

Lufthygiene: Untersuchungen zum Staubablagerungsverhalten in flexiblen Lüftungsleitungen und Darstellung eines einfachen Reinigungsverfahrens

Zusammenfassung:

Flexible Lüftungsleitungen zeigen bei Beaufschlagung mit künstlichem Prüfstaub keine höheren Staublasten als das glattwandige Gegenstück. Darüber hinaus lassen sich Staubablagerungen mittels rückwärtsstrahlender Druckluftdüse und mechanischer Absaugung zu über 90% entfernen.

1. Einleitung

Flexible Luftleitungen sind aufgrund ihres inneren Oberflächenreliefes bis dato aus hygienischer Sicht weniger akzeptiert als entsprechende glattwandige Systeme. So heißt es in der Neufassung der VDI 6022 vom 15.12.06 beispielsweise:

„Flexible Luftleitungen die keine technisch glatten Innenflächen haben, sind wegen ihrer eingeschränkten Reinigungsmöglichkeit auf das notwendige Maß zu beschränken und bei hoher Verschmutzung zu erneuern.“ (VDI 6022, 12.2005)

In der folgenden Studie der Firma biotec GmbH, Gütersloh, wird der Frage nachgegangen, ob flexible Luftleitungen tatsächlich zu einer erhöhten Deposition von Staub neigen. In Zusammenarbeit mit der Firma westaflexwerk GmbH wird ein Reinigungsverfahren vorgestellt, das mit geringem Aufwand sehr gute Reinigungsergebnisse generiert.

1.1. Strömungstechnische Vorbetrachtungen

1.2. Transport und Deposition von Staub

Als Staub werden in der Luft verteilte, disperse Feststoffe beliebiger Form, Struktur und Dichte bezeichnet. Der normal in der Luft enthaltene Staub weist Partikelgrößen zwischen 1...30µm auf (Recknagel, Sprenger, Schramek, 2005). Der Transport von Partikeln im freien Luftstrom erfolgt durch konvektive, diffusive und externe Kräfte. Als externe Kraft wirkt insbesondere die Schwerkraft auf die Partikel. Der Anteil der Schwerkraft (Sedimentation) am Gesamtfluss wächst mit der Größe der Partikel. Beim Transport von Staub zur Oberfläche und dessen Ablagerung an die Oberfläche (Deposition) wirken neben den genannten Kräften auch noch die Adhäsion und die Impaktion (Trägheitsabscheidung).

Partikel werden vom Luftstrom auf Oberflächen bewegt oder in diesen transportiert, wenn die auf das Partikel wirkende Schubspannungsgeschwindigkeit einen bestimmten Schwellenwert erreicht bzw. überschreitet. Am Schwellenwert herrscht ein Kräftegleichgewicht zwischen Gravitations-, Adhäsions-, Reibungs- und Auftriebskräften. Eine Abschätzung für den Schwellenwert der Schubspannungsgeschwindigkeit u_{ts} auf einem trockenen, völlig ebenen Boden gibt Shao und Lu (2000).

1.3. Strömung in flexiblen Rohren

Werden Rohre oder Kanäle von einem Fluid durchströmt, kommt es zum Druckabfall in Strömungsrichtung. Dieser Druckverlust ist ein irreversibler Verlust an Strömungsenergie infolge Reibung, Strömungsstörungen (z.B. Wirbel) oder Sekundärströmungen. Ein Rohr kann sowohl laminar als auch turbulent durchströmt werden, wobei die meisten in technischen Anlagen auftretenden Rohrströmungen turbulent sind.

Die Wellenform flexibler Lüftungsleitungen führt zu einer erhöhten Rauigkeit (Rillenrauigkeit). Es kommt zu einem Impulsaustausch zwischen der Kernströmung und der Kammerströmung. Die Kernströmung wird durch den lichten Durchmesser des Rohres begrenzt. Der Rillenbereich wird als Kammer bezeichnet.

Im Bild 1 ist ein Beispiel für die Durchströmung eines Wellenrohrs dargestellt. Mit steigender Reynolds-Zahl bilden sich Primär- und/oder Sekundärwirbel in den Kammern aus. Neben der Reynolds-Zahl ist auch die Geometrie (Wellenform) der Kammer für die Ausbildung der Sekundärströmung entscheidend.

Re-Bereiche	Laminarbereich	Übergangsbereich		Turbulenzbereich	Hochgeschwindigkeitsbereich
Strömungszustand					
Geschw.-profil					

Bild 1: Strömungszustand und Rohrreibungszahl eines Wellenrohrs (Auszug aus Wagner, 1992)

2. Material und Methode

2.1. Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen wurde von der Firma westaflexwerk GmbH ein 9 m langes Luftleitungssystem (System 100, Quadrofix) mit regulierbarem Ventilator zur Verfügung gestellt. Über Steckverbindungen besteht die Möglichkeit, 40cm lange Untersuchungsobjekte der starren, weitgehend glatten Lüftungsleitungen gegen flexible Lüftungsleitungen auszutauschen. Die Positionen für den Austausch wurden nach 1m, 2 m, und 4 m Teststrecke in das Luftleitungssystem eingebracht (Bild 2).

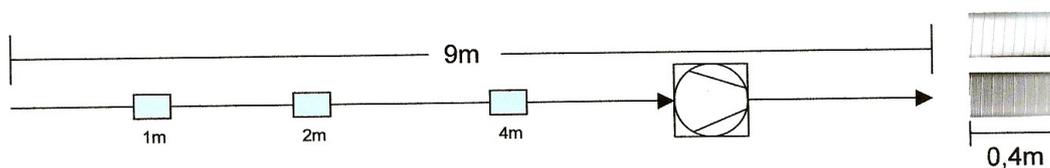
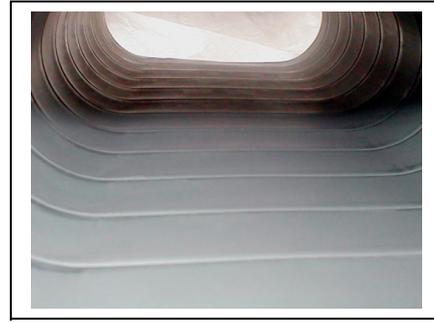


Bild 2 Versuchsaufbau mit Position der Untersuchungsobjekte

Im Bild 3 sind die inneren Oberflächen der Teilstücke dargestellt. Bei gleicher Leitungslänge weist die flexible Lüftungsleitung eine 2,1-fach größer innere Oberfläche auf.



a)



b)

Bild 3 Innere Oberfläche der untersuchten Lüftungsleitungen

a) System 100, Quadroflex

b) System 100, Quadrofix

Über eine im System fest integrierte Staudrucksonde kann die mittlere Luftgeschwindigkeit im Rohr ermittelt werden. Dazu wird eine Staudruck-Messeinrichtung Typ MSD eingesetzt. Die Messwerte wurden mittels Flügelradanemometer (Testo 445) überprüft.

2.2. Prüfstaub

Zur Messung der Staubdeposition auf welligen Rohroberflächen sind Wischverfahren nur bedingt anwendbar. Jedoch sind Prüfstäube mit einem hohen Anteil dissozierbarer Komponenten kommerziell erhältlich. Werden die Untersuchungsobjekte mit einem solchen Prüfstaub beaufschlagt, können die dissozierbaren Prüfstaubkomponenten in einem definierten Volumen destillierten Wassers ausgewaschen werden. Durch konduktometrische Analyse der Leitfähigkeit des Waschwassers und Vergleich mit einer zuvor erstellten Eichgrade sind so die Staubmenge bestimmbar. Das Verfahren wird mit glatten Rohrsystemen über die Staubdichtepfung nach VDI 6022 verifiziert.

Als Prüfstaub wird Arizona Staub nach SAE J726 Rev. JUN93 der Firma KSL Prüftechnik GmbH eingesetzt. Die Partikelverteilung nach Gewichtsprozent ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Partikelverteilung im Arizonastaub nach Gew.-%

Partikelgröße	fein
0 – 5	39 ± 2
5 – 15	18 ± 3
10 – 20	16 ± 3
20 – 40	18 ± 3
40 – 80	9 ± 3

2.3. Versuchsdurchführung

Für jeden Durchgang werden 10 x 10 g, also insgesamt 100 g Arizona Prüfstaub auf der Analysenwaage (Kern) eingewogen. Die Aliquote wird anschließend hintereinander bei laufendem Ventilator und definiertem Luftvolumenstrom am saugseitigen, offenen Ende in das System eingebracht. Das System läuft anschließend weitere 10 Minuten, bevor die Probe genommen wird. Das zu beprobende 40 cm lange Rohrstück wird aus der Luftleitung heraus genommen und in einer geschlossenen Kunststoffbox mit 2l destilliertem Wasser

ausgewaschen. Die gewonnenen Proben verbleiben für 12 h auf dem Magnetrührer und werden anschließend einer Leitfähigkeitsprüfung unterzogen. Über die Eichgrade wird jedem Leitfähigkeitswert eine Staubmenge zugeordnet. Das Luftkanalsystem wird nach jedem Experiment auseinandergelöst, ausgewaschen, mit destilliertem Wasser gespült und getrocknet.

Zur Erstellung der Eichgrade werden mit Hilfe der Analysenwaage (Firma Kern 770) definierte Prüfstaubmengen (1 g bis 20 g) eingewogen und anschließend in Bechergläsern in 2 l H₂O gelöst (Temperatur 16,9 bis 18°C). Die Proben verbleiben über 12 h auf dem Magnetrührer (Ikamag RCT, mittlere Drehzahl) und werden anschließend mittels Conductometer (WTW, LF-191) vermessen. Die Staubmenge wird in einem Diagramm der Leitfähigkeit gegenübergestellt.

Zur Verifizierung der hier vorgestellten Methode wurde das Wischverfahren nach JADCA (VDI 6022) in starren Wickelfalzrohren eingesetzt. Der auf der inneren Oberfläche des starren Wickelfalzrohres abgelagerte Staub wurde an 4 Messstellen mittels Schablone (5 cm x 5 cm) und Trockenwisch Tuch (Polypropylen, fusselfrei nicht hygroskopisch, Fläche 90 cm²) aufgenommen. Die abgehobene Staubfracht wurde gravimetrisch durch Differenzwägung bestimmt. Beide Messverfahren wurden anschließend gegenüber gestellt.

Zum Nachweis der Reinigungsmöglichkeit von flexiblen Rohrsystemen wird das Luftleitungssystem bei einem Luftvolumenstrom von 5,0 m/s mit 100 g Prüfstaub beaufschlagt. Die abgelagerte Staubfracht wird anschließend nach 1 m Teststrecke vor und nach Reinigung mittels der Leitfähigkeitsmethode bestimmt.

Die Reinigung erfolgt praxisnah mit einem Druckluftsystem der Firma Steg Raumlufttechnische Anlagen Reinigung GmbH. Zum Einsatz kommt ein Kompressor mit einem Arbeitsdruck von etwa 4,5 bar und einem Volumenstrom von 350 l/min bei einer Betriebsspannung von 220 V. Auf einen Lufttrockner nach dem Kompressor wurde verzichtet. Mit einer an dem Kompressor angeschlossenen flexiblen rückwärts strahlenden Druckluftdüse erfolgt die Reinigung des Luftleitungssystems. Der aufgewirbelte Staub wird am saugseitigen, offenen Ende des Versuchsaufbaus mittels eines K1-Industriesaugers (2000 W, max. 305 m³/h, max. 21500 Pa Unterdruck) abgesaugt.

3. Ergebnisse der Untersuchungen

Das Bild 3 zeigt eine typische Eichgrade mit Arizona Prüfstaub, wie sie für die Ermittlung der Staubablagerungen in den Rohrteilstücken eingesetzt wurde. Die Grundleitfähigkeit des destillierten Wassers lag bei 4,5 Mikrosiemens pro cm und erhöhte sich nach 12 stündiger Inkubation von 40 cm langen Rohrteilstücken in 2 l destilliertem Wasser um maximal 0,7 Mikrosiemens/cm (Abzissen 0-Wert).

Anhand der exemplarisch dargestellten Eichgrade wurde die Staubdeposition in starren bzw. flexiblen Lüftungsleitungen nach dem Einbringen von jeweils 100 g Prüfstaub bestimmt. Die Experimente fanden bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten statt, wobei das Bild 4 exemplarisch die gefundene Staubmenge bei einem Luftvolumenstrom von 5,0 m/s nach 2 m Teststrecke wiedergibt. Die Standartabweichung mit (n = 6) für dieses Verfahren wurde mit ± 17 % ermittelt.

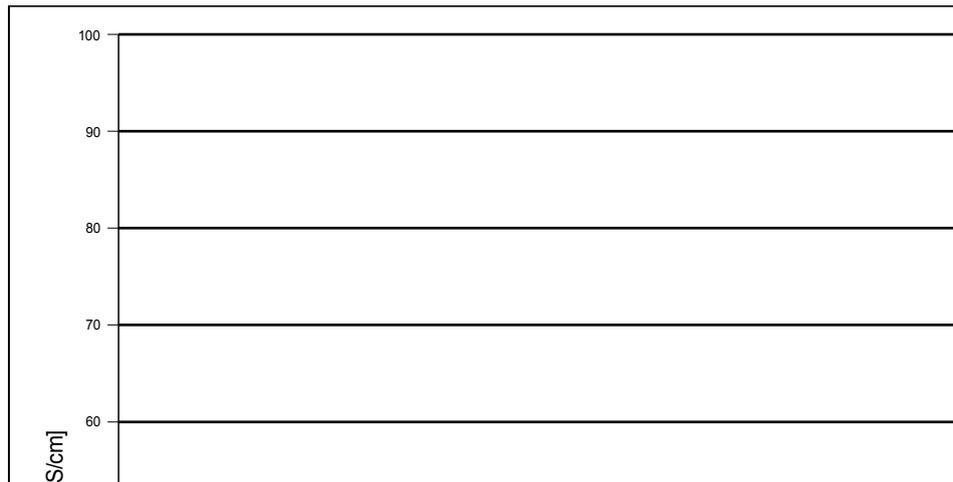


Bild 3 Arizona Prüfstaub - Eichgrade

Bei niedrigeren Luftgeschwindigkeiten (4,0 m/s) wurden vergleichbare Differenzen in den Absolutwerten gefunden. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten (6,0 m/s) kam es zu einer Annäherung der Staubablagerungen in flexiblen und starren Rohrteilstücken.

Grundsätzlich konnte bei den Experimenten eine Abnahme der Deposition über die gesamte Teststrecke beobachtet werden. So konnten beispielsweise bei einer Luftgeschwindigkeit von 5,0 m/s nach 4 m Teststrecke nur noch 38,9 % der Staubmenge nach 1 m Teststrecke wieder gefunden werden.

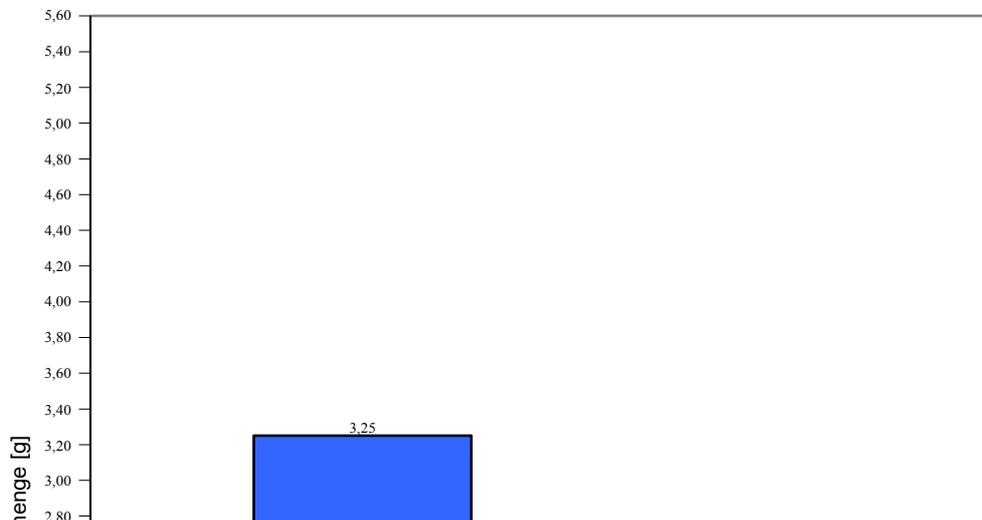


Bild 4 Staubablagerungen in der flexiblen (links) und starren Lüftungsleitung (rechts)

Die hier beschriebene Leitfähigkeitsmessung zur Bestimmung von Staubablagerungen in flexiblen Lüftungsleitungen wurde im Folgenden mit einem Verfahren der VDI 6022 zur Staubdichteprüfung in RLT-Anlagen korreliert. Beide Verfahren sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da bei der Leitfähigkeitsmessung die komplette innere Oberfläche eines Rohrteilstückes herangezogen wird, währenddessen beim Trocken-Wischverfahren eine Teilfläche (25 cm²) beprobt wird. Zu beachten ist weiterhin, dass bei Luftkanälen aufgrund der Schwerkraft eine höhere Staubdichte im Bodenbereich zu erwarten ist. Bei Beprobung des

Bodenbereiches mit dem Trocken-Wischverfahren werden also Maximalwerte erfasst, die nicht auf die gesamte innere Oberfläche eines Teilstückes hochgerechnet werden können.

Zur Korrelation beider Messverfahren wurde daher die relative Staubmengenabnahme über die Versuchsstrecke bestimmt. Hierzu wurde an zwei Messpunkten (nach 2 m und 4 m) die Staubdeposition bei starren Lüftungsleitungen untersucht und die ermittelte relative Differenz gegenübergestellt. Die Untersuchungsergebnisse sind im Bild 5 dargestellt. Die relative Differenz der Mittelwerte (n = 4) nach 2 m und 4 m Teststrecke zeigt, dass eine Korrelation beider Messverfahren zu beobachten ist (47,87 % zu 65,6 %).

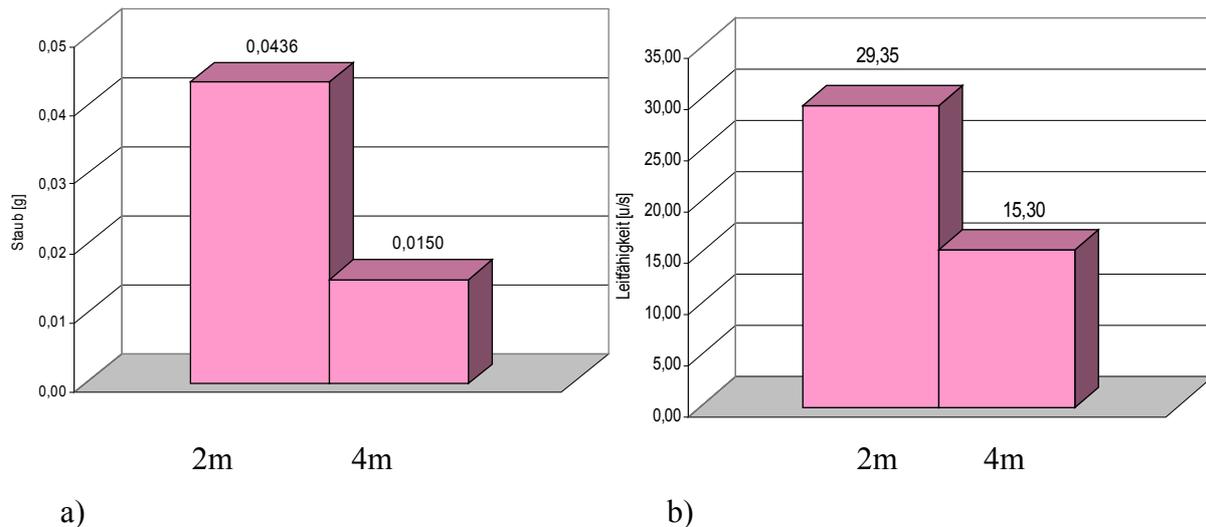


Bild 5 Vergleich der Staubprobenahmesysteme

- a) Leitfähigkeitsmessung - Relative Differenz: 47,9%
- b) Trockenwisch-Verfahren - Relative Differenz: 65,6%

Die Reproduzierbarkeit des Trockenwischverfahrens wurde über eine Messreihe bestimmt bei der 25 g Arizona Staub homogen auf einer Oberfläche von 1240 cm² verteilt und hiervon jeweils 25 cm² (n = 10) beprobt wurden. Das Verfahren ergibt in diesem Experiment eine relative hohe Standardabweichung von $\pm 30\%$ im Vergleich zur Leitfähigkeitsmessung $\pm 17\%$ (n=6).

Das Bild 6 zeigt die Ergebnisse zur Reinigungsfähigkeit von flexiblen Lüftungsleitungen. War vor Reinigung in den Untersuchungsobjekten eine Staubmenge von 9,08 g nachweisbar, konnte diese Staubmenge nach Reinigung um 90,3 % auf 0,88 g reduziert werden.

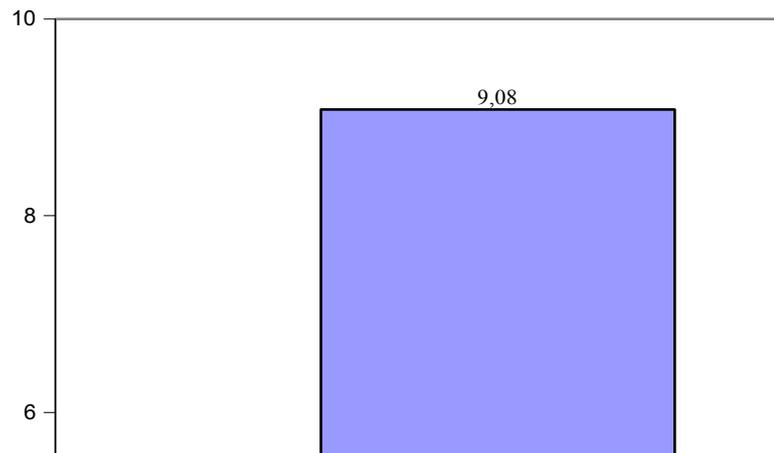


Bild 6 Reinigungsfähigkeit von flexiblen Lüftungsleitungen - Staubmenge (Arizona Staub) in 40 cm langen Teilstücken vor und nach Reinigung

4. Diskussion

Bei geradliniger Installation eines Luftkanals mit integrierten flexiblen Lüftungsleitungen kommt es nicht zu erhöhten Deposition eines definierten Prüfstaubes im Vergleich zu starren Luftleitungssystemen.

Unter den gewählten Versuchsbedingungen sind bei der angegebenen Luftgeschwindigkeit eingebrachte Staubfrachten sogar in geringerer Masse in Teilrohrstücken nachzuweisen. Die sich in den Kammern der Lüftungsleitungen ausbildenden Wirbel könnten als „Transportrollen“ wirken, die die Staubfracht überwiegend in der Kernströmung halten (siehe auch Bild 1). Die Deposition des Prüfstaubes ist dann abhängig von der Wirbelausbildung in den Kammern.

Durch den Luftstrahl aus der Druckluftdüse konnte der überwiegende Teil des deponierten Staubes aus den Kammern der Lüftungsleitung in die Kernströmung gespült werden. Das Ergebnis einer 90%igen Reinigung ist zudem bemerkenswert, da über das Druckluftsystem feine Wassertröpfchen in das Luftleitungssystem gelangten, sich an der bestaubten Oberfläche anlagerten und so eine Reinigung erschwert wurde.

Die entsprechenden Befunde gelten für den oben gewählten Versuchsaufbau. Zukünftige Experimente sind mit anderen Prüfstäuben geplant. Darüber hinaus erscheint es sinnvoll das Ablagerungsverhalten von Stäuben nicht nur in linearen Luftleitungssystemen zu überprüfen, sondern auch Untersuchungen an gebogenen Luftleitungen vorzunehmen, um die hier auftretenden Veränderungen im Depositionsverhalten zu berücksichtigen.

Mit dem hier dargestellten Reinigungsverfahren wird deutlich, dass es durchaus möglich ist Luftkanäle mit flexiblen Rohranteilen, wie sie etwa in der kontrollierten Wohnraumlüftung eingesetzt werden auf einem geringen Verschmutzungsgrad zu halten.

Nach VDI 6022 sind derartige Luftkanäle zukünftig mit einer F7 Filterstufe zu versehen, so dass außerdem hierüber ein erhöhter Hygienestandard in flexiblen Rohrleitungssystemen zu erwarten ist.

Bohl (1991)

Bohl, Willi: Technische Strömungslehre. 9.durchges. Auflage. Würzburg: Vogel

Recknagel, Sprenger, Schramek (2005)

Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 72. Auflage. München: Oldenbourg Industrieverlag

Shao und Lu (2000)

Shao, Yaping und Hua Lu: A simple expression for wind erosion threshold friction velocity, Journal of Geophysical Research 105 (D17), 22,437-22,443