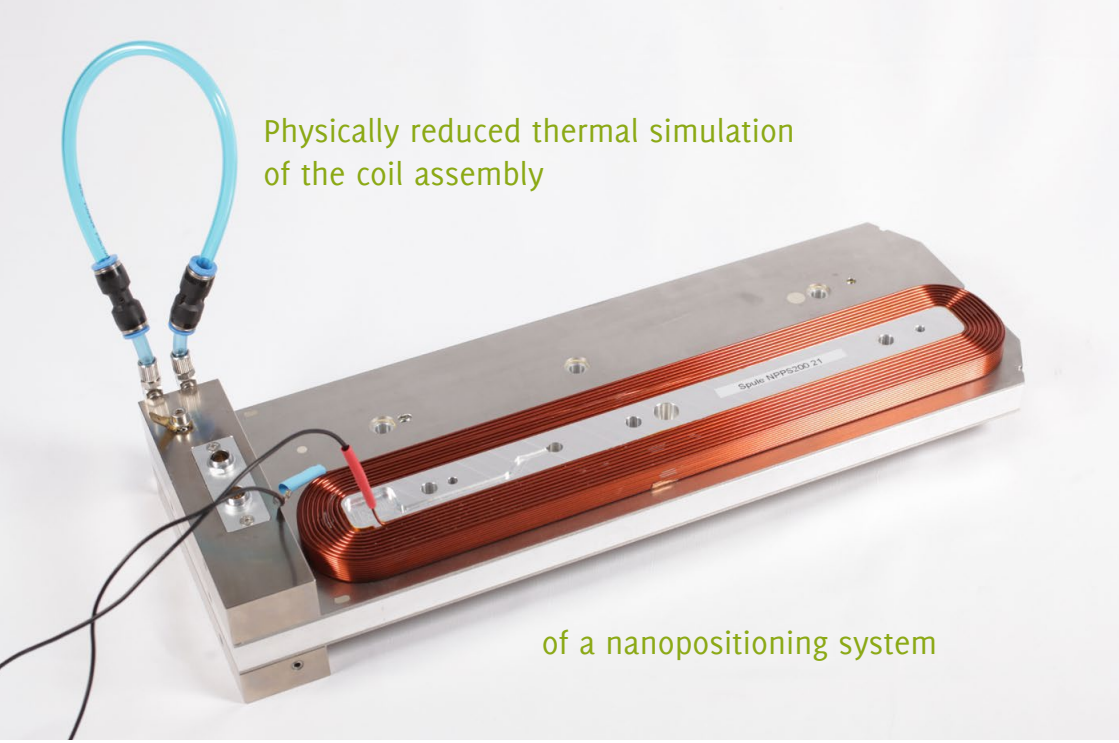
Physically reduced thermal simulation of the coil assembly of a nanopositioning system



Coil and coil assembly of a nanopositioning system, whose thermal behaviour has been simulated in physically reduced models. Prospectively, it is possible to improve the systems by predicting and compensating for disturbance influences. Photograph: IMMS.

Reduced modelling for efficient simulation of thermal effects

Nanopositioning systems (NPS) are employed across a range of industries — including nano and micro technology — to position and manipulate objects. As the trend moves toward smaller and more complex structures, the demands on the dynamics and positioning accuracy of nanopositioning systems continually increase. In these precision regimes even minor disturbances, such as thermally induced deformations, can negatively affect positioning accuracy. Therefore, it is essential to predict the performance of nanopositioning systems through modelling, so that emerging disturbances can be compensated for in the future. Because these models involve highly computationally and time intensive simulations, research is focused on whether high accuracy results can also be achieved with reduced models. The VirtuSen research group concentrates on predicting disturbances such as temperature changes caused by heat sources that generate stresses and deformations, thereby impairing accurate positioning.

www.imms.de/nmdrives

www.imms.de/virtusen

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

In the VirtuSen research group, the IMMS team succeeded in reproducing the thermal behaviour of a coil assembly in a physically reduced model for numerical fluid dynamics (Computational Fluid Dynamics; CFD) within the ANSYS Fluent simulation software. By reducing the model, it becomes possible to efficiently examine a variety of operating points. Based on this, the cooling of the coils can be optimised, and the thermal influence of the coil assembly on the other components of the nanopositioning system can be investigated. In the future, deformations are also to be predicted and compensated for before they can negatively affect positioning.

Coil assemblies of a nanometre accurate high precision drive

The coil assembly is installed thrice in the planar drive of the positioning system **NPS6D200** rotated by 120° each (Figure 1(a): A, B, C). This nanometre accurate positioning system, developed at IMMS, was realised as part of various earlier research projects for a planar workspace of Ø 200 mm. The new feature of the NPS6D200 was the extension of an integrated planar direct drive with a vertical actuation of 25 mm travel. The combination of planar and vertical drive allows closed loop control in six degrees of freedom (6 D). The electric coils of the planar drive heat up due to Ohmic losses. The resulting temperature differences cause heating of surrounding structures through direct or indirect contact via various heat transfer mechanisms. Among other components, the system's granite base is exposed to these heat sources, ultimately leading to stresses and deformations.

Specialist article on the NPS6D200: www.imms.de

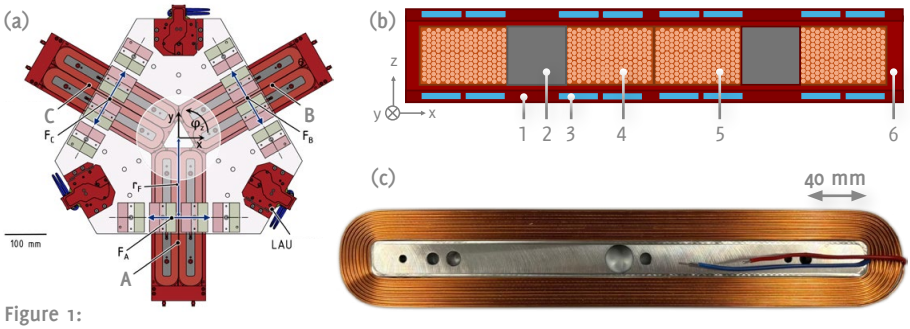


Figure 1:

(a) Schematic representation of the planar drive system;
(b) Schematic cross section of a coil assembly: 1) cooling element sandwiches, 2) coil cores, 3) cooling channels, 4/5) wound copper wire, 6) coil frames;
(c) Photograph of a coil with its core and electrical connections. Graphics/Photograph: IMMS.

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

The aim of the work carried out at IMMS was to predict the thermal behaviour of the coils and coil assemblies under various loads using a reduced simulation. This will enable optimisation of coil cooling, determination of their thermal influence on the entire positioning system, and, in the long term, improvement of the overall positioning accuracy of the nanopositioning system by compensating for the resulting deformations.

The coil assemblies, shown schematically in Figure 1(b), consist of two coils made from wound copper wire (4, 5) and aluminum coil cores (2), aluminum coil frames (6), and the so called cooling element sandwiches (1). These sandwiches enable temperature control of the coils via embedded cooling channels (3).

The thermal simulation of the entire coil assembly was divided into several subsystems: first, the coil itself was examined, and a geometric reduction of the coil model was performed. Next, the cooling element sandwiches were simulated separately, a process that is highly computationally intensive due to the coolant and finally, the entire coil assembly was simulated. All simulation results were validated with equivalent experiments.

Investigation and physically reduced simulation of the coils

The **investigation of the coils** was first carried out microscopically to determine their composition. As shown in Figure 2, the coil windings consist not only of copper wire (1) but also of various coatings (2), a filling material (epoxy) (6), a polyamide film (3) to isolate the windings from the coil core (5), and air gaps (4).

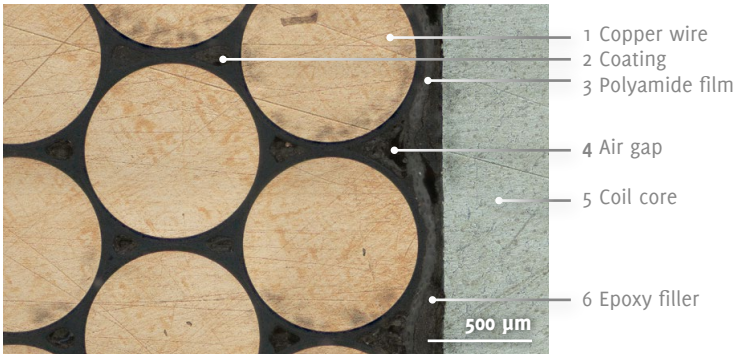


Figure 2:

Microscope image of a coil in cross section.

Photograph: IMMS.

© IMMS 2025
© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

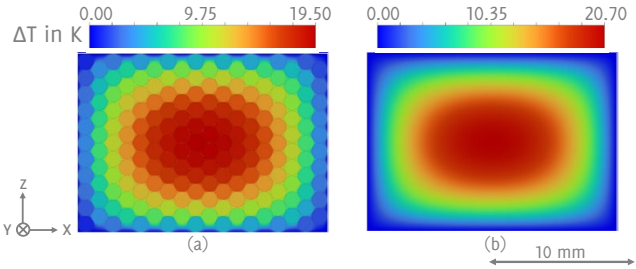


Figure 3:

Comparison of the resulting temperature gradients between a detailed simulation with all wires (a) and a reduced simulation with direction dependent thermal conductivity (b).

Graphic: IMMS.

Because simulating every geometric detail would require a very high computational effort, a geometrically **reduced model** was devised. First, all filler materials were combined into a single material with averaged properties. The remaining copper wires and the averaged filler material were examined in more detail to determine their thermal characteristics, with particular emphasis on the thermal conductivity of the proposed substitute material. Based on the coil cross section (Figure 1(b)) and the shape of the coils as seen in Figure 1(c), it was assumed that the thermal properties are direction dependent. To investigate this, a separate simulation was performed. It compared the resulting temperature gradient from a simulation with the detailed model (Figure 3(a), S1) to that from the simulation using the substitute material (Figure 3(b)). The comparison was carried out once with direction dependent thermal conductivity (S2) and once with direction independent thermal conductivity (S3).

Table 1 shows the percentage deviation of the resulting heat flux densities from the simulations at the corresponding outer walls. It demonstrates that the directional dependence of thermal conductivity must not be neglected.

	Deviation S2 / S1 in %	Deviation S3 / S1 in %
Left wall	–3,40	–14,80
Right wall	–2,82	–14,29
Top wall	5,57	14,88
Bottom wall	5,56	14,88

Table 1: Comparison of the resulting heat flux densities of simulations S1, S2, and S3 at the walls. Source: IMMS.

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

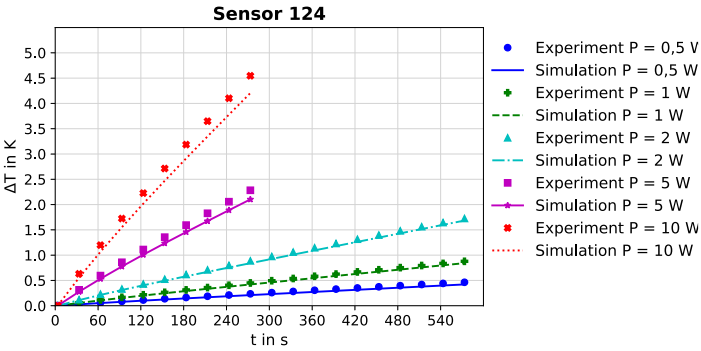


Figure 4:

Diagram of the resulting temperature difference between simulation and experiment for a representative sensor with average deviation.

Graphic: IMMS.

In a subsequent step, an entire coil was simulated transiently with various applied power levels and experimentally validated. The difference between the measured and simulated resulting temperature differences, referenced to the respective starting temperature, was determined separately for each sensor used in the experiment. As illustrated in Figure 4 for a representative sensor on the coil winding, the results show a small deviation from one another. The chosen sensor exhibits an average deviation from the other sensors. This suggests that the reduced coil model is suitable for use in simulations of the entire coil assembly.

Simulation of the cooling element sandwiches and the entire coil assembly

The **simulation of the cooling element sandwiches** focuses on accurately representing the coolant. To capture the flat, long geometry of the cooling channel, the mesh shown in Figure 5 was chosen, with one computational point per mesh volume. Care was taken to select the boundary layers correctly, as they are essential for calculating the heat transfer between fluid and solid. The resulting simulation of the cooling element sandwiches – validated against experimental data – was finally incorporated into the simulation of the entire coil assembly.

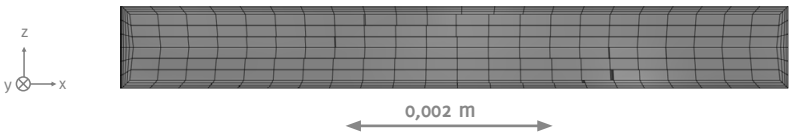


Figure 5: Mesh representation of the cooling channel. Graphic: IMMS.

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

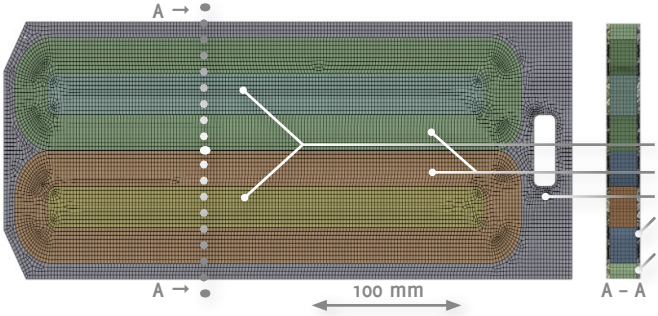


Figure 6:

Mesh representation of the coil assembly:

1) Coil core
2) Coil winding
3) Coil frame
4) Cooling-element sandwiches
5) Cooling channels.
Grafik: IMMS.

The **simulation of the entire coil assembly** was first carried out by selecting the thermal contact resistances between the solid bodies, as these have a significant influence on heat transfer between the individual components. The simulation was then performed for various power levels applied to the coils to cover a wide range of possible operating points. Figure 6 shows the chosen mesh of the individual parts of the coil assembly, with most of the mesh cells located inside the cooling channels of the cooling body sandwiches. This, as already explained, is due to the required high resolution in the fluid domain.

Figure 7 shows the resulting temperature distribution from the coil assembly simulation with an electrical input power of 10 W. The temperature of the cooling channel rises from the inlet (1) to the outlet (2), because the heat generated in the coils is absorbed by the coolant and transported out of the system. It is also evident that there is a temperature hotspot over one of the coils, which leads to a higher heat input into surrounding geometries.

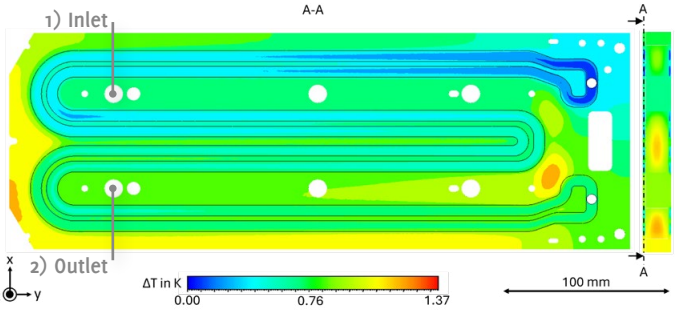


Figure 7:

Representation of the resulting temperature gradient from the coil assembly simulation with an electrical power of 10 W and a coolant inlet velocity of 0.202 m/s.

Graphic: IMMS.

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

The comparison between the simulation results and the experimental data shows a high degree of concordance. This indicates that the simulation accurately represents the system, and that the reduced geometry of the coils allows for faster computation of the results than a fully detailed geometric simulation, while still maintaining high accuracy.

Outlook

These results serve as the starting point for investigating the thermal influence of the coils and coil assemblies as one of the primary heat sources within the overall system on the surrounding or adjacent geometries. The simulation can predict which temperature gradients arise at different power levels and how they are distributed across the coil assemblies. For subsequent components – such as the granite base of the entire positioning system – the proximity to the coils as a heat source generates a temperature gradient. Because most materials, including granite, expand with increasing temperature, the coils introduce unwanted deformations into the overall system. Based on these findings, the VirtuSen research group studies the thermo mechanical response of the granite base and other adjacent systems and ultimately aims to efficiently thermomechanically simulate the entire nanopositioning system using a reduced model.

Contact person: Dipl.-Ing. Ina Naujokat, ina.naujokat@imms.de

Freistaat Thüringen
Hier hat Zukunft Tradition.

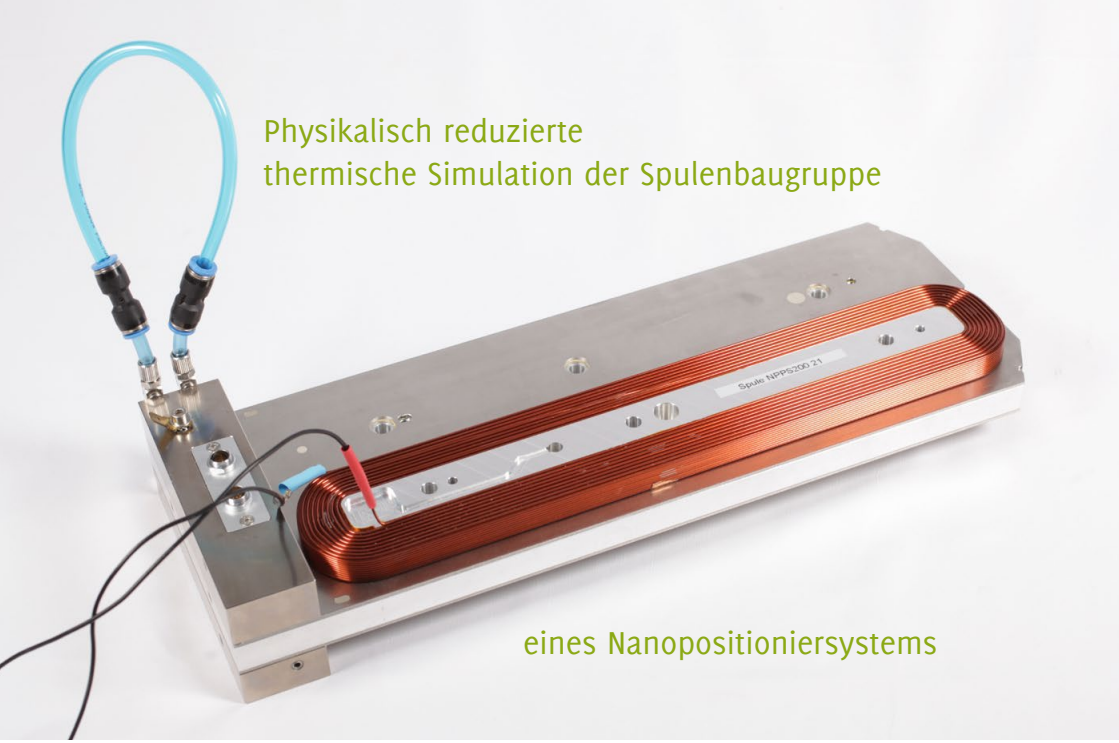
The research group ‘Application of AI-based virtual sensor technology to effectively increase the precision of positioning systems – VirtuSen’ was funded by the German Land of Thüringen.

www.imms.de/virtusen

Reference:

Thermal Analysis of a Coil Assembly in a Nanopositioning Drive System via Reduced-Complexity CFD Modeling, Ina Naujokat. Ludwig Herzog. Steffen Hesse. Parastoo Salimitari. *Appl. Sci. 2026, 16, 2748.* **https://doi.org/10.3390/app16062748**

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



Spule und Spulenbaugruppe eines Nanopositioniersystems, deren thermisches Verhalten in physikalisch reduzierten Modellen simuliert wurde. Perspektivisch ist es so möglich, die Systeme durch Vorhersage und Kompensation von Störeinflüssen zu verbessern. Foto: IMMS.

Reduzierte Modellierung zur effizienten Simulation thermischer Effekte

Nanopositioniersysteme (NPS) werden in verschiedenen Branchen, wie der Nano- und Mikrotechnologie, eingesetzt, um Objekte zu positionieren und zu manipulieren. Da der Trend zu immer kleineren und komplexeren Strukturen geht, steigen die Anforderungen bezüglich der Dynamik und Positioniergenauigkeit von Nanopositioniersystemen stetig. In diesen Genauigkeitsbereichen reichen schon geringe Störeinflüsse wie thermisch bedingte Deformationen aus, um die Positionierungsgenauigkeit negativ zu beeinflussen. Daher ist es notwendig, die Performance von Nanopositioniersystemen über Modellierungen vorherzusagen, um auftretende Störeinflüsse perspektivisch kompensieren zu können. Da es sich bei diesen Modellierungen um sehr rechen- und zeitintensive Simulationen handelt, wird daran geforscht, wie auch mit reduzierten Modellen eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse erzielt werden kann. Im Fokus der Forschungsgruppe VirtuSen steht die Vorhersage von Störeinflüssen wie zum Beispiel durch Wärmequellen hervorgerufene Temperaturänderungen, die zu Spannungen und Verformungen führen und somit eine genaue Positionierung beeinträchtigen.

www.imms.de/nmdrives

www.imms.de/virtusen

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

Dem IMMS gelang es in der Forschungsgruppe VirtuSen, das thermische Verhalten einer Spulenbaugruppe in einem physikalisch reduzierten Modell für numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics; CFD) in der Simulationssoftware Ansys Fluent wiederzugeben. Durch die Reduzierung des Modells ist es möglich, effizient verschiedene Arbeitspunkte zu betrachten. Darauf basierend kann die Kühlung der Spulen optimiert und der thermische Einfluss der Spulenbaugruppe auf die anderen Bestandteile des Nanopositioniersystems untersucht werden. Perspektivisch sollen zudem Deformationen vorhergesagt und kompensiert werden, bevor sie die Positionierung negativ beeinflussen können.

Spulenbaugruppen eines nanometergenauen Hochpräzisionsantriebs

Die Spulenbaugruppe ist dreimal um je 120° gedreht im planaren Antrieb des Positioniersystems **NPS6D200** (Abbildung 1 (a): A, B, C) verbaut. Dieses am IMMS entwickelte Nanopositioniersystem wurde in verschiedenen früheren Forschungsprojekten für einen planaren Arbeitsbereich von Ø200 mm realisiert. Neu am NPS6D200 war die Erweiterung eines integrierten planaren Direktantriebs um eine vertikale Aktuierung mit 25 mm Verfahrweg. Das Zusammenspiel aus dem planaren und vertikalen Antrieb ermöglichte eine Reglung in sechs Freiheitsgraden (6D). Die elektrischen Spulen des planaren Antriebs erwärmen sich durch Ohm'sche Verluste. Die entstehenden Temperaturunterschiede führen zur Erwärmung der umliegenden Strukturen durch direkten oder indirekten Kontakt über verschiedene Wärmeübertragungsmechanismen. Unter anderem die Granit-Basis des Systems ist diesen Temperaturgradienten ausgesetzt, was schließlich zu Spannungen und Deformationen führt.

Zum NPS6D200-Fachartikel auf www.imms.de

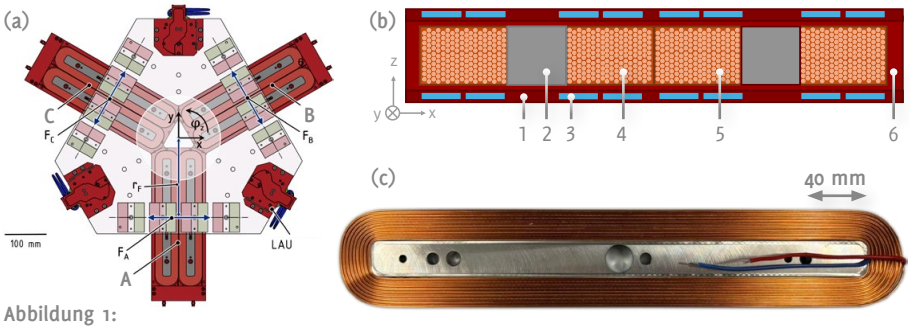


Abbildung 1:
(a) Schematische Darstellung des planaren Antriebssystems;
(b) Schematische Darstellung einer Spulenbaugruppe im Querschnitt: 1) Kühlkörpersandwiches, 2) Spulenkerne, 3) Kühlkanäle, 4/5) gewickelter Kupferdraht, 6) Spulenrahmen;
(c) Foto einer Spule mit Spulenkern und elektrischen Anschlüssen. Grafik/Foto: IMMS.

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

Ziel der Arbeiten am IMMS war es, über die reduzierte Simulation das thermische Verhalten der Spulen und Spulenbaugruppen unter verschiedenen Belastungen vorhersagen zu können, um die Kühlung der Spulen zu optimieren, deren thermischen Einfluss auf das gesamte Positioniersystem zu bestimmen und perspektivisch die Positioniergenauigkeit des gesamten Nanopositioniersystems zu verbessern, indem auftretende Deformationen kompensiert werden können.

Die Spulenbaugruppen, schematisch dargestellt in Abbildung 1 (b), bestehen aus zwei Spulen aus gewickeltem Kupferdraht (4,5) und Spulenkernen aus Aluminium (2), den Spulenrahmen aus Aluminium (6) und den sogenannten Kühlkörpersandwiches (1), welche die Temperierung der Spulen durch eingebettete Kühlkanäle (3) ermöglichen.

Die thermische Simulation der gesamten Spulenbaugruppe wurde dabei in mehrere Teilsysteme aufgeteilt: zunächst erfolgte eine Untersuchung der Spule und eine geometrische Reduktion des Spulenmodells, dann die gesonderte und aufgrund der Kühlflüssigkeit sehr rechenintensive Simulation der Kühlkörpersandwiches und final die Simulation der Spulenbaugruppe. Alle Simulationsergebnisse wurden mittels äquivalenter Experimente validiert.

Untersuchung und physikalisch reduzierte Simulation der Spulen

Die **Untersuchung der Spulen** erfolgte zunächst mikroskopisch, um deren Zusammensetzung zu bestimmen. Wie in Abbildung 2 dargestellt, bestehen die Spulenwicklungen neben den Kupferdrähten (1) zudem aus verschiedenen Lacken (2), einem Füllmaterial (Epoxid) (6), einer Polyamid-Folie (3), um die Wicklungen vom Spulenkern (5) zu isolieren, und Lufteinschlüssen (4).

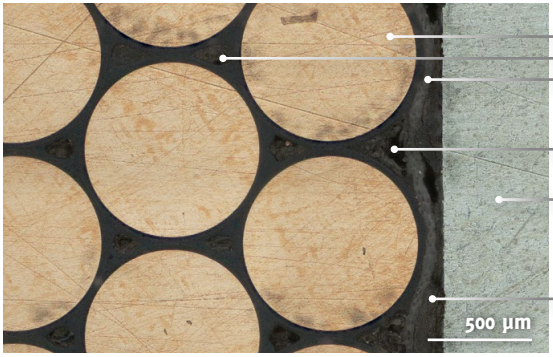


Abbildung 2:
Mikroskop-Aufnahme einer Spule im Querschnitt.
Foto: IMMS.

© IMMS 2025
© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

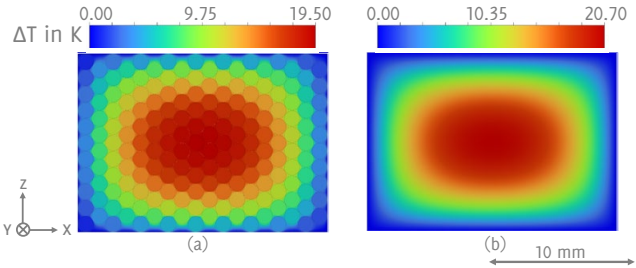


Abbildung 3: Vergleich der entstehenden Temperaturgradienten zwischen einer detaillierten Simulation mit allen Drähten (a) und einer reduzierten Simulation mit richtungsabhängiger Wärmeleitfähigkeit (b). Grafik: IMMS.

Da die Simulation aller Geometrie-Details einen hohen Berechnungsaufwand bedingt, wurde ein geometrisch **reduziertes Modell** entworfen. Hierfür wurden zunächst alle Füllmaterialien zu einem Werkstoff mit gemittelten Materialeigenschaften zusammengefasst. Die nun verbleibenden Kupferdrähte und das gemittelte Füllmaterial wurden näher betrachtet, um die thermischen Eigenschaften zu bestimmen. Hierbei lag das Augenmerk auf der Wärmeleitfähigkeit des angestrebten Ersatzmaterials. Anhand des Spulenquerschnitts (Abbildung 1 (b)) und der Form der Spulen, wie in Abbildung 1 (c) zu erkennen, wurde davon ausgegangen, dass die thermischen Eigenschaften richtungsabhängig sind. Um das zu untersuchen, wurde eine gesonderte **Simulation** durchgeführt. Diese verglich den resultierenden Temperaturgradienten einer Simulation mit detailliertem Modell (Abbildung 3 (a), S1) und die Simulation mit dem Ersatzmaterial (Abbildung 3 (b)). Der Vergleich wurde einmal mit richtungsabhängiger (S2) und einmal mit richtungsunabhängiger Wärmeleitfähigkeit (S3) durchgeführt.

Tabelle 1 zeigt die prozentuale Abweichung der resultierenden Wärmestromdichten der Simulationen an den entsprechenden Außenwänden. Es zeigt sich, dass die Richtungsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit nicht vernachlässigt werden darf.

	Abweichung S2 / S1 in %	Abweichung S3 / S1 in %
Linke Wand	−3,40	−14,80
Rechte Wand	−2,82	−14,29
Obere Wand	5,57	14,88
Untere Wand	5,56	14,88

Tabelle 1: Vergleich der resultierenden Wärmestromdichten der Simulationen S1, S2 und S3 an den Wänden. Quelle: IMMS.

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

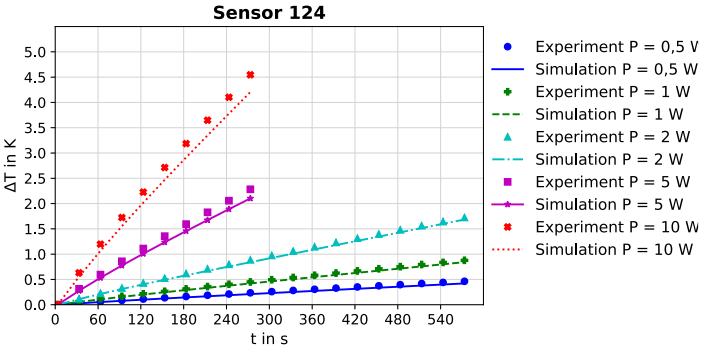


Abbildung 4:

Diagramm der entstehenden Temperaturdifferenz zwischen Simulation und Experiment für einen beispielhaften Sensor mit mittlerer Abweichung.

Grafik: IMMS.

In einem weiteren Schritt wurde eine gesamte Spule transient mit unterschiedlichen angelegten Leistungen simuliert und experimentell validiert. Die Differenz zwischen den gemessenen und simulierten resultierenden Temperaturdifferenzen bezogen auf die jeweilige Starttemperatur wurde für jeden im Experiment verwendeten Sensor einzeln ermittelt. Wie in Abbildung 4 beispielhaft für einen Sensor auf der Spulenwicklung dargestellt, werden Ergebnisse mit geringer Abweichung zueinander erzielt. Der gewählte Sensor zeigt eine mittlere Abweichung der Ergebnisse im Vergleich mit den restlichen Sensoren. Dies lässt darauf schließen, dass das reduzierte Modell der Spule geeignet ist, um in der Simulation der gesamten Spulenbaugruppe eingesetzt zu werden.

Simulation der Kühlkörpersandwiches und der gesamten Spulenbaugruppe

Zur **Simulation der Kühlkörpersandwiches** liegt das Hauptaugenmerk auf der korrekten Abbildung der Kühlflüssigkeit. Um die flache, lange Geometrie des Kühlkanals gut abzubilden, wurde die Vernetzung wie in Abbildung 5 gezeigt gewählt, wobei in jedem Netzvolumen ein Berechnungspunkt der Simulation liegt. Hierbei wurde auf die korrekte Wahl der Randschichten geachtet, da diese essenziell für die Berechnung der Wärmeübertragung zwischen Fluid und Festkörper ist. Die resultierende, mittels der experimentellen Daten validierte Simulation der Kühlkörpersandwiches wird final in die Simulation der gesamten Spulenbaugruppe übernommen.

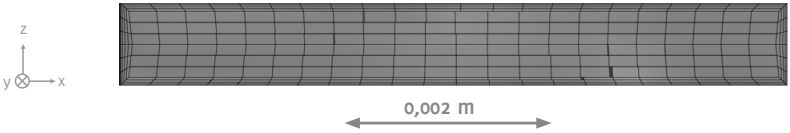


Abbildung 5: Darstellung der Vernetzung des Kühlkanals. Grafik: IMMS.

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

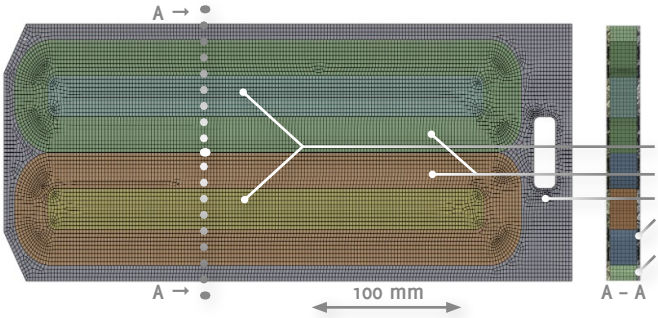


Abbildung 6:
Darstellung der Vernetzung der Spulenbaugruppe:
1) Spulenkern
2) Spulenwicklung
3) Spulenrahmen
4) Kühlkörpersandwiches
5) Kühlkanäle.
Grafik: IMMS.

Zur **Simulation der gesamten Spulenbaugruppe** wurden zunächst die thermischen Kontaktwiderstände zwischen den Festkörpern gewählt, da diese einen bedeutenden Einfluss auf die Wärmeübertragung zwischen den einzelnen Bauteilen haben. Die Simulation erfolgte anschließend für verschiedene Leistungen an den Spulen, um einen großen Bereich an möglichen Arbeitspunkten abzudecken. In Abbildung 6 wird die gewählte Vernetzung der einzelnen Bestandteile der Spulenbaugruppe gezeigt, wobei der Hauptteil der Zellen des erstellten Netzes innerhalb der Kühlkanäle der Kühlkörpersandwiches liegt. Das ist wie schon begründet auf die benötigte hohe Auflösung im Fluid zurückzuführen.

Abbildung 7 zeigt die resultierende Temperaturverteilung der Spulenbaugruppensimulation mit einer elektrischen Eingangsleistung von 10 W. Es ist zu sehen, dass die Temperatur des Kühlkanals vom Inlet (1) zum Outlet (2) zunimmt, da die in den Spulen entstehende Wärme von dem Kühlmittel aufgenommen und aus dem System heraustransportiert wird. Es ist außerdem zu erkennen, dass es einen Temperatur-Hotspot über einer der Spulen gibt, welcher zu einem höheren Wärmeeintrag in umliegende Geometrien führt.

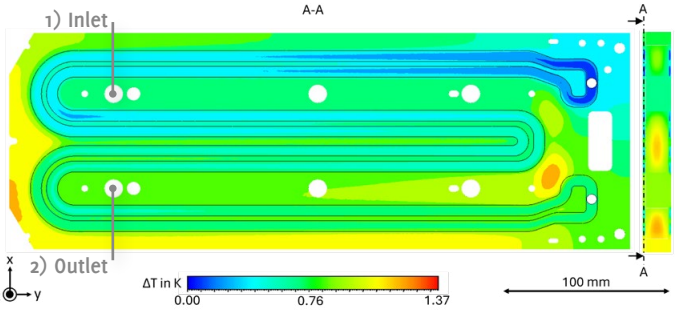


Abbildung 7:
Darstellung des resultierenden Temperaturgradienten der Spulenbaugruppensimulation mit einer elektrischen Leistung von 10 W und einer Kühlmittelgeschwindigkeit von 0,202 m/s am Inlet.
Grafik: IMMS.

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

Der Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und experimentellen Daten zeigt eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse. Das lässt darauf schließen, dass es sich um eine korrekte Simulation des Systems handelt, welche aufgrund der reduzierten Geometrie der Spulen eine schnellere Berechnung der Ergebnisse als eine geometrisch detailgenaue Simulation bei hoher Genauigkeit ermöglicht.

Ausblick

Diese Ergebnisse sind der Ausgangspunkt, um den thermischen Einfluss der Spulen und Spulenbaugruppen als eine der primären Wärmequellen innerhalb des Gesamtsystems auf die umliegenden/angrenzenden Geometrien zu untersuchen. Hierfür kann die Simulation vorhersagen, welche Temperaturgradienten bei verschiedenen Leistungen entstehen und wie sie sich an den Spulenbaugruppen verteilen. Für die anschließenden Geometrien, wie zum Beispiel die Granit-Basis des gesamten Positioniersystems, erzeugt die Nähe zu den Spulen als Wärmequelle einen Temperaturgradienten. Da sich die meisten Werkstoffe, so auch der Granit, mit zunehmender Temperatur ausdehnen, bringen die Spulen ungewollte Spannungen in das Gesamtsystem ein. Auf Basis dieser Ergebnisse wird in der Forschungsgruppe VirtuSen die thermomechanische Reaktion der Granit-Basis und weiterer angrenzender Systeme untersucht und perspektivisch das gesamte Nanopositioniersystem in einem reduzierten Modell effizient thermomechanisch simuliert.

Kontakt: Dipl.-Ing. Ina Naujokat, ina.naujokat@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

Literatur:

Thermal Analysis of a Coil Assembly in a Nanopositioning Drive System via Reduced-Complexity CFD Modeling, Ina Naujokat. Ludwig Herzog. Steffen Hesse. Parastoo Salimitari. *Appl. Sci. 2026, 16, 2748.* **https://doi.org/10.3390/app16062748**

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