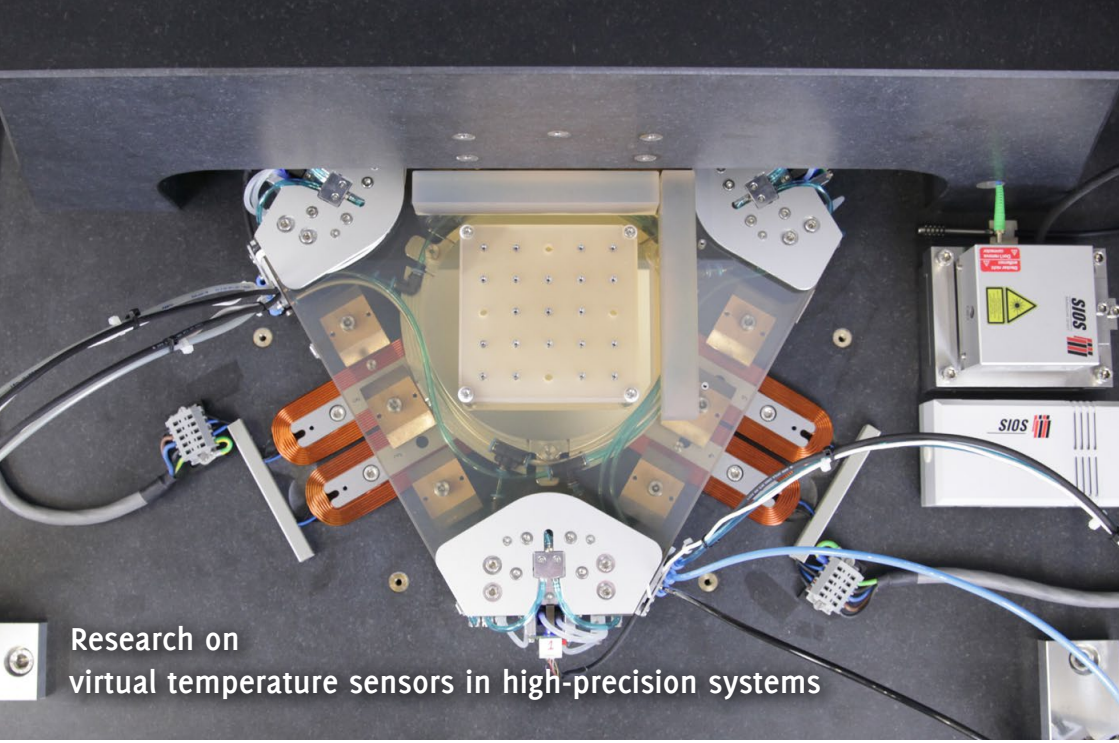


Research on virtual temperature sensors in high-precision systems

Using virtual sensing and AI, disturbances acting on complex mechatronic systems — such as high-precision drives — can be identified with spatial resolution and compensated for accordingly. Photograph: IMMS.

Motivation and overview

High-precision nanopositioning systems (NPS) are essential in modern manufacturing, metrology, and semiconductor applications, where positioning accuracy in the subnanometre range is required [1]. One of the greatest challenges with such systems is thermal disturbance, which leads to structural deformation and positioning errors [2]. Although temperature measurements are crucial for thermal compensation, sensor placement is often limited due to space constraints, functional requirements, and system complexity. As a result, it is not possible to directly measure the temperature at all relevant locations within the system.

www.imms.de/nmdrives

The VirtuSen project aims to address this limitation by developing AI-based virtual sensors that estimate temperature fields at inaccessible locations using a combination of sparse sensor measurements, physics-based models, and data-driven approaches. The central innovation lies in combining physical modelling with artificial intelligence, enabling accurate and physically consistent predictions even

www.imms.de/virtusen

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

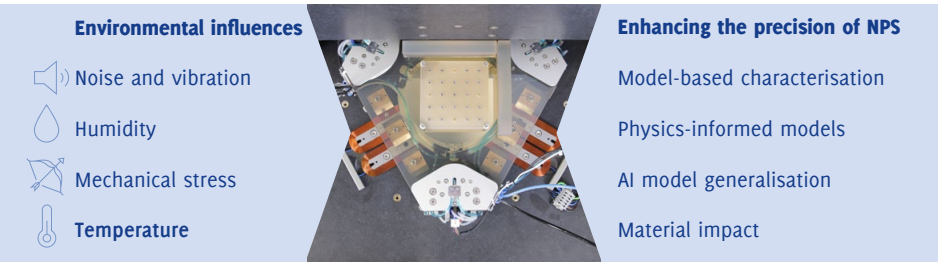


Figure 1: Factors influencing high-precision positioning systems and possible solutions. Graphic: IMMS.

with limited sensor data. The overall approach follows a stepwise strategy: starting with controlled experiments on material specimens, progressing to simplified nanopositioning systems and ultimately extending to real-world systems with limited sensor accessibility. This methodology ensures that the developed models are both accurate and transferable to practical situations.

Investigation and modelling of thermal behaviour

To establish a reliable basis for temperature prediction, both experimental studies and physical modelling are conducted. The experiments are performed on specimens of hard rock and mineral castings, which are commonly used in precision engineering applications. The specimens are specifically designed to allow for a detailed investigation of temperature gradients by embedding sensors at various depths and positions. The experimental results provide insights into heat propagation within the material, including differences between surface and internal temperatures as well as the influence of environmental conditions such as convection. At the same time, limitations regarding measurement uncertainty, repeatability, and sensitivity to boundary conditions are identified.

In parallel, transient 3D models are developed using numerical simulation tools to describe the thermal behaviour and replicate the actual experimental conditions. These models are used to calculate the spatial and temporal temperature distribution, enabling a systematic analysis of influencing factors such as heat input and boundary conditions. Although a general agreement between simulation and experiment is achieved, discrepancies remain due to uncertainties in material properties and boundary conditions. Reducing these discrepancies and ensuring transferability to more complex geometries are ongoing tasks.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

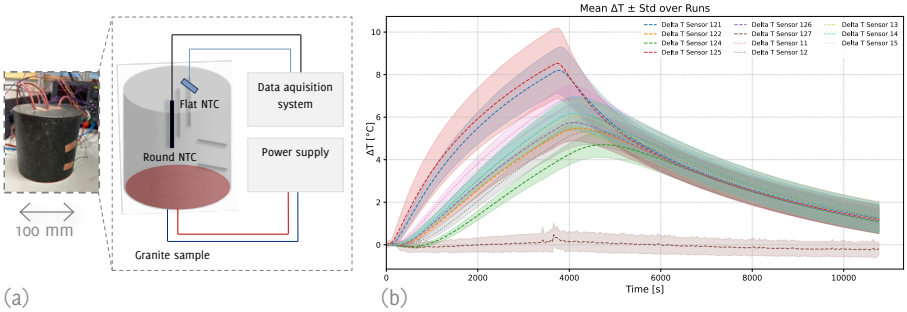


Figure 2: (a) Initial experimental setup using a granite cylinder (100 mm). (b) An example of the averaged temperature distribution in a granite cylinder sample. Source: IMMS.

Development of AI-based virtual sensors

Based on the experimental and simulated data, several AI-based approaches are investigated to assess the feasibility of virtual temperature measurement. Classical machine learning models, deep learning architectures, and physically informed neural networks (PINNs) are implemented and compared. The results show that temperature estimation based on limited sensor data is fundamentally feasible. Sequential models, in particular, demonstrate the ability to capture temporal behaviour, while physics-informed approaches provide a framework for incorporating physical constraints into the learning process. However, significant challenges remain. The models exhibit sensitivity to sensor configuration, limited robustness under changing operating conditions, and difficulties in accurately capturing local thermal effects or unknown heat sources. These observations suggest that further methodological development, together with the integration of improved data acquisition and modelling approaches, is required to achieve reliable performance.

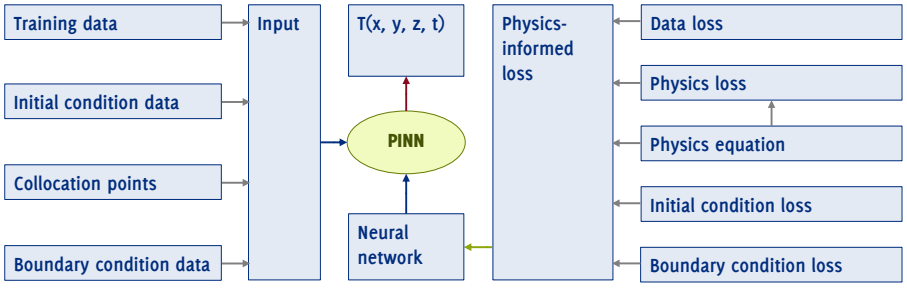


Figure 3: Schematic overview of the training framework of a PINN. Graphic: IMMS.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

Generalisation and transfer of AI Methods

A key objective of the project is to apply the developed methods to real-world nanopositioning systems, where only a limited number of surface sensors are available and no direct reference measurements are possible at the desired locations. Initial investigations show that while the models perform well under controlled experimental conditions, their transfer to more complex systems remains a major challenge. In particular, structured prediction errors, uncertainties in the model outputs, and dependence on the training data limit the direct applicability of current approaches. Furthermore, the integration of physical models and AI methods at the system level has not yet been fully validated. To address these challenges, the next step involves applying the developed methods to a simplified nanopositioning system in which partial internal sensing is still possible. This intermediate step enables a systematic evaluation of model transferability and provides important insights for further development.

Outlook and potential applications

The work carried out so far represents a first step toward implementing virtual temperature measurement in high-precision systems. However, considerable effort is still required to improve the accuracy, robustness, and generalisability of the models. In the next phase, the focus will be on refining the experimental setups, improving the physical models, and further developing AI-based methods to better handle limited data and uncertainties. Following validation on simplified systems, the approach will be extended to a real-world nanopositioning system with limited sensor equipment.

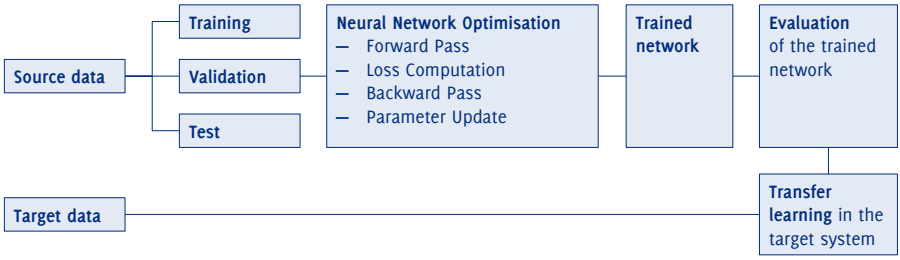


Figure 4: Training and transfer processes in neural networks. Graphic: IMMS.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

The long-term goal is to combine simplified physical models with AI-based virtual sensors to predict the entire temperature field and identify unknown thermal disturbances within the system. The developed methodology offers significant application potential for a wide range of precision engineering systems, particularly those developed at IMMS where direct measurement of internal states is not possible. By combining physical understanding with artificial intelligence, the project contributes to the development of intelligent, self-monitoring systems that can maintain high performance under changing operating conditions. This would enable more effective thermal compensation strategies and contribute to maintaining high positioning accuracy. Beyond nanopositioning systems, the developed methods have potential applications in a wide range of fields in precision engineering, including machine tools, measurement systems, and other mechatronic systems where internal states cannot be measured directly.

Contact person: Dr.-Ing. Parastoo Salimitari, parastoo.salimitari@imms.de

Freistaat Thüringen
Hier hat Zukunft Tradition.

The research group ‘Application of AI-based virtual sensor technology to effectively increase the precision of positioning systems – VirtuSen’ was funded by the German Land of Thüringen.

www.imms.de/virtusen

References:

[1] Y. Li et al., “Design, modeling and control of high-bandwidth nano-positioning stages for ultra-precise measurement and manufacturing: a survey,” *International Journal of Extreme Manufacturing, vol. 6, no. 6, p. 062007, Sep. 2024,* doi: 10.1088/2631-7990/AD6ECC.

[2] J. Wang, C. Zhu, M. Feng, and W. Ren, “Thermal error modeling and compensation of long-travel nanopositioning stage,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 65, no. 1–4, pp. 443–450, Mar. 2013,* doi: 10.1007/S00170-012-4183-3/METRICS.

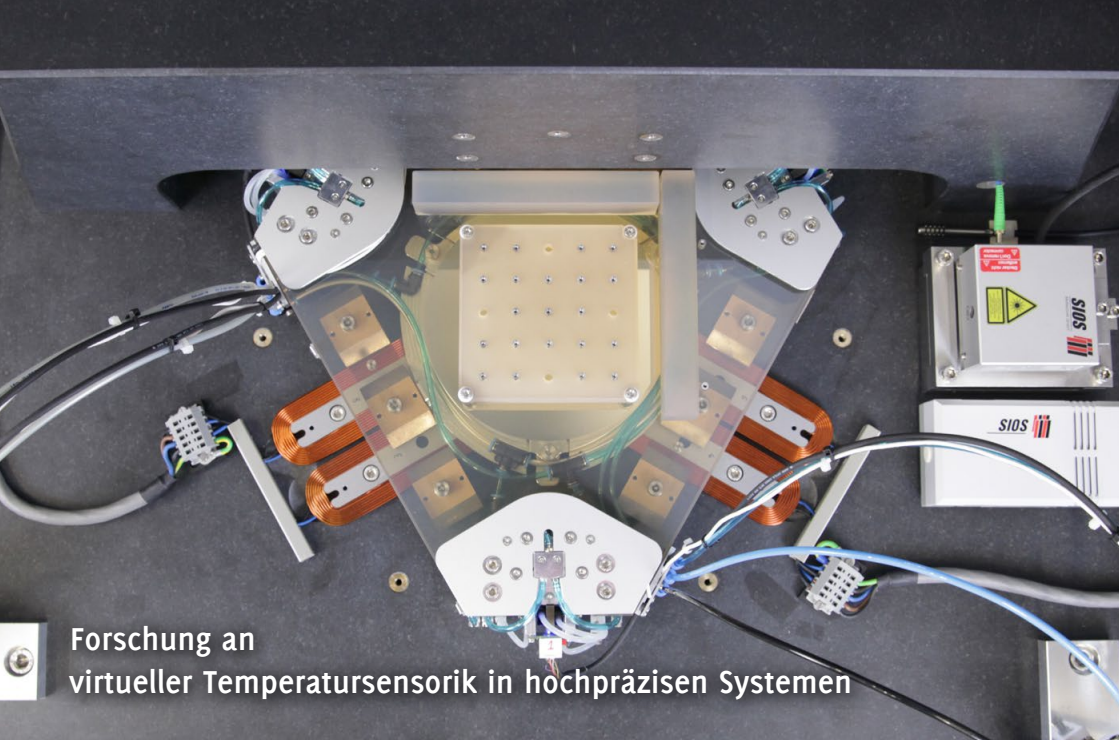
© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

[3] P. Salimitari, S. Hesse, M. Katzschmann, L. Herzog, “Experimental characterization of thermal disturbances in a 6DOF nanopositioning system under varying operational conditions”, *Precision & Performance Conference 2025, Cranfield University, UK, 17th- 20th November 2025*

[4] I. Naujokat, L. Herzog, S. Hesse, P. Salimitari, “Development and validation of a simplified coil model for CFD simulation of a nano-positioning planar drive system”, *Precision & Performance Conference 2025, Cranfield University, UK, 17th-20th November 2025*

[5] I. Naujokat, L. Herzog, S. Hesse, P. Salimitari, “Thermal Analysis of a Coil Assembly in a Nanopositioning Drive System via Reduced-Complexity CFD Modeling”, *Appl. Sci. 2026, 16, 2748*

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.



Forschung an virtueller Temperatursensorik in hochpräzisen Systemen

Mithilfe virtueller Sensorik und KI sollen Störeinflüsse auf komplexe mechatronische Systeme wie auf einen solchen Hochpräzisionsantrieb ortsaufgelöst erfasst und kompensiert werden können. Daran arbeitet die Forschungsgruppe VirtuSen. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Hochpräzise Nanopositioniersysteme (NPS) sind in der modernen Fertigung, Messtechnik und bei Halbleiteranwendungen, wo eine Positioniergenauigkeit im Subnanometerbereich erforderlich ist, unverzichtbar [1]. Eine der größten Herausforderungen bei solchen Systemen sind thermische Störungen, die zu strukturellen Verformungen und Positionierfehlern führen [2]. Obwohl Temperaturmessungen für die Kompensation entscheidend sind, ist die Platzierung von Sensoren aufgrund von Platzmangel, funktionalen Einschränkungen und der Komplexität des Systems begrenzt. Infolgedessen ist es nicht möglich, die Temperatur an allen relevanten Stellen innerhalb des Systems direkt zu messen.

www.imms.de/nmdrives

Das Projekt VirtuSen zielt darauf ab, diese Einschränkung zu überwinden, indem es KI-basierte virtuelle Sensoren entwickelt, die Temperaturfelder an unzugänglichen Stellen mithilfe einer Kombination aus wenigen Messungen, physikalischer Modellierung und datengesteuerten Methoden abschätzen. Die zentrale Innovation besteht

www.imms.de/virtusen

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

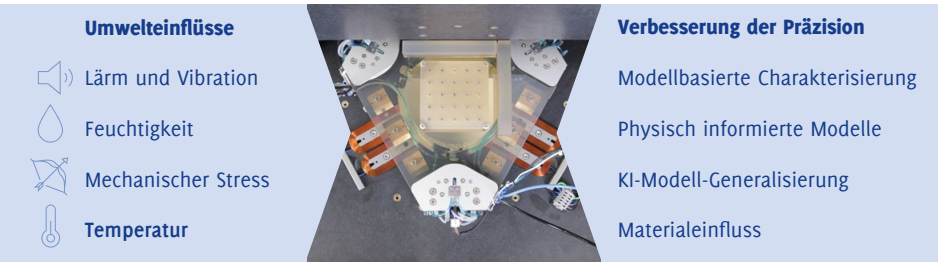


Abbildung 1: Einflussgrößen und Lösungsansätze für hochpräzise Positioniersysteme. Grafik: IMMS.

in der Kombination von physikalischer Modellierung mit künstlicher Intelligenz, wodurch auch bei begrenzten Sensordaten genaue und physikalisch konsistente Vorhersagen ermöglicht werden. Der Gesamtansatz folgt einer schrittweisen Strategie: Ausgehend von kontrollierten Experimenten an Materialproben geht es weiter zu vereinfachten Nanopositionierungssystemen und schließlich zu realen Systemen mit eingeschränktem Sensorzugang. Diese Methodik stellt sicher, dass die entwickelten Modelle sowohl genau als auch auf praktische Anwendungen übertragbar sind.

Untersuchung und Modellierung des thermischen Verhaltens

Um eine zuverlässige Grundlage für die Temperaturvorhersage zu schaffen, wurden sowohl experimentelle Untersuchungen als auch physikalische Modellierungen durchgeführt. Die Experimente wurden an Proben aus Hartgestein und Mineralguss durchgeführt, die üblicherweise in Konstruktionen der Feinmechanik verwendet werden. Die Proben wurden speziell so konzipiert, dass eine detaillierte Untersuchung der Temperaturgradienten möglich war, indem Sensoren in unterschiedlichen Tiefen und Positionen eingebettet wurden. Die experimentellen Ergebnisse lieferten Erkenntnisse über die Wärmeausbreitung innerhalb des Materials einschließlich der Unterschiede zwischen Oberflächen- und Innentemperaturen sowie des Einflusses von Umgebungsbedingungen wie Konvektion. Gleichzeitig wurden Einschränkungen hinsichtlich Messunsicherheit, Wiederholbarkeit und Empfindlichkeit gegenüber Randbedingungen festgestellt.

Parallel dazu wurden mithilfe numerischer Simulationswerkzeuge transiente 3D-Modelle zur Beschreibung des Wärmeverhaltens entwickelt, um die realen Versuchsbedingungen nachzubilden. Durch die Anwendung dieser Modelle wird die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung berechnet, womit eine systematische Analyse von Einflussfaktoren wie Wärmeeintrag und Randbedingungen ermöglicht wird.

www.imms.de/virtusen

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

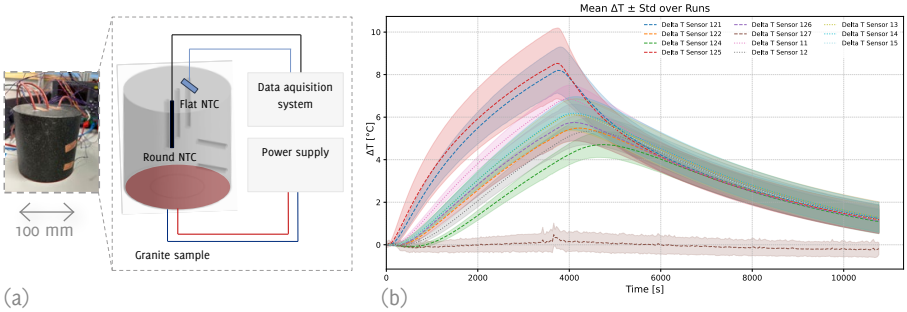


Abbildung 2: (a) Erster Versuchsaufbau mit einem Granitzylinder (100 mm). (b) Ein Beispiel für die gemittelte Temperaturverteilung in einer Granitzylinderprobe. Quelle: IMMS.

Zwar wurde eine allgemeine Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment erreicht, doch bestehen weiterhin Abweichungen aufgrund von Unsicherheiten bei den Materialeigenschaften und Randbedingungen. Die Verringerung dieser Diskrepanzen und die Sicherstellung der Übertragbarkeit auf komplexere Geometrien sind laufende Aufgaben.

Entwicklung von KI-basierten virtuellen Sensoren

Auf der Grundlage der experimentellen und simulierten Daten wurden mehrere KI-basierte Ansätze untersucht, um die Machbarkeit der virtuellen Temperaturerfassung zu bewerten. Klassische Modelle des maschinellen Lernens, Deep-Learning-Architekturen und physikalisch informierte neuronale Netze (PINNs) wurden implementiert und verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Temperaturschätzung anhand weniger Sensordaten grundsätzlich möglich ist. Insbesondere sequenzielle Modelle zeigen die Fähigkeit, zeitliches Verhalten zu erfassen, während physikalisch

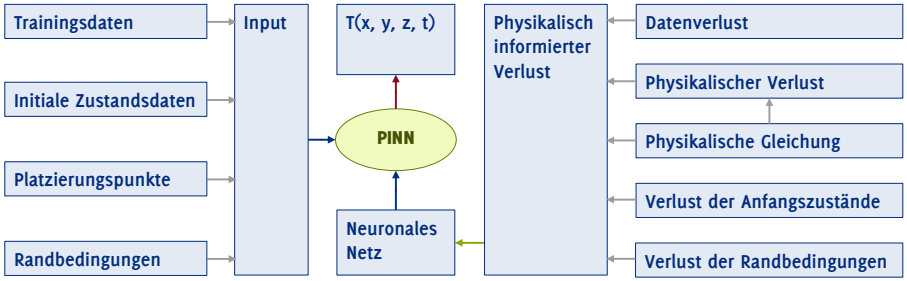


Abbildung 3: Schematischer Überblick über den Trainingsrahmen eines PINN. Grafik: IMMS.

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

informierte Ansätze einen Rahmen bieten, um physikalische Einschränkungen in den Lernprozess einzubeziehen. Es bleiben jedoch erhebliche Herausforderungen bestehen. Die Modelle zeigen eine Empfindlichkeit gegenüber der Sensorkonfiguration, eine begrenzte Robustheit bei sich ändernden Bedingungen sowie Schwierigkeiten bei der genauen Erfassung lokaler thermischer Effekte oder unbekannter Wärmequellen. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass eine weitere methodische Entwicklung und die Integration mit verbesserten Daten- und Modellierungsansätzen notwendig sind, um eine zuverlässige Leistung zu erzielen.

Verallgemeinerung und Übertragung von KI-Methoden

Ein zentrales Ziel des Projekts ist die Übertragung der entwickelten Methoden auf reale Nanopositionierungssysteme, bei denen nur eine begrenzte Anzahl von Oberflächensensoren zur Verfügung steht und an den gewünschten Stellen keine direkten Referenzmessungen vorliegen. Erste Untersuchungen zeigen, dass die Modelle zwar unter kontrollierten Versuchsbedingungen gut funktionieren, ihre Übertragung auf komplexere Systeme jedoch nach wie vor eine große Herausforderung darstellt. Insbesondere strukturierte Vorhersagefehler, Unsicherheiten in den Modellausgaben und die Abhängigkeit von den Trainingsdaten schränken die direkte Anwendbarkeit aktueller Ansätze ein. Darüber hinaus ist die Integration von physikalischen Modellen und KI-Methoden auf Systemebene noch nicht vollständig validiert. Um diese Herausforderungen anzugehen, werden im nächsten Schritt die entwickelten Methoden auf ein vereinfachtes Nanopositionierungssystem angewendet, bei dem eine teilweise interne Sensorik noch möglich ist. Dieser Zwischenschritt ermöglicht eine systematische Bewertung der Modellübertragbarkeit und liefert wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung.

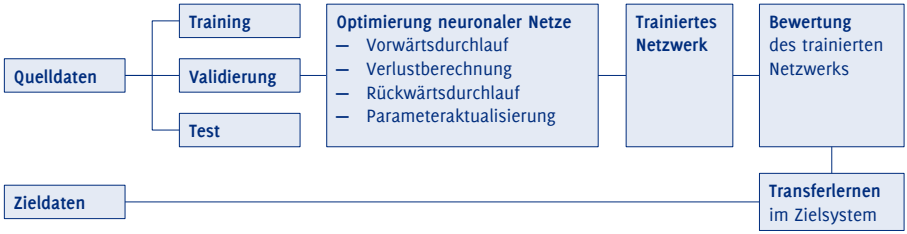


Abbildung 4: Trainings- und Transferablauf der neuronalen Netze. Grafik: IMMS.

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

Die bisher durchgeführten Arbeiten stellen einen ersten Schritt zur Realisierung einer virtuellen Temperaturerfassung in hochpräzisen Systemen dar. Es sind jedoch noch erhebliche Anstrengungen erforderlich, um die Genauigkeit, Robustheit und Generalisierungsfähigkeit der Modelle zu verbessern. In der nächsten Phase wird der Schwerpunkt auf der Verfeinerung der Versuchsaufbauten, der Verbesserung der physikalischen Modelle und der Weiterentwicklung KI-basierter Methoden liegen, um wenige Daten und Unsicherheiten besser zu bewältigen. Nach der Validierung an vereinfachten Systemen wird der Ansatz auf ein reales Nanopositionierungssystem mit begrenzter Sensorausstattung ausgeweitet.

Langfristiges Ziel ist es, vereinfachte physikalische Modelle und KI-basierte virtuelle Sensoren zu kombinieren, um das gesamte Temperaturfeld vorherzusagen und unbekannte thermische Störungen innerhalb des Systems zu identifizieren. Die entwickelte Methodik bietet erhebliches Anwendungspotenzial für eine Vielzahl von Systemen der Feinmechanik, insbesondere für solche, die am IMMS entwickelt werden und bei denen eine direkte Messung der internen Zustände nicht möglich ist. Durch die Kombination von physikalischem Verständnis mit künstlicher Intelligenz trägt das Projekt zur Entwicklung intelligenter, selbstüberwachender Systeme bei, die unter wechselnden Betriebsbedingungen eine hohe Leistung aufrechterhalten können. Dies würde effektivere thermische Kompensationsstrategien ermöglichen und zur Aufrechterhaltung einer hohen Positioniergenauigkeit beitragen. Über Nanopositioniersysteme hinaus haben die entwickelten Methoden potenzielle Anwendungsmöglichkeiten in einer Vielzahl von Bereichen der Feinmechanik, darunter Werkzeugmaschinen, Messsysteme und andere mechatronische Systeme, bei denen interne Zustände nicht direkt gemessen werden können.

Kontakt: Dr.-Ing. Parastoo Salimitari, parastoo.salimitari@imms.de

Freistaat Thüringen
Hier hat Zukunft Tradition.

Die Forschungsgruppe „Applikation KI-basierter virtueller Sensorik zur effektiven Präzisionssteigerung von Positioniersystemen – VirtuSen“ wird vom Freistaat Thüringen gefördert.

www.imms.de/virtusen

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

[1] Y. Li et al., "Design, modeling and control of high-bandwidth nano-positioning stages for ultra-precise measurement and manufacturing: a survey," *International Journal of Extreme Manufacturing, vol. 6, no. 6, p. 062007, Sep. 2024,* doi: 10.1088/2631-7990/AD6ECC.

[2] J. Wang, C. Zhu, M. Feng, and W. Ren, "Thermal error modeling and compensation of long-travel nanopositioning stage," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 65, no. 1–4, pp. 443–450, Mar. 2013,* doi: 10.1007/S00170-012-4183-3/METRICS.

[3] P. Salimitari, S. Hesse, M. Katzschmann, L. Herzog, "Experimental characterization of thermal disturbances in a 6DOF nanopositioning system under varying operational conditions", *Precision & Performance Conference 2025, Cranfield University, UK, 17th- 20th November 2025*

[4] I. Naujokat, L. Herzog, S. Hesse, P. Salimitari, "Development and validation of a simplified coil model for CFD simulation of a nano-positioning planar drive system", *Precision & Performance Conference 2025, Cranfield University, UK, 17th-20th November 2025*

[5] I. Naujokat, L. Herzog, S. Hesse, P. Salimitari, "Thermal Analysis of a Coil Assembly in a Nanopositioning Drive System via Reduced-Complexity CFD Modeling", *Appl. Sci. 2026, 16, 2748*

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.