

# Fraktale Dimensionen und Charakteristika gestrahlter Stahloberflächen: Interrelation und Auswirkungen auf die Haftfestigkeit eines drucksensitiven Klebstoffes

Dipl.-Ing. Tom Marquardt

Rostock, 14. März 2025

## 1 Einleitung

Das Ziel dieser Dissertation war es, den Einfluss von Strahl- und Rauheitsparametern auf die fraktalen Dimensionen von gestrahlten Stahloberflächen zu untersuchen und deren Auswirkungen auf die Haftfestigkeit eines drucksensitiven Klebstoffes (auch Haftklebstoff genannt) zu bestimmen. Diese Untersuchung ist relevant für den Einsatz von Polymerfoliensystemen im Korrosionsschutz, insbesondere bei Offshore-Windenergieanlagen, die hohe Anforderungen an die Oberflächenschutzsysteme stellen.

Abbildung 1 illustriert die Herausforderungen bei der Bestimmung der Rautiefe auf gestrahlten Stahloberflächen, bedingt durch komplexe und variierende Oberflächenstrukturen. Rauheitsparameter wie der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$  quantifizieren nur die vertikalen Abweichungen des Profils und vernachlässigen Aspekte wie Neigungen, die Formen der Unebenheiten sowie die räumliche Verteilung und Häufigkeit dieser Merkmale.

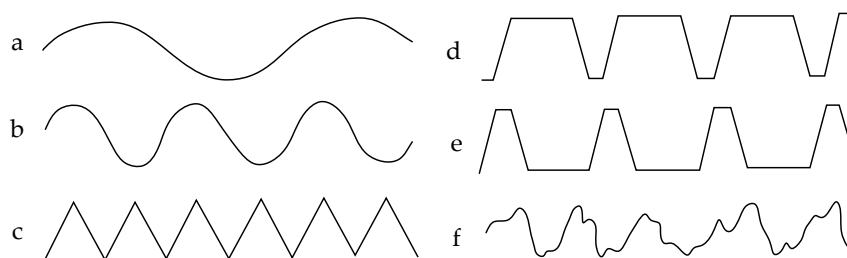


Abbildung 1: Darstellung unterschiedlicher Oberflächenprofile (a-f) mit vergleichbarem Rauheitswert (arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$ ). Eigene Darstellung.

Diese Problematik verdeutlicht die Notwendigkeit präziserer Charakterisierungsmethoden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf der Untersuchung der fraktalen Dimensionen und ihrer Eignung als alternative oder ergänzende Parameter zu traditionellen Rauheitskennwerten wie dem arithmetischen Mittenrauwert  $R_a$  oder der in der Industrie üblicherweise verwendeten gemittelten Rautiefe  $R_z$ .

Fraktale Dimensionen ermöglichen eine umfassendere Charakterisierung der Oberflächenkomplexität, die durch verschiedene Strahlparameter beeinflusst wird. Die Untersuchung der Oberflächenstruktur zielt darauf ab, ein tieferes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Stahl und drucksensitivem Klebstoff zu erlangen, um die Auswirkungen auf die resultierende Haftfestigkeit besser bewerten und optimieren zu können.

## Methodik

In dieser Dissertation wurden zwölf unterschiedlich vorbereitete Substratoberflächen eines niedrig legierter Kohlenstoffstahl (1.0570) untersucht, um den Einfluss von Strahl- und Rauheitsparametern auf die fraktale Dimension und die Haftfestigkeit eines drucksensitiven Klebstoffes zu analysieren. Es wurden drei verschiedene Strahlmittel (Edelkorund, Stahlgrit und Stahlshot), zwei Vorbereitungsgrade (Sa 2<sup>1/2</sup> und Sa 3) sowie drei Rautiefenlevel (Rz 25 µm, 50 µm und 75 µm) verwendet.

Alle Substrate wurden mit einem kommerziellen Trockendruckluftstrahlsystem aufgeraut. Die Düse war eine konvergent-divergente Laval-Düse mit einem Ausgangsdurchmesser von 25 mm. Der Düsendruck wurde mittels Kompressor bei statischen Luftdrücken zwischen 0,3 MPa bis 0,5 MPa erzeugt, mit dem Rautiefenlevel als Zielkennwert. Der Versuchsaufbau inklusive aller Einstellfaktoren ist in Abbildung 2 dargestellt.

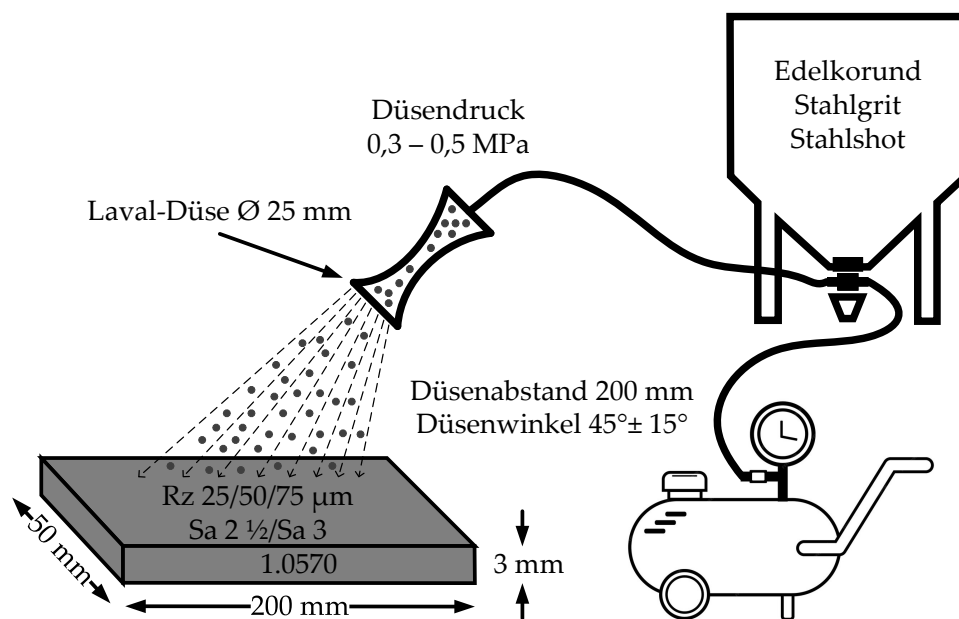


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau der Probenpräparation durch Trockendruckluftstrahlen. Eigene Darstellung.

Die Oberflächen wurden mittels vier unterschiedlicher Messmethoden aufgenommen, um Einblicke in deren Beschaffenheit zu gewinnen. Dabei kamen die taktile Oberflächenprofilometrie, die optische Projektionsprofilometrie, die optische Metallografie sowie die Rasterelektronenmikroskopie zum Einsatz.

Nach der Datenerfassung wurden die Messdaten softwaregestützt visualisiert: Die Ergebnisse der taktilen Oberflächenprofilometrie und der optischen Projektionsprofilometrie wurden in *Microsoft Excel* analysiert, während die Daten der optischen Metallografie mit *ImageJ* und die der Rasterelektronenmikroskopie mit *GIMP* verarbeitet wurden.

Die resultierenden 2D-Profilen und 2D-Aufnahmen wurden verwendet, um vier fraktale Dimensionen mithilfe der *Box-counting-Methode* zu ermitteln. Die durchschnittliche fraktale Dimension  $\bar{D}_B$  als Mittelwert aller Dimensionen einer Datenreihe, die minimale  $D_{Bmin}$  und die maximale  $D_{Bmax}$  fraktale Dimension als Extremwerte der Datenreihe, sowie die optimale fraktale Dimension  $D_{B-R^2max}$ , die aus dem höchsten Bestimmungsgrad  $R^2$  im Regressionsmodell abgeleitet wurde, werden zur Charakterisierung der Substratoberflächen verwendet.

Die ermittelten fraktalen Dimensionen dienten als Grundlage für Varianzanalysen (ANOVA) und Korrelationsuntersuchungen mittels Spearman's Rangkorrelationskoeffizient, um die unterschiedlichen Einflüsse auf die fraktalen Dimensionen zu untersuchen. Für jede Messmethode wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan erstellt, um die Einflüsse von Strahlmittel, Vorbereitungsgrad und Rautiefe zu quantifizieren. Abschließend wurden Haftfestigkeitsprüfungen durchgeführt, um die Wechselwirkungen zwischen der Oberflächenstruktur und dem Klebstoff zu überprüfen. Diese Tests ermöglichten die Bestimmung der Korrelation zwischen den fraktalen Dimensionen und der Haftfestigkeit sowie die Validierung der fraktalen Dimensionen als Parameter zur Oberflächenbewertung bei Verklebungen von Stahloberflächen mit dem untersuchten Haftklebstoff.

## Ergebnisse und Diskussion

### Hypothese 1: Einfluss von Strahl- und Rauheitsparametern auf die fraktale Dimension von Stahloberflächen

- Grit-gestahlte Substrate zeigen höhere fraktale Dimensionen als Shot-gestahlte Substrate. Die Unterschiede resultieren aus der Form des Strahlmittels (scharfkantig vs. kugelförmig).
- Geringere Rautiefen ( $25\ \mu\text{m}$ ) führen zu höheren fraktalen Dimensionen, während höhere Rautiefen ( $75\ \mu\text{m}$ ) zu niedrigeren fraktalen Dimensionen führen.
- Die Spearman-Korrelationsrangfolge der Profilcharakteristika aus Abbildung 3 mit der durchschnittlichen fraktalen Dimension  $\bar{D}_B$  ist: *Anordnung* (0,88) > *Vertikale (Kern)* (0,87) > *Vertikale (Spitze)* (0,79/0,84) > *Vertikale (Gesamt)* (0,79) > *Vertikale (Riefen)* (0,52) > *Gestalt* (0,19).
- Die höchste Korrelation mit den fraktalen Dimensionen weisen die Rauheitsparameter des Profilcharakteristikums *Anordnung* auf. Die Profilparameter der Charakteristika *Vertikale (Riefen)* und *Gestalt* zeigen eine signifikant geringere Korrelation.

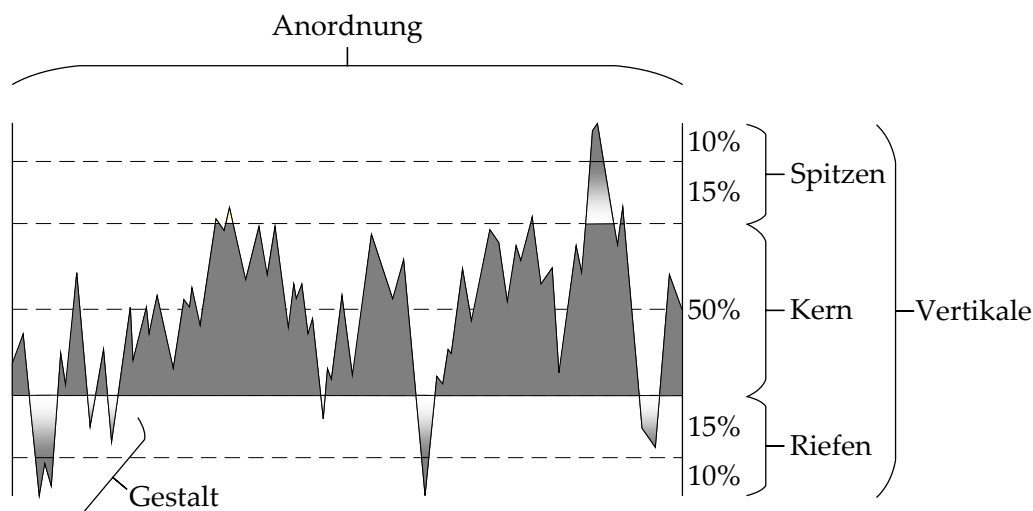


Abbildung 3: Unterteilung von gestrahlten Stahloberflächen in drei Profilcharakteristika: *Anordnung* (Abszissenrichtung), *Vertikale* (Ordinatenrichtung) mit *Spitzen*- (jeweils oberste 25%), *Kern*- (mittlere 50%) und *Riefenbereich* (jeweils unterste 25%), sowie die *Gestalt*. Diese prozentualen Anteile beziehen sich auf die Verteilung der vertikalen Profilhöhen innerhalb der Oberfläche. Eigene Darstellung.

## Hypothese 2: Einfluss der Messmethode auf die Bestimmung der fraktalen Dimensionen

- Die Messmethode hat einen signifikanten Einfluss auf die fraktalen Dimensionen, mit einem Beitrag von 58,68 % ( $D_{Bmin}$ ) bis 70,18 % ( $\overline{D}_B$ ) zum Regressionsmodell.
- Bei Berücksichtigung der Wechselwirkungen, erhöht sich der Beitrag der Messmethode bis auf 75 % ( $\overline{D}_B$ ).
- Die durchschnittliche fraktale Dimension  $\overline{D}_B$  auf Basis der taktilen Oberflächenprofilometrie ( $\overline{D}_B = 1,07$  bis 1,11) zeigt eine hohe Übereinstimmung mit den Werten der optischen Projektionsprofilometrie ( $\overline{D}_B = 1,08$  bis 1,11). Die optische Metallografie ( $\overline{D}_B = 1,12$  bis 1,23) zeigt ähnliche relative Trends, jedoch signifikant höhere absolute Werte. Abbildung 4 veranschaulicht die drei Messmethoden.
- Der Variationskoeffizient für die Messungen unterscheidet sich je nach Messmethode: Taktile Profilometrie (niedrigster, 2,8 %), Projektionsprofilometrie (mittlerer, 9,8 %) und optische Metallografie (höchster, 14,0 %). Die Wiederholgenauigkeit ist umgekehrt proportional zu diesen Werten.
- Die Projektionsprofilometrie zeigt als optisches Verfahren eine höhere Anfälligkeit für externe Störungen (z.B. Lichtverhältnisse oder Einfallswinkel des Lichts).
- Die taktile Oberflächenprofilometrie bietet Vorteile hinsichtlich des Messaufwands, der Messlänge und der Auflösung.

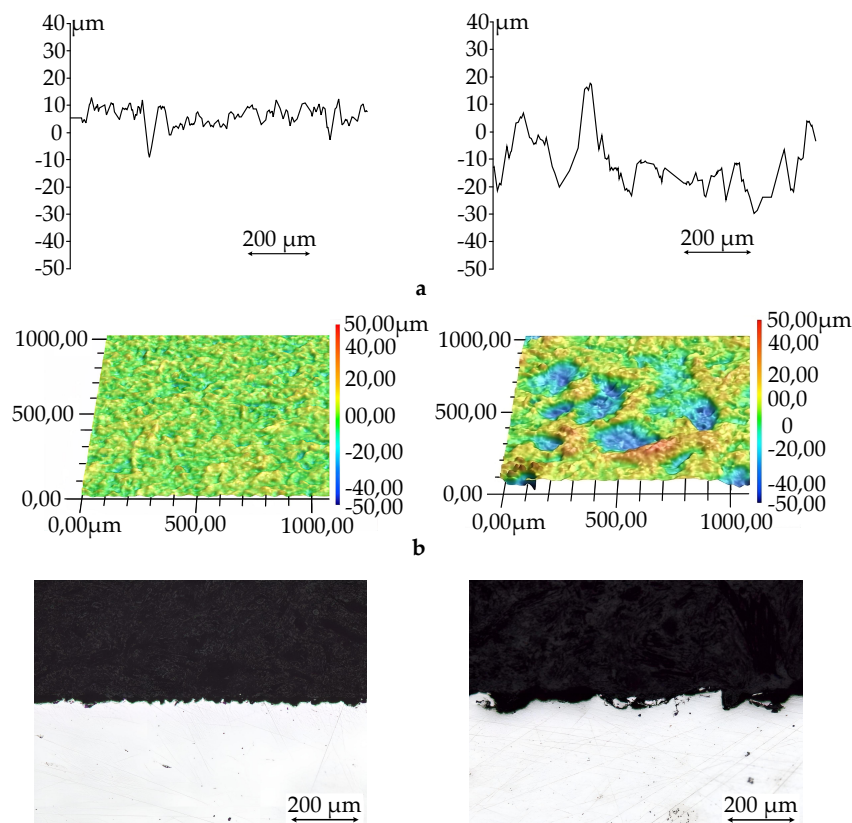


Abbildung 4: Profile von Stahlflächen (Edelkorund, Vorbereitungsgrad Sa 3), gemessen mit den drei Methoden (gescannter Bereich/Länge: 1000 µm). Linke Reihe: niedriges Rautiefenniveau (25 µm); rechte Reihe: hohes Rautiefenniveau (75 µm); (a) Taktile Oberflächenprofilometrie; (b) Optische Projektionsprofilometrie; (c) Optische Metallografie.

### Hypothese 3: Zusammenhang zwischen den fraktalen Dimensionen und der Haftfestigkeit eines drucksensitiven Klebstoffes

- Unter den drei untersuchten Strahlparametern erwies sich die Rautiefe als der einzige signifikante Faktor für die Haftfestigkeit, mit einem Beitrag von 62 % zum Modell.
- Die Beiträge von Strahlmittel und Vorbereitungsgrad waren gering und statistisch nicht signifikant.
- Die Spearman's Rangkorrelationsanalyse zeigt extrem signifikante ( $p < 0,001$ ) und sehr starke Korrelationen (zwischen den fraktalen Dimensionen und der Haftfestigkeit:  $D_{Bmax}(0,944) > D_{B-R^2max}(0,923) > \overline{D}_B(0,860) > Rz(-0,727)$ ).
- Die Regressionsmodelle zur Vorhersage der Haftfestigkeit basierend auf der Rautiefe Rz zeigen korrigierte Bestimmtheitsmaße  $R^2_{adj}$  im Bereich von 44,73 % bis 46,91 %. Die Einführung der maximalen fraktalen Dimension  $D_{Bmax}$  als Einflussfaktor (Kovariate) verbessert das Modell signifikant auf ein  $R^2_{adj}$  von 71,13 %.

## Schlussfolgerungen

### Einfluss von Strahl- und Rauheitsparametern (Hypothese 1)

- Die fraktalen Dimensionen bieten eine präzisere Beschreibung der Oberflächenkomplexität und sollte als zusätzlicher Parameter in der Oberflächencharakterisierung verwendet werden.
- Eine differenzierte Analyse von Shot- und Grit-gestrahlten Substraten ist notwendig, um die spezifischen Einflüsse der Strahlmittelform auf die fraktalen Dimensionen zu verstehen und zu nutzen.
- Eine Optimierung der Fraktalwerte könnte in weiterführenden Arbeiten durch die gezielte Modifikation der Rautiefenparameter des Anordnungscharakteristikums erreicht werden.

### Einfluss der Messmethode (Hypothese 2)

- Die Auswahl der Messmethode sollte sorgfältig erfolgen, da diese die ermittelten fraktalen Dimensionen signifikant beeinflusst.
- Die taktile Oberflächenprofilometrie ist aufgrund der höheren Präzision und Wiederholgenauigkeit besonders geeignet für industrielle Anwendungen.
- Bei der Projektionsprofilometrie muss die Abhängigkeit von der Messrichtung berücksichtigt werden, um konsistente Ergebnisse zu gewährleisten.

### Einfluss der fraktalen Dimension auf die Haftfestigkeit (Hypothese 3)

- Die Integration der fraktalen Dimension in die Bewertung der Haftfestigkeit des untersuchten Haftklebstoffes auf gestrahlten Stahloberflächen verbessert die Vorhersagegenauigkeit.

Diese Dissertation trägt zum Verständnis der Oberflächencharakteristika gestrahlter Stahloberflächen bei und zeigt, dass fraktale Dimensionen eine präzisere Vorhersage der Haftfestigkeit ermöglichen als herkömmliche Rauheitsparameter.