgewählt, um eine Anpassung an die aktuelle Situation des WZM zu ermöglichen, die von dem während der Trainingsphase erlebten Zustand abweichen kann.

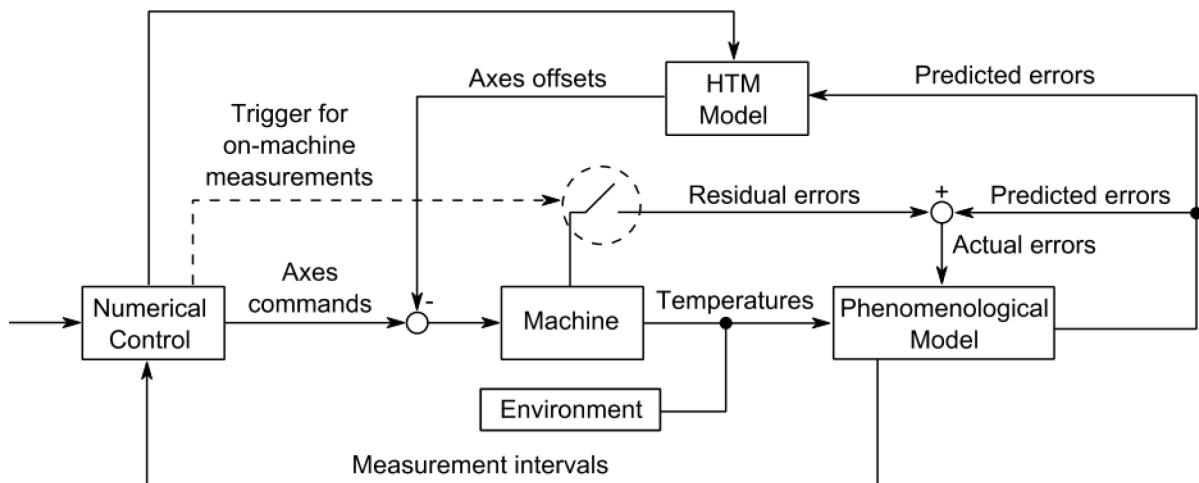


Abbildung 17 Schematische Anwendung des TALC auf einer WZM [5].

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Im Kick-Off vom 15.12.2021 sowie dem Meilensteinmeeting am 07.06.2022 wurde die Anforderung der Industrie an stabile Prozesse bestätigt. Als Anforderung wurde das Warmlaufverhalten und die Eignung zur Produktion mit «Losgrösse 1» in schwankenden Umgebungsbedingungen genannt.

### 4.1 Messungen auf der NMV5000DCG

Um den Energieverbrauch durch die zeitliche Integration der Leistungsaufnahme im Zusammenspiel mit der thermischen Kompensation parallel zu messen, bietet sich die in Kapitel 3 beschriebene Anlage an der WZM NMV5000DCG an. Es werden also die Leistungsaufnahme gesondert von sechs Komponenten, die Temperatur an 11 kritischen Punkten sowie 7 thermische Fehler gemessen. Eine entscheidende Grösse, die untersucht werden soll, ist die Warmlaufzeit.

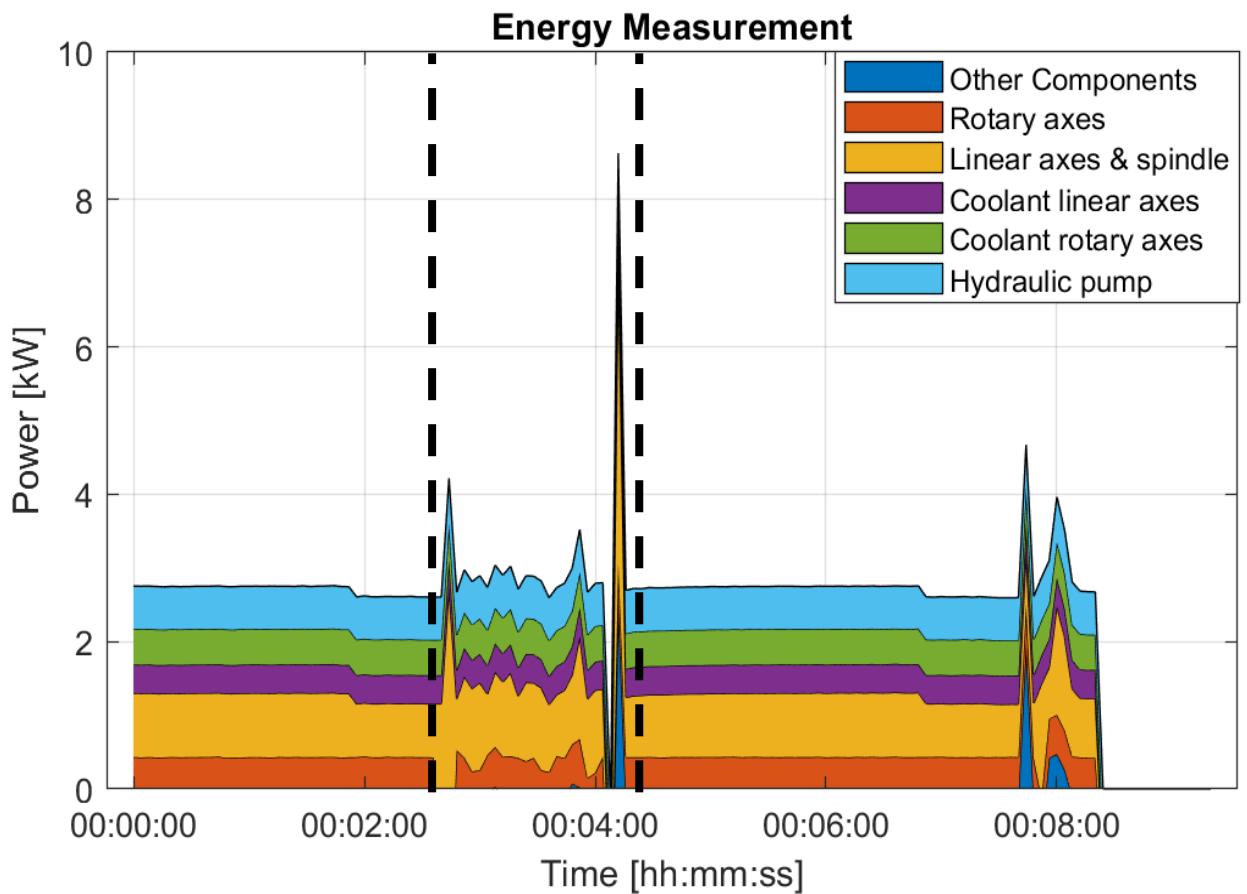


Abbildung 18 Leistungsaufnahme während eines Messzyklus zur Bestimmung der geometrischen Fehler an diesem Zeitpunkt.

Abbildung 18 zeigt zwischen den schwarzen vertikal gestrichelten Linien die Messung des Leistungsaufnahmen der NMV5000DCG während eines Messzyklus des verwendeten diskreten R-Tests. Davor und danach war die Maschine im Ruhezustand, bevor sie nach etwa acht Minuten abgeschaltet wurde, was zu einer Änderung der Leistungsaufnahme führte. Im Mittel nimmt die Maschine, während dem Messzyklus 2.892 kW Leistung auf, was mit einer Messdauer von 100 Sekunden zu einem Energieverbrauch von 0.0803 kWh pro Messung führt. Der Energieverbrauch des Tasters selbst, der mit zwei AA-Batterien typischerweise für 200 Messstunden betrieben werden kann, wird vernachlässigt, da er im Vergleich zum Grundlastverbrauch der Maschine nicht signifikant ist.

Dieselbe Überlegung wird für die Temperatursensoren, sowie den Laptop zur Aufzeichnung der Messdaten angestellt. Während dem Ruhezustand der Maschine führt diese keine Aufgaben aktiv durch, ist jedoch bereit Aufgaben durchzuführen. Das heisst Hilfsaggregate wie die Hydraulikpumpe oder die Kühlaggregate sind aktiv, um jederzeit den Klemmdruck zu Verfügung zu stellen, und die Maschine auf einer möglichst konstanten Temperatur zu halten. Jedoch nehmen auch die Motoren der Linear- und Rotationsachsen Leistung auf, da die typischerweise verwendeten Servomotoren einen Haltestrom verbrauchen, um ihre Position zu halten, der in Wärme umgewandelt wird. Dies ist ein signifikanter Energieverbrauch dafür, dass die einzige produktive Eigenschaft der Maschine ihre Bereitschaft ist. Wird jedoch eine Maschine aus dem Kaltstart direkt verwendet sind ohne thermische Kompensation erhebliche thermische Fehler und damit Ausschuss gerade im Warmlauf zu erwarten.



## 96 Stunden Messung NMV5000DCG

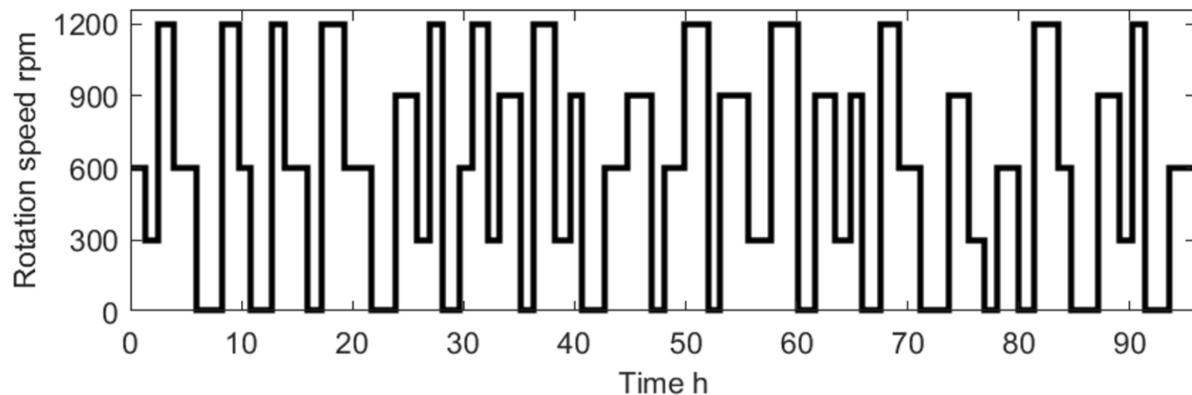


Abbildung 19 Lastfall der C Achse während des Experiments.

Während dem Experiment wird ein zufällig generiertes abgestuftes Lastprofil der C-Achse, wie in Abbildung 19 gezeigt, über den gesamten Geschwindigkeitsbereich von 0-1200 Umdrehungen pro Minute verwendet. Dies stellte eine Vereinfachung eines Drehprozess im Schlichtmodus dar. Die Bearbeitungskräfte sind nicht vorhanden, da nur Luftschnitte durchgeführt werden, was jedoch eine sehr gute Approximation des Schlichtprozesses ist, der durch minimale Zustellungen die Genauigkeit des Werkstücks sicherstellen soll und daher auch sehr thermisch sensibel ist. Verglichen mit den in 4.2 und 4.3 durchgeführten Lastfällen ist die Variabilität eher hoch. Dies erlaubt einen möglichst komplexen Fall zu simulieren viel instationärem Verhalten, verglichen mit der Serienproduktion eines einzelnen Bauteils, bei welcher sich die thermische Maschinenlast periodisch wiederholt. Nach fünf Minuten Lastfall wird ein Messzyklus mit dem OMP 60 Messtaster durchgeführt, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, welcher etwa 100 Sekunden dauert.

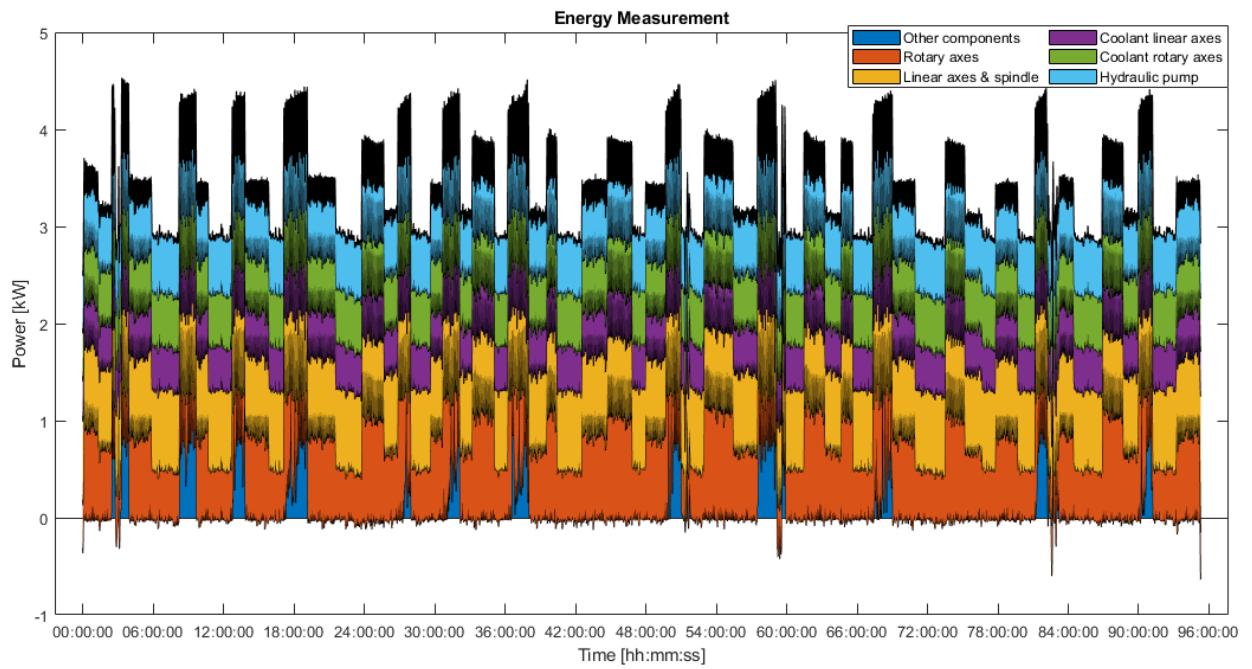


Abbildung 20 Leistungsaufnahme der sechs Messpunkte der NMV5000DCG in Echtzeit, ermittelt über die gesamte Experimentdauer.

Die Leistungsaufnahme der NMV5000DCG ist in Abbildung 20 dargestellt. Im Mittel werden 3.3698 kW aufgenommen. Über die gesamte Messzeit von etwa 96 Stunden (Leistungsaufnahme über 95h 17min) werden also 320.78 kWh verbraucht. 283 Messungen führen zu einem Energieverbrauch von  $0.0803 \text{ kWh pro Messung} \cdot 283 \text{ Messungen} = 22.7249 \text{ kWh}$  für das Erstellen und Aktualisieren des thermischen Kompensationsmodell. Für die Produktion von Präzisionsteilen kann der energetische break-even also schon erreicht werden, wenn gesamthaft eine Warmlaufdauer von  $22.7249 \frac{\text{kWh}}{3.372 \text{kW}}$  durchschnittliche Leistungsaufnahme im Warm – up = 5.67 Stunden eingespart würde. Die Maschinenkühlung für sowohl die Rotations- wie auch die Linearachsen entspricht etwa 25 % des gesamten Energieverbrauchs der NMV5000DCG. Dies bestätigt die Hochrechnungen aus der Literaturrecherche, wonach das Kühlssystem für 15-30 % des totalen elektrischen Energieverbrauchs von WZM verantwortlich ist.

## 96 Stunden Messung Thermische Fehler

Abbildung 21 zeigt mit  $E_{Y0C}$  einen der beiden dominantesten der sieben gemessenen thermischen Fehler der NMV5000DCG. Der Fehler weist ein sehr dynamisches Verhalten auf, welches stark mit dem Lastfall der C-Achse zusammenhängt. Nach 24 Stunden wurde das Kompensationsmodell mit vier Inputs erstellt wie im dritten Subplot sichtbar. Der zweite Subplot zeigt den Restfehler. Dieser besteht nahezu nur aus Rauschen, es ist jedoch noch ein teilweise systematischer Fehler vorhanden. Dies ist ein Indikator dafür, dass das Kompensationsmodell noch nicht optimal trainiert ist. Eine längere und abwechslungsreichere Trainingsphase sowie besser geeignete Modelleingänge könnten dies zusätzlich verbessern. Um die Kompensationsgüte zu beschreiben können unterschiedliche Metriken verwendet werden, hier wird das Fehlerband (Peak to Peak P2P error) und der RMSE (engl. Root Mean Square Error, deutsch: Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme). Der P2P beschreibt die Distanz vom tiefsten zum höchsten Fehler, also die maximale Abweichung der beiden Extrempunkte in einer Serie zueinander, dieses Mass ist sehr sensitiv da es auch durch Messrauchen und Messwertausreisser stark



beeinflusst wird. Der RMSE hingegen beschreibt die Wurzel des quadrierten mittleren Restfehlers also ein robustes Mass, was etwa den mittleren Modell Fehler beschreibt. Insgesamt lässt sich das Fehlerband jedoch von 31.125  $\mu\text{m}$  auf 4.5057  $\mu\text{m}$  um 85.52 % reduzieren der RMSE sogar von 7.697  $\mu\text{m}$  auf 0.8966  $\mu\text{m}$  um 87.88 % reduzieren.

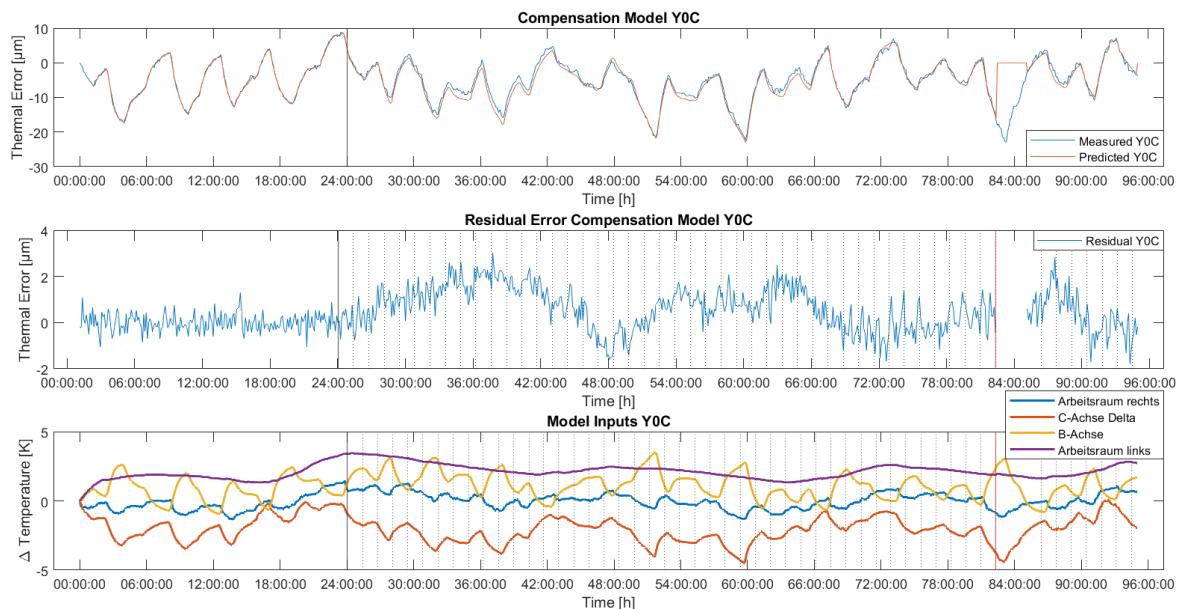


Abbildung 21 Gemessener Fehler  $E_{Y0C}$  während dem 96 h Experiment auf der NMV5000DCG.

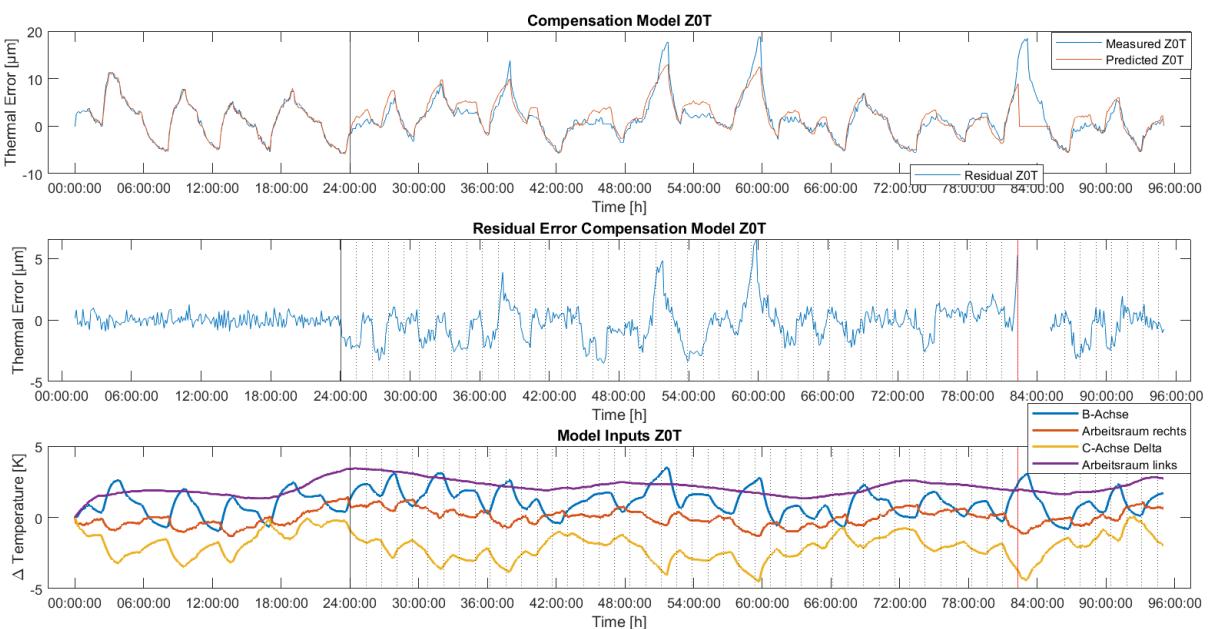


Abbildung 22 Gemessener Fehler  $E_{Z0T}$  während dem 96 h Experiment auf der NMV5000DCG.



Abbildung 22 beschreibt mit  $E_{Z0T}$  den zweiten der signifikantesten thermischen Fehler. Hier ist der Restfehler leicht höher als bei  $E_{Y0C}$ , was vor allem durch die Messignalqualität begründet ist. Die Fehler in X- und Y-Richtung werden jeweils durch ein zweiseitiges Antasten des Präzisionsartefakts ermittelt, wohingegen das Antasten in Z-Richtung, aus zugänglichkeitsgründen, nur einseitig erfolgen kann. Das Messresultat in Z-Richtung ist daher deutlich verrauschter. Daher wurde auch ein NG mode ausgelöst und die Modellparameter angepasst. Insgesamt wurde der P2P Error von 24.5  $\mu\text{m}$  auf 11.19  $\mu\text{m}$  um 54.31 % reduziert. Der RMSE wurde von 4.25  $\mu\text{m}$  auf 1.46  $\mu\text{m}$  um 65.67 % reduziert. Dies ist eine signifikante Fehlerreduktion.

## 320 Stunden Messung NMV5000DCG

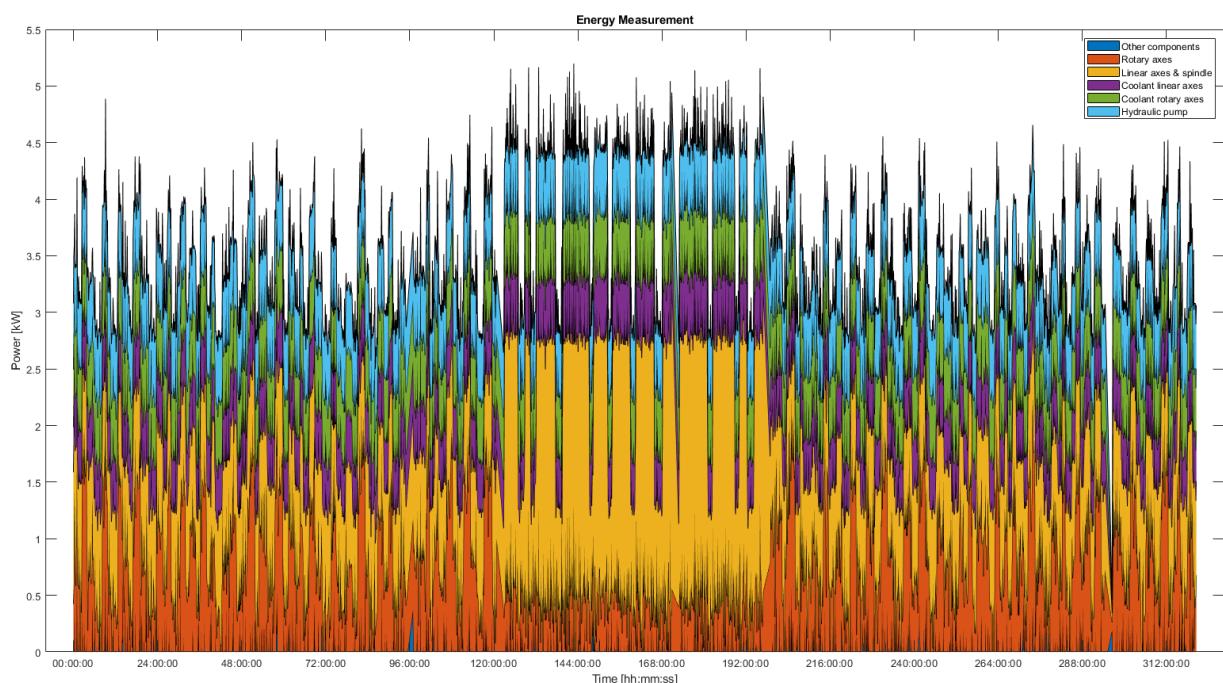


Abbildung 23 Leistungsaufnahme während der Messungen mit dem Lastfällen Drehmodus und B-Achse-Schwenken und Halten mit C-Achse Rotation ohne Drehmodus.

Abbildung 23 zeigt die Leistungsaufnahme während einer 320 Stunden Messung. Dies sind eigentlich sechs separate Experimente, die mit einem gemeinsamen Referenzpunkt zusammengefügt wurden. Sie bestehen immer aus einem längeren Experiment, gefolgt von einem Maschinenstop und erneutem Start für nach 24 h. Nach 120 h beginnt ein veränderter Lastfall, bei dem die B-Achse geschwenkt ist und vom Motor gehalten wird. Dies erhöht die benötigte Leistungsaufnahme im B-Achsmotor deutlich. Des Weiteren rotiert die C-Achse immer noch aber deutlich langsamer da der Drehmodus nur im B-Achsen fixierten Zustand aufgerufen werden kann. Nach 96 Stunden beginnt wieder der ursprüngliche Lastfalltyp (mit einer neuen Zufallsverteilung).

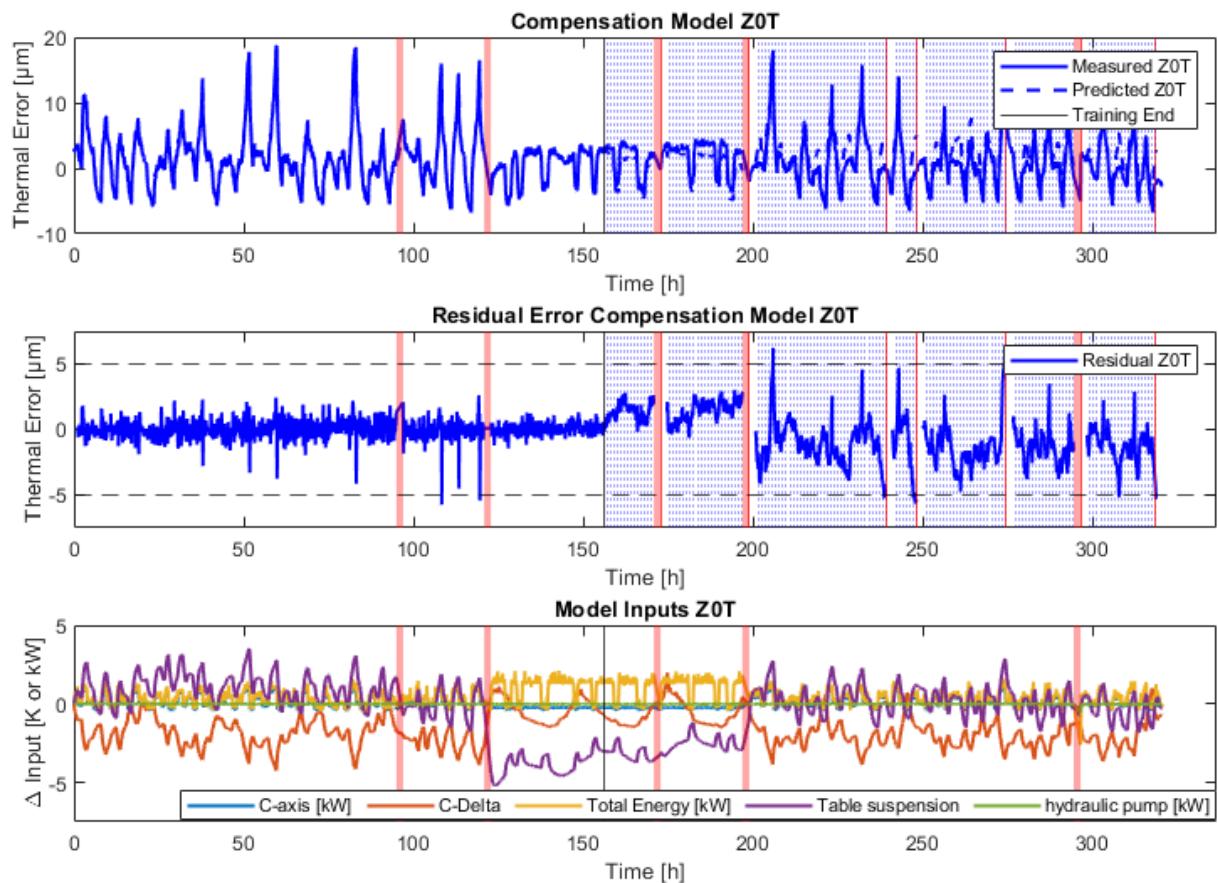


Abbildung 24 Gemessener Fehler  $E_{ZOT}$  während dem 320 h Experiment an der NMV5000DCG.

Abbildung 24 zeigt den  $E_{ZOT}$  thermischen Fehler. Das Kompensationsmodell wird die ersten 160 Stunden trainiert. Es ist deutlich zu sehen, dass das Verhalten, während dem die B-Achse geschwenkt ist, systematisch anders ist. Dennoch ist die Kompensationsgüte auch für ein anderes Fehlerverhalten gut.

Abbildung 25 zeigt alle Linearfehler der C-Achse. Hier ist der Unterschied im Lastfall noch deutlicher ersichtlich. Die Fehler der B-Achse sollten idealerweise auch vom Messzyklus erfasst werden, um zu unterscheiden, ob die thermische Last der B-Achse besser abgetragen wird (der Motor ist ausserhalb der direkten Maschinenstruktur) oder vom Messzyklus auch nicht von einer anderen Achse beobachtet werden kann.

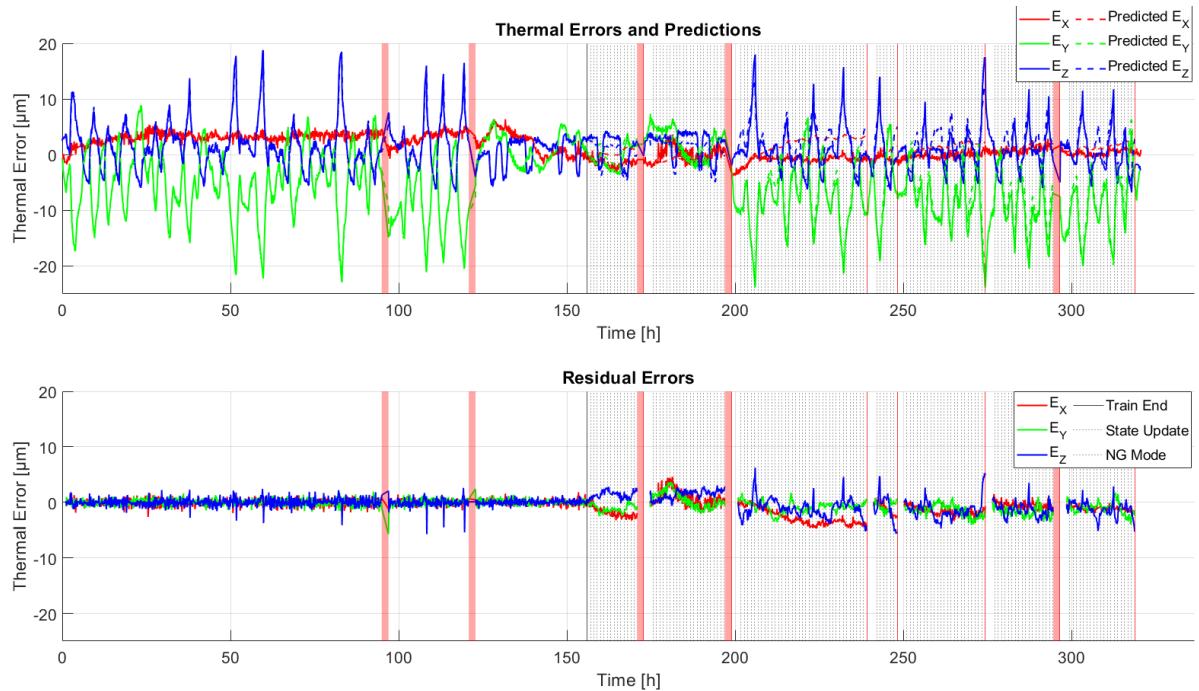


Abbildung 25 Gemessener Fehler  $E_{xoc}$ ,  $E_{yoc}$ ,  $E_{zot}$  während dem 320 h Experiment an der NMV5000DCG.

## 4.2 Berechnungen zur energetischen Effizienz der thermischen Fehlerkompensation

### Energetischer Einfluss des Warmups bzw. Produktivitätsänderungen

Auf Basis der Messungen der WZM des Schweizer Herstellers kann der Einfluss des Warm-ups klar definiert werden. Beispielhaft wird an einem idealen Kunden der Nutzen über ein Produktionsjahr von 46 Wochen kalkuliert. Wird am Wochenende die Maschine abgeschaltet und innerhalb der Werkwoche von montags bis freitags zweischichtig mit 16 Stunden effektiver Produktionszeit, vollautonom gefertigt, ist montags ein mindestens zweistündiger Warmlaufzyklus notwendig. Einmal pro Woche wird zudem typischerweise umgerüstet, was einen einstündigen Warmlaufzyklus benötigt. Hierdurch wird die Produktionszeit um die Rüstzeit von einer Stunde reduziert. Alle geplanten Wartungen werden in den Stillstandzeiten am Wochenende angesetzt. Im Fall ohne Kompensation werden pro Woche vier Stunden Produktionszeit von einem idealen Kunden mit minimalem Rüстаufwand, der die Baseline darstellt, verloren. Teilweise werden von Kunden bis zu acht schnelle Rüstvorgänge je Schicht als extremes Beispiel vorgenommen.

Im Fall mit thermischer Kompensation ist nur eine Stunde Rüstaufwand nötig. Zusätzlich werden 4 bis 72 Stunden Messdaten zur Modellerstellung benötigt, je nachdem was für ein Kompensationsmodell bereits von anderen Maschinen vorhanden ist und welche Komplexität das Kompensationsmodell benötigt. Während der Messpausen, kann aufgrund des Messaufbaus, nicht produziert werden.



Tabelle 3 Auswirkungen der Thermischen Kompensation auf die Warmup Zeiten der WZM des Schweizer Herstellers.

Funktion	Ohne Kompensation	Mit thermischer Kompensation
Produktionszeit [h/a]	$46 \text{ w} * 104 \text{ h/w} = 4784 \text{ h/a}$	$46 \text{ w} * 104 \text{ h/w} = 4784 \text{ h}$
Produktive Zeit [h/a]	$4784 \text{ h} - 4 \text{ h} * 46 \text{ w} = 4600 \text{ h/a}$	$4784 \text{ h} - 1 \text{ h} * 46 \text{ w} - 4 \text{ h} = 4666 \text{ h bis } 4734 \text{ h/a}$ Trainingszeit = 4666 h bis 4734 h/a
Warmlaufzeit [h/a]	138 h/a	-
Trainingszeit [h/a]	-	72 h/a bis 4 h/a
Effizienz [%]	$4600 \text{ h} / 4784 \text{ h} = 96.15 \%$	$4666 \text{ h bis } 4734 \text{ h} / 4784 \text{ h} = 97.53 \% \text{ bis } 98.95 \%$

Tabelle 3 zeigt diese Auswirkungen. Im Idealfall lässt sich ohne thermische Kompensation eine maximale Effizienz von 96.15 % erreichen, die definiert ist als Anteil der Zeit, in der die Maschine Teile produziert geteilt durch die Zeit, in der die Maschine Leistung aufnimmt. Mit thermischer Kompensation lässt sich eine Maschinen Effizienz von 97.53 % bis 98.95 % erreichen. Dies hängt insbesondere mit der Menge der benötigten Messungen zusammen. Dateneffiziente Kompensationsmodelle sind also deutlich energetisch effizienter und sollten daher angestrebt werden. Dies bedeutet jedes Jahr wird von jeder Maschine mindestens 66 bis 134 Stunden Energie verbraucht, die sich durch einfache thermische Kompensation vermeiden lässt.

Im Folgenden wird für ein Kompensationsmodell 100 Stunden Trainingsdaten zur Modellerstellung angenommen. Jede Woche werden über zwei Stunden zusätzliche Messungen durchgeführt, um das Modell anzupassen, bzw. mitlernen zu lassen. Alternativ werden pro Woche entweder vier oder sieben Stunden für Warm-up Zyklen verwendet. Da die Anforderungen an ein Kompensationsmodell stark von den tatsächlichen thermischen Lasten während der Produktion abhängen, die ihrerseits von den produzierten Bauteilen abhängen, werden typischerweise robustere Kompensationsmodelle, die auf zusätzlichen Daten trainiert wurden, eingesetzt. Es ließen sich auch Kompensationsmodelle ab 5.67 Stunden äquivalentem Warm-up Energieverbrauch erstellen, die je nach Last bereits nach einer Woche oder Schicht amortisiert sein können.

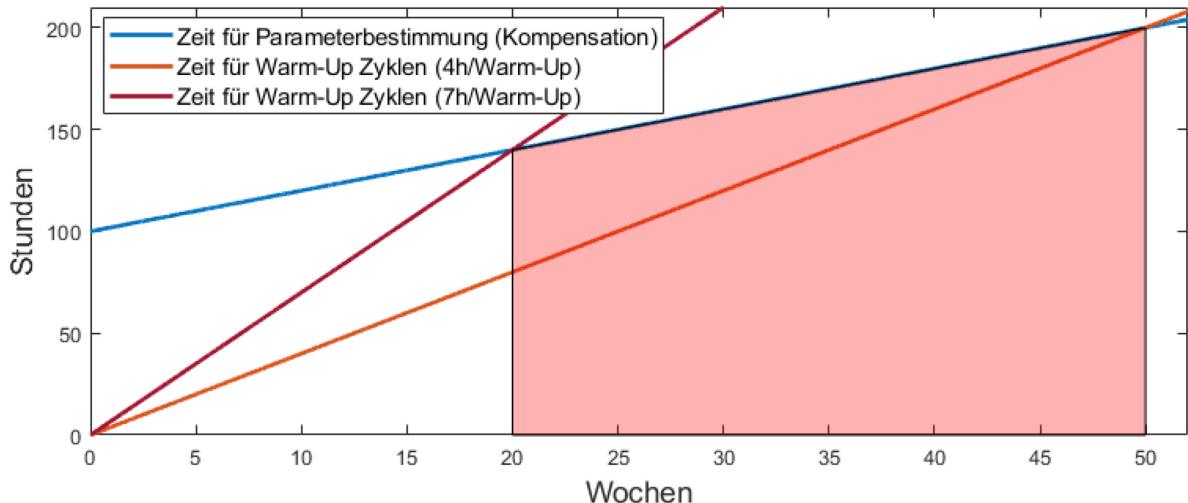


Abbildung 26 Zeitlicher break-even Punkt zwischen thermischer Kompensation und Warmlaufzyklen.

Abbildung 26 zeigt das zeitliche break-even zwischen Warmlaufzyklen und der thermischen Kompensation. Je nach wöchentlicher Warmlaufdauer liegt dieser Punkt zwischen 20 und 50 Wochen. Es ist eindeutig, dass kürzere initiale Trainingsexperimente und ein flacherer Anstieg, also weniger zusätzliche Messungen zum Modell überprüfen und nachtrainieren, diesen break-even Punkt vorziehen. Gleichzeitig hängt er stark von der tatsächlichen Verwendung der WZM ab, die in der Industrie oft variieren kann.

## Einfluss der Toleranz und thermischer Fehler auf den Energieverbrauch von WZM

Die an der Versuchsanlage NMV5000DCG entstandenen Messergebnisse decken sich qualitativ sehr gut mit den vier untersuchten Industriemaschinen. Da die intern erhobenen Daten keinerlei Restriktionen unterliegen, werden die folgenden Analysen und Hochrechnungen auf der Basis der am Institut durchgeführten Experimente beschrieben.

Tabelle 4 zeigt die Beziehung zwischen Toleranzband eines typischen industriellen Fertigungsprozesses und der Wahrscheinlichkeit, dass während der Produktionsdauer die Toleranz verletzt wird. Es ist wichtig zu beachten, dass ein Fehler von z.B. 20 µm innerhalb von der Produktionsdauer auf 22 µm ansteigt, nur eine Toleranzabweichung von 2 µm bedeutet, da beim korrekten Einreichten des Werkstücks typischerweise ein neuer Nullpunkt gesetzt wird, auch wenn dies mit Messaufwand verbunden ist. Dies zeigt die starke Beziehung zwischen Produktionsdauer und erreichbarer Toleranz auf. Insbesondere für längere Produktionszeiten ist eine thermische Kompensation sehr effektiv. Durch das Einrichten des Werkstücks wird de-facto eine thermische Kompensation dieses Zeitpunkts vorgenommen, durch thermische Kompensation könnte man diese Messzeit reduzieren. Dies erfordert vorvermessene Rohlinge oder Rohlinge gefertigt in einem engen Toleranzband. Grundsätzlich lässt sich jedoch sagen, dass die thermische Kompensation eine deutliche Steigerung der Genauigkeitsklasse der WZM erlaubt. Das bedeutet auch, dass sich identische Maschinen für genauere Fertigung eignen, ohne das auf typischerweise teurere oder unproduktivere Maschinen gewechselt werden muss.



Tabelle 4 Anteil Ausschussrisiko, das zeigt, wie oft potenziell das vorgegebene Toleranzband verletzt wird, abhängig von der Bauteilproduktionsdauer und einmessen zu Produktionsbeginn, mit thermischer Kompensation oder ohne auf der NMV5000DCG

Toleranzen	Zeit je Werkstück	Ausschuss Unkompensiert	Ausschuss Kompensation
Schleifen 5 µm / 10 µm/m	6:50 min	0.64 %	0 %
	68:20 min	47.4 %	4.2 %
	334:52 min	98.9 %	28.3 %
Fräsen 10 µm / 15 µm/m	6:50 min	0 %	0 %
	68:20 min	9.9 %	0 %
	334:52 min	63.6 %	0 %
Drehen 15 µm / 20 µm/m	6:50 min	0 %	0 %
	68:20 min	0 %	0 %
	334:52 min	24.7 %	0 %

Diese Genauigkeitssteigerung ist gleichzeitig eine Steigerung der Maschinenflexibilität, da typischerweise die erreichbare Genauigkeit ein signifikanter Kostenfaktor ist, der oft mit erhöhtem Energieverbrauch einhergeht, z.B. durch grösser dimensionierte Kühlsysteme und zusätzliche Kühlkanäle. Thermische Kompensation ermöglicht es mit vorhandenen günstigen Maschinen genauere Teile zu produzieren, ohne dafür genauere dedizierte Maschinen zu benötigen, da es typischerweise nicht wirtschaftlich ist, Maschinen deutlich unter ihren Fähigkeiten einzusetzen.

Bezüglich der Platzeinsparungen lassen sich nur theoretische Überlegungen anstellen, da keine Maschinenflotte für die Validierung zur Verfügung steht. Angenommen wird ein KMU mit 100 WZM, welches einen typischen Mix an Werkstattfertigung und Klein- und Mittelserien Produktion über die Wertschöpfungskette, Drehen, Fräsen und Schleifen abdeckt. Als Maschinenmodell wird die untersuchte Anlage NMV5000DCG verwendet, auf der direkt Dreh- und Fräsprozesse durchgeführt werden können und die für diese Annahme mit Schleifmaschinen gleichgesetzt wird. Die Toleranz und Bauteilauswirkungen auf die Anzahl Gutteile während eines 320 Stunden Experiment, sind in Tabelle 4 gezeigt. Es werden vor allem Metallteile bearbeitet, theoretisch stellen die Materialeigenschaften der Werkstücke keine grosse Einschränkung dar. Die Produktionszeiten sind gleichverteilt, was heisst für ein grosses Teil werden 50 kleine produziert. Es wird also genauso viel Produktionszeit für kleine Werkstücke und grosse verwendet. Dafür stehen 50 Dreh-, 30 Fräsen- und 20 Schleifmaschinen zu Verfügung. Angenommen der Schleifprozess hat die engsten Toleranzen, der Fräsprozess mittlere und der Drehprozess die grössten, erlaubten thermischen Fehler, während der Bauteilproduktion Schlichtzeit von 10 µm und 20 µm/m. Dies führt dazu das  $20 \cdot \frac{1-0.49}{1-0.108} = 11.44 \triangleq 12$  kompensierte Maschinen entsprechen, da diese die gleiche Anzahl Gutteile produzieren könnten. Das heisst die Anzahl Schleifmaschinen kann um 40% reduziert werden. Analog für Fräsmaschinen:  $30 \cdot \frac{1-0.245}{1-0} = 22.65 \triangleq 23$  kompensierte Maschinen können 23 % der benötigten Maschinen eingespart werden. Für



Drehmaschinen  $50 \text{ unkomponierte Maschinen} = 50 \cdot \frac{1-0.082}{1-0} = 45.9 \triangleq 46 \text{ komponierte Maschinen}$   
können auch 8 % der Maschinen eingespart werden. Total bedeutet dies eine Ersparnis von 19 WZM, was einer 19 % Reduktion des Maschinenparks und damit einer ebenso deutlichen Platzersparnis und einer ebenso hohen Ersparnis bei den Investitionskosten entspricht.

Es ist offensichtlich das dies nur ein theoretisches Szenario ist, da die nicht geeigneten Maschinen nicht existieren würden und da hohe Ausschussraten normalerweise keine wirtschaftliche Produktion zulassen. Es deutet jedoch eine Erhöhung der Flexibilität des Maschinenparks an, das heisst, dass nicht zwingend neue Maschinen benötigt werden, sondern bestehende nachgerüstet oder neue wirtschaftlich in einem grösseren Bereich betrieben werden können. Der Trend, dass bei genauen Bauteilen, wie sie z.B. beim Feinfräsen oder Schleifen entstehen sollen, die thermischen Fehler eine signifikante Rolle spielen erfordert das diese beachtet werden und idealerweise mit minimalem Energieaufwand minimiert werden. Ebenso entscheidend ist die relative Produktionsdauer da, um die Genauigkeit über einen längeren Zeitraum zu halten der thermische Fehler entscheidend ist. Der Trend zur Lossgrösse 1 erfordert daher Genauigkeit auf Knopfdruck ohne vorherige «Erfahrungskompensation» und daher intelligente Kompensationsmodelle um den benötigten Energieeinsatz zu minimieren.

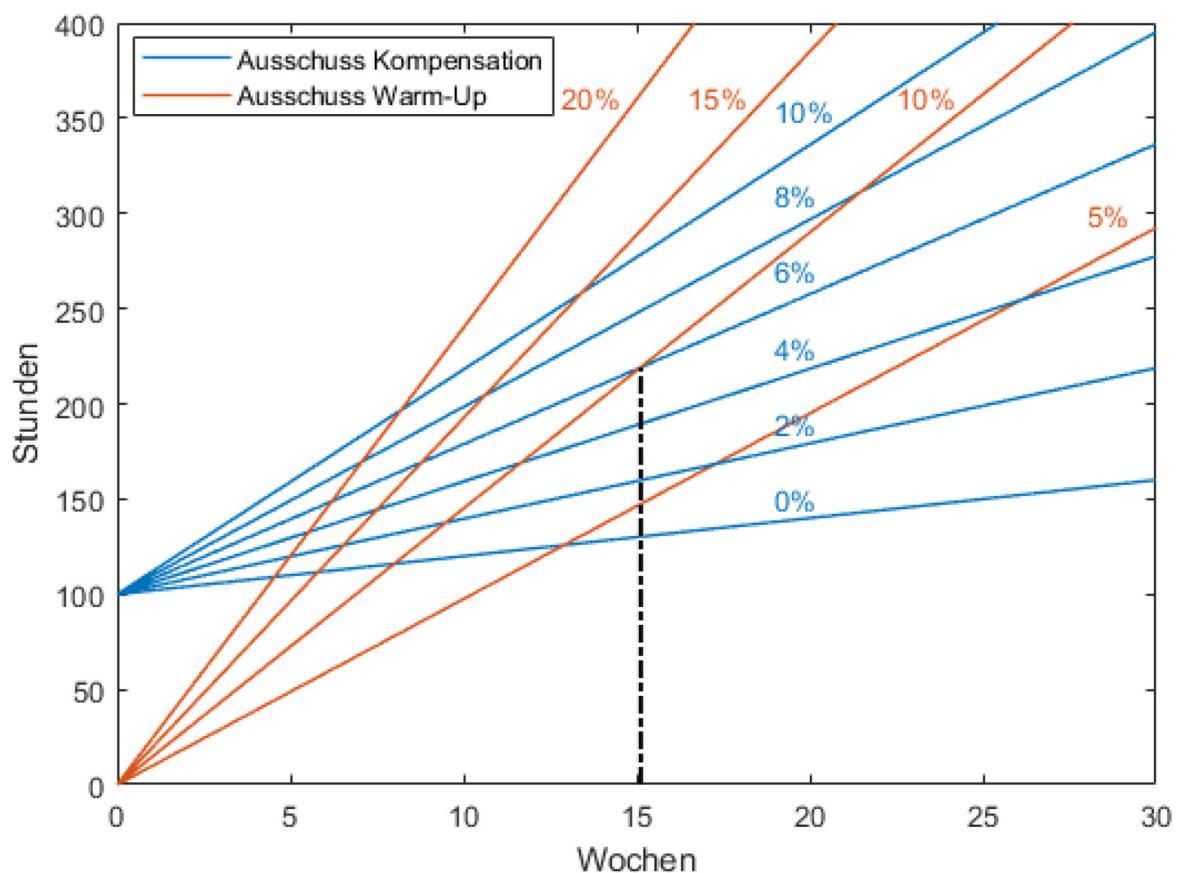


Abbildung 27 Berücksichtigung unterschiedlicher Ausschussquoten auf den Einfluss des zeitlichen break-even zwischen thermischer Kompensation und Warmlauf.

In der vorhergehenden break-even Berechnung wurde der Einfluss von Ausschuss nicht berücksichtigt. Wird nun nur die verlorene Maschinenzeit, also nicht die graue Energie, die in dem Rohling bereits steckt, berücksichtigt ergibt sich der in Abbildung 27 dargestellte zeitliche break-even Bereich. Es sind



unterschiedliche Ausschussquoten dargestellt, die entweder auftreten, wenn nur ein Warmlauf oder thermische Kompensation und direkter Produktionsstart verwendet werden.

Beispielhaft ist der break-even nach 15 Wochen eingezeichnet, der eintritt, wenn die Produktion nach dem Warmlauf immer noch eine Ausschussquote von 10% aufweist. Mit thermischer Kompensation kann der Warmlauf vermieden werden und die Ausschussquote dennoch auf 6 % gesenkt werden, was nicht einmal ein besonders gutes Kompensationsmodell benötigt. Für höchst anspruchsvolle Teile, die sich an den Grenzen der Maschinenfähigkeit befinden, ist dies ein konservatives, aber realistisches Szenario. Nach einem Jahr hat die WZM 728 Stunden ohne und 482 Stunden mit thermischer Kompensation unproduktiv, also ohne Gutteil, Energie verbraucht.

## Kühlleistung von Maschinenhallen

Abbildung 9: Struktur des Elektrizitätsverbrauchs nach Verwendungszwecken  
Prozentuale Aufteilung im Jahr 2020

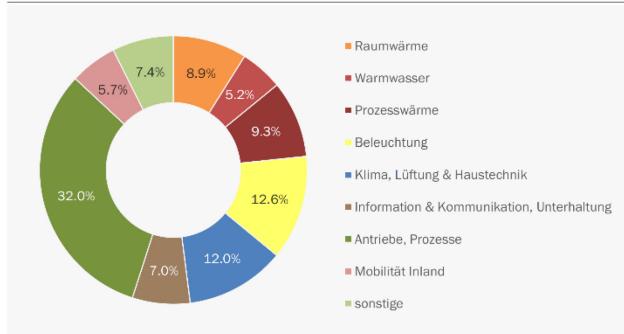


Abbildung 10: Verteilung der Verwendungszwecke auf die Verbrauchssektoren  
Prozentuale Aufteilung für das Jahr 2020

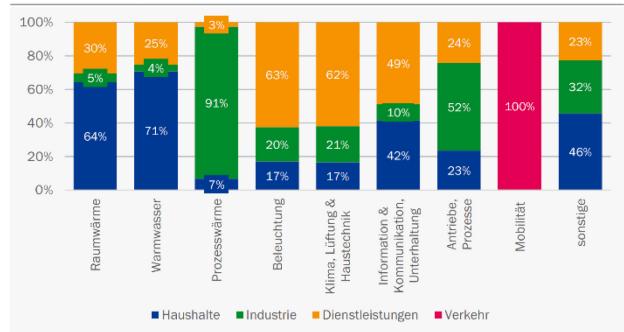


Abbildung 28 Daten des schweizerischen Energieverbrauchs nach Verwendungszweck entnommen aus dem BFE Bericht Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2014 nach Verwendungszwecken [59].

In der Schweiz werden 12 % Prozent des Elektrizitätsverbrauch für Klima, Lüftung und Haustechnik aufgewendet, von denen 21 % in der Industrie verwendet werden. Dies entspricht 2.52 % des totalen elektrischen Energieverbrauchs, was sich mit den Literaturwerten von 2-9 % in Kapitel 2 deckt. Die Wärmelast, die in typischen Produktionshallen mit mechanischer Fertigung temperiert werden muss, wird nach VDI 2262 mit 50 – 250 W/m<sup>2</sup> abgeschätzt. Die Raumwärme wird nicht berücksichtigt, da die Industrie nur für einen kleinen Anteil verantwortlich ist und dieser typischerweise nicht zur thermischen Stabilisierung, sondern zum Mitarbeiterwohl befinden aufgewendet wird.

Grundsätzlich ist jedoch auch zu beachten, dass bereits klimatisierte Hallen aufgrund thermischer Kompensation wahrscheinlich nicht umgebaut werden, thermische Kompensation jedoch die erlaubte Temperaturschwankung erhöhen und Ausschuss bei schlagartiger Umgebungstemperaturänderung, wie z.B. bei einer Hallentoröffnung im Winter, verhindern könnte. Gleichzeitig reduziert es den Druck neue Hallenklimatisierung einzubauen zu müssen, oder ermöglicht diese kleiner dimensionieren zu können, da die erforderliche Genauigkeit stattdessen mit thermischer Kompensation erreicht werden kann.

## Kühlleistung von WZM

Zerspanende WZM wie in Kapitel 2 beschrieben sind für 1 – 3 % des globalen Elektrizitätsverbrauchs verantwortlich. Mit der Annahme, dass alle Maschinen wie die NMV5000DCG 25 % des elektrischen Energieverbrauchs für die Kühlung verwenden (Literaturwerte bewegen sich typischerweise zwischen 15 – 30 %), ergibt sich ein globaler Energieverbrauch von 50 – 175 TWh für Kühlsysteme von WZM. Da die Kühlsysteme neben der Hauptaufgabe, die thermisch induzierten Verlagerungen zu reduzieren,



auch für andere Funktionen innerhalb einer WZM nötig sind, wie z.B. das Verhindern des Überhitzens von Antriebsmotoren, lässt sich diese nicht vollständig eliminieren. Je nach Maschinentyp und Kühlsystem lassen sich jedoch Reduktionen in der Grössenordnung von 25 – 75 % prognostizieren, die durch thermische Kompensation erreicht werden könnten. Gleichzeitig liesse sich durch die Verwendung von besseren Komponenten, wie z.B. digital gesteuerten Scroll Kompressoren anstelle von Heissgas-Bypass Systemen, eine Erhöhung der Effizienz erreichen. Diese ist jedoch im Gegensatz zur thermischen Kompensation nur mit erheblichen Mehrkosten und Hardware-Aufwand zu erreichen.

Erfahrungsgemäss lässt sich 50% der Kühlleistung einer der kleineren untersuchten WZM ohne grösseren Aufwand einsparen. Z.B. könnten zwei Maschinen an einem Kühler angeschlossen werden, was in der Industrie teilweise praktiziert wird. Allerdings sinkt dadurch die Genauigkeit unter die akzeptierten Grenzwerte, weshalb dies in der industriellen Produktion nur sehr selten praktiziert wird. Eine einfache Überschlagsrechnung zeigt, dass mit der kleinen Anzahl von  $n \approx 300$  WZM eines Typs der aktuell installiert ist. Mit der typischen Mindestlebensdauer von  $t = 10$  Jahren und einer kontinuierlichen Nutzung des Kühlaggregats, wie in der Serienproduktion üblich, führt dies zu  $t = 87'600$  Operationsstunden. Da das Kühlaggregat eine elektrische Leistungsaufnahme von  $P_0 = 4\text{ kW}$  hat führt dies zu einem elektrischen Gesamtenergieverbrauch  $P = n * 0.5 * P_0 * t = 52.6 \text{ GWh}$ . In der Industrie üblich werden auch in Produktionspausen WZM möglichst nicht abgeschaltet, da andernfalls ein neuer, bzw. längerer, Warm-up-Zyklus notwendig ist.

## Ökonomische Auswirkungen von Thermokompensation für WZM in der Schweiz

Nimmt man das vorherige Beispiel zugrunde, bei dem 52.6 GWh bei 300 WZM eingespart wurden und setzt einen durchschnittlichen Industriestrompreis von 15 Rp/kWh an, so ergibt sich eine Kostenersparnis von 7'890 kCHF über 10 Jahre, also 789 kCHF pro Jahr. Man kann eine Amortisationszeit von ca. 2 Jahren als ohne spezielle Massnahmen wirtschaftlich annehmen, was für diesen Maschinenpark zulässige Kosten von 1'578 kCHF für das gesamte Thermokompensationssystem bedeutet, also 5260 CHF pro umgerüsteter Maschine. So lassen sich Massnahmen wie die Entwicklungs- und Implementationskosten für die thermische Kompensation, sowie der benötigte Aufwand für Messungen durchführen, solange sie unter ~5000 CHF pro Maschine liegen, was typischerweise einem etwas hohen aber noch vertretbarer Preis für Softwareoptionen von WZM entspricht.

Wählt man einen Top down Ansatz, so kann man für die Schweiz von 112'000 Maschinen mit einer durchschnittlichen elektrischen Leistung von 7.1 kW und 4200 jährlichen Betriebsstunden nach dem EE4MT Projekt ausgehen. Dies macht mit 3.34 TWh etwa 5.75 % des gesamten Schweizer Elektrizitätsbedarfs aus, was im Vergleich zu der Wertschöpfung des Sektors vertretbar ist, aber vermutlich auch andere Maschinen als reine zerspanende WZM beinhaltet, für die thermisch induzierte Verlagerungen nicht die drängendste Problematik darstellen. Ein Produktivitätsgewinn von 3 – 19 % durch Vermeidung von Warm-up Zeiten und Flexibilitätssteigerungen entspricht, also einer Einsparmöglichkeit von 100 – 634 GWh, von denen jedoch ein Teil durch Mehrproduktion zunichte gemacht wird, was nichts desto trotz den Wirkungsgrad des Gesamtsystems gesteigert hat. Nimmt man an das 10 % der 112'000 Maschinen zerspanende WZM sind die von thermisch induzierten Fehlern relevant beeinflusst sind, bedeutet dies einen jährlichen Energieverbrauch von 333.98 GWh der WZM von dem 50.1 – 100.2 GWh für die Maschinenkühlung aufgewendet werden, lässt diese sich nun um die Hälfte reduzieren bedeutet dies ein jährliches Potential in der Schweiz von 25 – 50 GWh, die direkt in der Maschinenkühlung durch thermische Kompensation eingespart werden kann. Das entspricht Energiekosten von 3.75 - 7.5 Mio CHF pro Jahr.

Nach dem Schweizer Bundesamt für Zoll und Grenzsicherheit (BAZG) werden jährlich WZM im Wert von 3.8 Milliarden Schweizer Franken exportiert. Dies sind etwa 1900 WZM mit einem durchschnittlichen Preis von etwa 2 Mio CHF, was im globalen Vergleich auf grosse, teure und qualitativ hochwertige



Maschinen hindeutet. Diese sind von thermisch induzierten Fehlern am stärksten betroffen, da auf ihnen Teile von hohen Qualitätsanforderungen produziert werden (ansonsten kämen vermutlich günstigere Konkurrenzmaschine aus z.B. China oder Südkorea zum Einsatz). Würden diese alle mit einer Option zur thermischen Kompensation ausgestattet, á 5000 CHF, entspricht dies einem jährlichen Umsatz von 9.5 Mio CHF für Kompensationstechnologien. Alternativ bietet sich auch eine Art Abo-Modell an, mit thermischer Kompensation im Stil von „Software as a Service“, oder eine Integration in die Basisausstattung der Maschine, welche die direkte Wertschöpfung schwerer quantifizierbar macht, weil nicht offenkundig ist ob dadurch zusätzliche Maschinen verkauft werden könnten oder nicht da so zusätzliche Marktanteile gewonnen werden könnten oder ein Verlust verhindert wird.

## 5 Schlussfolgerungen und Fazit

Die intelligente und selbstlernende thermische Fehlerkompensation ist ein wichtiger Baustein um den Umwelteinfluss der gesamten metallverarbeitenden Industrie zu reduzieren. Sowohl der Energiebedarf durch die maschineninterne Kühlung, als auch die Klimatisierung der Maschinenumgebung lässt sich signifikant reduzieren. Gleichzeitig kann die Energieeffizienz durch die Reduktion der benötigten Warmlaufzeiten drastisch verbessert werden und Ausschuss vermieden werden. Der benötigte Energieaufwand zur thermischen Kompensation ist nicht zu vernachlässigen, spielt jedoch eine untergeordnete Rolle- Sobald industrielle Skalen erreicht werden und z.B. Kompensationsmodelle von einer WZM auf andere transferiert werden, sollte er nahezu nicht mehr ins Gewicht fallen.

Besonders um den Energieverbrauch der WZM selbst zu reduzieren ist die enge Kollaboration mit dem WZM-Hersteller unabdingbar, da auch weitere Faktoren wie z.B. die Gewährleistung, Maschinensicherheit und Langlebigkeit neben den thermischen Fehlern bei der Maschinenkühlung eine Rolle spielen. Das bedeutet, um den direkten Energieverbrauch der WZM zu reduzieren, benötigt es idealerweise eine enge Zusammenarbeit mit dem jeweiligen Hersteller.

Es sind Reduktionen des direkten elektrischen Energieverbrauchs der Maschine, je nach typischer Anwendung in der Fertigung, zwischen 10 % und 30 % realistisch erreichbar; dies rein durch die Verwendung einer thermischen Kompensation in Kombination mit einer neuen Auslegung des Kühlkonzepts. Berechnungen eines Schweizer WZM-Herstellers demonstrieren das Sparpotential. 300 Maschinen des kleinen Typs haben ein Einsparpotential von 52.6 GWh über ihre Lebensdauer. Dafür muss nur die direkte Maschinenkühlung reduziert werden, sogar ohne konstruktive Änderungen vornehmen zu müssen, jedoch mit thermischer Kompensation um weiterhin die erforderliche Genauigkeit erzielen zu können.

Um den Energieverbrauch der Umgebungstemperierung zu reduzieren ist die Zusammenarbeit mit dem Endnutzer und seine Sensibilisierung entscheidend. Je nach Quelle beträgt der elektrische Energieverbrauch zur HVAC von Produktionshallen 3 % bis 9 % des Gesamtenergieverbrauchs, was einen signifikanten Hebel darstellt. Dazu wird thermische Energie benötigt, die sich jedoch nur in Zusammenhang mit dem gesamten Gebäudekonzept des Nutzers reduzieren lässt. Thermische Kompensation erlaubt vor allem in nicht klimatisierten Hallen eine Produktion nahezu so stabil zu führen, als wäre die Halle ideal klimatisiert, was vor allem den Anstieg an klimatisierten Hallen verlangsamen sollte. Dies erfordert jedoch eine holistischere Perspektive und enge Zusammenarbeit von Maschinenanwender, Hersteller und dem Eigentümer der Produktionshallen, der für Investitionsentscheidungen wie Isolierung, Klimatisierung und Wärmenetze verantwortlich ist.

Der unmittelbarste Vorteil der thermischen Kompensation ist jedoch die Reduktion der unproduktiven Maschinenzeit und die Reduzierung von Ausschuss bzw. dem maschinenbedingten Ausschussrisiko, also eine Steigerung der Maschinenfähigkeit. Je nach Maschinengröße und Lastfall beträgt die Warmlaufphase 2 bis 6 Stunden. Das bedeutet, dass in dieser Zeit keine Präzisionsteile gefertigt werden können, die Maschine also unproduktive Energie, in Form von elektrischer Leistung, sowie Druckluft/Hallenklimatisierung verbraucht, was die Energieeffizienz der Produktion deutlich reduziert.



Typischerweise werden Maschinen daher nur abgeschaltet, wenn dies notwendig ist, nicht für kürzere Unterbrechungen, da die Startzeit bis zur produktiven Produktion, mehrere Stunden beträgt.

Thermische Kompensation erlaubt, solange das Modell robust ist und korrekt arbeitet, sofort nach Maschinenstart mit der Produktion von Präzisionsteilen zu beginnen. Je nach Kompensationsmodell benötigt die Erstellung auch eine gewisse Anzahl an Messungen, welche die Produktivität reduzieren. Der energetische Break-even Punkt für diesen Kalibrationsaufwand wird bereits nach Einsparung von 5 – 25 Stunden Warmlauf, je nach Modellkomplexität des Warm-ups, erreicht. Für komplexere Kompensationsmodelle kann es 20 bis 50 Produktionswochen dauern, bis dieser Break-even Punkt erreicht ist. Für längere Modelltrainings wird noch die Nutzung von, aktuell sich in der Entwicklung befindende, Modelltransfers empfohlen, da so mehrere hundert bis tausend Stunden Messdaten von einer Maschine auf eine Vielzahl umgelegt werden können.

Das Potential der thermischen Kompensation ist eindeutig signifikant und kann sich bereits für kleiner WZM Hersteller mit Maschinenparks in der Grössenordnung von 100 - 300 Maschinen lohnen, da die zulässigen Amortisationskosten in der Grössenordnung von 1 Mio CHF liegen, mit direkten Einsparungen von etwa 5000 CHF pro Maschine zuzüglich Produktivitäts- und Qualitätssteigerungen. Jedoch muss der Prozess der thermischen Kompensation und Modellerstellung hierfür skaliert werden, da der Messaufwand und Implementierungsaufwand im aktuellen Stadium signifikant ist und einen hohen Arbeitsaufwand von geschulten Ingenieuren erfordert. Dies ist aufgrund des softwarebasierten Ansatzes theoretisch, ohne signifikanten Materialaufwand, möglich, erfordert jedoch zusätzlichen Forschungs- und Entwicklungsaufwand, um diese Skalierung der thermischen Kompensation realisieren zu können.

## 6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Das aktuell laufende Innosuisse Projekt «Digital twin enabled transfer learning for thermal error compensation of machine tools» wird weitergeführt. Ziel ist es, den Messaufwand in komplexen Umgebungssituationen durch Simulationen zu ersetzen. Durch die bessere Skalierbarkeit von Simulationen verglichen mit komplexen Experimenten auf WZM wird ein grösserer Datensatz erwartet, der die Robustheit der datengetriebenen Kompensationsmodelle verbessern sollte. Hierbei wird sowohl der Prüfstand «Thermi» simuliert und gemessen, als auch dasselbe 5-Achs-Bearbeitungszentrum, das in diesem Projekt untersucht wurde. Hierbei wird auch eine Weiterentwicklung der Messtechnik zur Separierung der Fehler der zweiten Rotationsachse angestrebt.

Es wird eine konkrete industrielle Umsetzung der thermischen Kompensation mit einem Schweizer WZM-Hersteller durchgeführt. Hierzu wurde am 14.09.2022 ein Innosuisse Antrag 102.981 IP-ENG eingereicht. Konkrete weitere Arbeiten können jedoch vor einem positiven Förderentscheid nicht mehr durchgeführt werden, da beide Seiten bereits erheblichen Aufwand ohne eindeutige Projektförderung erbracht haben und die benötigte zusätzliche Personalaufwand nicht ohne eine externe Finanzierung zur Verfügung gestellt werden kann. Fokus des Projektes wäre, eine industriell robuste thermische Kompensation, welche durch Fleet-Learning und Modell-Transfer von der Forschungsmaschine unterstützt, auf Serienmaschinen übertragen wird. Ohne solche Methoden müsste auf jeder Maschine mehrere hundert Stunden Experimente durchgeführt werden, was viele Endnutzer von einer raschen Umsetzung abhält. Ziel ist auch durch die Kompensation und ein verbessertes Verständnis den Energieverbrauch der WZM zu reduzieren, in dem die Kühlung deutlich kleiner dimensioniert wird. Gleichzeitig könnten die thermisch kompensierten WZM in jeder Umgebungsbedingung robust produzieren und aufwändig temperierte Produktionshallenklimatisierungen eingespart werden.

Das internationale Cornet Projekt wird gemeinsam mit den Chemnitzer und Wiener Projektteams weitergeführt bzw. auf deutscher Seite gestartet. Dies erweitert die Diskussionsrunden und die zu Verfügung stehenden Demonstratoren, da jedes Team schlussendlich ihre lokale Maschine kompensieren möchte.



Aktive Bestrebungen die Messtechnik zu verbessern, werden bei inspire zudem durchgeführt. Bezuglich der Messzeit, benötigt zum Erfassen der thermischen Fehler, versprechen kapazitive Messtaster, eine deutlich höhere Messgeschwindigkeit, obwohl deutlich mehr Messpunkte aufgenommen werden können, wodurch die Messunsicherheit reduzieren werden kann. Damit kann eine eindeutigere Zuordnung zusätzlicher, bisher nicht betrachteter Fehlerkomponenten, erfasst und separiert werden. Bezuglich der Temperaturmessungen ist geplant, die aktuellen Thermoelemente durch PT100 RTD Widerstandsthermometer zu ersetzen, welche bezüglich Auflösung, Linearität und Langzeitstabilität ein besseres Verhalten aufweisen. Dies benötigt jedoch ein von Grund auf anderes Auslesesystem, welches typischerweise deutlich teurer sein kann oder zumindest einen grösseren Konstruktionsaufwand benötigt. Des Weiteren werden die Steuerungsschnittstellen modernisiert, sodass zusätzliche Informationen direkt aus der Maschinensteuerung und den Regelungen der einzelnen WZM-Komponenten ausgelesen werden kann.

Es bestehen auch aktive Bestrebungen mit weiteren WZM-Herstellern die direkte Zusammenarbeit auszubauen. Um die thermische Kompensation zu industrialisieren und zu skalieren ist die Zusammenarbeit zwischen den Forschungsanstalten und der Schweizer Industrie notwendig. Teilweise ist dies durch nationale Grenzen, welche die jeweiligen Förderinstrumente beeinflussen, wie in jedem anderem europäischen Land erschwert.

## 7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

International ist dieses Projekt Teil unseres Beitrages zum CORNET Projekt Geo Comp «Compensation of geometrical errors of kinematic chains caused by thermal deformations». Aufgrund von Verzögerungen in der Fördermittelsprache auf deutscher Seite, in Folge des Regierungswechsels und personellen Wechseln dort hat sich die gemeinsame Zusammenarbeit jedoch verzögert. Wir auf der Schweizer und Österreichischer Seite arbeiten, soweit es uns möglich ist, an unseren Arbeitspaketen um die Projektziele dieses Projektes zu halten, was zum Teil funktioniert. Der offizielle Projektkickoff hat sich insgesamt um etwa ein Jahr verzögert. Statt Ende 2021, wie das erste Schweizer advisory board meeting, fand der Kick-Off am 03.11.2022 in Wien statt. Dort wurde die lokale Organisation vom österreichischen Team unter der Leitung von Prof. Dr. Bleicher unternommen. Es werden zweiwöchentlich virtuelle Projektsitzungen durchgeführt, zu denen die Industrie jeweils eingeladen ist. Das nächste physische Treffen findet im März 2023 in Dresden nach International Conference on Thermal Issues in Machine Tools statt.

Innerhalb der Schweiz wird weiterhin ein regelmässiger Austausch mit Vertretern der Industrie gefördert, in dem Treffen im Rahmen eines Industrial Advisory Board zum Thema Thermal issues in machine tools durchgeführt werden. Bei der Organisation hierfür arbeiten wir eng mit der Swissmem zusammen. In diesem Rahmen wurde der Kick-off des Projektes mit 14 Teilnehmern virtuell durchgeführt. Das Protokoll hierzu befindet sich im Anhang. Am Meeting wurde auch ein virtuelles Brainstorming durchgeführt. Die Resultate davon befinden sich in der Abbildung 29 oder im Protokoll im Anhang. Am 07.06.2022 fand das zweite Treffen des Schweizer Industrial Advisory Boards statt, dass auch eine Führung und Demonstration an der NMV5000DCG enthielt. Das Protokoll hierzu befindet sich ebenfalls im Anhang.

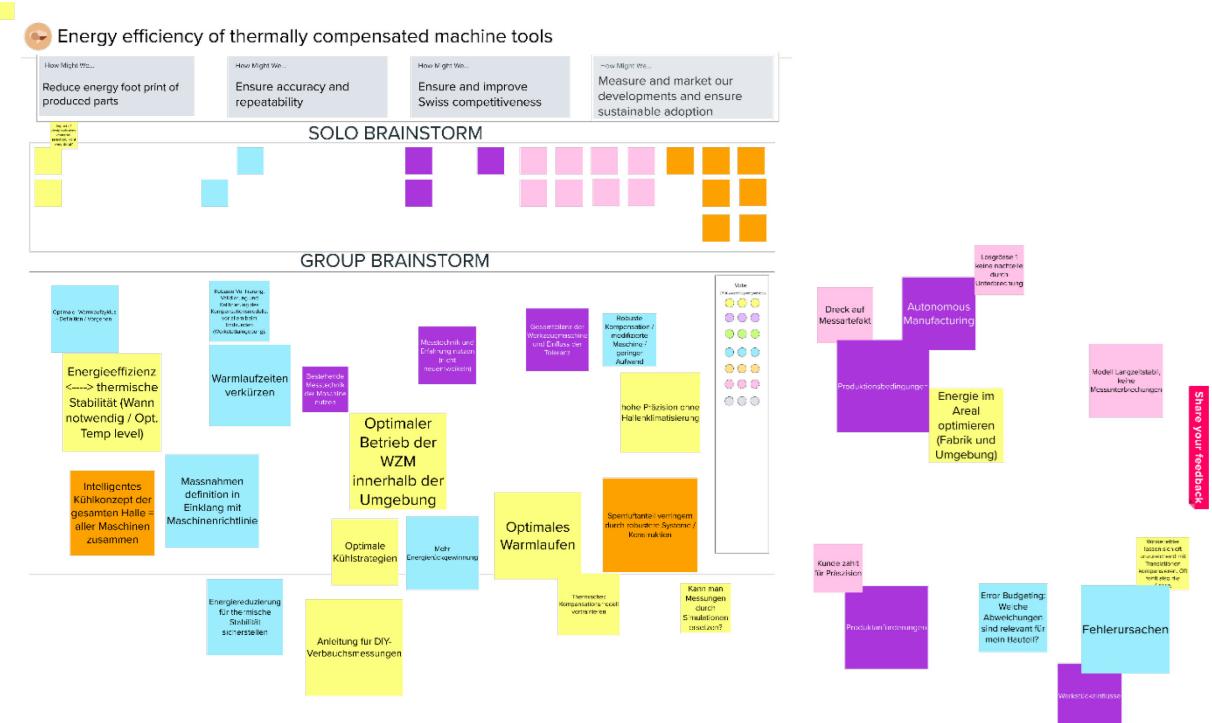


Abbildung 29 Brainstorming Kick Off Industrial Advisory Board.



## 8 Publikationen

Eine Keynote wurde an der Konferenz: euspen Special Interest Group Zurich 2022 (<https://www.euspen.eu/events/sig-meeting-thermal-issues-2022/?subid>) von Dr. Josef Mayr mit dem Titel: *Sustainability in production by thermal error compensation* vor etwa 70 internationalen und nationalen Teilnehmern aus Industrie und Wissenschaft gehalten.

Ein Abstract mit dem Titel: "Thermal Error Compensation Models using Energy Consumption of Machine Tools" von den Autoren: Sebastian Lang, Nico Zimmermann, Dr. Josef Mayr, Prof. Dr. Konrad Wegener und Prof. Dr. Markus Bambach wurde an der «3rd International Conference on Thermal Issues in Machine Tools» eingereicht und angenommen. Am 15.10 wurde das volle Paper eingereicht.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW), "Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie und ihre Stellung im Weltmarkt," 2021.
- [2] Swissmem, "Faktenblatt Q1 2022: Die wichtigsten Zahlen zur schweizerischen Maschinen-, Elektro- und Metallindustrie (MEM-Industrie)," no. Q1, 2021.
- [3] Christop Blättler, "Swissmem Letter of intent: User committee SMTM," 2021. [Online]. Available: [www.swissmem.ch](http://www.swissmem.ch)
- [4] A. M. Gontarz, "Energy Assessment of Machine Tools within Manufacturing Environments," 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010025751>
- [5] P. Blaser, F. Pavliček, K. Mori, J. Mayr, S. Weikert, and K. Wegener, "Adaptive learning control for thermal error compensation of 5-axis machine tools," *J Manuf Syst*, vol. 44, pp. 302–309, 2017.
- [6] J. Mayr *et al.*, "Thermal issues in machine tools," *CIRP Annals*, vol. 61, no. 2, pp. 771–791, Jan. 2012.
- [7] M. Weck, P. McKeown, R. Bonse, and U. Herbst, "Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 44, no. 2, pp. 589–598, 1995.
- [8] M. Putz, C. Richter, J. Regel, and M. Bräunig, "Industrial consideration of thermal issues in machine tools," *Production Engineering*, vol. 12, no. 6, pp. 723–736, 2018, doi: 10.1007/s11740-018-0848-6.
- [9] L. Shabi, J. Weber, and J. Weber, "Analysis of the Energy Consumption of Fluidic Systems in Machine Tools," in *Procedia CIRP*, 2017, vol. 63, pp. 573–579. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.348.
- [10] M. Putz, C. Richter, J. Regel, and M. Bräunig, "Industrial consideration of thermal issues in machine tools," *Production Engineering*, vol. 12, no. 6, pp. 723–736, 2018, doi: 10.1007/s11740-018-0848-6.
- [11] M. Putz, C. Richter, J. Regel, and M. Bräunig, "Industrial relevance and causes of thermal issues in machine tools," 2018.
- [12] International Organization for Standardization (ISO) Geneva Switzerland, "ISO 14955-1:2017 Machine tools-Environmental evaluation of machine tools-Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools," 2017. [Online]. Available: [www.iso.org](http://www.iso.org)
- [13] S. D. Züst, "Model Based Optimization of Internal Heat Sources in Machine Tools," ETH Zurich, 2017.
- [14] B. Denkena, E. Abele, C. Brecher, M. A. Dittrich, S. Kara, and M. Mori, "Energy efficient machine tools," *CIRP Annals*, vol. 69, no. 2, pp. 646–667, 2020.



- [15] S. Peng *et al.*, "Toward a Sustainable Impeller Production: Environmental Impact Comparison of Different Impeller Manufacturing Methods," *J Ind Ecol*, vol. 21, pp. S216–S229, 2017.
- [16] H. Cao, H. Li, H. Cheng, Y. Luo, R. Yin, and Y. Chen, "A carbon efficiency approach for life-cycle carbon emission characteristics of machine tools," *J Clean Prod*, vol. 37, pp. 19–28, 2012.
- [17] H. Droz and S. Hellweg, "Analyse der Umweltwirkung der Schweizer MEM-Industrie," p. 60, 2018.
- [18] K. Kellens, W. Dewulf, M. Overcash, M. Z. Hauschild, and J. R. Duflou, "Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)-CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, no. 1, pp. 69–78, Jan. 2012, doi: 10.1007/s11367-011-0340-4.
- [19] J. M. Brown, J. Beck, A. Kaszynski, and J. Clark, "Surrogate Modeling of Manufacturing Variation Effects on Unsteady Interactions in a Transonic Turbine," *J Eng Gas Turbine Power*, vol. 141, no. 3, pp. 1–17, 2019.
- [20] J. P. Clark, J. A. Beck, A. A. Kaszynski, A. Still, and R. H. Ni, "The effect of manufacturing variations on unsteady interaction in a transonic turbine," *J Turbomach*, vol. 140, no. 6, pp. 1–9, 2018.
- [21] L. Weng *et al.*, "Influence of external heat sources on volumetric thermal errors of precision machine tools," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 99, no. 1–4, pp. 475–495, Oct. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2462-3.
- [22] IEA, "World Energy Statistics and Balances," 2022. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=ElecConsBySector> (accessed Nov. 28, 2022).
- [23] T. T. Mai *et al.*, "Electrification Futures Study: Scenarios of Electric Technology Adoption and Power Consumption for the United States," *National Renewable Energy Laboratory*, p. 151, 2018, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/71500.pdf>
- [24] T. Schudeleit, S. Züst, and K. Wegener, "Methods for evaluation of energy efficiency of machine tools," *Energy*, vol. 93, pp. 1964–1970, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.074.
- [25] K. Schischke, E. Hohwieler, R. Feit-, and N. F. Nissen, "Energy-Using Product Group Analysis Lot 5 : Machine tools and related machinery Task 1 Report," *Group Analysis*, pp. 1–155, 2011, [Online]. Available: <http://www.ecomachinetools.eu/typo/reports.html>
- [26] B. Denkena, E. Abele, C. Brecher, M. A. Dittrich, S. Kara, and M. Mori, "Energy efficient machine tools," *CIRP Annals*, vol. 69, no. 2, pp. 646–667, 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.05.008.
- [27] L. Shabi, J. Weber, and J. Weber, "Analysis of the Energy Consumption of Fluidic Systems in Machine Tools," *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 573–579, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.348.
- [28] K. Wegener *et al.*, "Fluid elements in machine tools," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 66, no. 2, pp. 611–634, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.008.
- [29] C. Brecher, S. Bäumler, D. Jasper, and J. Triebs, "Energy efficient cooling systems for machine tools," in *Leveraging Technology for a Sustainable World*, Springer, 2012, pp. 239–244.
- [30] M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu, and Y. Oda, "A study on energy efficiency improvement for machine tools," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 60, no. 1, pp. 145–148, 2011, doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.099.
- [31] K. Mori, B. Bergmann, D. Kono, B. Denkena, and A. Matsubara, "Energy efficiency improvement of machine tool spindle cooling system with on–off control," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 25, pp. 14–21, 2019, doi: 10.1016/j.cirpj.2019.04.003.



- [32] N. Diaz, M. Helu, S. Jayanathan, Y. Chen, A. Horvath, and D. Dornfeld, "Environmental analysis of milling machine tool use in various manufacturing environments," *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, ISSST 2010*, 2010.
- [33] L. Zhou, J. J. Li, F. Li, Q. Meng, J. J. Li, and X. Xu, "Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: A comprehensive literature review," *J Clean Prod*, vol. 112, pp. 3721–3734, 2016.
- [34] Office of Energy Statistics U.S. Department of Energy, *2011 Yearly Energy Review*, vol. 26, no. 04. 2011.
- [35] Q. Btu, "U . S . Primary Energy Consumption by Source and Sector , 2007," vol. 2007, no. April, p. 2007, 2007.
- [36] International Organization for Standardization (ISO) Geneva Switzerland, "ISO 10791-2:2001 Test conditions for machining centres — Part 2: Geometric tests for machines with vertical spindle or universal heads with vertical primary rotary axis (vertical Z-axis)," 2001.
- [37] A. Mohammadi *et al.*, "A methodology for online visualization of the energy flow in a machine tool," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 19, pp. 138–146, 2017, doi: 10.1016/j.cirpj.2017.08.003.
- [38] Accuenergy, "Acuvim II Series Advanced Power & Energy Meter Datasheet."
- [39] J. Mayr, M. Müller, and S. Weikert, "Automated thermal main spindle & B-axis error compensation of 5-axis machine tools," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 65, no. 1, pp. 479–482, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.018.
- [40] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, and F. Delbressine, "Geometric error measurement and compensation of machines-An update," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 57, no. 2, pp. 660–675, 2008.
- [41] M. Gebhardt, J. Mayr, N. Furrer, T. Widmer, S. Weikert, and W. Knapp, "High precision grey-box model for compensation of thermal errors on five-axis machines," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 63, no. 1, pp. 509–512, 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.029.
- [42] S. Ibaraki, H. Inui, C. Hong, S. Nishikawa, and M. Shimoike, "On-machine identification of rotary axis location errors under thermal influence by spindle rotation," *Precis Eng*, vol. 55, no. March 2018, pp. 42–47, 2019, doi: 10.1016/j.precisioneng.2018.08.005.
- [43] DALLAS Semiconductor, "DS1820 1-Wire TM Digital Thermometer • Unique 1-Wire TM interface requires only one port pin for communication," pp. 1–27, 1995, [Online]. Available: <http://www.systronix.com/Resource/ds1820.pdf>
- [44] E. M. Miao, Y. Y. Gong, P. C. Niu, C. Z. Ji, and H. D. Chen, "Robustness of thermal error compensation modeling models of CNC machine tools," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, no. 9–12, pp. 2593–2603, 2013, doi: 10.1007/s00170-013-5229-x.
- [45] R. B. Aronson, "The war against thermal expansion," *Manufacturing Engineering*, vol. 116, no. 6, p. 45, 1996.
- [46] M. Mareš, O. Horejš, and L. Havlík, "Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece," *Precis Eng*, vol. 66, no. July, pp. 21–30, 2020.
- [47] M. Holub, O. Andrs, J. Kovar, and J. Vetiska, "Effect of position of temperature sensors on the resulting volumetric accuracy of the machine tool," *Measurement (Lond)*, vol. 150, p. 107074, 2020.
- [48] E. Miao, Y. Liu, H. Liu, Z. Gao, and W. Li, "Study on the effects of changes in temperature-sensitive points on thermal error compensation model for CNC machine tool," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 97, pp. 50–59, 2015.



- [49] M. En-Ming, G. Ya-Yun, D. Lian-Chun, and M. Ji-Chao, "Temperature-sensitive point selection of thermal error model of CNC machining center," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 74, no. 5–8, pp. 681–691, 2014.
- [50] J. Zhu, "Robust Thermal Error Modeling and Compensation," 2008.
- [51] Y. Wang, G. Zhang, K. S. Moon, and J. W. Sutherland, "Compensation for the thermal error of a multi-axis machining center," *J Mater Process Technol*, vol. 75, no. 1–3, pp. 45–53, Mar. 1998.
- [52] J. Mayr, P. Blaser, A. Ryser, and P. Hernandez-Becerro, "An adaptive self-learning compensation approach for thermal errors on 5-axis machine tools handling an arbitrary set of sample rates," *CIRP Annals*, vol. 67, no. 1, pp. 551–554, 2018.
- [53] N. Zimmermann, S. Lang, P. Blaser, and J. Mayr, "Adaptive input selection for thermal error compensation models," *CIRP Annals*, vol. 69, no. 1, pp. 485–488, 2020.
- [54] N. Zimmermann, M. Breu, J. Mayr, and K. Wegener, "Autonomously triggered model updates for self-learning thermal error compensation," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 00, pp. 4–7, 2021.
- [55] N. Zimmermann, T. Büchi, J. Mayr, and K. Wegener, "Self-optimizing thermal error compensation models with adaptive inputs using Group-LASSO for ARX-models," *J Manuf Syst*, May 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.04.015.
- [56] N. Ouerhani, B. Loehr, A. Rizzotti-Kaddouri, D. S. de Pinho, A. Limat, and P. Schinderholz, "Data-Driven Thermal Deviation Prediction in Turning Machine-Tool - A Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms," *Procedia Comput Sci*, vol. 200, pp. 185–193, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.217.
- [57] H. Liu, E. Miao, J. Wang, L. Zhang, and S. Zhao, "Temperature-Sensitive Point Selection and Thermal Error Model Adaptive Update Method of CNC Machine Tools," *Machines*, vol. 10, no. 6, p. 427, May 2022, doi: 10.3390/machines10060427.
- [58] J. CZWARTOSZ, Robert, JEDRZEJEWSKI, "APPLICATION OF MACHINE LEARNING IN THE PRECISE AND COST- EFFECTIVE SELF-COMPENSATION OF THE THERMAL ERRORS OF CNC MACHINE TOOLS – A REVIEW," *Journal of Machine Engineering*, vol. 22, no. June, 2022.
- [59] Infras; Prognos; TEP Energy;, "Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2014 nach Verwendungszwecken," *Bfe*, no. September, p. 81, 2021.



## 10 Anhang

Im Anhang finden sie das Protokoll des Kick off Meetings sowie die Tagungsordnung des Meilenstein Meetings.

### ***Ergebnis Protokoll: Kick Off Meeting with the Industry Advisory Board*** **Energy efficiency of thermally compensated machine tools**

Projektplan:

Work Package	Activity / Task	Project Month									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
WP1	Measurement setup installation										
	Waste due to warm-up evaluation										
WP2	Machine break down evaluation										
	Air conditioning evaluation										
WP3	Material evaluation										
	Economic impact for Switzerland										
Ecoloogical impact for Switzerland											
Milestones								MS1			MS2
Industrial advisory board meetings	Kick-off						MS1			MS2	
Final reporting											Final

Teilnehmer:

Inspire: Ralf Gerdes, Josef Mayr, Sebastian Lang, Nico Zimmermann.

ETH IWF: Petr Kaftan, Fabian Stoop.

BFE: Carina Alles, Simone Marchesi.

Swissmem: Adam Gontarz.

Agathon: Stephan Scholze.

Reiden: Michael Müller.

Kellenberger: Michael Egeter, Philip Satz.

Heidenhain: Rene Donna.

Starrag: Markus Ess (Entschuldigt).

Tornos: David Trombert (Entschuldigt).

**Agenda:**

Präsentation:

- Introduction
- Project Overview
- Energy Consumption of MTs
- Thermal Errors of MTs
- Measurement Demonstration
- Open Discussion & Mural
- Conclusion & Outlook

Das Brainstorming Mural kann unter folgendem Link gefunden werden (<https://app.mural.co/t/inspireiwf6488/m/inspireiwf6488/1639516270014/9ec04c4d1ff330a730e8478fabc04e2ff9ae5788?sender=ue8803a698b266ab974e17743>)



#### Diskussionsergebnisse:

- Energieeffizienz bereits heute für manche Kunden entscheidend, anderen fehlt noch das Bewusstsein.
- Integration der Werkzeugmaschine in ihre Umgebung und Anforderung an Klimatisierung nötig.
  - Einfluss der Umgebungstemperatur und Klimatisierung im Rahmen des Projektes Analysegegenstand.
  - Grössere Analysen auf Areal Level ist nicht Projektinhalt → Hierzu gibt es laut Frau Alles aktuelle laufende Projekte gefördert durch das BFE.
- Die Schweiz als Produktionsstandort profitiert von einem CO<sub>2</sub> armen Strommix, wodurch der ökologische Fussabdruck während der Herstellung du Nutzungsphase minimiert wird.
- Starke Exportorientierung, gerade der Schweizer Werkzeugmaschinenindustrie. Rahmenbedingung im EU Ausland sind wichtig und müssen erfüllt werden.
- Präzision überwiegt Energieverbrauch typischerweise, da Produktanforderungen hoch und mit Energieeffizienzanforderungen auf Produktseite weiter steigend.
- Hoher Autonomiegrad ist erforderlich, auch im Hinblick auf sehr hohe Lohnstückkosten in der Schweiz.
  - Industrie muss aufgrund des Facharbeitermangels zunehmend auf wenig geschultes Bedienerpersonal „Knöpfldrücker“ zurückgreifen.
  - Plausibilitätsprüfung der Daten erforderlich.
  - Selbstlernfähigkeit und Adaptivität des Systems ist notwendig und gewünscht.
- Die Messungen der thermischen Maschinenfehler müssen industrietauglich durchgeführt werden. Regelmässig mit konstantem Zeitintervall und einem fixen Artefakt auf dem Maschinentisch ist eine nicht praktikable Lösung.
  - Trainieren der Kompensationsmodelle mit Hilfe eines digitalen Zwillings evtl. vielversprechend, siehe parallel startendes Innosuisse-Projekt (**27835.1 IP-ENG**).
- Werkstückeinflüsse werden oft vernachlässigt, für einen ganzheitlichen Ansatz müssen diese auch berücksichtigt werden.
  - Thermisch Prüfwerkstücke sinnvoller Ansatz zur Validierung.
- Winkelfehler lassen sich durch Translation nicht ausreichend kompensieren. Ganzheitlicher Multi-Achsen-Ansatz, der auf die Maschinenkinematik angepasst ist wird benötigt.
- Warmlaufphasen sind kritisch für den Erhalt der Präzision.
  - Führt zu hohen Energiekosten.
  - Kunden sind zunehmend mit dem daraus resultierenden Maschinenstillstand unzufrieden da dieser die Produktivität stark vermindert.
  - Oft ist das genaue Ziel, Werkstückeigenschaften und Werkstückanforderungen, der Warmlaufphasen unbekannt und wird nicht zielführend verfolgt.
  - Vieles basiert auf den Erfahrungswerten der Bediener.
  - Trend sinkende Losgrössen: Diese sorgen zu vermehrtem Umrüsten und Produktionsunterbrechungen. Daraus resultieren mehr Warmlaufphasen, die auf weniger produzierte Teile umgelegt werden müssen.
  - Ziel ist eine Kompatibilität mit Losgröße 1. Das erste produzierte Teil erfüllt die Anforderungen ohne exzessiven Messaufwand oder Nacharbeiten.

#### Fragen & Antworten:

Q: Wie werden die Ergebnisse der Industrie zur Verfügung gestellt?

A: Es wird ein Abschlussbericht auf Aramis öffentlich zur Verfügung gestellt. Es werden wissenschaftliche Publikationen angestrebt, die auf Konferenzen und in Fachzeitschriften veröffentlicht werden. Es wird eine breitere Kommunikation z.B. über die sozialen Medien angestrebt um ein möglichst grosses Bewusstsein für das Thema Energieeffizienz, insbesondere mit Bezug auf die thermischen Fehler zu schaffen.



## ***Ergebnis Protokoll: M1 Meeting with the Industrial Advisory Board***

M1: Energy efficiency of thermally compensated machine tools

Kick off: Digital twin enabled transfer learning for thermal error compensation of machine tools

Ort: Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich. Inspire AG PFA H24 (3. Stock).

Alternativ <https://ethz.zoom.us/j/68822125813?pwd=MEZRRVdjajBobGFMZ|RQam5KbGcwUT09>

Teilnehmer:

Inspire: Ralf Gerdes, Josef Mayr, Sebastian Lang, Nico Zimmermann.

ETH IWF: Petr Kaftan, Fabian Stoop, Konrad Wegener.

ETH AM|Z: Markus Bambach.

BFE: Carina Alles, Simone Marchesi.

Industrie Partner (alphabetisch)

Agathon: Stephan Scholze (Entschuldigt).

Comet: Oliver Gerent.

Chiron/Factory5: Claus Eppler.

Heidenhain: Rene Donna (Entschuldigt), Uwe Schär.

Imoberdorf: Anton Imoberdorf (Entschuldigt).

Kellenberger: Michael Egeler, Philip Satz.

Posalux: Udo Heinzel.

Reiden: Michael Müller.

Starrag: Markus Ess.

Tornos: David Trombert.

### **Agenda:**

Start: 14:00

Presentation:

Introduction Inspire & ETH

Energy Consumption of MTs

Milestone 1 BFE Project *Energy efficiency of thermally compensated machine tools*

Kick Off Innosuisse Project: *Digital twin enabled transfer learning for thermal error compensation of machine tools*

First Discussion & Online Questions

End of Video Stream, ca 15:15

Measurement Demonstration & In person Lab Tour

Open Discussion

Conclusion & Outlook

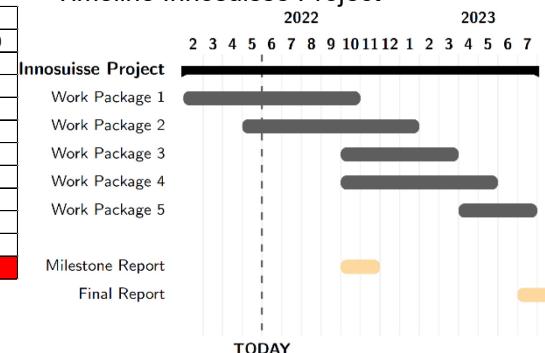
End: 16:00



Timeline BFE Project

Work Package	Activity / Task	Project Month									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
WP1	Measurement setup installation										
	Waste due to warm-up evaluation										
WP2	Machine break down evaluation										
	Air conditioning evaluation										
WP3	Material evaluation										
	Economic impact for Switzerland										
Milestones							MS1			MS2	
Industrial advisory board meetings	Kick-off										
Final reporting											

Timeline Innosuisse Project



## Diskussionsergebnisse:

- Die grundsätzliche Forschungsrichtung und die vorgestellten Ergebnisse wurden sehr positiv aufgenommen.
  - Besonders die Warmlaufphasen sind wie im Kick-off diskutiert von höchster Bedeutung da sie als unproduktive Maschinenzeit Energie verbrauchen, ohne einen Mehrwert zu liefern, lassen sich ohne Kompensation jedoch nicht vermeiden.
  - Insbesondere die Referenzierung der Kompensationsmodelle ist ein Problem der Industrie. Das Anwendungsbeispiel ist eine Maschine wird angeschaltet, eine Messung durchgeführt und abgeschaltet. Wenn diese nun erneut angeschaltet wird, sollte sofort die thermische Kompensation beginnen können, was jedoch eine Berücksichtigung des selben Referenzpunktes erfordert. Die Forschung, welche vorgestellt wurde geht hierfür in die richtige Richtung und sollte weiter ausgebaut werden.
- Die „Gleichheit“ der WZM innerhalb einer Serie wurde diskutiert. Hierbei sind unterschiedliche Erfahrungen vorhanden. Teilweise sind alle Maschinen eines Herstellers nahezu identisch auch bei minimal anderen Optionsausführungen. Teilweise müssen jedoch auch zwischen Baugleichen Maschinen Anpassungen vorgenommen werden, insbesondere bei der Amplitude der Maschinenantwort gibt es mehr Variationen als bei ihrer Zeitkonstante. Dies wurde als wichtiger Punkt für zukünftige Untersuchungen identifiziert.
- Als sehr wichtig wurde auch die Energie, die für die Kühlung benötigt wird erachtet. Diese teilt sich einmal auf die Maschinenkühlung und die Kühlung/Temperierung der Umgebung auf.
  - Die Maschinenkühlung lässt sich durch die thermische Kompensation nicht auf 0 reduzieren, da gewisse Anforderungen für die Langlebigkeit der Motoren und geschmierten Lager erforderlich sind. Jedoch könnte mit einer thermischen Kompensation ein kleiner Dimensioniertes Kühlssystem mit einer grösseren zulässigen Variation der Temperatur verwendet werden was den Energieverbrauch aber auch die Herstellkosten drastisch reduziert.
  - Die Umgebungskühlung hängt stark vom End Nutzer der Maschine ab. Aktuell findet Präzisionsfertigung ausschliesslich in stark klimatisierten Umgebungen statt. Thermische Kompensation erlaubt es die Maschinen genau zu betreiben unabhängig von Temperaturschwankungen der Umgebungstemperatur. Insbesondere in Bezug auf steigende Energiekosten leidet die Wirtschaftlichkeit dieser starken Klimatisierung stark. Idealerweise kann eine WZM in einer nicht klimatisierten „Werkstattumgebung“ jederzeit hochpräzise Werkstücke fertigen, dies erfordert jedoch robuste Kompensationsmodelle. Thermische Kompensation von WZM wurde in diesem Zusammenhang als heiliger Gral der Entwicklung beschrieben.
- Es wurden Erfahrungen aus der Anwendung von Kompensationsmodellen in der Industrie geteilt. Ein lineares 1 Sensor Modell eignet sich normalerweise nicht für die Kompensation auch von weniger komplexen Fehlern. Für einzelne Fehler wie z.B. die Z-Verlagerung der Spindel könnte ein signifikanter Anteil durch einen Wirbelstromsensor kompensiert werden. Dies ist jedoch typischerweise nur als Option verfügbar und wird aufgrund von erheblichen Mehrkosten von vielen Kunden nicht angenommen. Die Anforderungen an die Messtechnik



sind daher einfache Messmittel mit minimalem Energie und Kostenaufwand. Hierfür bieten sich vor allem Temperatursensoren und aus der Steuerung vorhandene Daten an. Die Messungen der Verlagerung sind, wie gezeigt, mit einem nicht vernachlässigbaren Produktivitätsverlust verbunden. Daher ist die Anforderung an die Kompensationsmodelle klar, es muss eine maximale Robustheit bei minimalen vorhandenen Trainingsdaten gewährleistet werden.

- Um den Energieaufwand, der sich durch thermische Kompensation sparen lässt genauer zu quantifizieren wird demnächst eine Umfrage an alle Teilnehmer des industrial advisory boards verschickt. Sollten sie sonst Daten z.B. zu Warmlaufzeiten & Zyklen, Umgebungsklimatisierung und Präzisionsanforderung der produzierten Produkte haben, freuen wir uns diese in unserer Auswertung aufnehmen zu können (auf Anfrage selbstverständlich auch nur vertraulich oder anonymisiert).