

Thermische Modellierung von Verbindungsstellen



Thorsten Helmig, Faruk Al-Sibai und Reinhold Kneer

1 Einleitung

Zur Beschreibung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen ist die Modellierung eines thermischen Systems notwendig, welches die wirkenden thermischen Randbedingungen mit der resultierenden Temperaturverteilung im untersuchten Bauteil verknüpft. Eine häufig auftretende thermische Randbedingung stellen insbesondere Kontaktwärmeübergänge zwischen Maschinenkomponenten dar.

Bei Kontaktwärmeübergängen entspricht die reale Kontaktfläche zweier Bauteile aufgrund fertigungsbedingter Oberflächenrauigkeiten nur einem Bruchteil der nominellen Fläche. Hierdurch entsteht ein thermischer Widerstand, welcher zu einem Temperatursprung an der Verbindungsstelle führt. Neben der Kontaktfläche wird dieser Widerstand ebenfalls durch veränderliche Anpressdrücke, fluide Zwischenmedien sowie durch makroskopische Krümmung der Kontaktpartner beeinflusst. Die genaue Kenntnis dieser Wärmetransportmechanismen ist somit für die exakte Beschreibung des thermischen Verhaltens von Maschinenkomponenten entscheidend.

T. Helmig · F. Al-Sibai · R. Kneer (✉)
Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: kneer@wsa.rwth-aachen.de

T. Helmig
E-Mail: helmig@wsa.rwth-aachen.de

F. Al-Sibai
E-Mail: al-sibai@wsa.rwth-aachen.de

2 Grundlagenphänomene

Für einen eindimensionalen stationären Wärmetransport ohne Kontaktstelle kann der Temperaturverlauf im Körper mithilfe des Fourier Gesetz beschrieben werden. Das resultierende Temperaturprofil ist hierbei linear (Abb. 1 links). Im Gegensatz dazu tritt an Füge- und Kontaktstellen zwischen den Bauteilen ein Kontaktwärmewiderstand auf, welcher zu einem Temperatursprung über die Grenzfläche führt.

Zurückzuführen ist dieser Temperatursprung auf das Oberflächenprofil der Kontaktpartner, welches fertigungsbedingt mikroskopische Oberflächenrauigkeiten und Strukturen aufweist. Demzufolge herrscht nicht über die gesamte Fläche Kontakt, sondern lediglich über einen Bruchteil der nominellen Fläche. Die Querschnittsveränderung führt zu einer Einschnürung des Wärmestroms und letztendlich einem messbaren Temperatursprung über die Grenzfläche. Die integrale mathematische Modellierung erfolgt über den Kontaktwärmübergangskoeffizienten.

3 Analytisch-theoretische Beschreibung der Kontaktwärmübergänge

Bereits in den 1960er wurden erste analytische Ansätze zur Vorhersage von Kontaktwärmübergangskoeffizienten vorgestellt. Aufgrund der begrenzten Rechenleistung damaliger Computer nutzen diese Ansätze oftmals Reihenentwicklungen zur Modellierung des Temperaturfeldes. Für einen grundlegenden Überblick der Thematik werden die wichtigsten Korrelationen vorgestellt.

Insbesondere die Arbeit von (Cooper et al. 1969) ist hier zu nennen, welche Wärmübergänge ohne Zwischenmedien an makroskopisch planaren Kontaktflächen beschreibt:

$$\alpha_c = 1,45\lambda \left(\frac{m}{R_q} \right) \left(\frac{p}{H} \right)^{0,985} \quad (1)$$

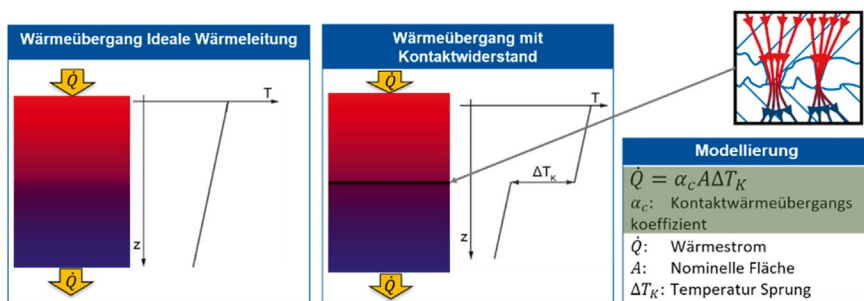


Abb. 1 Grundlagenphänomen Kontaktwärme

Hierbei entspricht k der Wärmeleitfähigkeit, m der Flankensteigung, R_q der Oberflächenrauigkeit, p dem applizierten Druck und H der Materialhärte. Die Ergebnisse zeigen eine lineare Abhängigkeit des Wärmeübergangs zum aufgeprägten Druck. Diese Gleichung beinhaltet einfach zu bestimmende integrale Kraft- und Oberflächenkenngrößen und kann für eine erste Abschätzung des Wärmeübergangs genutzt werden. Bei Werkzeugmaschinen ist hierbei noch insbesondere der Einfluss von Zwischenmedien, sowie der Effekt makroskopischer Krümmungen, beispielsweise bei Wälzkörpern und Profilschienen, von Interesse. Eine qualitative Darstellung dieses Phänomens ist in Abb. 2 gezeigt:

Bahrami et al. (2004) haben umfassende theoretische Arbeiten im Bereich makroskopischer Krümmungen geleistet und beschreiben den Gesamtwärmeübergang als Reihenschaltung von thermischen Widerständen. Diese umfassen zum einen den makroskopischen Widerstand durch Krümmung und zum anderen den mikroskopischen Widerstand durch das Rauheitsprofil der Oberfläche. Dies ergibt für den Gesamtwiderstand:

$$R_{ges} = R_{mic} + R_{mac} \quad (2)$$

Ausgeschrieben führt dies somit zu:

$$R_{ges} = \left(\frac{1}{1,57k} \right) \left(\frac{R_q}{m} \right) \left(\frac{H}{F_{nom}} \right) + \left(\frac{1 - (a_{mac}/b_{mac})^{1,5}}{2ka_{mac}} \right) \quad (3)$$

F_{nom} beschreibt die nominelle Kraft und der Geometrieparameter a_{mac} entspricht hierbei der Kontaktbreite und b_{mac} dem Probenradius (siehe Bahrami et al. 2004).

Insgesamt können die aufgezeigten Korrelationen für eine relativ schnelle Bestimmung des Wärmeübergangs genutzt werden. Die Ergebnisse sind allerdings nur als eine Abschätzung zu werten, da die getroffenen Annahmen, wie homogene

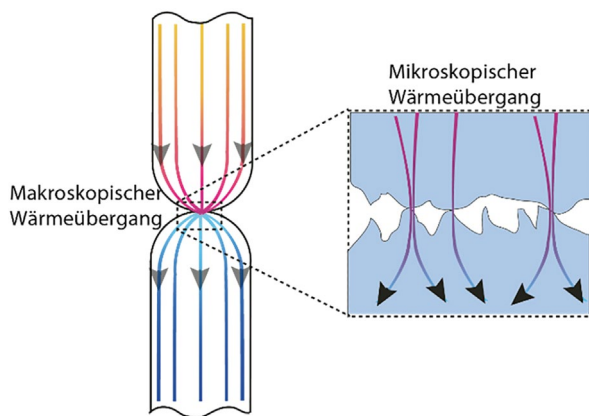


Abb. 2 Qualitative Darstellung der Kontaktgeometrie bei makroskopischen Unebenheiten nach (Helmig et al. 2022)

Verteilung der Kontaktstellen und vereinfachte Modellierung durch Wärmestromzylinder, zu einer Überschätzung des Wärmeübergangs führen.

Für eine Validierung der berechneten Werte sollten daher experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden. Hier stehen verschiedene Konzepte mit variierendem Aufwand zur Auswahl. Zwei davon werden im Folgenden vorgestellt.

4 Experimentelle Bestimmung von Kontaktwärmeübergangskoeffizienten

In den vergangenen Jahrzehnten wurden eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung von Kontaktwärmeübergangskoeffizienten entwickelt und getestet. Eine umfassende Übersicht dieser Methoden wird in der Arbeit von (Xian et al. 2018) vorgestellt und entsprechende Vor- und Nachteile der Methode sowie Größe und Kontext der untersuchten Materialien diskutiert.

Bezüglich Werkzeugmaschinen sind besondere zwei Ansätze von Interesse. Die erste vorgestellte Methodik ist wenig kostenintensiv, beinhaltet einen einfachen experimentellen Aufbau bei guter Genauigkeit und ist dementsprechenden für einen praxisnahen Einsatz in der Industrieanwendung geeignet. Der zweite Ansatz greift auf kostenintensive Infrarot-Messtechnik zurück, benötigt einen komplexeren Aufbau und ist demzufolge eher für einen grundlagenorientierten bzw. akademischen Einsatz geeignet.

Die erste Methodik ist in Abb. 3 dargestellt. Hier wird eine obere und untere Probe bei einer konstanten Last verpresst und ein definierter stationärer Wärmestrom aufprägt. Das resultierende stationäre Temperaturprofil (Abb. 3, rechts) wird anschließend genutzt, um den Kontaktwärmeübergangskoeffizient zu bestimmen. Die Wartezeiten für ein stationäres Temperaturprofil können dabei mehrere Stunden betragen. Für die Temperaturerfassung werden Thermoelemente entlang der Probenkörper platziert und der berechnete Temperaturgradient bis zur Kontaktstelle extrapoliert, um den Temperatursprung und den Wärmeübergang zu bestimmen. Allerdings reagiert dieses Verfahren empfindlich auf Messungenauigkeiten, dementsprechend ist auf eine möglichst exakte Positionierung der Messstellen und genaues Erfassen der jeweiligen Temperaturdaten zu achten. Deshalb sollte neben der Auswertung auch eine Unsicherheitsanalyse erfolgen, um die Genauigkeit des Ergebnisses einschätzen zu können.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt bei der einfachen und kostengünstigen Messtechnik, da lediglich Thermoelemente genutzt werden und keine leistungsstarke Mess- und Auswertemethodik benötigt wird. Eine ausführliche Beschreibung ist beispielsweise in der Arbeit von (Gopal 2013) zu finden.

Um die Nachteile einer langen Wartezeit der genannten Methodik zu kompensieren, wurde das oben genannte Konzept weiterentwickelt und ist folgend in Abb. 4 zu sehen.

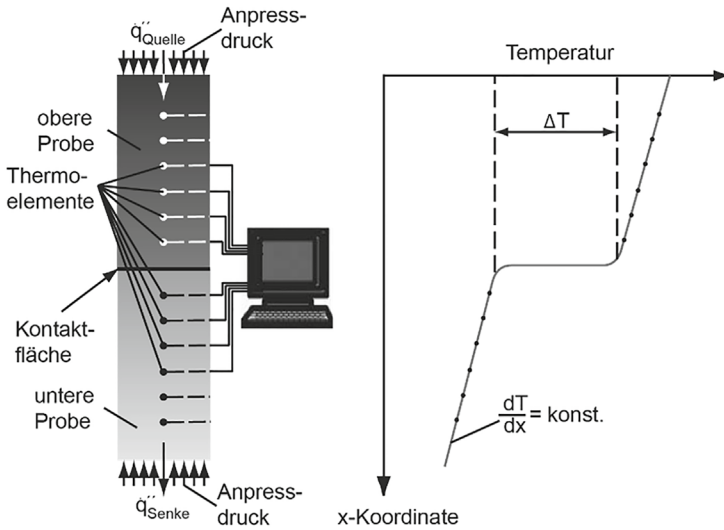


Abb. 3 Messaufbau zur stationären Bestimmung von Kontaktwärmübergangskoeffizienten (Fieberg und Kneer 2008)

Bei diesem Aufbau wird statt Thermoelementen eine High Speed Infrarotkamera eingesetzt, welche örtlich und zeitlich hochauflösende Temperaturinformation bereitstellt. Hierbei werden zunächst Proben mit vorher definierten Oberflächenparametern wie mittlere Flankensteigung und Rauigkeit hergestellt. Für die Untersuchung werden diese in die Prüfpresse eingespannt, auf unterschiedliche Temperaturniveaus vorgeheizt und anschließend miteinander verpresst. Der folgende transiente Temperaturausgleich der Proben wird mit der Infrarotkamera erfasst und anschließend in einem inversen Auswerteverfahren ausgewertet.

Das inverse Auswerteverfahren basiert auf der Lösung von thermischen Erhaltungsgleichungen. Durch Abgleich der simulierten Temperaturdaten mit gemessenen Werten erfolgt eine Optimierung der thermischen Randbedingung bis eine maximale Übereinstimmung zwischen numerischen und experimentellen Werten erreicht wird. Eine detaillierte Erläuterung der entwickelten Methode ist in der Arbeit von (Burghold et al. 2015) zu finden. Das inverse Auswerteverfahren ist dabei nicht nur auf den gewählten Pressenprüfstand beschränkt, sondern kann auf eine Vielzahl thermischer Probleme mit unbekannter Randbedingung im Bereich der Werkzeugmaschine angewandt werden (Ozisik 2002). Im Kontext von Werkzeugmaschinen ist hier z. B. der Transfer der Methode zur Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten bei Wälzkörpern und Lagerkomponenten zu nennen (Helmig et al. 2021).

Insgesamt ist die höhere Genauigkeit des Messverfahrens allerdings mit einem höheren, weitaus komplexeren Auswerteaufwand verbunden und erfordert eine hohe Expertise des durchführenden Ingenieurs, um Randeffekte und Fehlerquellen in der Auswertung und im Ergebnis korrekt einschätzen zu können.

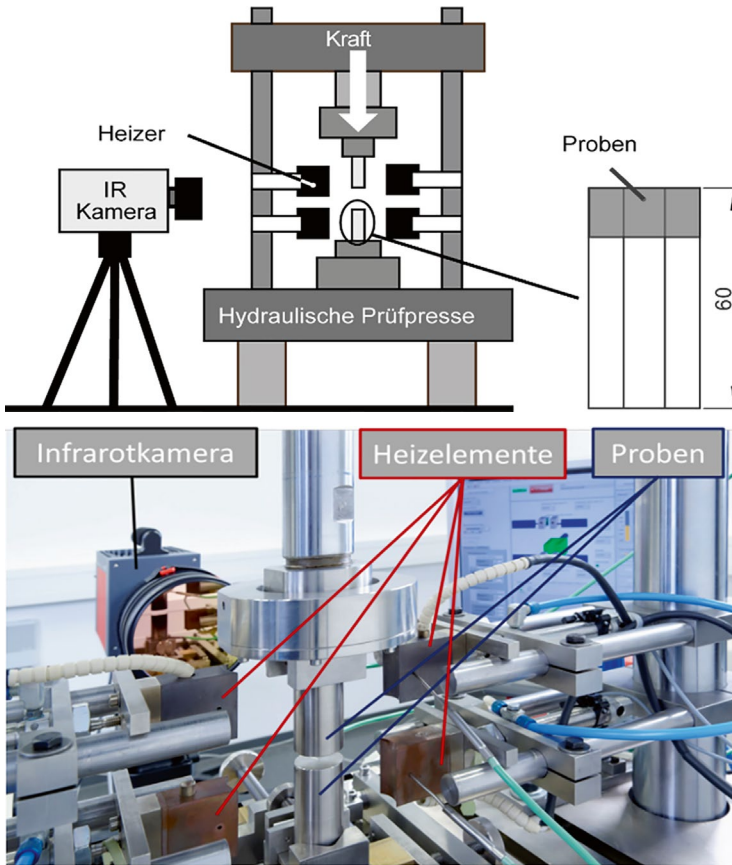


Abb. 4 Messaufbau zur instationären Bestimmung von Kontaktwärmübergangskoeffizienten (Burghold et al. 2015)

5 Numerische Bestimmung von Kontaktwärmübergangskoeffizienten

Die Entwicklung leistungsstarker Computersysteme in den vergangenen Jahren hat die Grundlage für numerische Lösungsansätze gelegt. Analog zu den bereits vorgestellten theoretisch-analytischen Ansätzen müssen auch in der Numerik die Hauptaspekte Oberflächengeometrie, Kontaktmechanik und Thermik berücksichtigt werden.

Nach derzeitigem Stand der Forschung sind wenige kommerzielle Softwaretools erhältlich, die alle drei Themenbereiche sowie deren Verknüpfung in einer zufriedenstellenden Genauigkeit abbilden (Frekers et al. 2017). Es existieren jedoch derzeit prototypische Ansätze. Auf die genauen mathematischen Zusammenhänge wird an dieser Stelle nicht im Detail eingegangen, sondern es werden

vielmehr die grundlegenden Herausforderungen bei der Modellentwicklung darstellt.

Oberflächengeometrie

Die Oberflächengeometrie stellt eine notwendige Eingangsgröße für mechanische Modellierung dar und kann entweder über statistische Ansätze generiert oder über real vermessene Oberflächen bestimmt werden. Letzteres hat eine höhere Genauigkeit, erfordert allerdings einen hohen Messaufwand sowie den Einsatz sehr kostenintensiver Oberflächenvermessungstechnik. Alternativ können isotrope Oberflächen mithilfe integraler Größen, wie Rauigkeit oder mittlere Flankensteigung generiert werden. Die generierten Oberflächen berücksichtigen allerdings nicht die fertigungstypische Rillenstrukturen real gefertigter Oberflächen und führen somit zu einem veränderten Ergebnis.

Mechanische Modellierung

Zur Bestimmung der Kontaktstellen und Geometrie für die thermische Modellierung muss zunächst die Oberflächenverformung berechnet werden. Dies kann z. B. mithilfe von Finite-Element-Methoden (FEM) erfolgen. Um die Rauheitsprofile und Oberflächengeometrie exakt abbilden zu können, ist jedoch eine hohe räumliche Auflösung der Kontaktpartner notwendig. Dies führt zu einer hohen Speicherlast und bedingt einen Kompromiss zwischen Auflösung und Größe des betrachteten Oberflächensegments, (Murashov et al. 2015) und (Sidaapa und Tariq 2020). Alternativ zur klassischen FE-Modellierung können auch elasto-plastische Halbraummodelle eingesetzt werden, welche die lokale Oberflächenhöhe z in Abhängigkeit der Ortskoordinaten x und y abbilden ($z = f(x, y)$). Diese Methode führt zu einer deutlichen Reduktion der Rechenzeit. Bezüglich ausführlicher Literatur sei hier auf die Arbeit von Willner (2004) und Goerke (2010) verwiesen.

Thermische Modellierung

Für die finale Bestimmung des Kontaktwärmeeübergangs wird die dreidimensionale Temperaturgleichung gelöst:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

Die Lösung von Wärmeleitproblemen stellt in den meisten kommerziellen Software Programmen eine moderate physikalische Herausforderung dar. Jedoch ist darauf zu achten, die Oberflächengeometrie mit einer hohen Zellauflösung abzubilden, um Ungenauigkeiten im resultierenden Temperaturfeld und daraus abgeleiteten Wärmeübergangskoeffizienten zu vermeiden. Abb. 5 zeigt hierzu einen exemplarischen Querschnitt des resultierenden Temperaturfelds aus einer dreidimensionalen Simulation.

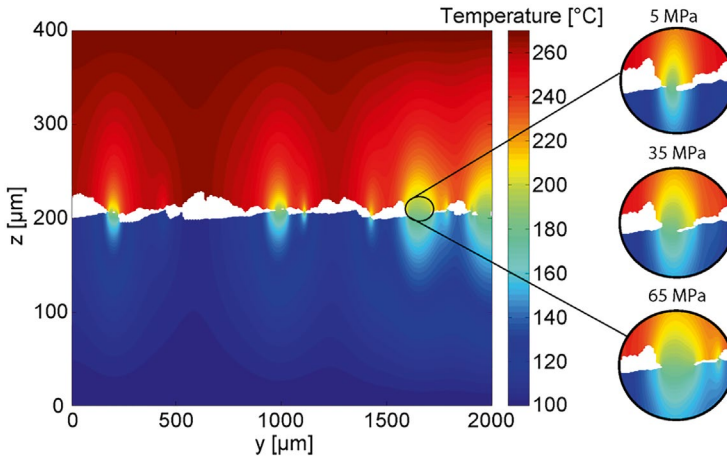


Abb. 5 Exemplarisches Temperaturprofil sowie der Lasteinfluss auf die Größe der Kontaktstellen für eine Pressung von 65 MPa (Frekers et al. 2017)

6 Vorstellung exemplarischer Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden repräsentative Ergebnisse aus theoretischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen von Kontaktwärmeübergängen vorgestellt und diskutiert. Diese sollen zunächst ein Gefühl für die Größenordnung und Verlauf geben.

6.1 Einfluss von Rauheit und Oberflächenausrichtung

Abb. 6 zeigt Kontaktwärmeübergänge einer exemplarischen Oberflächenpaarung mit einer Rauheit $R_q = 20 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit der aufgeprägten Last p . Deutlich erkennbar ist, dass die analytische Korrelation von Mikic (1974) im Vergleich zu numerischen und experimentellen Ergebnissen den Wärmeübergang erheblich überschätzt. Lediglich bei relativ geringen Lasten ($< 5 \text{ MPa}$) ist eine hohe Übereinstimmung erkennbar. Des Weiteren sind numerische Ergebnisse für generierte und real vermessene Oberflächen dargestellt. Bemerkenswert sind hierbei die deutlichen Unterschiede bei mittleren und hohen Lasten, welche auf die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen von generierten und gemessenen Oberflächen zurückzuführen sind. Theoretische Ansätze gehen von einer isotropen Oberflächenstruktur aus und können fertigungstechnisch bedingte Wellenstrukturen nicht abbilden.

Isotrope Oberflächen führen zu einer eher gleichmäßigen Verteilung der mikroskopischen Kontaktstellung im Gegensatz zu Oberflächen mit Wellenstrukturen.

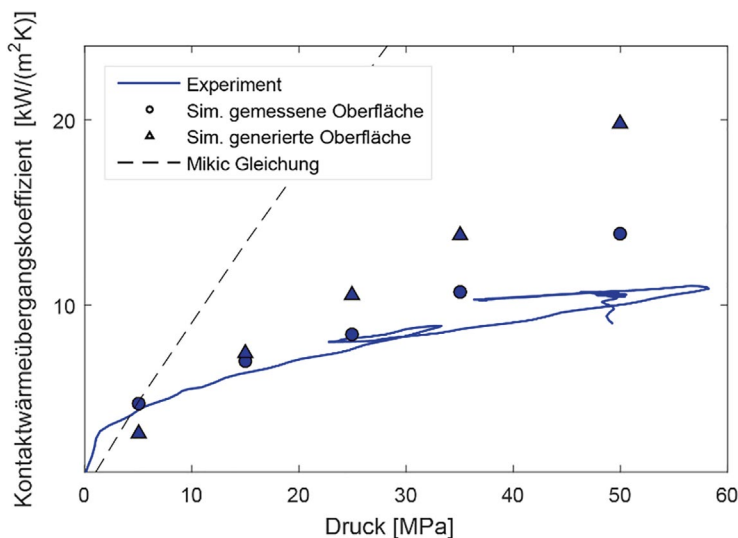


Abb. 6 Exemplarische Ergebnisse für experimentelle, numerische und analytisch bestimmte Kontaktwärmübergänge (Frekers et al. 2017)

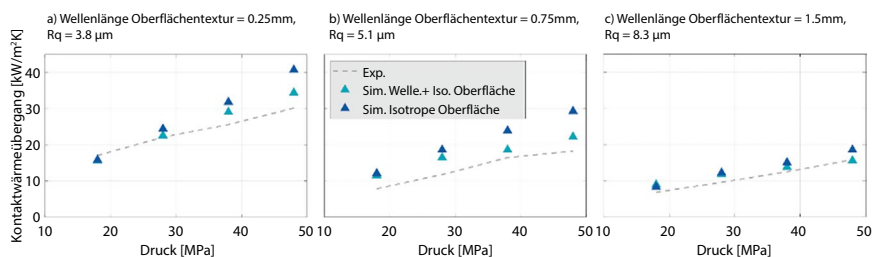


Abb. 7 Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Daten verschiedener Oberflächen-generierungsansätze (Helmig et al. 2021)

Dies führt letztendlich zu einer Überschätzung des Wärmeübergangs. Das Phänomen ist auch in Abb. 7 dargestellt, welche experimentelle Daten mit den numerischen Ergebnissen isotroper und strukturierter Oberflächen vergleicht. Die hier dargestellten experimentellen und numerischen Untersuchungen zeigen eine deutliche Abnahme des Wärmeübergangs mit steigender Oberflächenrauigkeit.

Des Weiteren existieren bei Oberflächen mit einer Wellenstruktur je nach Orientierung der Kontaktpartner verschiedene Eingriffsszenarien. Dies ist in Abb. 8 für experimentelle Untersuchungen von Oberflächen mit derselben Rauigkeit und variierender Orientierung der Oberflächenstrukturen gezeigt. Während in der linken Abbildung Oberflächen mit derselben Orientierung dargestellt sind, zeigt der rechte Teil Ergebnisse von Oberflächen mit einer gegensätzlichen Orientierung.

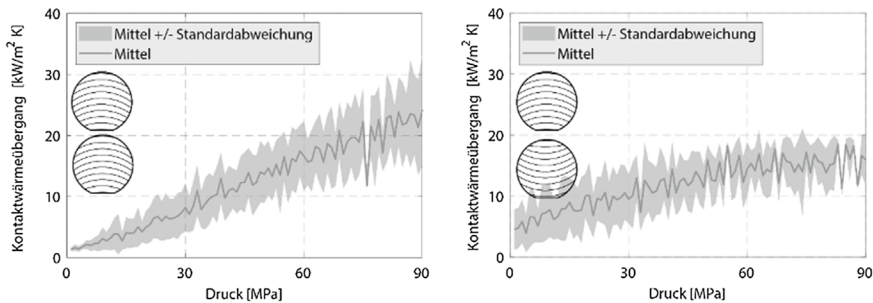


Abb. 8 Einfluss der Ausrichtung der Oberflächenstrukturen auf den Kontaktwärmeübergang (Helmig et al. 2020)

Diese weisen einen deutlich kleineren Wärmeübergang als Kontaktpaarungen mit gleicher Orientierung auf.

Insgesamt sollen diese exemplarischen Ergebnisse die Komplexität und das Zusammenspiel vieler Faktoren bei der Bestimmung des Kontaktwärmeübergangs verdeutlichen und unterstreichen, dass bereits viel wissenschaftliche Grundlagenarbeit in dieser Thematik erfolgt ist, jedoch bei der Bestimmung und Vorhersage dennoch Unsicherheiten auftreten können. Hinsichtlich der Anwendung auf die Werkzeugmaschine bieten die gewonnenen Erkenntnisse jedoch eine ausreichend hohe Genauigkeit, da eine Variation des Kontaktwärmeübergangs in den gezeigten Bereichen nur einen geringen Einfluss auf das resultierende Temperaturfeld hat.

6.2 Einfluss von Zwischenmedien

In den bisher dargestellten Ergebnissen werden insbesondere Kontaktwärmeübergänge ohne Zwischenmedien gezeigt. In vielen Bereichen der Werkzeugmaschine kommen allerdings Kühl- und/oder Schmierstoffe zwischen den Kontaktpartnern zum Einsatz, welche zu einer signifikant höheren Wärmeleitfähigkeit in den Kavitäten führen. Hierzu zeigt Abb. 9 experimentell und numerisch ermittelte Kontaktwärmeübergänge unter Berücksichtigung verschiedener Zwischenmedien wie Öle, Luft oder auch Wasser. Grundsätzlich zeigen Experiment und Simulation eine gute Übereinstimmung.

Der Einsatz von Zwischenmedien somit eine Möglichkeit, um den Wärmeübergang zwischen den einzelnen Komponenten zu erhöhen (Bräunig et al. 2019). Der Einsatz von Zwischenmedien soll hierbei jedoch nicht als universelles Mittel zur Erhöhung des Wärmeübergangs betrachtet werden. Insbesondere Öle unterliegen Alterungsprozesse und sollten dementsprechend regelmäßig erneuert werden. Bei hohen Temperaturen können außerdem Teile des Zwischenmediums verdampfen. Die signifikant kleinere Wärmeleitfähigkeit des Dampfes führt dann zu einem geringen Wärmeübergang.

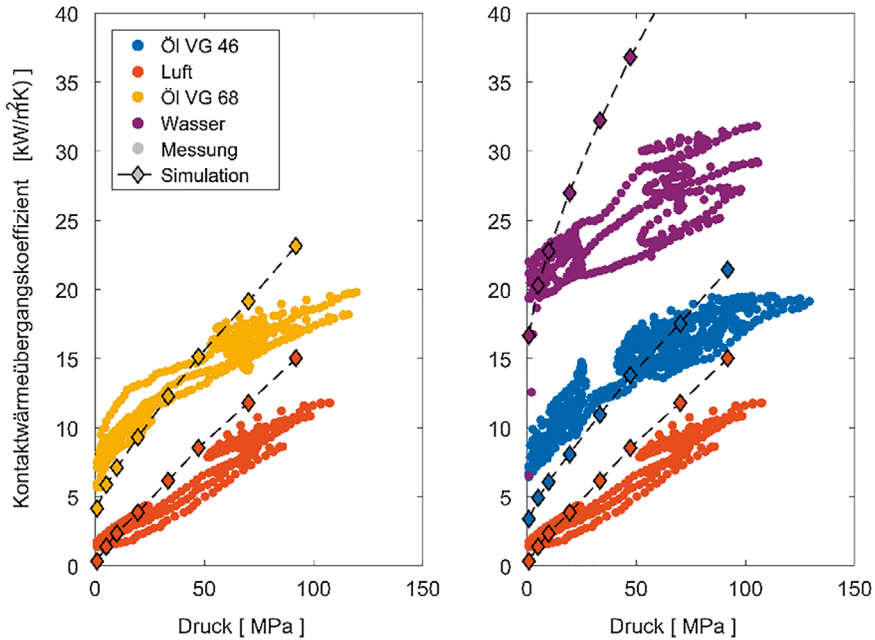


Abb. 9 Kontaktwärmeübergang in Abhängigkeit ausgewählter fluider Zwischenmedien (Frekers und Kneer 2018)

6.3 Einfluss von makroskopischer Krümmung

Als Letztes wird in diesem Kapitel der Einfluss von makroskopischen Unebenheiten auf den Gesamtwärmeübergang diskutiert. Neben dem thermischen Widerstand durch die Oberflächenrauheit wird durch die makroskopische Krümmung der Kontaktflächen ein weiterer thermischer Widerstand induziert. Dieser fließt als zusätzliche Größe in den Gesamtwärmeübergang ein. Dementsprechend gilt:

$$R_{ges} = R_{mac} + R_{mic} \quad (5)$$

Hier entspricht R_{ges} den Gesamtwiderstand, R_{mac} dem makroskopischen und R_{mic} den mikroskopischen Anteil.

Ergebnisse für variierende Krümmung und Drücke sind in Abb. 10 zu sehen. Die untersuchten Oberflächen weisen hierbei alle eine Rauheit von ca. $1,5 \mu\text{m}$ auf. Deutlich wird hier, dass in dem untersuchten Parameterbereich mikroskopischer und makroskopischer Wärmewiderstand in ähnlichen Teilen zum Gesamtwärmewiderstand beitragen. Während der makroskopische Widerstand kaum Veränderung durch eine Erhöhung der Last zeigt, kann beim mikroskopischen Widerstand eine deutliche Verringerung durch Lasterhöhung beobachtet werden.

Hinsichtlich des Einflusses des Oberflächenradius wird ein gegenteiliges Verhalten deutlich. Der makroskopische Widerstand zeigt einen leicht abfallenden

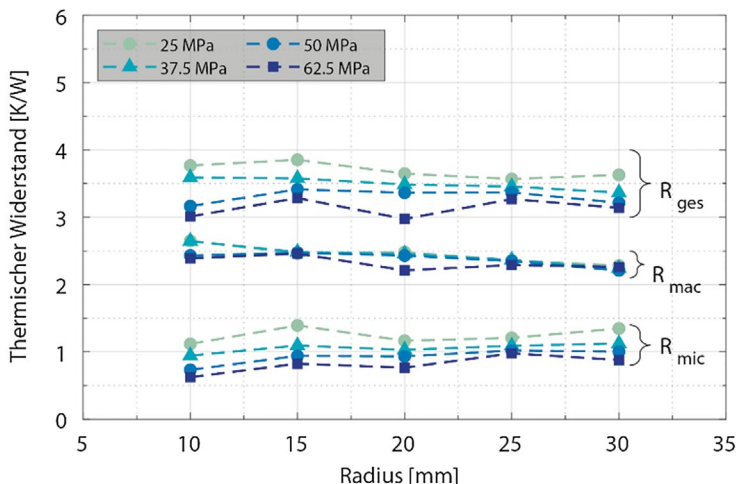


Abb. 10 Mikroskopische, makroskopische und Gesamtkontaktwiderstand als Funktion des Oberflächenradius und des applizierten nominellen Drucks (Helmig et al. 2022)

Trend bei höheren Radien, während beim mikroskopischen Widerstand aufgrund der Streuung der Werte zunächst kein eindeutiger Trend erkennbar ist. Insgesamt verdeutlicht Abb. 10, dass bei gekrümmten Oberflächenkontakten zusätzliche Widerstände entstehen, welche in derselben Größenordnung liegen wie der mikroskopische Widerstand. Bei der Modellierung von Gesamtmaschinen ist dementsprechend zu berücksichtigen, ob durch interne oder externe mechanische Lasten makroskopische Verformungen an Kontaktpaarungen auftreten können und diese zu einem höheren thermischen Gesamtwiderstand führen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Literatur existieren eine Vielzahl von theoretischen und analytischen Ansätzen zur Beschreibung der Kontaktwärmeübergänge. Aufgrund der getroffenen Annahmen überschätzen diese allerdings den realen Kontaktwärmeübergang häufig und können zu Ungenauigkeiten im Gesamtmodell führen. Alternativ können Literaturdaten aus bereits durchgeführten experimentellen Untersuchungen genutzt und zur Abschätzung des Wärmeübergangs angewandt werden. Für die individuelle Bestimmung von Kontaktwärmeübergängen wurden experimentelle Methoden vorgestellt. Der stationäre Aufbau mit taktilen Sensoren wie Thermoelementen kann mit verhältnismäßig wenig Konstruktions- und Kostenaufwand nachgebaut werden und bietet eine moderate Genauigkeit. Zudem existieren hierfür auch umfassende Literaturdaten.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sowohl Anpressdruck als auch die Wahl des Zwischenmediums wirkungsvolle Maßnahmen darstellen, um den Wärmeübergang zwischen einzelnen Maschinenkomponenten zu erhöhen. Für eine erste Abschätzung des Druckeinflusses können die gezeigten analytischen Korrelationen genutzt werden. Alternativ bieten experimentelle Ergebnisse von (Burghold et al. 2015; Frekers et al. 2017; Helmig et al. 2020) ein Nachschlagewerk. Für die Abschätzung des Einflusses fluider Zwischenmedien auf den Wärmeübergang kann auch vereinfachend zunächst auch ein linearer Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Zwischenmediums angenommen werden.

Literatur

- Bahrami MMYM, Culham JR, Yovanovich MM, Schneider GE (2004) Thermal contact resistance of nonconforming rough surfaces, part 2: thermal model. *J Thermophys Heat Transfer* 18(2):218–227
- Bräunig M et al (2019) Effects of cooling lubricant on the thermal regime in the working space of machine tools. *Procedia Manufacturing* 33(2019):327–334
- Burghold EM, Frekers Y, Kneer R (2015) Determination of time-dependent thermal contact conductance through IR-thermography. *Int J Therm Sci* 98:148–155
- Cooper MG, Mikic BB, Yovanovich MM (1969) Thermal contact conductance. *Int J Heat Mass Transf* 12(3):279–300
- Fieberg C, Kneer, R (2008) Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements. *Int J Heat Mass Transf* 51:1017–1023
- Frekers Y, Helmig T, Burghold EM, Kneer R (2017) A numerical approach for investigating thermal contact conductance. *Int J Therm Sci* 121:45–54
- Frekers Y, Kneer R (2018) Numerical investigation on the influence of interstitial fluids on thermal contact conductance. *International Heat Transfer Conference Digital Library*. Begel House Inc.
- Görke D (2010) Experimentelle und numerische Untersuchung des Normal- und Tangentialkontaktverhaltens rauer metallischer Oberflächen. Dissertation
- Gopal V, Whiting MJ, Chew JW, Mills S (2013) Thermal contact conductance and its dependence on load cycling. *Int J Heat Mass Transf* 66:444–450
- Helmig T, Burghold M, Al-Sibai F, Kneer R (2020) Investigating the influence of macroscopic surface structures on the thermal contact conductance using infrared thermography. *Proceedings of the 5th h World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT'20)*
- Helmig T, Göttlich T, Kneer R (2021) A novel approach to generate non-isotropic surfaces for numerical quantification of thermal contact conductance. *Submitted to the Eurotherm 2021 Conference*
- Helmig T, Göttlich T, Kneer R (2022) An infrared thermography based experimental method to quantify multiscale thermal resistances at non-conforming interfaces. *Int J Heat Mass Transf* 186:122399
- Mikić BB (1974) Thermal contact conductance; theoretical considerations. *Int J Heat Mass Transf* 17(2):205–214
- Murashov MV, Panin SD (2015) Numerical modelling of contact heat transfer problem with work hardened rough surfaces. *Int J Heat Mass Transf* 90:72–80
- Ozisik MN, Orlande HRB, Kassab AJ (2002) Inverse heat transfer: fundamentals and applications. *Appl Mech Rev* 55(1):B18–B19

- Siddappa PG, Tariq A (2020) Contact area and thermal conductance estimation based on the actual surface roughness measurement. *Tribol Int* 148:106358
- Willner K (2004) Elasto-plastic normal contact of three-dimensional fractal surfaces using half-space theory. *J Trib* 126(1):28–33
- Xian Y, Zhang P, Zhai S, Yuan P, Yang D (2018) Experimental characterization methods for thermal contact resistance: a review. *Appl Therm Eng* 130:1530–1548

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

