

R. Fehrenbacher; A. Jörger; K. Bause; S. Ott, A. Albers

## **Topografieänderungen während der Vorkonditionierung: Eine Analyse des Zusammenhangs der Oberflächenbeschaffenheit und deren Kenngrößen von trockenlaufenden Reibpaarungen**

### **Zusammenfassung:**

Die Beurteilung des Fortschrittes eines Vorkonditionierungsvorganges wird bei der Industrie vorwiegend auf Grundlage der Reibungszahlverläufe über die Anzahl der durchgeführten Schaltungen ausgesprochen. Auf jener Basis getätigte Bewertungen werden in diesen Forschungsarbeiten um eine Begutachtung der Oberflächenbeschaffenheit erweitert. Hierzu werden verschiedene Reibpaarungen einer hohen Anzahl an Bremsschaltungen unter divergenten Beanspruchungskollektiven unterzogen und dabei zyklensweise detaillierte 3-D-Aufnahmen der Oberflächentopografie an mehreren Stellen der Reibflächen vorgenommen. Die daraus gewonnenen Informationen bilden unter anderem die Basis, um gängige Profilparameter aus den Oberflächendaten abzuleiten und deren Korrelation zu der Reibungszahl sowie deren Verlauf zu beurteilen. Des Weiteren wird das Fundament zum Aufbau völlig neuer Beurteilungskriterien einer erfolgreichen Vorkonditionierung aufgezeigt und somit Möglichkeiten zur Beschleunigung des Verfahrens erbracht.

### **Abstract:**

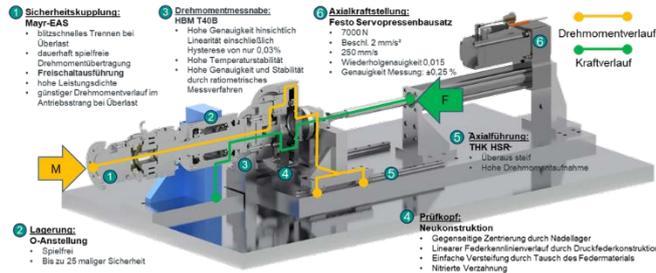
The assessment of the progress of a preconditioning process is mainly made in the industry based on the friction coefficient curves over the number of cycles completed. Assessments made on that basis are extended in this research work to include an assessment of the surface condition. For this purpose, various friction pairings are subjected to a high number of braking operations under divergent stress collectives, and detailed 3-D images of the surface topography are taken at several points on the friction surfaces on a cycle-by-cycle basis. Among other things, the information obtained from this work forms the basis for deriving typical profile parameters from the surface data and assessing their correlation to the coefficient of friction and its progression. Furthermore, the foundation for the construction of entirely new evaluation criteria of successful preconditioning is shown, and thus possibilities for the acceleration of the process are provided.

### **Einleitung:**

Der Bedarf an kompakten Kupplungs- und Bremssystemen steigt. Diese Systeme sorgen beispielsweise bei Werkzeugmaschinen, Fertigungsstraßen, im Bergbau und vor allem im Bereich der Personenbeförderung für Sicherheit und Zuverlässigkeit. Auch in Ressorts wie der Energiewandlung durch Windkraft, der Abwassertechnik oder in der Medizintechnik gewinnen Kupplungs- und Bremssysteme zunehmend an Bedeutung. Ein wichtiger Aspekt dieser Systeme ist neben der Zuverlässigkeit ein über die Betriebsdauer gleichbleibendes Reibverhalten. Vor allem fabrikneue Reibpaarungen sind durch Fertigungstoleranzen, Lagerung sowie Transport und die Umgebungskonstruktion toleranzbehaftet was Vorkonditionierungsprozesse aus funktionaler Sicht eigentlich unabdingbar macht. Die Bewertung solcher Prozesse wird im Allgemeinen jedoch nur undurchsichtig durch Beurteilungen anhand von Reibungszahlverläufen über verschiedene Formen des Energieeintrages in die Reibpaarung angegeben. Diese Energieeinträge können durch mehrere hintereinandergeschaltete Bremszyklen oder Dauerschlupf erfolgen. Eine Standardisierung existiert weder bei Art sowie Höhe des Energieeintrags noch bei der Beurteilung der erfolgreich beendeten Vorkonditionierung. Bei Letzterem hat sich dennoch die Bewertung des Verlaufs der Reibungszahl sowie dessen Annäherung an einen konstanten Wert über die Schaltungsanzahl etabliert. Dies jedoch ohne Beleuchtung der dahintersteckenden Mechanismen. Diese Forschungsarbeiten zielen darauf ab, einen ersten Schritt zur Untersuchung der auf den Reiboberflächen stattfindenden Vorgänge während der Vorkonditionierung zu begehen. Es werden dabei die Zusammenhänge der Verläufe von Reibungszahl, Topologie-Änderungen und den daraus berechneten Werten von Oberflächenparametern gezogen, indem die Reibflächen mehrere Systemvarianten unter unterschiedlichen Belastungskollektiven während eines typischen Einlaufvorganges analysiert werden.

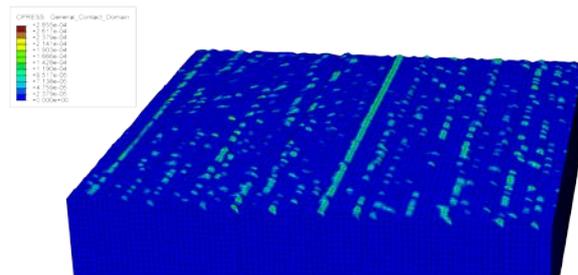
**Hilfsmittel und Methodik:**

Zur Vorkonditionierung wird während dieser Forschungsarbeiten eine speziell hierfür konstruierte Untersuchungsumgebung an einem Prüfstand des IPEK-Instituts für Produktentwicklung verwendet (Abbildung 1). Neben einem steifen Strukturaufbau werden zur Minimierung von Messfehlern sämtliche Sensoren in Nähe des Friktionskontaktes positioniert. Der Energieeintrag erfolgt durch präzise steuerbare Elektromotoren, welche durch ein Massenträgheitssimulationsmodell angesteuert werden. Zur Untersuchung der Reibflächen und deren Topografie wird ein Weißlichtinterferometer mit hoher Auflösung verwendet. Die auf dieser Apparatur gewonnenen Daten dienen als Grundlage unterschiedlicher Auswertemethoden und zur Berechnung gängiger Oberflächenprofilparameter. Zudem können anhand der aufgenommenen Details FEM-Simulationen aufgebaut werden, die mit weiteren Materialdaten eine in-situ-Betrachtung des Reibkontaktes ermöglichen, um somit Traganteile und deren Änderungen während der Vorkonditionierung zu beobachten. Abbildung 2 zeigt das Modell zur in-situ Kontaktanalyse. Die Reib- und Gegenreibe sind dabei auf Basis der mit dem Weißlichtinterferometer gemessenen Oberflächenprofile digitalisiert und vernetzt worden. Diese Messdaten und Modelle werden dem am Prüfstand gemessenen Reibungszahlverlauf gegenübergestellt, um mögliche Kausalitäten abzuleiten.



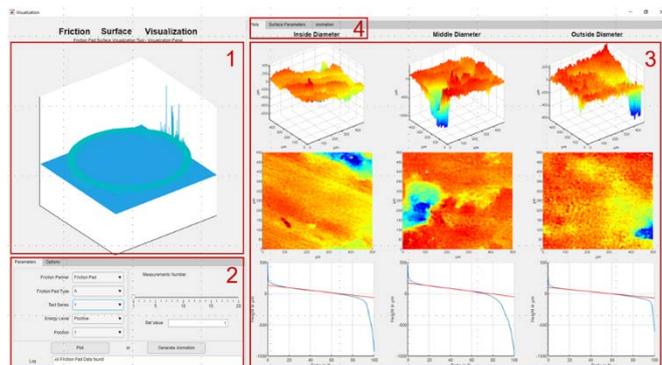
**Abbildung 1 Untersuchungsumgebung zur Vorkonditionierung der Proben**

hoher Auflösung verwendet. Die auf dieser Apparatur gewonnenen Daten dienen als Grundlage unterschiedlicher Auswertemethoden und zur Berechnung gängiger Oberflächenprofilparameter. Zudem können anhand der aufgenommenen Details FEM-Simulationen aufgebaut werden, die mit weiteren Materialdaten eine in-situ-Betrachtung des Reibkontaktes ermöglichen, um somit Traganteile und deren Änderungen während der Vorkonditionierung zu beobachten. Abbildung 2 zeigt das Modell zur in-situ Kontaktanalyse. Die Reib- und Gegenreibe sind dabei auf Basis der mit dem Weißlichtinterferometer gemessenen Oberflächenprofile digitalisiert und vernetzt worden. Diese Messdaten und Modelle werden dem am Prüfstand gemessenen Reibungszahlverlauf gegenübergestellt, um mögliche Kausalitäten abzuleiten.



**Abbildung 2 Kontaktverteilung der Gegenreibe**

Aufgrund der großen Datenmenge und der angestrebten Korrelation zwischen den Reibungszahlen, der Oberfläche sowie der korrespondierenden Kennwerte wurde von den Autoren eine Methode zur Visualisierung der Messergebnisse erarbeitet. (Abbildung 3) Um eine niederschwellige Anwendbarkeit zu ermöglichen, wurde diese in einem Softwaretool mit einer hinterlegten Datenbank zur Speicherung der Oberflächendaten und den daraus abgeleiteten Profilparameter operationalisiert. Neben der Möglichkeit zur Animation der 3-D-Oberflächendaten verschiedener Messpunkte und einer darauf aufbauenden chronologischen Abfolge der Oberflächenstrukturen steht die Begutachtung der Oberflächenkennwerte und deren Relationen zu den Minimal- und Maximalwerten im Vordergrund. Das Softwaretool verfügt weiter über eine Eingabemaske, welches in der Lage ist, dem Bediener mit geringem Aufwand gewünschte Aufnahmen unter Berücksichtigung der Position und des



**Abbildung 3 Topografiedarstellung dreier Messflächen eines Belages (1: Gesamtdarstellung des Belages, 2: Auswahlbereich der Messung, 3: Anzeige der Oberflächen (Innen, Mitte, Außen), 4: Ansichtswahl über Registerkarten (Oberfläche, Oberflächenkennwerte, Animation))**

Fortschritts des Vorkonditionierungsprozesses anzuzeigen. Gleichzeitig ist dieses Werkzeug in der Lage, relevante Oberflächenkennwerte über Messwolken zu berechnen und Abottkurven (Materialanteilskurven) der gemessenen Bereiche aufzuzeigen.

Die Untersuchungsmethodik teilt sich in mehrere Teilgebiete. Zunächst erfolgt die tatsächliche Vorkonditionierung durch Bremsschaltungen am Prüfstand. Die Anzahl an Schaltungen und somit die Spannen der Untersuchungsintervalle sind während des Versuchsverlaufs des gesamten Vorkonditionierungsprozesses individuell gestaltet. Neuralgische Phasen wie zu Beginn des Prozesses werden in kurzen Messabständen untersucht. Im Gegensatz dazu, so die Erfahrung, werden nach mehreren Hunderten absolvierten Zyklen keine größeren Änderungen erwartet und die Anzahl an aufeinanderfolgenden Bremsungen zwischen den Oberflächenaufnahmen erhöht. Die Untersuchungen erfolgten an mehreren Systemen bei gleicher Eingangsparameterkombination, um eine höhere Brauchbarkeit der Ergebnisse zu erreichen. Nach jedem Versuchsintervall folgen hochauflösende Messungen mit Punktabständen von 2  $\mu\text{m}$  am Weißlichtinterferometer. Bei diesen Untersuchungen werden unterschiedliche Positionen der Oberflächen des Belages und der Gegenreibe aufgenommen. Die Lokalisierung der Messflächen erfolgte hinsichtlich erwartbarer inhomogener Belastungszustände über die komplette Reibbelagsbreite [1]. Die Punkte sind dabei so gewählt, dass die Radien der Messfelder des Belages mit denen der Gegenreibe exakt übereinstimmen. Untersucht wurden unterschiedliche Reibmaterialien mit identischen Abmessungen, die sich vor allem in Bezug auf ihre Steifigkeiten unterscheiden.

Die initialen Belastungsparameter (Energieeintrag, Drehzahl, Flächenpressung) wurden durch Versuche bei ähnlichen Forschungsvorhaben mit entsprechenden Reibmaterialien und darauffolgenden Ergebnisauswertungen von Vorversuchen zu Beginn der Arbeiten definiert. Zudem flossen Erfahrungen und gängige Werte der Industrie mit ein.

### Ergebnisse:

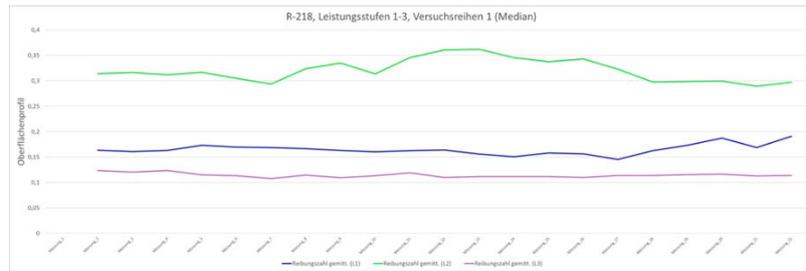
Zur Ergebnisdarstellung kann ebenfalls oben erwähntes Softwaretool herangezogen werden. Dabei können Matrizen aufgebaut werden die Oberflächenkennwerte derartig anordnen, sodass ein direkter Vergleich zwischen unterschiedlichen Belägen und Belastungskollektiven mit Diagrammen ermöglicht wird. (Abbildung 4 – Abbildung 6

Die Untersuchungsergebnisse der Oberflächenparameter legen nahe, dass im Allgemeinen während des Vorkonditionierungsprozesses eine Einglättung stattfindet. Hierfür sprechen vor allem die Werte des arithmetischen (exemplarisch in Abbildung 4) oder des quadratischen Mittenrauwertes. Der Verlauf der Reibungszahl steigt im Laufe des Vorkonditionierungsprozesses über alle Leistungsstufen tendenziell an (Abbildung 5). Neben dem arithmetischen Mittenrauwertes ( $R_a$ ) wurden viele weitere Oberflächenkennwerte auf deren Entwicklung und Wechselwirkung mit denen der Reibungszahlen verglichen. Ein Wert, dessen Geltung für die Bewertung des Einlaufes höher anzusetzen ist, ist die



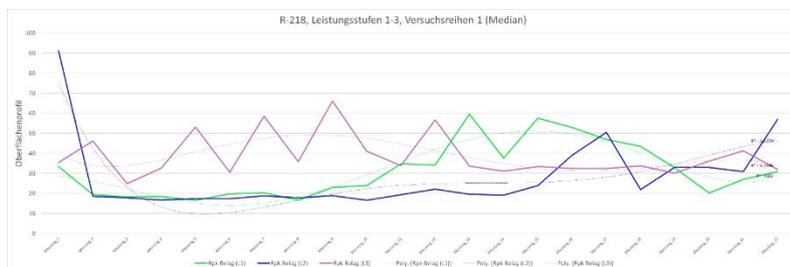
**Abbildung 4 Arithmetische Mittenrauwerte ( $R_a$ ) bei unterschiedl. Energieeinträgen pro Schaltung (Blau < Grün < Lila)**

reduzierte Spitzenhöhe Rpk, (Abbildung 6) sie bietet eine gute Aussagekraft bezüglich der Spitzkämmigkeit eines Profils, was auch Relevanz zur Beurteilung des Traganteils haben kann [2]. Es konnte festgestellt werden, dass die Verläufe der reduzierten Spitzenhöhe mit denen der Reibungszahl korrelieren. Jedoch sind Unterschiede zwischen den Reihen mit unterschiedlich hohen Energieeinträgen zu sehen. Auffällig sind auch starke Änderungen der Werte mit Erhöhung der Anzahl aufeinanderfolgender Bremszyklen. Hier gibt es Anzeichen für eine Umstrukturierung der Oberfläche mit einhergehender Temperaturerhöhung der Reibflächen [3].



**Abbildung 5 Reibungszahlverlauf bei unterschiedl. Energieeinträgen pro Schaltung (Blau < Grün < Lila)**

Auch in diesem Punkt sind Korrelationen zwischen einigen Oberflächenkennwerten und der Reibungszahl beobachtbar. Je nach Leistungsstufe sind diese Änderungen mehr oder weniger ausgeprägt. (Abbildung 4 – Abbildung 6) Wobei die Änderungen bei höheren Energieeinträgen weniger auffällig sind. Auch die Belagsart spielt hier eine Rolle, da die Ausprägung der Gradienten bei steiferen Belägen ersichtlicher ist als bei weichen. Allgemein gilt, dass Abhängigkeiten einiger Oberflächenkennwerte zu beobachten sind. So markiert die hier gezeigte Versuchsreihe gegenläufige Entwicklungen des Verlaufs des arithmetische Mittenrauwert zum Reibungszahlverlauf, während die reduzierte Spitzenhöhe mit diesem korreliert.



**Abbildung 6 Reduzierte Spitzenhöhe Rpk bei unterschiedl. Energieeinträgen pro Schaltung (Blau < Grün < Lila)**

Abbildung 6) Wobei die Änderungen bei höheren Energieeinträgen weniger auffällig sind. Auch die Belagsart spielt hier eine Rolle, da die Ausprägung der Gradienten bei steiferen Belägen ersichtlicher ist als bei weichen. Allgemein gilt, dass Abhängigkeiten einiger Oberflächenkennwerte zu beobachten sind. So markiert die hier gezeigte Versuchsreihe gegenläufige Entwicklungen des Verlaufs des arithmetische Mittenrauwert zum Reibungszahlverlauf, während die reduzierte Spitzenhöhe mit diesem korreliert.

### Diskussion:

Der innovative Beitrag dieser Forschung liegt vorrangig im Aufbau einer neuen Untersuchungsmethodik zur Bewertung von Vorkonditionierungsprozessen. Die Erweiterung durch neue Beurteilungskriterien für den Erfolg von Vorkonditionierungen um Oberflächenkennwerte zeigt Korrelationen mit dem Reibungszahlverlauf. Hierbei werden erste Erfahrungen zur Beurteilung von Mechanismen auf der Reibfläche, die den Verlauf der Reibungszahlen beeinflussen, aufgezeigt. Zudem bietet die parallele Aufnahme von Oberflächen in 3-D die Möglichkeit zur Validierung der berechneten Oberflächenkennwerte und einen tiefen Einblick in die Struktur von Oberflächentopografien und deren Änderungen.

### Quellen:

- [1] Albers, A., Ott, S., Merkel, P.: Kupplungsmodell zur Beschreibung der Übertragbarkeit tribologischer Prüfergebnisse von Teilbelag- auf Bauteiluntersuchungen. Abschlussbericht FVA Forschungsvorhaben 607. Karlsruhe 2013
- [2] Mahr GmbH. 2015. MarSurf. Oberflächenkenngrößen.
- [3] Severin, D., Musiol, F.: Der Reibprozess in trockenlaufenden mechanischen Bremsen und Kupplungen, Artikel. Konstruktion 47. Berlin 1995

**Autorenangaben**

Rüdiger Fehrenbacher, M.Sc

Arn Jörger, M.Sc.

Katharina Bause, Dipl.-Ing.

Sascha Ott, Dipl.-Ing.

Albert Albers, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c.

[ruediger.fehrenbacher@kit.edu](mailto:ruediger.fehrenbacher@kit.edu)

[arn.joerger@kit.edu](mailto:arn.joerger@kit.edu)

[katharina.bause@kit.edu](mailto:katharina.bause@kit.edu)

[sascha.ott@kit.edu](mailto:sascha.ott@kit.edu)

[sekretariat@ipek.kit.edu](mailto:sekretariat@ipek.kit.edu)