

1 Motivation

Die Reduzierung von Reibungsverlusten ist im Maschinen- und Anlagenbau nach wie vor von entscheidender Bedeutung und besitzt das Potential für enorme Einsparungen von Energie, Ressourcen, Emissionen und Kosten. Nach einer Untersuchung von *Holmberg und Erdemir* [1; 2] besitzen reibreduzierende und verschleißsenkende Maßnahmen, wie der Einsatz neuer Oberflächen, Materialien und Schmierstofftechnologien, das Potential, die durch Reibung und Verschleiß verursachten Energieverluste auf einen Zeithorizont von 15 Jahren (ausgehend vom Jahr 2019) um bis zu 40 % zu senken. Diese Einsparungen entsprechen einer jährlichen Reduzierung des weltweiten Energieverbrauchs um 8,7 %. Das resultiert in einem langfristigen, weltweiten CO₂-Einsparungspotential durch Reibungsoptimierung von 3,15 Milliarden Tonnen pro Jahr. [1–3]

Das Ziel der deutschen Bundesregierung ist, basierend auf dem Pariser Klimaabkommen, die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius durch die Reduzierung von CO₂-Emissionen zu begrenzen [4]. Durch das CO₂-Einsparungspotential durch reibreduzierende Maßnahmen wird die wissenschaftliche und industrielle Entwicklung von neuen Materialien, Verfahren und Strategien für die Reibreduzierung stetig vorangetrieben.

Reibreduzierende Beschichtungen stellen eine Möglichkeit dar, die Reibung zwischen zwei Reibpartnern signifikant zu senken. Zielmärkte für die entsprechenden Beschichtungen sind der Automobilbau, Luft- und Raumfahrt sowie allgemein der leichte und schwere Maschinenbau. Beispielanwendungen sind reibreduzierende Beschichtungen für Motorkolben [5], Nockenwellen [6] oder Gleitlager [7].

Ein möglicher reibreduzierender Beschichtungswerkstoff ist das Hochleistungspolymer Polyetheretherketon (PEEK). Dieses zeichnet sich durch seine herausragenden Materialeigenschaften wie die große Dauergebrauchstemperatur ($T_b = 260\text{ °C}$), seine exzellenten Gleitreibeeigenschaften, Abriebbeständigkeit sowie Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit aus. [8; 9]

Konventionell wird zur Beschichtung von Komponenten partikuläres PEEK als Pulver oder Dispersion auf diese aufgebracht und anschließend im Ofen bei einer Temperatur von 380 °C bis 420 °C für einige Minuten bis Stunden über die Schmelztemperatur von PEEK ($T_m \approx 340\text{ °C}$) erhitzt [10]. Durch die thermische Belastung der Komponente ist die Beschichtung von temperaturempfindlichen Substraten, wie beispielsweise der Aluminiumlegierung EN AW-6082, nur unter signifikantem Härteverlust möglich. Des Weiteren werden bei der Beschichtung von großen Bauteilen große Energiemengen benötigt. Aus diesen Gründen werden in Industrie und Forschung neue, alternative Beschichtungsverfahren für PEEK untersucht.

Ein möglicher Ansatz, die partikuläre PEEK-Schicht mittels Laserstrahlung auf Stahlkomponenten zu schmelzen, ist durch *Sändker* am Fraunhofer-Institut für

Lasertechnik ILT und Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme TOS der RWTH Aachen untersucht worden. Das zentrale Resultat ist, dass die Herstellung von dichten und haftfesten PEEK-Schichten auf einem temperaturempfindlichen Stahlsubstrat aus 100Cr6 möglich ist. Dennoch können, je nach verwendeter Bearbeitungsstrategie, entweder keine vollständig dichten Schichten hergestellt werden oder der Härteverlust des Substratmaterials beträgt mindestens 25 %. Lediglich durch die Herstellung von PEEK-Mehrschichtsystemen lässt sich eine vollständig dichte Schicht bei einem Härteverlust von ca. 10 % umsetzen. [11–14]

Das von *Sändker* entwickelte Verfahren ist ein vielversprechender Ansatz zur Beschichtung von temperaturempfindlichen Substraten mit PEEK. Dennoch weist das Verfahren noch Nachteile auf, die einer industriellen Anwendung im Weg stehen können: Diese betreffen insbesondere die für eine ausreichende Benetzung der Bauteiloberfläche durch PEEK notwendige Vorheizung des Substratmaterials mittels einer Heizplatte. Zum einen ist die Übertragung auf 3D-Bauteile nur eingeschränkt möglich. Zum anderen kann bei Materialien mit einer größeren Temperaturempfindlichkeit als der Stahllegierung 100Cr6 die thermische Belastung zu noch größeren Härteverlusten führen (z. B. verschiedene Aluminiumlegierungen). Das gilt insbesondere für schwere Bauteile (> 1 kg) bei denen längere Prozesszeiten für die Bearbeitung notwendig sind.

Da Aluminiumlegierungen nach dem Stand der Technik aufgrund des großen Härteverlustes nur sehr eingeschränkt mittels konventioneller Verfahren mit PEEK beschichtet werden, ist die Entwicklung neuer Verfahren, die eine Beschichtung ohne signifikanten Härteverlust ermöglichen, von großer industrieller Relevanz. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit das Substratmaterial Aluminium EN AW-6082 betrachtet werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist, die bisherige Vorheizung während des laserbasierten Schmelzverfahrens mittels einer Heizplatte nach *Sändker* durch die Vorheizung mittels einer zweiten Laserstrahlquelle zu ersetzen (Zwei-Strahl-Ansatz¹). Dadurch soll die Aufheizung der Substratoberfläche mit einer einzelnen Überfahrt ermöglicht werden, sodass der Härteverlust im Material weiter reduziert wird, aber gleichzeitig die Herstellung von haftfesten Schichten möglich ist. Die zentrale Fragestellung ist, ob eine ausreichende Aufheizung mit einer einzelnen Überfahrt (Aufheizzeit: < 0,1 s) möglich ist und zu bestimmen, welche limitierenden Faktoren hierfür existieren.

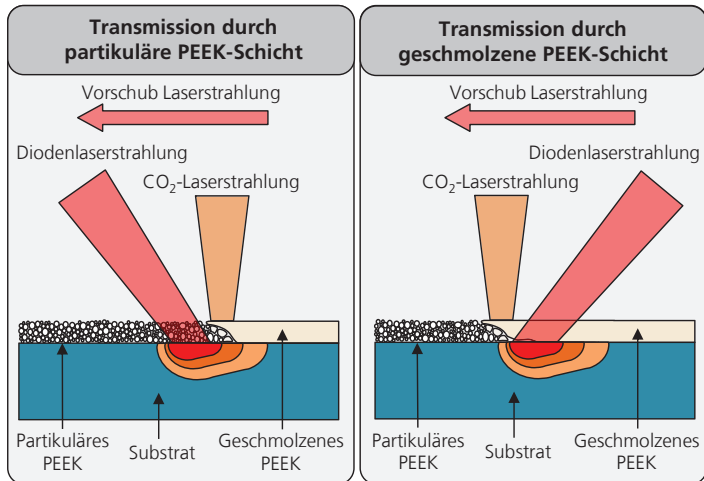
Für die Aufheizung des Substrates wird Diodenlaserstrahlung der Wellenlänge $\lambda = 980$ nm verwendet. PEEK hat bei dieser Wellenlänge einen kleinen Absorptionsgrad (< 3 %), weshalb die Strahlung des Diodenlasers durch die PEEK-Schicht transmittiert werden kann, ohne diese zu schmelzen (siehe Kapitel 2.2.3). Für das Schmelzen der PEEK-Schicht wird CO₂-Laserstrahlung der Wellenlänge

¹ Der laserbasierte Zwei-Strahl-Ansatz wird in dieser Arbeit als das Verfahren zur Bearbeitung von partikulären PEEK-Schichten definiert, bei welchem simultan die Aufheizung des Substrates als auch das Schmelzen des PEEKs durch Laserstrahlung auf verschiedenen Laserstrahlquellen umgesetzt wird.

$\lambda = 10600 \text{ nm}$ verwendet, bei welcher PEEK einen Absorptionsgrad bis über 90 % (siehe Kapitel 2.2.3) aufweist.

Zwei mögliche Ansätze werden untersucht (siehe Bild 1): Eine vorgeschaltete Aufheizung der Substratoberfläche mittels Diodenlaserstrahlung vor dem Schmelzen der PEEK-Schicht mittels CO_2 -Laserstrahlung (Transmission durch partikuläre PEEK-Schicht) und eine nachgeschaltete Aufheizung der Substratoberfläche mittels Diodenlaserstrahlung durch die bereits mit CO_2 -Laserstrahlung geschmolzene PEEK-Schicht (Transmission durch geschmolzene PEEK-Schicht).

Bild 1:
Untersuchte Zwei-Strahl-Ansätze zum Schmelzen von partikulären PEEK-Schichten:
1. Vorgeschaltete Aufheizung mittels Transmission der Diodenlaserstrahlung durch die partikuläre PEEK-Schicht (links)
2. Nachgeschaltete Aufheizung mittels Transmission der Diodenlaserstrahlung durch die geschmolzene PEEK-Schicht (rechts)

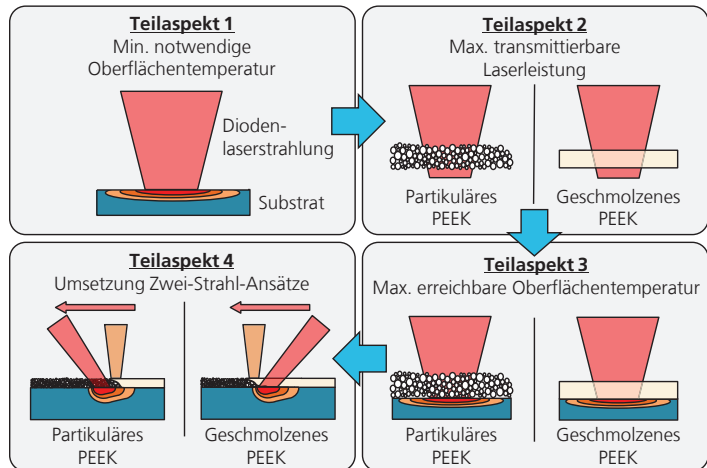


Beim ersten Ansatz wird die Strahlung des Diodenlasers ($\lambda = 980 \text{ nm}$) durch die partikuläre PEEK-Schicht transmittiert, um die Substratoberfläche vorzuheizen. Unmittelbar danach wird das partikuläre PEEK mittels CO_2 -Laserstrahlung ($\lambda = 10600 \text{ nm}$) aufgeschmolzen. Aufgrund der Aufheizung des Substrates benetzt das schmelzflüssige PEEK die Oberfläche stärker und erstarrt langsamer. Nach der Erstarrung entsteht eine haftfeste Schicht. Beim zweiten Ansatz wird zuerst die partikuläre PEEK-Schicht mittels CO_2 -Laserstrahlung aufgeschmolzen. Dann wird die Strahlung des Diodenlasers durch die geschmolzene PEEK-Schicht transmittiert, um die Substratoberfläche aufzuheizen. Sollte das PEEK an diesem Punkt noch im schmelzflüssigen Zustand vorliegen, ist eine Aufheizung auf die Temperatur notwendig, bei welcher eine Benetzung des PEEKs auf der Substratoberfläche eintritt. Sollte das PEEK bereits erstarrt sein, ist eine Aufheizung über die Schmelztemperatur T_M von PEEK notwendig, um die PEEK-Schicht auf der Substratoberfläche anzuschmelzen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der erste Ansatz durch „Transmission durch partikuläre PEEK-Schicht“ und der zweite Ansatz durch „Transmission durch geschmolzene PEEK-Schicht“ beschrieben.

Zur Beantwortung der zentralen Fragestellung, ob eine ausreichende Aufheizung mit einer einzelnen Überfahrt (Aufheizzeit: $< 0,1$ s) für einen der Ansätze möglich ist, werden folgende Teilaspekte untersucht (siehe Bild 2):

1. Bestimmung der minimal notwendigen Temperatur auf der Substratoberfläche in Abhängigkeit von der Oberflächentopografie für die Herstellung von haftfesten PEEK-Beschichtungen.
2. Bestimmung der maximal transmittierbaren Laserstrahlung durch eine partikuläre und geschmolzene PEEK-Schicht in Abhängigkeit von Laserstrahldurchmesser und Vorschubgeschwindigkeit (mittels der in dieser Arbeit verwendeten Anlagentechnik und Bearbeitungsstrategien).
3. Bestimmung der maximal erreichbaren Temperaturen auf der Substratoberfläche bei einer einzelnen Überfahrt (Aufheizzeit: $< 0,1$ s) für beide Zwei-Strahl-Ansätze (unter Annahme der maximal transmittierbaren Laserstrahlung aus Teilaspekt 2).
4. Entwicklung von Bearbeitungsstrategien und Überprüfung mittels experimenteller Untersuchungen für beide Zwei-Strahl-Ansätze sowie Charakterisierung von Schicht- und Substrateigenschaften.

Bild 2:
Teilaspekte der
Untersuchung
zum laserbasierten
Schmelzen von
partikulären PEEK-
Schichten mittels
der Zwei-Strahl-
Ansätze



Zur Erreichung der Zielsetzung werden systematisch die Teilaspekte 1 bis 4 untersucht. Das beinhaltet zum einen die Entwicklung einer laserbasierten Vorbehandlung zum Aufräumen des Substratmaterials und die Untersuchung der Verbundfestigkeit zwischen PEEK und Substrat in Abhängigkeit von Rauigkeit und Temperatur der Substratoberfläche durch Zugversuche. Basierend darauf wird die minimal notwendige Oberflächentemperatur zur Herstellung von haftfesten PEEK-Beschichtungen abgeschätzt (Teilaspekt 1).

Zum anderen werden die optischen Eigenschaften des verwendeten PEEK-Materials, dessen Zersetzungsverhalten während der Bearbeitung mittels Laserstrahlung und die Strahlaufweitung durch Streuung von Laserstrahlung innerhalb der partikulären PEEK-Schicht gemessen. Mit Hilfe der dadurch abgeschätzten Laserstrahldurchmesser auf der Substratoberfläche (Teilaspekt 2) wird zusammen mit experimentellen Untersuchungen und der Simulation der Temperaturverteilung die maximal erreichbare Temperatur auf der Substratoberfläche für beide Zwei-Strahl-Ansätze bestimmt (Teilaspekt 3).

Basierend auf dem Ergebnis werden Bearbeitungsstrategien für beide Zwei-Strahl-Ansätze entwickelt und experimentell untersucht. Die so hergestellten Schichten werden bezüglich ihrer funktionalen Schicht- und Substrateigenschaften (Verbundfestigkeit, Schichtdicke und Substrathärte) charakterisiert (Teilaspekt 4). Als Zielwerte werden eine Verbundfestigkeit zwischen Schicht und Substrat von > 5 MPa und ein Härteverlust des Substrates von < 15 % angestrebt.²

² Für die Verbundfestigkeit existiert kein etablierter Wert, ab welchem eine Beschichtung als haftfest beschrieben wird. Ebenso ist kein etablierter Wert für den Härteverlust eines Bauteils vorhanden, der als funktionsrelevante Beeinträchtigung akzeptiert ist. Diese Werte sind je nach Anwendung unterschiedlich. Die in dieser Untersuchung verwendeten Zielwerte sind durch den Autor definiert.