ETH zürich

ETH Library

Modelling Every Wear: In Silico, In Vitro, and In Vivo Approaches to Predict Wear of Knee Implants

Doctoral Thesis

Author(s):
Dreyer, Michael J.

Publication date:
2023

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000640649

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH NO. 29574

Modelling Every Wear: *In Silico*, *In Vitro*, and *In Vivo* Approaches to Predict Wear of Knee Implants

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES
(Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

MICHAEL JOSEPH DREYER

MSc ETH Mechanical Engineering, ETH Zurich

born on 30.10.1994

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. William R. Taylor
Bernhard Weisse
Dr. Jörn Seebeck

2023

Summary

Total Knee Arthroplasty is a common surgical procedure for managing arthritis, providing pain relief and improved functionality to patients through implantation of a joint replacement. However, wear of the polyethylene (PE) inlay of knee implants poses clinical challenges, including the potential for implant failure and revision surgeries. Not only understanding, but also the ability to predict wear outcomes in knee implants is crucial for guiding implant design, regulatory approval, and clinical decision making. *In vitro* wear simulations are realistic, but slow and laborious, while *in silico* modelling is fast and accessible, but limited by model sensitivity and lack of input data. In this work, we applied these complementary approaches to "modelling every wear": We fitted statistical models to *in vivo* wear outcomes, performed *in vitro* testing, and built state-of-the-art computational wear models. Across these domains, we provide novel tools and realistic data, striving towards accurate predictions of *in vivo* PE wear.

To provide realistic and practically usable input data for experimental testing, we generated a representative summary of the CAMS-Knee datasets, the largest collection of knee implant kinematics and tibiofemoral contact loads measured *in vivo* for six subjects and five activities. The loads of the created standardized subject “Stan” are similar to earlier datasets, but valuably complemented by synchronized kinematics. Compared to the ISO 14243 standard loads, Stan’s loads are up to +56% higher, while the kinematics exhibit markedly different curve shapes. Application of Stan’s kinematics and the ISO standard loads to a knee simulator wear test revealed not only visibly different wear locations on the articulating surface, but also approximately three times higher wear rates for Stan’s boundary conditions. While further testing under Stan’s conditions is necessary to substantiate this, these initial results indicate that the ISO standards may not be fully representative of *in vivo* loading and damage.

In a different experiment, we performed an array of pin-on-disk tests to quantify the influence of contact pressure and cross-shear, i.e. multidirectional sliding, on the mechanism and volume of PE wear. Wear was found to strongly increase when going from unidirectional to multidirectional sliding and, contrary to the classical Archard law, not proportionally increase with increasing contact pressure, but increase less at higher pressures. This was due to the formation of hardened protrusions on the PE surface at higher pressures, which afford some protection of the surface. To the wear results, an empirical model of PE wear as a function of cross-shear and contact pressure was fitted to serve as input data for computational wear models.

The empirical PE wear model was then used as input to a computational wear prediction algorithm based on finite-element models of the implant under physiological load and motion. This algorithm can model the change in surface geometry due to nonlinear wear and long-term plastic creep of the PE, the following change in contact mechanics, and the resulting interaction with subsequent wear damage. Verification and validation were carried out against the knee simulator test with the Stan and ISO boundary conditions. While a force-controlled ISO model was unable to mirror the bench test kinematics and thus wear rate, displacement-controlled models accurately predicted experimental wear rates for both ISO and Stan boundary conditions. This analysis confirmed that *in silico* wear models are very

sensitive to even small errors in relative tibiofemoral motion, and that accurate reproduction of *in vivo* joint kinematics is crucial while some deviation of the contact loads may be permissible.

If *in vivo* contact kinematics can be modelled, realistic computational predictions of implant wear are thus possible. To this end, we developed a novel technique to control the load and kinematic boundary conditions applied to computational models of joints. In the combined Load- and Displacement-Controlled method with Springs (LDCS), joint contact loads are applied to the model components directly. Then, motions are applied in the same directions as the loads, which would be not possible with conventional control methods. This is achieved by applying the motions through nonlinear springs, which mediate a balance between the applied loads and kinematics and also prevent propagation of any measurement noise present in the joint kinematics to the contact locations. The LDCS method reduced load and motion errors by a factor of two or more compared to conventional approaches and thus presents clear advantages for modelling tibiofemoral contact and wear.

Lastly, we analysed inlays retrieved from revision surgery to quantify *in vivo* wear, not only providing comparative data for *in silico* and *in vitro* wear simulations, but also providing direct evidence of the effect of clinical parameters like choice of implant design and mechanical axis limb alignment on personal wear outcomes. To this end, we validated and employed a surface reconstruction approach to obtain the distribution and volume of wear on the articulating surface of the polyethylene inlays. We found that rotating-platform inlays experienced a significant 39% lower wear rates *in situ* than fixed-bearing implants, likely due to the rotational freedom which mediates alignment of a rotating inlay to the femoral component, thus reducing contact stresses and motion. Limb alignment, on the other hand, was only non-significantly related to overall wear rates, though there was a slight trend of varus-aligned specimens showing more wear damage. However, limb alignment did significantly alter the mediolateral distribution of wear, with varus alignment resulting in predominantly medial compartment wear. Our analysis also revealed considerable inter-patient variability, likely due to patient-specific factors like level of activity which were not included in our statistical model.

In summary, this research has both added to the wear prediction toolbox by providing validated computational tools and has presented novel *in vivo* data to enable and validate wear simulations. With Stan, we have provided input data for experimental and computational knee implant wear simulations, where we also found *in silico* wear models to be sensitive to errors in joint kinematics. With the LDCS method, we provided a modelling technique to drastically reduce such errors when replicating *in vivo* joint kinematics in a computational model. Lastly, investigating how various parameters affect PE wear, we found contact pressure and multidirectional sliding as well as limb alignment and implant design to influence wear outcomes.

Further experimental and computational studies aiming to truly predict *in vivo* wear should attempt to account for the observed variability between patients and the sensitivity of models to changed input conditions by including multiple patients, activities, and repetitions in simulations of implant wear driven by accurate joint kinematics.

Zusammenfassung

Die totale Kniearthroplastik ist ein gängiger chirurgischer Eingriff zur Behandlung von Arthritis, der den Patienten Schmerzlinderung und verbesserte Funktionalität durch die Implantation eines Gelenkersatzes bietet. Allerdings stellt Verschleiss der Polyethylen (PE) Inlays von Knieimplantaten klinische Herausforderungen dar, einschliesslich des potenziellen Versagens des Implantats und notwendiger Revisionseingriffe. Nicht nur ein Verständnis, sondern auch die Fähigkeit zur Vorhersage des Verschleisses bei Knieimplantaten ist entscheidend für die Entwicklung von Implantaten, regulatorische Zulassung und klinische Entscheidungsfindung. *In vitro* Verschleissversuche sind realistisch, aber langsam und aufwändig, während *in silico* Modellierung schnell und zugänglich ist, jedoch durch Modellsensitivität und Mangel an Inputdaten limitiert ist. In dieser Arbeit wurden diese komplementären Ansätze zur Modellierung von Verschleiss angewendet: *In vivo* Verschleissergebnisse wurden statistisch modelliert, *in vitro* Tests durchgeführt und rechnerische Verschleissmodelle erstellt. In all diesen Bereichen präsentieren wir neuartige Methoden und realistische Daten, mit dem Ziel, genaue Vorhersagen über *in vivo* PE Verschleiss zu ermöglichen.

Um realistische und praktisch anwendbare Inputdaten für experimentelle Tests bereitzustellen, wurde eine repräsentative Zusammenfassung der CAMS-Knie-Datensätze erstellt, der grössten Sammlung von Knieimplantat-Kinematiken und tibiofemoralen Kontaktlasten, gemessen *in vivo* bei sechs Probanden und fünf Aktivitäten. Die Lasten des so erstellten standardisierten Probanden "Stan" ähneln früheren Datensätzen, werden aber durch synchronisierte Kinematiken wertvoll ergänzt. Im Vergleich zu den ISO 14243 Standardlasten sind Stans Lasten bis zu +56% höher, während die Kinematik deutlich unterschiedliche Kurvenformen aufweist. Die Anwendung von Stans Kinematik und der ISO Standardlasten auf einen Knie-Simulator-Verschleisstest zeigte nicht nur sichtbar unterschiedliche Verschleissstellen auf der Oberfläche, sondern auch etwa dreimal höhere Verschleissraten unter Stans Randbedingungen. Obwohl weitere Tests unter Stans Bedingungen notwendig sind, um dies zu bestätigen, deuten diese ersten Ergebnisse darauf hin, dass die ISO-Standards möglicherweise nicht vollständig repräsentativ für *in vivo* Belastungen und Schäden sind.

In einem weiteren Experiment wurde eine Reihe von Pin-on-Disk-Tests durchgeführt, um den Einfluss von Kontaktdruck und Cross-Shear, also multidirektionaler Relativbewegung, auf den Mechanismus und das Volumen des PE-Verschleisses zu quantifizieren. Der Verschleiss nahm beim Übergang von unidirektionalem zu multidirektionalem Gleiten stark zu und stieg entgegen dem klassischen Archard-Gesetz nicht proportional mit steigendem Kontaktdruck, sondern weniger stark bei höheren Drücken. Dies war zurückzuführen auf die Bildung von verhärteten Erhebungen auf der PE-Oberfläche bei höheren Drücken, die einen gewissen Schutz der Oberfläche darstellten. An die Verschleisswerte wurde eine empirische Funktion für PE-Verschleisse als Funktion von Cross-Shear und Kontaktdruck angepasst, die als Input für rechnerische Verschleissmodelle dienen kann.

Das empirische PE-Verschleissmodell wurde dann als Input für einen rechnerischen Verschleissvorhersagealgorithmus verwendet, der auf Finite Elemente Modellen des Implantats unter physiologischer Belastung und Bewegung basiert. Dieser

Algorithmus kann die Veränderung der Oberflächengeometrie aufgrund von nichtlinearem Verschleiss und langfristigem plastischem Kriechen des PE, die daraus resultierende Änderung in der Kontaktmechanik und die daraus resultierende Wechselwirkung mit nachfolgenden Verschleissschäden modellieren. Verifizierung und Validierung wurden gegen die Knie-Simulator-Tests mit den Stan und ISO Randbedingungen durchgeführt. Während ein kraftgesteuertes ISO-Modell nicht in der Lage war, die Kinematik und somit Verschleissrate, die im Versuch gemessen wurden, zu reproduzieren, konnten weggesteuerte Modelle die experimentellen Verschleissraten sowohl für ISO als auch für Stan Inputs genau vorhersagen. Diese Analyse bestätigte, dass *in silico* Verschleissmodelle sehr empfindlich auf selbst kleine Fehler in der relativen Tibiofemoralbewegung reagieren und dass eine genaue Reproduktion der *in vivo* Gelenkkinematik massgeblich ist, während eine gewisse Abweichung der Kontaktlasten zulässig sein kann.

Wenn die *in vivo* Kontaktbedingungen modelliert werden können, sind realistische rechnerische Vorhersagen des Implantatverschleisses möglich. Zu diesem Zweck haben wir eine neue Technik zum Aufbringen der Last- und Bewegungs-Randbedingungen entwickelt, mit denen Computermodelle von Gelenken gesteuert werden. In der kombinierten "Load- and Displacement-Controlled method with Springs" (LDCS) werden Gelenkkontaktlasten direkt auf die Komponenten im Modell aufgebracht. Anschliessend werden Bewegungen entlang der gleichen Richtungen wie die Lasten aufgebracht, was mit herkömmlichen Steuerungsmethoden nicht möglich wäre. Dies wird erreicht, indem die Bewegungen durch nichtlineare Federn aufgebracht werden, die ein Gleichgewicht zwischen den aufgebrachten Lasten und Kinematiken herstellen und auch ein Fortpflanzen von eventuell vorhandenem Messrauschen in der Gelenkkinematik zu den Kontaktpunkten verhindern. Die LDCS-Methode reduzierte Last- und Bewegungsfehler um einen Faktor von zwei oder mehr im Vergleich zu herkömmlichen Ansätzen und bietet damit klare Vorteile für die Modellierung von Tibiofemoral-Kontakt und Verschleiss.

Zuletzt wurden Inlay-Retrievals, die bei Revisionsoperationen entnommen wurden, analysiert, um den *in vivo* Verschleiss zu quantifizieren. Somit wurden nicht nur Vergleichsdaten für *in silico* und *in vitro* Verschleisssimulationen bereitgestellt, sondern auch direkte Nachweise für die Effekte von klinischen Parametern wie der Wahl des Implantatdesigns und der mechanischen Achsausrichtung des Knies auf patientenspezifischen Verschleiss erbracht. Zu diesem Zweck wurde eine Methode zur Rekonstruktion der unbeschädigten Oberfläche validiert und verwendet um die Verteilung und das Volumen des Verschleisses auf der Oberfläche der PE Retrievals zu ermitteln. Wir stellten fest, dass Rotating-Platform Inlays *in situ* eine um signifikant niedrigere (-39%) Verschleissrate aufwiesen als Fixed-Bearing Inlays, wahrscheinlich aufgrund der frei möglichen Rotation, die eine Ausrichtung des drehbaren Inlays zur Femurkomponente ermöglicht, wodurch Kontaktspannungen und Relativbewegungen reduziert werden. Die Achsausrichtung des Beins hingegen hatte nur einen nicht-signifikanten Effekt auf die Verschleissrate, auch wenn es einen leichten Trend gab, dass Varus-ausgerichtete Inlays mehr Verschleiss zeigten. Allerdings veränderte die Achsausrichtung des Beins signifikant die mediolaterale Verteilung des Verschleisses, wobei Varus-Ausrichtung hauptsächlich medialen Verschleiss verursachte. Unsere Analyse offenbarte auch erhebliche Variabilität zwischen Patienten, wahrscheinlich aufgrund patientenspezifischer Faktoren wie Aktivitätsniveau, die in unserem statistischen Modell nicht berücksichtigt wurden.

Zusammenfassend hat diese Forschungsarbeit sowohl validierte rechnerische Werkzeuge zur Vorhersage von Verschleiss beigetragen als auch neuartige *in vivo* Daten präsentiert, um Verschleisssimulationen zu ermöglichen und zu validieren. Mit Stan haben wir Inputdaten für experimentelle und rechnerische Knieimplantat-Verschleisssimulationen bereitgestellt. Dabei wurde auch festgestellt, dass *in silico* Verschleissmodelle empfindlich auf Fehler in der Gelenkkinematik reagieren. Mit der LDCS-Methode haben wir eine Modellierungstechnik zur Verfügung gestellt, um solche Fehler bei der Reproduktion der *in vivo* Gelenkkinematik in einem rechnerischen Modell drastisch zu reduzieren. Schliesslich haben wir bei der Untersuchung wie verschiedene Parameter den PE-Verschleiss beeinflussen festgestellt, dass Kontaktdruck und multidirektionale Relativbewegung sowie die Achsausrichtung des Beins und das Design des Implantats die Verschleissrate beeinflussen.

Künftige experimentelle und rechnerische Studien, die darauf abzielen, *in vivo* Verschleiss vorherzusagen, sollten nach Möglichkeit die beobachtete Variabilität zwischen den Patienten und die Sensitivität der Modelle auf veränderte Inputbedingungen berücksichtigen, indem sie mehrere Patienten, Aktivitäten und Wiederholungen in Simulationen des Implantatverschleisses, gesteuert durch genaue Gelenkbewegungen, einbeziehen.