

Einfluss der Haftgrundvorbereitung auf die entstehende Topographie und Schichthftung; Ein dreidimensionales Fraktalanalyse-Verfahren

St. Siegmann¹, C.A. Brown²

¹Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, EMPA Thun, Abt. Werkstofftechnologie, Gruppe Thermische Beschichtungstechnik, Feuerwerkerstrasse 39, CH-3602 Thun, Schweiz, e-mail: stephan.siegmann@empa.ch,

²Surface Metrology Laboratory, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts, USA, e-mail: brown@surfract.com

1. Einleitung:

Massgeblich für die gute Anbindung thermisch gespritzter Schichten auf dem Grundwerkstoff ist die chemische und mechanische Beschaffenheit der Substratoberfläche. Die „Vorbehandlung von Oberflächen metallischer Werkstücke und Bauteile für das thermische Spritzen“ ist in einer gleichlautenden Europäischen Norm EN 13507 niedergeschrieben [1]. Bei der Vorbehandlung spielt die Strahlverfahrenstechnik [2] eine entscheidende Rolle, um eine Oberfläche vor der Beschichtung zu reinigen, zu vergrössern und zu aktivieren. Je nach verwendetem Strahlmittel resp. -korn und Strahlparameter entstehen auf der Strahlgutoberfläche unterschiedliche Topographien. Diese können anhand genormter Rauigkeitskenngrössen nach EN ISO 4287 [3] oder EN ISO 8503 [4] untersucht und klassiert werden.

Bereits im Jahre 1956 hatten sich Drazkiewicz [5] oder 1962 Steffens [6] intensiv Gedanken über den „Haftungsmechanismus beim Metallspritzen“ gemacht und entsprechende Untersuchungen dazu veröffentlicht. Doch das Thema des Grenzflächeneinflusses auf die Schichthftung scheint bis in unsere Zeit noch nicht endgültig gelüftet zu sein, wie zahlreiche Publikationen belegen, z.B. [7-15].

Eigene Untersuchungen mit einem neuen, dreidimensionalen Fraktalanalyse-Ansatz wurden schon hinlänglich publiziert [16-24]. Der neue Ausgangspunkt basiert auf den von Mandelbrot im Jahre 1984 vorgestellten „Les Objects Fractals“ [25].

Schon im Jahre 1990 wurden Vergleiche fraktaler und konventioneller Topographiebeschreibung untersucht [26]. Da es aber schon 63 ISO-genormte Oberflächenkennwerte gibt, stellt sich die berechtigte Frage, worin das Interesse an einer weiteren Beschreibung liegt.

Zur Erfassung von Oberflächendaten bieten sich 1-, 2- und 3-dimensionale Messmethoden an. Die 1-dimensionalen Messungen ergeben lediglich einen Höhenpunkt ohne Bezug zu seiner Umgebung. Eine 2-dimensionale Profilmessung kann den Verlauf der Oberfläche entlang einer Linie beschreiben, aber erst die 3-dimensionale Vermessung vermag die Oberfläche vollumfänglich zu beschreiben und anisotrope Strukturen aufzuzeigen.

Zwei-dimensionale Fraktalanalyse-Beschreibungen wurden an bearbeiteten Oberflächen [27-30] oder Oberflächen von thermisch gespritzten Schichten [31, 32] durchgeführt. Einen Bezug zur Schichthftung aus zwei-dimensionalen Fraktalanalysedaten wurde bei Amada [10, 33-36] hergestellt. Fraktalanalyse anhand zwei-dimensionaler Daten werden jedoch keine vollständige drei-dimensionale Beschreibung bei Vorzugsrichtungen, wie beim Sandstrahlen üblich, wiedergeben können.

Drei-dimensionale Untersuchungen mit Hilfe der Patch-Work-Methode [37, 38] war erstmals in der Lage, eine skalenabhängige 3-D Beschreibung vorzunehmen und diese Daten mit der Schichthftung zu korrelieren [21, 22, 24]. Dabei zeigte sich, welche Flächendimensionen mit der Schichthftung am besten korrelieren.

Die vorliegende Untersuchung erhebt jedoch nicht den Anspruch unterscheiden zu können, ob die durch Strahlen angebotene, zusätzliche Oberfläche mehr chemische oder mechanische Verankerungspunkte bietet. Ein eindeutiger, linearer Zusammenhang zwischen der Zunahme der Oberflächen und den Haftzugswerten liegt jedoch bei allen untersuchten Substratlegierungen vor.

2. Die Oberflächenvorbehandlung:

2.1 Substrat-Werkstoffe

Für diese Studie wurden Ausgangswerkstoffe mit unterschiedlichen Legierungen und Härten verwendet. Die verschiedenen Testproben (Coupons) mit 25mm Durchmesser und 10mm Dicke variierten in ihren Vickers-Härten (HV30) von 95 bis 770 (*Tabelle 1*). Alle Proben wurden vor der Strahlbehandlung vorgängig geschliff

fen und auf einen mittleren Rauigkeitswert von $R_a = 0.01 - 0.5 \mu\text{m}$ poliert, um eine definierte Ausgangslage zu gewährleisten. Diejenigen Proben, welche für die Schichthaftungsmessungen verwendet wurden, wiesen eine Länge von 54mm und das geforderte M16-Gewinde auf [39, 40]. Die Haftzugproben wurden auf die gleiche Weise neu gestrahlt, die Topographie vermessen und anschliessend durch Vakuumplasma-Spritzen mit NiCr 80/20 beschichtet.

Table 1: Verwendete Substratwerkstoffe und deren Vickers-Härten (HV30).

Code	Bezeichnung		DIN Nr.	Vickers Härte (HV30)
A	Baustahl	St 37-2	1.0037	95
B	Rostfreier Stahl	X5CrNi1810	1.4301	247
C	Vergütungsstahl	42CrMo4	1.7225	282
D	Gehärteter Stahl	100Cr6	1.3505	772

2.2 Sandstrahlen

Zur reproduzierbaren Durchführung des Strahlvorganges wurde in einer konventionellen Druckluftinjektor-Sandstrahleinrichtung ein pneumatischer Vorschub aufgebaut, welcher die zu untersuchenden Teile mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 50mm/s unter der Strahldüse vorbei führte (*Abbildung 1*).

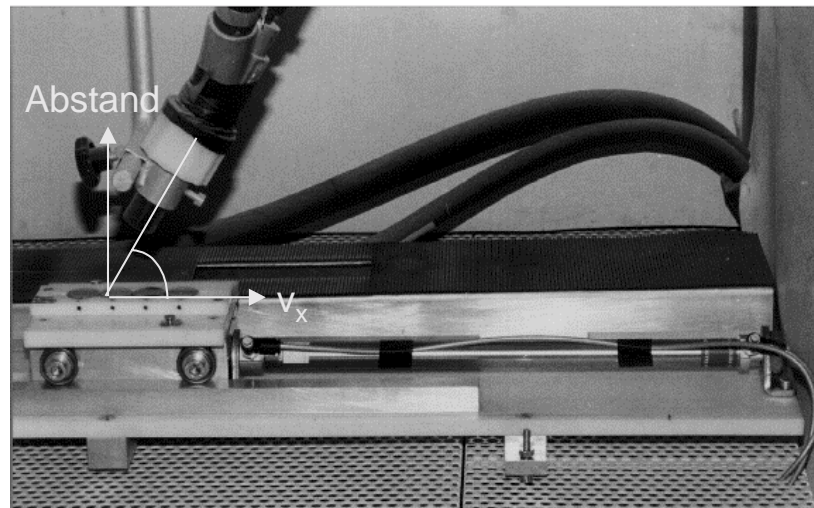


Abbildung 1: Sandstrahleinrichtung mit pneumatischem Vorschubmechanismus, auf welchem gleichzeitig vier Proben (links) montiert und unter der Strahldüse vorbei geführt werden können.

Als Strahlmittel wurden Edelkorund (Al_2O_3) in der Körnung F 24 (0.5 - 1mm) verwendet. Um eine maximale und gleichbleibende Wirkung des Strahlens zu garantieren, wurde das Strahlmittel nach jedem Versuchssatz erneuert.

Die folgenden Strahlparameter wurden variiert:

- Strahlgut, d.h. Substratwerkstoffe (gem. *Table 1*),
- Arbeitsabstand von Düsenaustritt bis zur Werkstückoberfläche: 4cm, 6cm, 9cm,
- Strahlwinkel: 45° , 60° , 75° (gemessen zur Substratoberfläche),
- Druck der Pressluft: 2bar, 3bar, 4bar,
- Passagenzahl: 1x, 3x, 5x, 8x, 10x überfahren,

Die verschiedenen Substrate zeigten bereits optisch erkennbar deutlich unterschiedliche Oberflächenstrukturen, die exemplarisch in *Abbildung 2* (links) dargestellt werden.

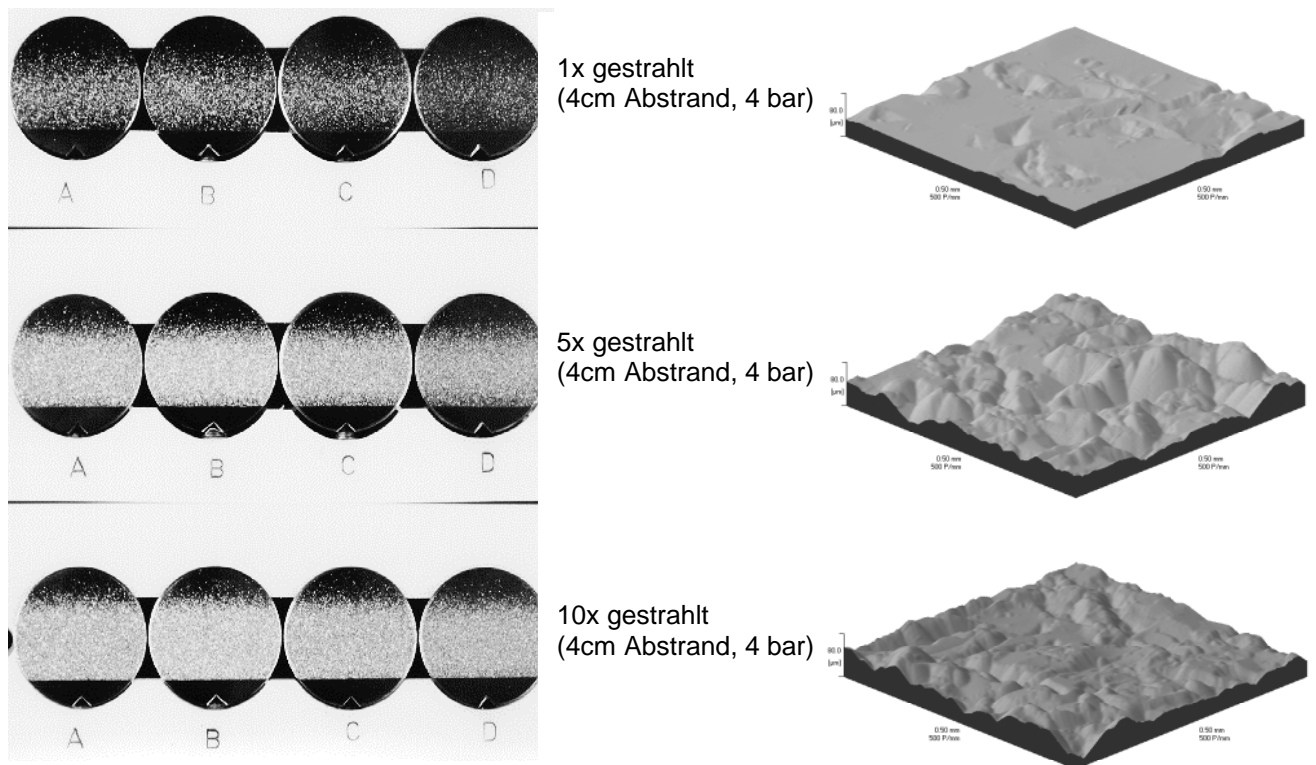


Abbildung 2: (Links) Optische Abbildung der Oberflächenveränderung beim Strahlen unterschiedlicher Substrate (A, B, C, D gem. Tabelle 1). Die polierten Oberflächen erscheinen in dieser Beleuchtung schwarz (unterer Teil der Proben als Referenz jeweils abgedeckt), wohingegen die „Krater“ das auftreffende Licht als helle Punkte reflektieren. Auf der rechten Seite ist exemplarisch ein Ausschnitt aus Probe B als dreidimensional vermessene Topographie in realitätsnaher, d.h. „künstlich beleuchteter“ Darstellung wiedergegeben.

3. Die Oberflächencharakterisierung:

3.1 Die Oberflächenvermessung:

Zur Oberflächenvermessung bieten sich verschiedene Messmethoden an, welche verfahrensspezifische Vor- und Nachteile aufweisen können. Üblicherweise werden heute optische Verfahren (Laser, Weisslicht, etc.) und mechanische (Profil-, Pertometer, AFMs) Tastschnittgeräte eingesetzt, welche die Oberflächen zeilenweise abtastern und die Höhenkoordinaten in Funktion der x-/y-Achsen aufnehmen [41, 42].

Für diese Studie wurde ein mechanisches Tastschnittgerät Typ UBM eingesetzt, welches mit einer Spitze mit Öffnungswinkel von 90° und einem Spritzenradius von $5\ \mu\text{m}$ ausgerüstet war. Vorversuche mit einem Laser-Scanning-Gerät haben keine zufriedenstellenden Resultate ergeben, da die Messungen wegen der Laserfokussierung einen hochfrequenten Rauschanteil enthielten, welcher nicht a priori durch Datenfilterung ausgeschlossen werden wollte.

Die vorliegenden Messungen wurden deshalb mit dem mechanischen Taster auf einer Fläche von $500 \times 500\ \mu\text{m}$ mit einer Schrittweite in x-/y-Richtung von $2\ \mu\text{m}$ durchgeführt, was sich aus früheren Untersuchungen als ausreichend erwiesen hatte [16-20]. Die nominelle z-Achsen-Auflösung des Gerätes gemäss Herstellerangaben betrug $50\ \text{nm}$.

3.2 Fraktalanalyse:

Um den Einfluss der verschiedenen Werkstoffe, der Sandstrahlbedingungen, der entstehenden Topographien auf schlussendlich die Haftfestigkeiten der Schichten zu untersuchen, wurden aus den gewonnenen Topographiedaten einerseits die konventionellen Rauheitsparameter (R_a , R_z , etc.) errechnet und andererseits Fraktalanalyse durchgeführt. Die zur Fraktalanalyse verwendete Software Superfrax[®] arbeitet nach der sogenannten „Patch-Work“-Methode [43]. Bei dieser Methode wird die zu messende Oberfläche zeilenweise mit

virtuellen Dreiecken belegt bis die ganze Probe vollständig bedeckt ist (siehe *Abbildung 3*). Bei jedem Durchgang wird die Fläche der virtuellen Dreiecke verkleinert, wodurch die Oberfläche immer präziser abgebildet wird.

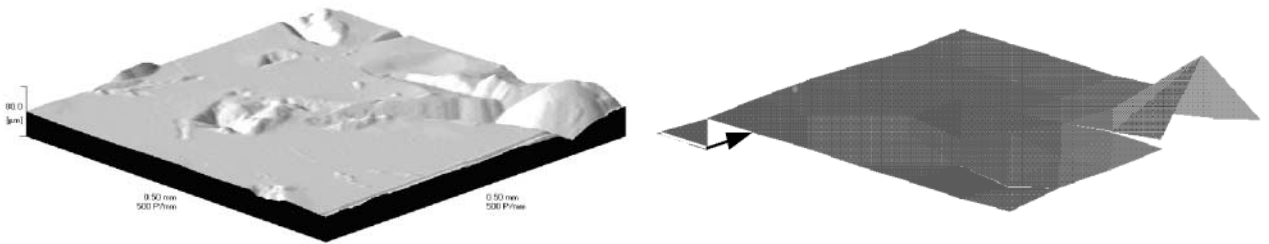


Abbildung 3: Beispiel einer 3-dimensional vermessenen Oberfläche (links) und Momentaufnahme während eines Fraktalanalyse-Durchgangs (rechts). Sichtbar sind die noch sehr groben Dreiecksflächen, welche zeilenweise mit jeweils gleichen Flächenanteilen auf die Oberfläche gelegt werden.

Erlangt die Dimension der Seitenlinien der Dreiecke den Abstand der Datenpunkte, endet das Verfahren, da durch Verkleinerung keine neuen Oberflächeninformationen mehr bestimmt werden können. Ermittelt wird für jeden Durchgang die relative Oberflächenvergrößerung bezogen auf eine gleich grosse, glatte Oberfläche. Mit kleiner werdendem Betrachtungsmaßstab (Patch-Size) beginnt die Oberfläche scheinbar anzuwachsen, wie in *Abbildung 4* exemplarisch für einen Strahlparametersatz und verschiedene Werkstoffe gezeigt wird. Die Extrapolation der jeweiligen Steigungen m der verschiedenen Fraktalanalysenmessungen auf die Grundgerade (Relative Area = 1) in *Abbildung 4* ergeben den dazugehörigen Übergang von "glatt" zu "rau" (smooth-rough crossover, SRC). Oberhalb dieses Überganges SRC erscheint die Oberfläche als „glatt“ und unterhalb von SRC steigt die relative Oberfläche mit kleiner werdendem Betrachtungsmaßstab an.

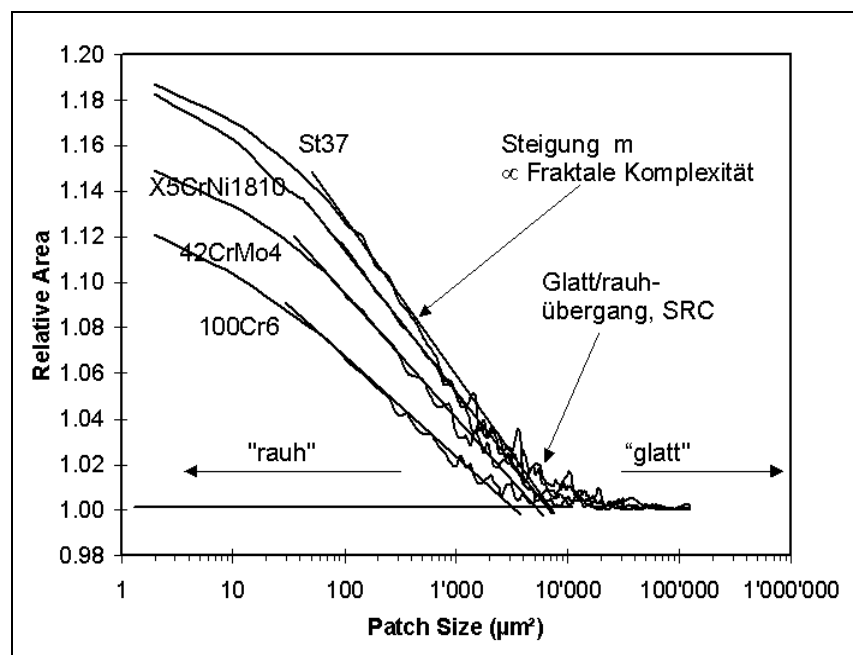


Abbildung 4: Fraktalanalyse von mit gleichen Parametern gestrahlten Werkstoffen (St37, X5CrNi1810, 42CrMo4, 100Cr6). Die Grafik zeigt die relative Oberfläche (Relative Area) in Funktion des Beobachtungsmaßstabs (Patch Size). Das Gebiet mit konstanter Steigung m in der Grafik erstreckt sich über ungefähr zwei Dekaden und ist mit der fraktalen Dimension D verknüpft.

Die fraktale Dimension D wird aus der Steigung m der Geraden auf folgende Weise bestimmt:

$$D = 2 - 2 m.$$

Wie aus *Abbildung 4* ersichtlich ist, erstreckt sich die fraktale Komplexität über ca. 2 Zehnerpotenzen. Da die Steigungen der Kurven sehr kleine, negative Werte annehmen, wurde die sogenannte "Area-Scale Fractal Complexity" (ASFC) eingeführt, welche auf folgende Weise definiert ist:

$$\text{ASFC} = -1000 m;$$

d.h. für z.B. die Baustahlprobe St37 ergibt sich eine Steigung $m = -0.02612$, woraus sich eine $\text{ASFC} = 26.12$ und die fraktale Dimension zu $D = 2.0522$ errechnet.

4. Vakuumplasma gespritzte Beschichtungen und Schichthaftung

Zur Untersuchung des Einflusses der Topographie auf die Schichthaftung wurden Haftzugprobekörper gemäss EN 582 [39], resp. ISO 14916 [40] aus den in *Tabelle 1* beschriebenen Werkstoffen hergestellt und mittels Vakuum-Plasma-Spritzen mit NiCr 80/20 beschichtet. Die Beschichtungsparameter wurden in einer vorgängigen Studie hinsichtlich Porosität und Schichthaftung optimiert und für alle Substratwerkstoffe gleich belassen.

Aus der Vorstudie mit den Coupons (Versuchsmatrix mit rund 400 Proben) wurden für die Haftzugfestigkeitsmessungen jene Topographien ausgesucht, welche eine minimale, eine durchschnittliche und eine maximale Mittenrauigkeit R_a , ASFC, SRC, etc. ergeben hatten. Diese Parameter wurden auf die 12 Haftzugprobekörper aus den jeweils artgleichen Werkstoffen angewandt. Es wurden von jedem Sandstrahlparameter 2 Proben hergestellt, topographisch vermessen, beschichtet und der Mittelwert ihrer Haftzugfestigkeiten bestimmt.

Die Ergebnisse früherer Haftzugfestigkeitsuntersuchungen mit Standardabweichungen von ± 5 MPa rechtfertigten die kleine Probenanzahl, da bei dieser Untersuchung lediglich eine Tendenz aufgezeigt werden sollte.

5. Ergebnisse

5.1 Topographie

Die folgende *Abbildung 5a* zeigt den Zusammenhang zwischen den, bei gleichen Parametern gestrahlten, Proben aus der Vorstudie und die Resultate für die Haftzugprobekörper. Wie man erkennen kann, scheint die Reproduzierbarkeit gemessen mit R_a sehr gut ($R^2 = 0.84$). Vergleicht man jedoch die selben Proben mit ihrer fraktalen Grösse ASFC, treten offensichtliche Unterschiede hervor, welche zu einer scheinbar schlechteren Korrelation, d.h. Wiederholbarkeit, führen ($R^2 = 0.38$).

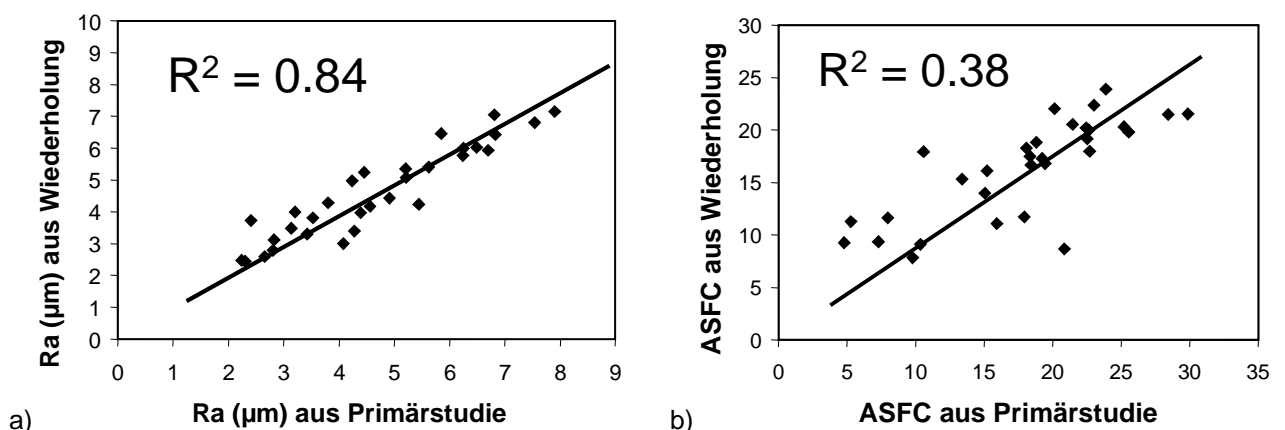


Abbildung 5: a) Vergleich der Mittenrauigkeit R_a und b) der fraktalen Grösse (ASFC) der Proben aus der Vorstudie und der Wiederholung für die Haftzugprobekörper mit gleichen Sandstrahlparametern. Die Reproduzierbarkeit scheint für R_a gut, wohingegen erst die fraktale Grösse ASFC die offensichtlichen Unterschiede erkennen kann.

5.1 Haftzugfestigkeit

Die ermittelten Haftzugfestigkeitswerte (Durchschnittswert aus 2 Messungen) erstreckten sich aufgrund der unterschiedlichen Substratwerkstoffe und Strahlparameter von 0 bis 94 MPa.

In der *Abbildung 6a* werden die Haftzugfestigkeitswerte gegen den „klassischen“ Mittenrauhwert R_a aufgetragen und in *Abbildung 6b* gegen die fraktale Grösse ASFC. Dabei zeigten alle untersuchten Werkstoffe einen linearen Zusammenhang zwischen Haftzugfestigkeiten und R_a resp. der fraktalen Dimension ASFC. Bei den konventionellen Rauheitsgrössen (wie z.B. R_a) ergibt sich jedoch keine eindeutige Aussage für die 100Cr6-Proben im unteren Rauheitsbereich von $R_a = 2...3 \mu\text{m}$. Dort treten gleichzeitig Haftzugfestigkeitswerte von 0 MPa (Wegfallen der Schichten), als auch solche von ca. 40 MPa auf (*Abbildung 6a*, gestrichelter Bereich). Bei der Fraktalanalyse (*Abbildung 6b*) hingegen konnten diese Werte aus der Regression bereits vorausgesagt werden, d.h. dass eine Schichthaftung erst ab ca. $ASFC = 10$, d.h. einer Oberflächenvergrößerung gegenüber einer glatten Oberfläche von ca. 6 % eintreten wird.

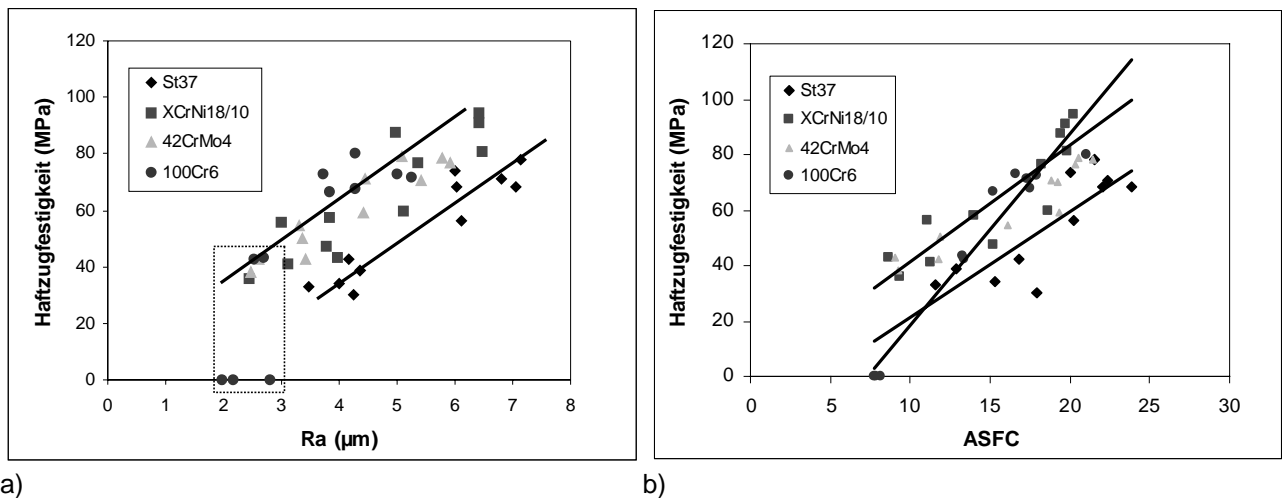


Abbildung 6: Haftzugfestigkeitswerte nach EN 582 der verschiedenen Werkstoffe (gem. Bildlegende) in Funktion von R_a (6a), resp. ASFC (6b). Jeder Datenpunkt repräsentiert den Durchschnitt von 2 Messungen. Jene Haftzugfestigkeitswerte, welche 0 MPa ergaben, lassen sich aus der Fraktalanalyse der Topographiedaten mit einem Bestimmtheitsmass aus der Regression von $R^2 = 0.90$ voraussagen.

Die folgende *Abbildung 7* zeigt für die vier Werkstoffe die Korrelation R^2 zwischen der relativen Oberflächenvergrößerung in Funktion der Patch-Grösse und der Haftzugfestigkeitswerte. Einen höheren Koeffizient als ca. 0.9 lässt sich wegen den Streuungen der Haftzugfestigkeitswerte (Klebeeinflüsse) nicht erreichen. Ebenso lässt die Auflösungsgrenze bei der Profilmessung durch den Radius der Tastspitze und -winkel keine bessere Voraussagbarkeit in diesem Bereich zu. Für den Einsatz in der Praxis lässt sich damit ein Kompromiss zwischen Messzeit und Voraussagbarkeit der Haftzugfestigkeitswerte finden (siehe *Abbildung 8*).

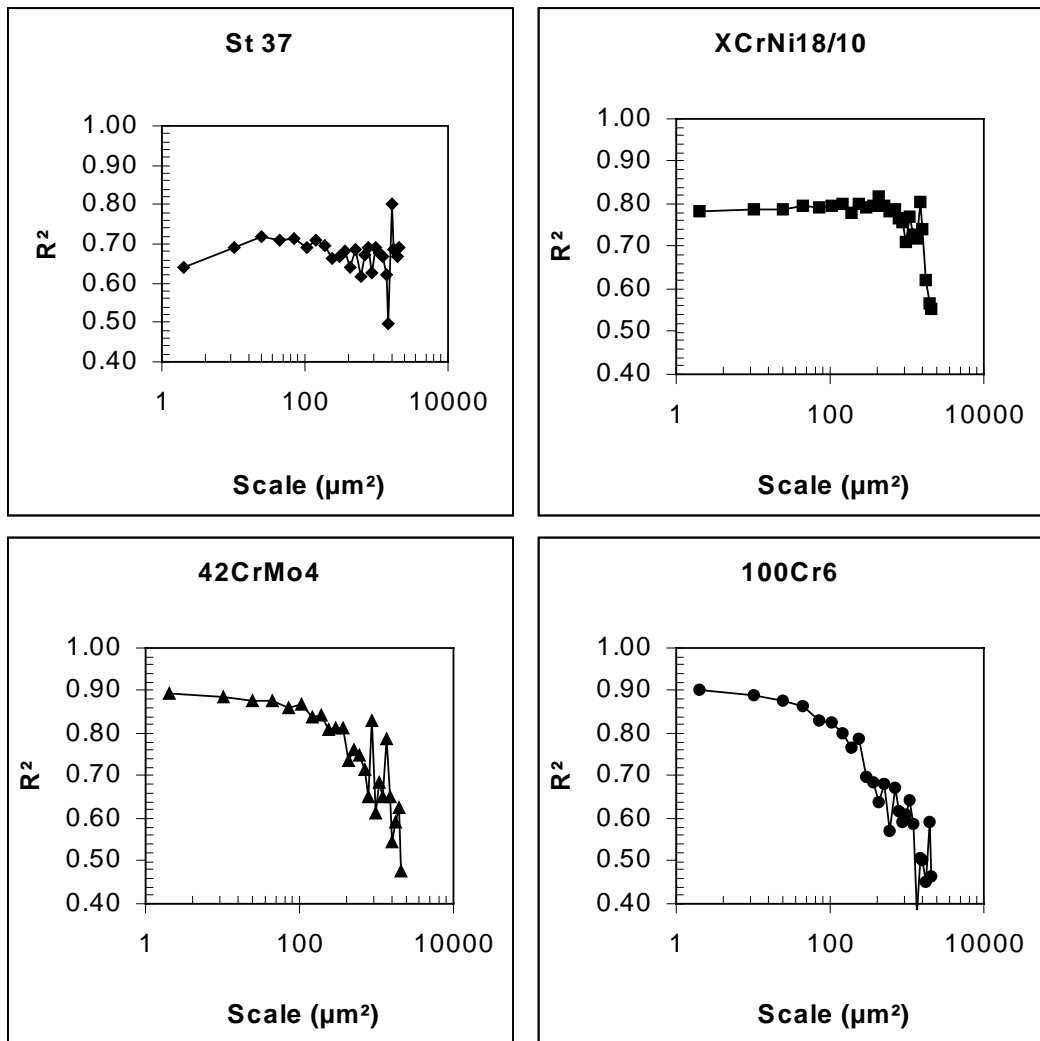


Abbildung 7: Korrelationskoeffizienten R^2 zwischen der relativen Oberflächenvergrößerung in Funktion der Betrachtungsskala und der Haftzugfestigkeitswerte für die in der Studie untersuchten Werkstoffe. Für alle untersuchten Werkstoffe ergibt sich eine Verbesserung der Korrelation mit kleiner werdender Skala, oder sie durchläuft ein Maximum (z.B. für St37).

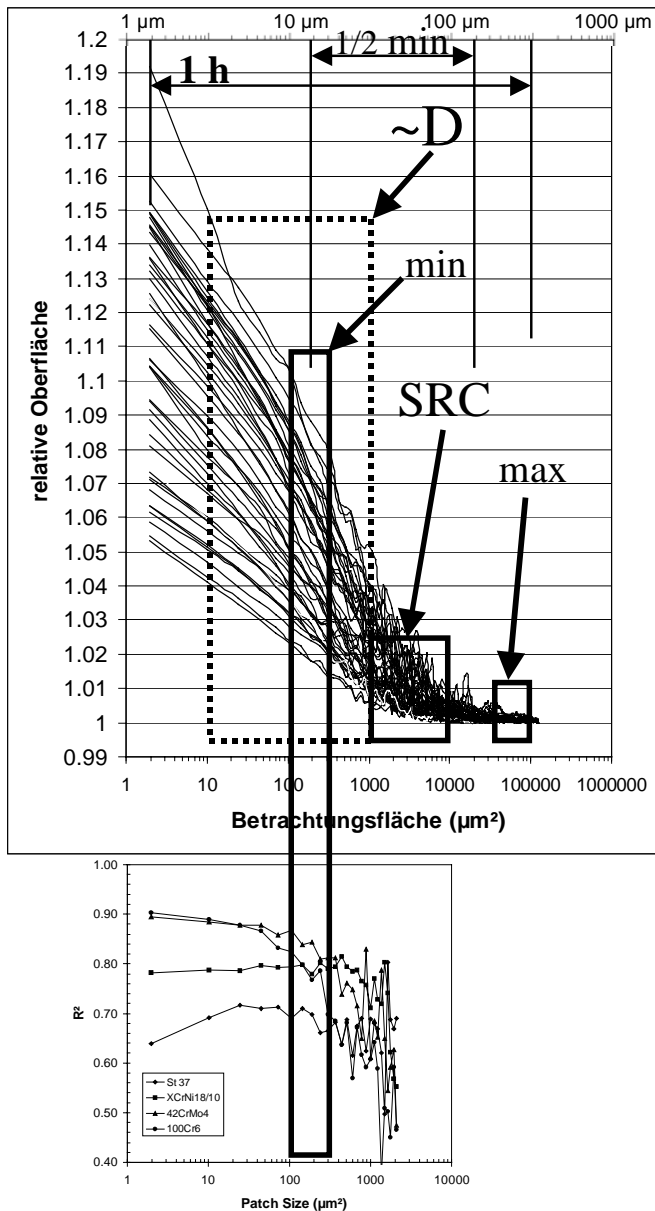


Abbildung 8: Gegenüberstellung aller Resultate aus Abbildung 7 (unten verkleinert) und der Originaldaten der Fraktalanalyse (oben). Eingezeichnet sind die Bereiche konstanter Komplexität (D), der gesamte Messbereich (1h), sowie der Bereich des Smooth-Rough-Crossover (SRC). Der mit "min" bezeichnete Rahmen gibt einen akzeptablen Vertrauensbereich für die Schichthaftung wieder, welcher durch Topographiemessung eines Bereichsfensters von "SRC" bis "min" (Dauer ca. 1/2 Minute) erreicht werden kann.

6. Diskussion

Diese Arbeit hat aufgezeigt, dass die Untersuchung der relativen Oberflächenvergrößerung bei Betrachtungsskalen um ca. $100 \mu\text{m}^2$ bereits eine gute Korrelation mit den Haftzugfestigkeitswerten für alle untersuchten Werkstoffe ergibt. Dieses Resultat legt nahe, dass in erster Näherung die Haftzugfestigkeitswerte mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Haftzentren, resp. -flächen korreliert. Ob die Anbindung der Spritzpartikel dabei auf mechanische Verklammerung oder chemische Bindung zurück zu führen ist, kann dabei nicht unterschieden werden. In beiden Fällen jedoch ist der Einfluss mit der spezifischen Oberfläche verknüpft.

Anhand der Erkenntnisse aus den Fraktalanalyseuntersuchungen kann nunmehr ein Messfenster definiert werden, welches das zeitaufwendige Vermessen der Topographie (Messdauer während der Studie pro Probe: 1 Stunde) auf einen für die Schichthaftung signifikanten Ausschnitt mit ca. 30 Sekunden Messdauer reduziert.

7. Literatur:

- [1] EN 13507: Thermisches Spritzen - Vorbehandlung von Oberflächen metallischer Werkstücke und Bauteile für das thermische Spritzen / Thermal spraying - Pre-treatment of surfaces of metallic parts and components for thermal spraying / Projection thermique - Traitement préalable de surfaces de pièces et composants métalliques pour projection thermique, (2001-03).
- [2] DIN 8200: Strahlverfahrenstechnik; Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren / Blasting; terms, classification of blasting techniques / Technique des rayons; terminologie, classification des procédés à rayons, (1982-10).
- [3] EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997) / Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287:1997) / Specification géométrique des produits (GPS) - Etat de surface: Méthode du profil - Termes, définitions et paramètres d'état de surface (ISO 4287:1997), (1998-08).
- [4] EN ISO 8503-2: Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen - Rauheitskenngrößen von gestrahlten Stahloberflächen - Teil 2: Verfahren zur Prüfung der Rauheit von gestrahltem Stahl - Vergleichsmusterverfahren (ISO 8503-2:1988) / Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates - Part 2: Method for the grading of surface profile of abrasive blast-cleaned steel - Comparator procedure (ISO 8503-2:1988) / Préparation des subjectiles d'acier avant application de peintures et de produits assimilés - Caractéristiques de rugosité des subjectiles d'acier décapés - Partie 2: Méthode pour caractériser un profil de surface en acier décapé par projection d'abrasif - Utilisation d'échantillons de comparaison visuo-tactile ISO (ISO 8503-2:1988), (1995-05).
- [5] Draskiewicz, T.: Einfluss der Haftgrundvorbereitung und der Spritzbedingungen auf die Haftfestigkeit gespritzter Metallüberzüge, Proceedings of 1st International Metal Spraying Conference (Published in Schweisstechnik 6/12/56) (1956), p. 381.
- [6] Steffens, H.-D.: The Bonding Mechanism in Metal Spraying, Proceedings of 3rd International Metal Spraying Conference (1962), p. 1-8.
- [7] Wielage, B. u. S. Steinhäuser, et al.: Investigation of the boundary metallic substrate - ceramic coating obtained by detonation and VPS plasma spraying methods - Untersuchungen zum Haftmechanismus zwischen Metallsubstraten und thermisch gespritzten Keramiksichten (D-Gun, VPS), Proceedings of ITSC 2002 International Thermal Spray Conference 1 (2002), p. 1016-1019.
- [8] Shieu, F. S. u. M. J. Deng, et al.: Effect of Surface Pretreatments on the Adherence of Porcelain Enamel to a Type 316L Stainless Steel, Journal of Materials Science 34 (1999), p. 5265-5272.
- [9] Coddet, C. u. G. Montavon, et al.: Surface Preparation and Thermal Spray in a Single Step: The PROTAL Process - Example of Application for an Aluminum-Base Substrate, Journal of Thermal Spray Technology 8 (1999), p. 235-242.
- [10] Amada, S. u. T. Hirose: Influence of Grit-Blasting Pretreatment on the Adhesion Strength of Plasma Sprayed Coatings - Fractal Analysis of Roughness, Surface and Coatings Technology 102 (1998), p. 132-137.
- [11] Gawne, D. T. u. G. Dong, et al.: The Influence of Pretreatment on the Adhesion of Ceramic Coatings on Steel, Transactions of the Institute of Metal Finishing 75 (1997), p. 205-207.
- [12] Haywood, D. M. u. A. N. Kirkbride: Surface Preparation - The Foundation for a Coating, Proceedings of 2nd Plasma-Technik-Symposium 1 (1991), p. 373-381.
- [13] Wigren, J.: Grit-Blasting as Surface Preparation before Plasma Spraying, Proceedings of 1st National Thermal Spray Conference - Thermal Spray: Advances in Coatings Technology (1987), p. 99-104.
- [14] Kniewald, D.: Contributions to the Problems of Preliminary Treatment of Surfaces by Means of Blasting and its Influence on the Properties of Metal Spraying Coating, Proceedings of 8th International Thermal Spraying Conference (1976), p. 482-491.
- [15] Endoh, M.: Influence of Principal Factors of Pre-Treatment on Surface Roughness on Mild Steel Substrate and Adhesive Strength of Zn Sprayed Coating, Proceedings of 8th International Thermal Spraying Conference (1976), p. 492-502.
- [16] Siegmann, S. u. C. A. Brown: Oberflächencharakterisierung von Proben zum thermischen Spritzen, Proceedings of Thermische Spritzkonferenz TS 96 175 (1996), p. 288-289.

- [17] Siegmann, S. u. C. A. Brown: Investigations on the Substrate Surface Morphology for Thermal Sprayed Coatings, Proceedings of 17th International SAMPE Europe Conference: Success of Materials by Combination (1996), p. 149-158.
- [18] Siegmann, S. u. C. A. Brown: Oberflächenbearbeitung und -charakterisierung von Werkstoffen zum thermischen Spritzen, EMPA Projekte 1996 (1996), p. 15.
- [19] Siegmann, S. D. u. C. A. Brown: Scale-Sensitive Fractal Analysis for Understanding the Influence of Substrate Roughness in Thermal Spraying, Proceedings of 1st United Thermal Spray Conference - Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances (1997), p. 665-670.
- [20] Siegmann, S. D. u. C. A. Brown: Investigation of Substrate Roughness in Thermal Spraying by a Scale-Sensitive 3-D Fractal Analysis Method, Proceedings of 15th International Thermal Spray Conference - Thermal Spray: Meeting the Challenges of the 21st Century 1 (1998), p. 831-836.
- [21] Siegmann, S. u. C. A. Brown: Surface Texture Correlations with Tensile Adhesive Strength of Thermally Sprayed Coatings Using Area-Scale Fractal Analysis, Proceedings of 2nd United Thermal Spray Conference 1 (1999), p. 355-360.
- [22] Siegmann, S. u. C. A. Brown: Haftfestigkeitsuntersuchungen an vakuum plasmagespritzten NiCr 80/20-Schichten mit Hilfe der 3D-Fraktalanalyse, Proceedings of 2. Freiburger Plasmaspritztag - Oberflächenveredelung durch thermische Beschichtungen (1999), p. 4.
- [23] Siegmann, S. u. C. A. Brown: A Method for Determining the Characteristic Scale for Adhesion for a Discrete Bonding Model on a Rough Substrate, Proceedings of X. International Colloquium of Surface (2000), p. 196-204.
- [24] Brown, C. A. u. S. Siegmann: Fundamental Scales of Adhesion and Area-Scale Fractal Analysis, Proceedings of 8th International Conference on the Metrology and Properties of Engineering Surfaces (2000), p. 5.
- [25] Mandelbrot, B.: Les Objects Fractals, (1975), p. 268.
- [26] Brown, C. A. u. D. F. Dauw, et al.: Comparison of Fractal and Conventional Topographic Analysis of Electric Discharge Machined Ceramic Surfaces, Surface Engineering (1990), p. 39-51.
- [27] Doege, E. u. B. Laackman, et al.: Characterisation of Technical Surfaces by Means of Fractal Geometry, Steel Research 66 (1995), p. 113-116.
- [28] Hasegawa, M. u. J. Liu, et al.: Calculation of the Fractal Dimensions of Machined Surface Profiles, Wear 192 (1995), p. 40-45.
- [29] Thomas, T. R. u. B.-G. Rosén, et al.: Fractal Characterisation of the Anisotropy of Rough Surfaces, Wear 232 (1999), p. 41-50.
- [30] Hamblin, M. G. u. G. W. Stachowiak: Measurement of Fractal Surface Profiles Obtained from Scanning Electron and Laser Scanning Microscope Images and Contact Profile Meter, Journal of Computer-Assisted Microscopy 6 (1994), p. 181-194.
- [31] Montavon, G. u. C. Coddet, et al.: Microstructural Index to Quantify Thermal Spray Deposit Microstructures Using Image Analysis, Journal of Thermal Spray Technology 7 (1998), p. 229-241.
- [32] Guessasma, S. u. G. Montavon, et al.: Fractal dimension as an indicator of thermal spray coatings roughness - Fraktalanalyse zur Beschreibung der Rauheit thermisch gespritzter Oberflächen, Proceedings of ITSC 2002 International Thermal Spray Conference 1 (2002), p. 949-953.
- [33] Amada, S. u. T. Hirose, et al.: Introduction of Fractal Dimension to Evaluation of Adhesive Strength, Proceedings of 14th International Thermal Spray Conference: Thermal Spraying-Current Status and Future Trends 2 (1995), p. 885-890.
- [34] Amada, S. u. H. Yamada: Introduction of Fractal Dimension to Adhesive Strength Evaluation of Plasma-Sprayed Coatings, Surface and Coatings Technology 78 (1996), p. 50-55.
- [35] Amada, S. u. T. Hirose: Application of Plane Fractal Geometry to Adhesion Strength of Thermal Sprayed Coatings, Proceedings of 1st International Thermal Spray Conference - Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research 1 (2000), p. 1071-1076.
- [36] Amada, S. u. A. Satoh: Fractal Analysis of Surface Roughened by Grit Blasting, Journal of Adhesion Science and Technology 14 (2000), p. 27-41.
- [37] Brown, C. A. u. W. A. Johnsen, et al.: Method of Quantifying the Topographic Structure of a Surface, (1994), p. .
- [38] Brown, C. A. u. P. D. Charles, et al.: Fractal Analysis of Topographic Data by the Patchwork Method, Wear 161 (1993), p. 61-67.
- [39] EN 582: Thermisches Spritzen; Ermittlung der Haftzugfestigkeit / Thermal spraying; determination of tensile adhesive strength / Projection thermique; mesure de l'adherence par essais de traction, (1993-10).
- [40] ISO 14916: Thermisches Spritzen - Bestimmung der Haftfestigkeit mittels Zugversuch / Thermal spraying - Determination of tensile adhesive strength / Projection thermique - Mesure de l'adherence

par essais de traction, (1999-08).

- [41] EN ISO 3274: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1996) / Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments (ISO 3274:1996) / Specification geometrique des produits (GPS) - Etat de surface: Methode du profil - Caracteristiques nominales des appareils a contact (palpeur) (ISO 3274:1996), (1997-11).
- [42] ISO 13565-1: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 1: Filterung und allgemeine Messbedingungen / Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Surface having stratified functional properties - Part 1: Filtering and general measurement conditions / Specification geometrique des produits (GPS) - Etat de surface: Methode du profil; surfaces ayant des proprietes fonctionnelles differentes suivant les niveaux - Partie 1: Filtrage et conditions generales de mesurage, (1996-12).
- [43] Brown, C. A. u. G. Savary: Describing Ground Surface Texture Using Contact Profilometry and Fractal Analysis, *Wear* 141 (1991), p. 211-226.