Filmische Verunreinigungen: Herausforderungen für die zeitgemäße Anlagentechnik

1. Einleitung

Dieses FiT Paper erläutert die anlagen- und verfahrenstechnischen Anforderungen zur Bewältigung filmischer Verunreinigungen in industriellen Reinigungsprozessen. Es richtet sich an Anwender mit Grundlagenwissen und ergänzt die FiT-Checkliste zur Planung von Reinigungsprozessen, die bereits Informationen zur Beschaffung einer Reinigungsanlage bietet.

Zentral für die Entwicklung einer effektiven Reinigungslösung ist die genaue Definition der erforderlichen Sauberkeitsstandards. Diese Handlungsempfehlung fokussiert sich auf die spezifischen Herausforderungen, die filmische Verunreinigungen für die Anlagentechnik mit sich bringen. Dabei wird deutlich, dass die jeweilige Sauberkeitsanforderung die entscheidende Messgröße für die Auswahl und Auslegung einer geeigneten Reinigungsanlage darstellt.

2. Definition: Filmische Verunreinigungen

Eine filmische Verunreinigung ist eine dünne, zusammenhängende (nicht-partikuläre) Schicht aus unerwünschten, fremdartigen Bestandteilen auf Teil- oder Vollflächen von Bauteilen.[1] (Anmerkung: Diese Definition lässt bewusst die chemische Natur offen.) Sie gefährden nachfolgende Fertigungsprozesse und beeinträchtigen so die finale Produktqualität.

Zu den filmischen Verunreinigungen gehören beispielsweise:

- Öle und Fette
- Rückstände von Reinigern
- Korrosionsschutzmittel
- Beschichtungen
- Kühlschmierstoffe
- und weitere Fertigungshilfsmittel.

Je nach Art und Eigenschaften der filmischen Verunreinigung ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Verfahrenstechnik, Chemie und Medienaufbereitung im Reinigungsprozess.

[1] Quelle: FiT-Richtlinie, Filmische Verunreinigungen beherrschen

3. Einfluss der Bauteileigenschaften

Schichtenmodell einer Bauteiloberfläche

Filmische Verunreinigungen können nicht nur auf der Oberfläche selbst vorkommen (2-D-Verunreinigung), sondern auch in den Randschichten des Bauteils bis in die verformte Grenzschicht hinein (3-D-Verunreinigung). Poröse Strukturen und chemische Reaktionen können dazu führen, dass Verunreinigungen tiefer ins Bauteil eindringen, was die Reinigung deutlich erschwert.

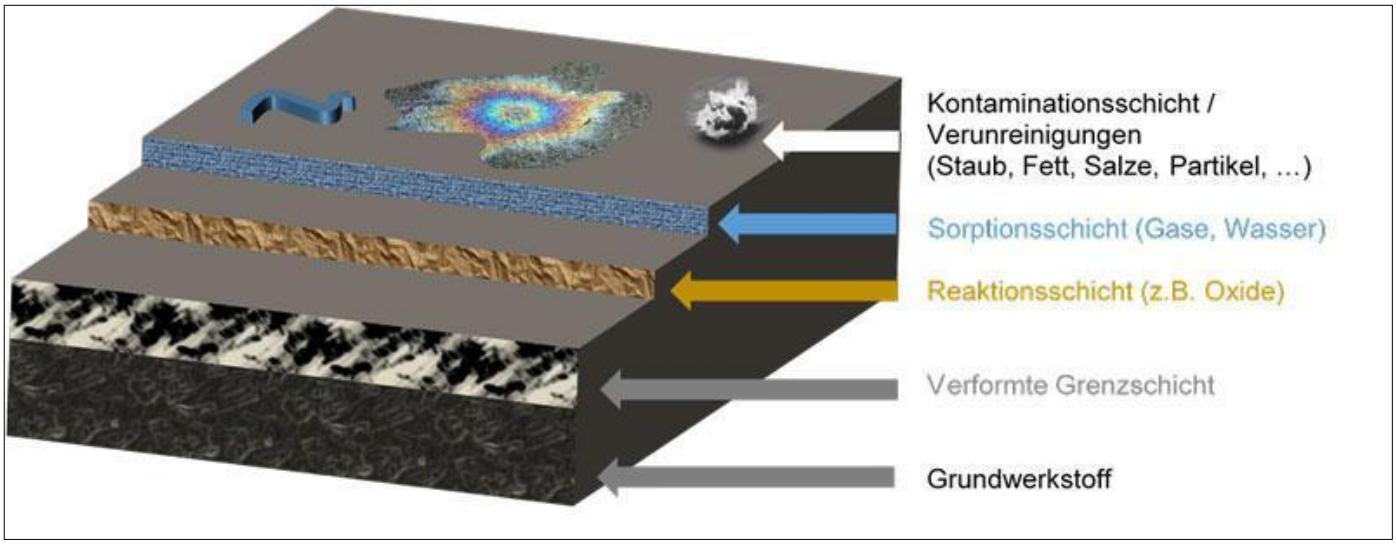

Abb. 1: Schichtenmodell einer Bauteiloberfläche; Quelle: Frank-Holm Rögner / mo

2D-Verunreinigungen

Die Eigenschaften des zu reinigenden Bauteils, insbesondere dessen Form oder Geometrie, beeinflussen maßgeblich die Reinigungsprozesse. Besonders komplexe Bauteile, wie solche mit Hinterschneidungen oder Kühlkanälen, stellen dabei spezielle Herausforderungen dar, da Reinigungsmechanismen dort anders wirken müssen.

3D-Verunreinigungen

Unerwünschte, fremdartige Bestandteile können zudem durch Umformprozesse eingeschlossen werden und sind damit nicht mehr oberflächlich zugänglich. Sie werden (auch) als 3D-Verunreinigungen bezeichnet. Daher müssen Bauteile gegebenenfalls zwischen den Fertigungsprozessen gereinigt werden.

Einflüsse durch die Werkstoffe

Neben der Form und Geometrie eines Bauteils beeinflusst auch das Material bzw. der Werkstoff dessen Reinigung. Dieser kann sowohl physikalisch als auch chemisch mit dem Reinigungsmedium und den Verunreinigungen reagieren und so die Haftungskräfte verändern. Bei Anwendungen mit hohen Anforderungen an die technische Sauberkeit ist daher die Wahl des richtigen Werkstoffs entscheidend.

4. Einflüsse auf die Verfahrenstechnik

Die Fähigkeiten eines funktionierenden Reinigungs- und ggf. Spülprozesses sind abhängig von Art, Zustand und Menge der Verschmutzung (inkl. deren Schwankungsbreite) und Geometrie bzw. Form, Material und Struktur des Bauteils sowie dessen räumlicher Anordnung (z. B. Packungsdichte).

Hierbei muss der Reinigungsprozess zwei Aufgaben erfüllen:

- das Anheben der Verschmutzung und
- den Abtransport der Verschmutzung vom Bauteil.

Um die **Anhebefähigkeit** eines Verfahrens zu beurteilen, sollte nicht nur die Art der Verschmutzung (partikulär, pigmentartig, filmisch) bekannt sein, sondern auch deren Lage. Strömungstechnisch lassen sich diese zwei Bereiche so definieren: die turbulente Schicht und die laminare Unterschicht.

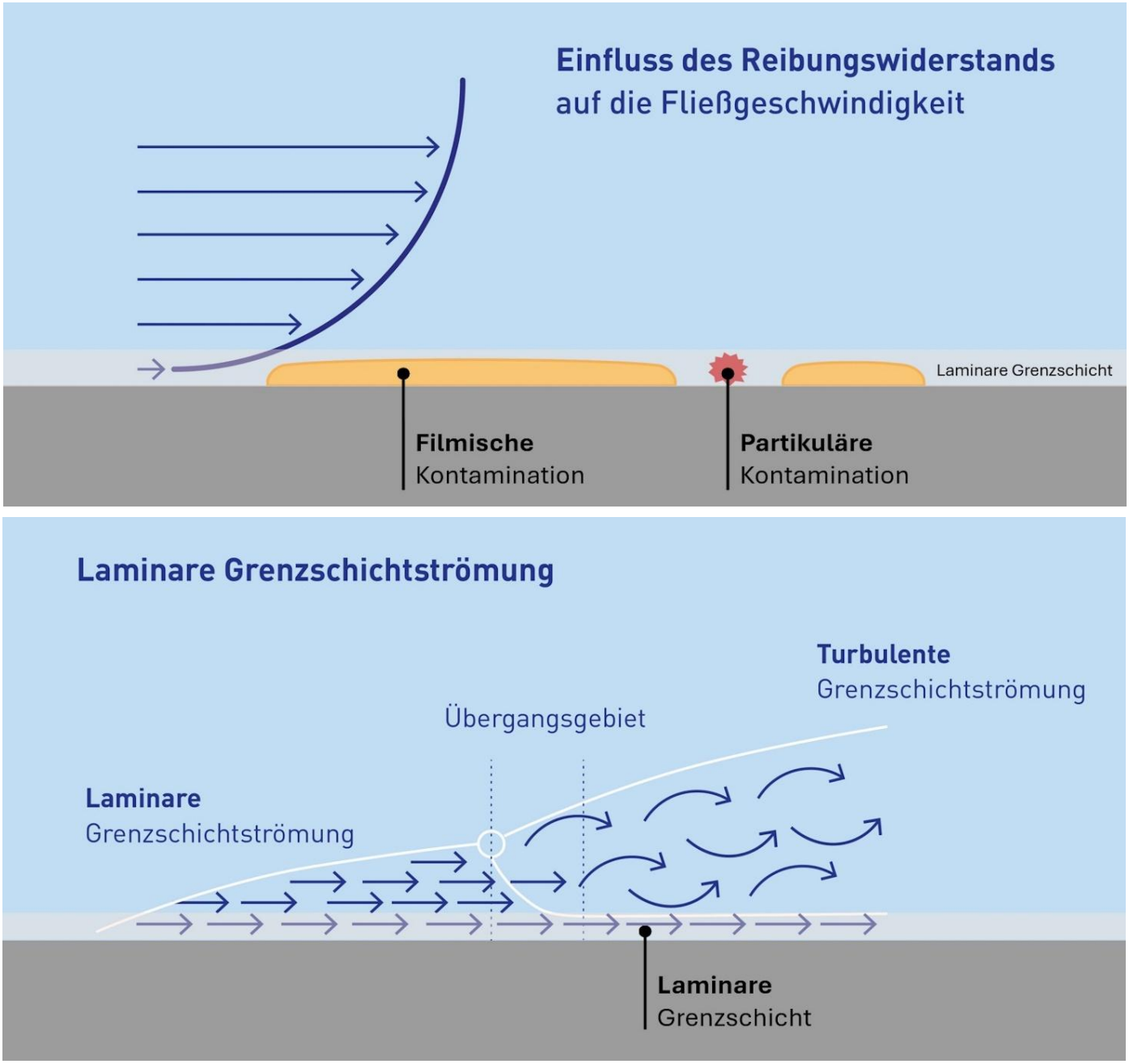

Abb. 2: Strömung und Unterschicht; Quelle: LPW Reinigungssysteme GmbH

- Partikuläre Verschmutzungen befinden sich oft in der turbulenten Strömungsschicht.
- Filmische Verunreinigungen sind eher in der laminaren Grenzschicht zu finden.
- Mischformen (Pigmente) kommen in beiden Bereichen vor.

Abtransport der Verschmutzung

Die Transportfähigkeit eines Verfahrens bezieht sich darauf, wie effektiv es die angehobene Verschmutzung vom Bauteil entfernt, um eine erneute Verschmutzung (Rückverschmutzung) zu verhindern. Der Abtransport der angehobenen Verschmutzung vom Bauteil wird ebenfalls von der Bauteilgeometrie und -anordnung beeinflusst, da auch hier strömungstechnische Grenzen bestehen.

Für diese beiden Teilaufgaben gibt es jeweils verschiedene Reinigungsverfahren, die in der Praxis unterschiedliche Stärken und Schwächen zeigen. Um die Schwächen der einzelnen Verfahren auszugleichen, hat es sich bewährt, mehrere Reinigungsverfahren miteinander zu kombinieren. Durch dieses Zusammenspiel verschiedener Vorgehensweisen kann ein optimales Gesamtergebnis erzielt werden.

Als optische Hilfestellung zur Bewertung der Stärken und Schwächen einzelner Verfahren bietet sich ein Netz- oder auch Spinnennetzdiagramm an, das im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

5. Das Spinnennetzdiagramm als grafische Hilfestellung zur Beurteilung von Stärken und Schwächen verschiedener Reinigungsverfahren

Ein Spinnennetzdiagramm, auch bekannt als Netzdiagramm, Sterndiagramm, Kiviat- oder Radardiagramm, ist eine grafische Darstellung, die mehrere gleichwertige Kategorien in einer netzartigen Form zeigt. Es eignet sich besonders gut zur Visualisierung von Bewertungen oder Vergleichen.

Im Fall der unterschiedlichen Reinigungsverfahren im Abgleich zu den spezifischen Anforderungen eines Bauteils spielen die folgenden sechs Kriterien eine tragende Rolle.

Für die primäre Aufgabe eines funktionierenden Reinigungsprozesses – das Anheben der Verschmutzung:

1. Eignung für/Anforderung an die Abreinigung filmischer oder pigmentartiger Verunreinigungen
2. Eignung für/Anforderung an die Abreinigung partikulärer Verunreinigungen

Für die sekundäre Aufgabe eines funktionierenden Reinigungsprozesses – den Abtransport der Verschmutzung:

3. Transportfähigkeit (Fähigkeit zur Vermeidung von Rückverschmutzungen)
4. Eignung für/Anforderungen an Aspektverhältnis (z. B. Verhältnis der Tiefe zum Durchmesser von Bohrungen,
   Verhältnis von Bauteilgröße zum Spaltabstand bei enger Chargierung).
5. Bauteilkomplexität (z. B. Struktur, Geometrie)

Ausgangspunkt für ein Spinnennetzdiagramm ist die Erstellung einer Tabelle, die zum einen die Anforderungen eines Bauteils in Bezug auf oben genannte Kriterien aufzeigt, sowie einer Tabelle die die Reinigungsverfahren und deren Bewertung in Bezug auf die spezifischen Fähigkeiten zeigt.

Beurteilung der Stärken und Schwächen verschiedener Reinigungsverfahren

im Abgleich zu den Anforderungen eines Bauteils

Bauteil	Bauteil A	Bauteil B
Filmische oder pigmentartige Verunreinigungen	5	1
Partikuläre Verunreinigungen (> 100 µm)	1	5
Anforderung an Transportfähigkeit	4	5
Hohes Aspektverhältnis (z. B. Kapillare)	5	1
Komplexe Geometrien	2	4

Bewertung (Eignung/Anforderung)

5	sehr hoch
4	hoch
3	mittel
2	niedrig
1	sehr niedrig
0	nicht

Reinigungsverfahren	z. B. Spritzreinigen	z. B. Injektionsfluten	z. B. Dampfentfetten	z. B. Zyklische Nukleation	z. B. Ultraschall
Fähigkeiten bei filmischen oder pigmentartigen Verunreinigungen	3	3	4	5	5
Fähigkeiten bei partikulären Verunreinigungen (> 100 µm)	4	5	1	3	4
Transportfähigkeit	3	5	1	2	2
Fähigkeiten bei hohem Aspektverhältnis (z. B. Kapillare)	0	1	2	5	1
Fähigkeiten bei komplexen Geometrien	1	4	4	4	2

Bewertung:
5 = sehr hoch • 4 = hoch • 3 = mittel • 2 = niedrig • 1 = sehr niedrig • 0 = nicht geeignet/nicht erforderlich

Wandelt man diese Daten zur besseren Darstellung um, ergibt sich folgendes Spinnennetzdiagramm

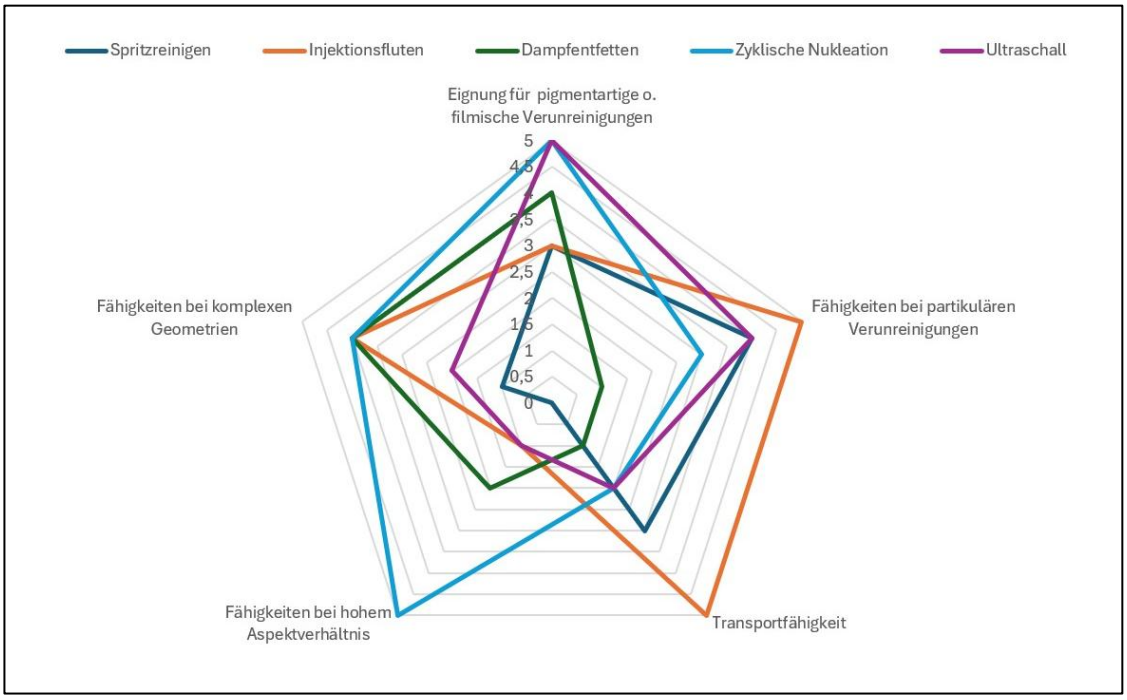

Abb. 3: Spinnendiagramm – Beurteilung der Wirkgrößen je Verfahren nach ihren Fähigkeiten

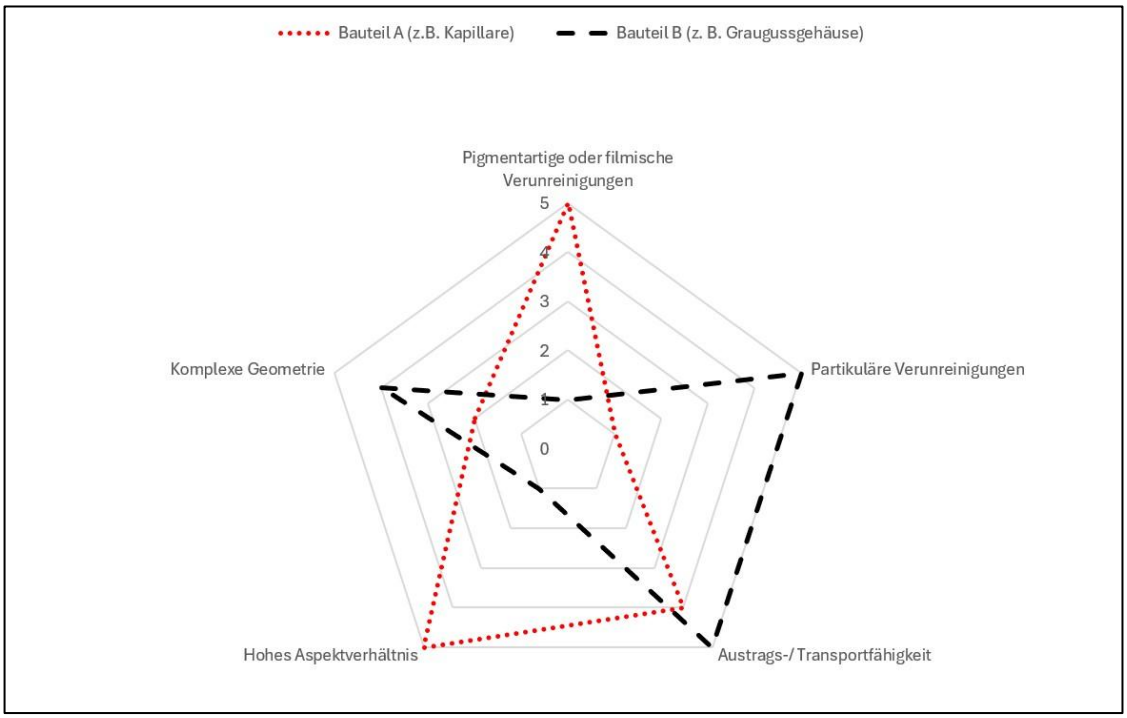

Abb. 4: Anforderungen des Bauteils an die Reinigungsverfahren

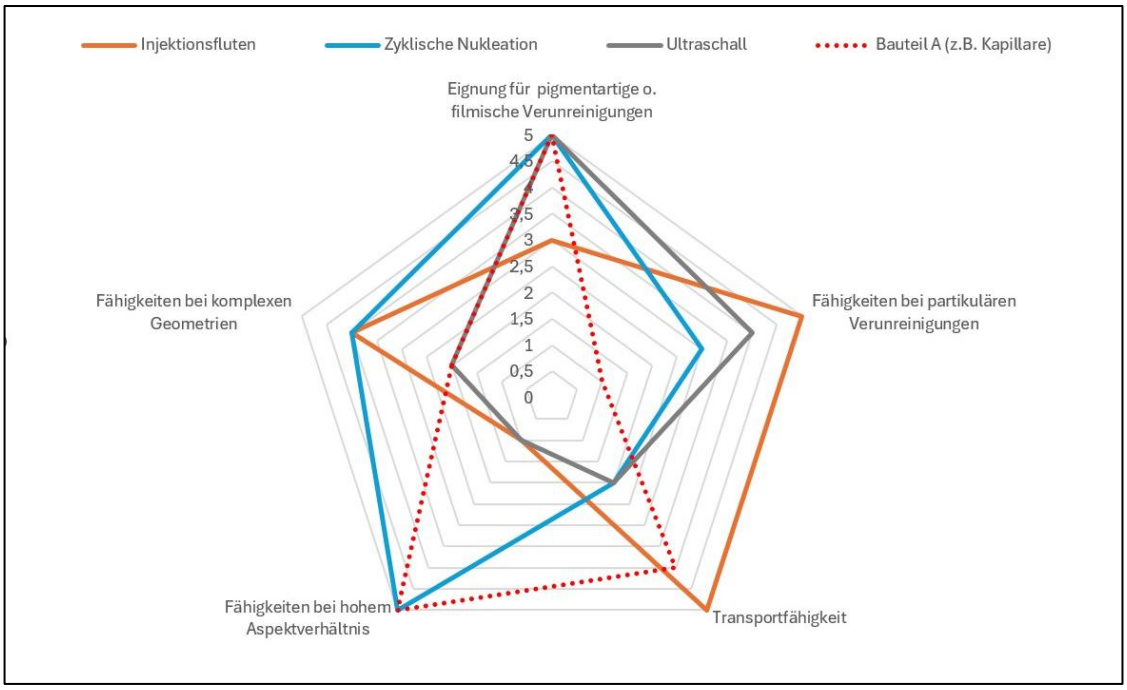

Abb. 5: Spinnendiagramm – Vergleich Anforderung (Bauteil A) und Eignung (Verfahren)

Setzt man die Verfahren in Relation zu den Anforderungen an ein Bauteil (Bauteil A), ergibt sich bei diesem Beispiel als tragendes Verfahren die zyklische Nukleation (Druckwechselverfahren), die durch den Einsatz eines Injektionsflutprozesses und/oder einer Ultraschallreinigung in der Performance aber noch verstärkt werden kann.

Die Wirksamkeit der Verfahren – auch in Kombination – sollte durch geeignete Reinigungsversuche auf ihre Verwendbarkeit geprüft werden. Dabei kann beispielsweise getestet werden, ob die Materialoberfläche überhaupt für den Einsatz von Ultraschall geeignet ist oder ob die Turbulenzen des Injektionsflutens möglicherweise Schäden am Bauteil verursachen.

6. Kategorisierung der Reinigungsverfahren

Reinigungsverfahren können basierend auf ihrer Wirkungsweise in zwei Hauptkategorien – direkte und indirekte Verfahren – eingeteilt werden.

Indirekte Verfahren benötigen ein Übertragungsmedium, wie z. B. Gase, um eine Reinigungswirkung zu erzielen.

Direkte Verfahren haben – wie die Bezeichnung schon vermuten lässt – eine „direkte" Wirkung auf der Oberfläche des zu reinigenden Bauteils, beispielsweise durch Beaufschlagung mit einem Wasserstrahl.

Bei allen Reinigungsverfahren müssen die folgenden vier Faktoren in Relation zur eigentlichen Reinigungsaufgabe gemäß Sauberkeitsspezifikation gesetzt werden:

1. eingesetzte Chemikalien
2. erforderliche Waschmechanik
3. geeignete Temperatur
4. notwendige Behandlungszeit.

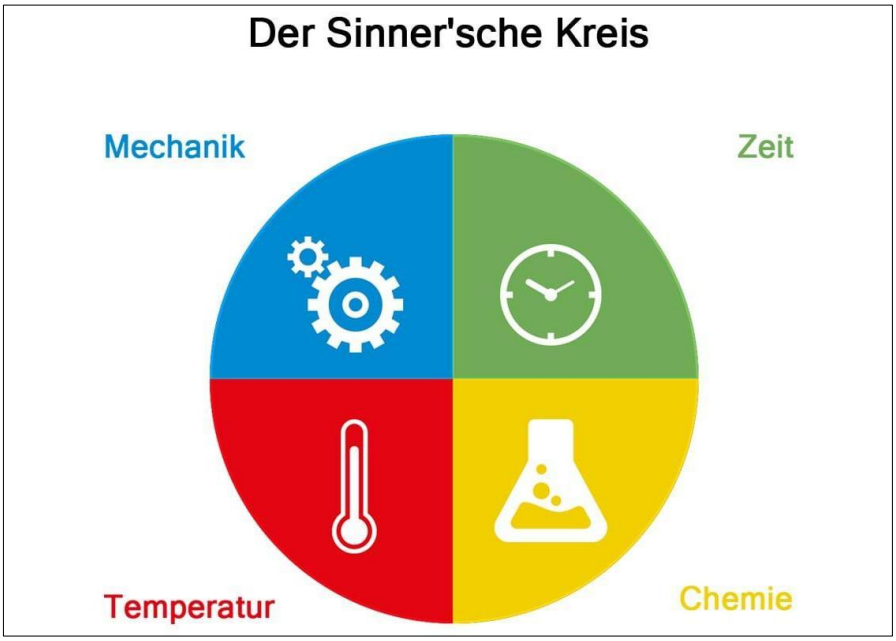

Abbildung 6: Sinnerscher Kreis – Einflüsse auf den Reinigungsprozess, Quelle: www.waescherei-suche.de

Anhand des Sinnerschen Kreises wird deutlich, wie diese Faktoren zusammenwirken und sich gegenseitig beeinflussen können, um das gewünschte Reinigungsergebnis zu erzielen. So kann beispielsweise eine höhere Chemiekonzentration bei niedrigerer Temperatur ein vergleichbares Ergebnis liefern wie eine geringere Chemiekonzentration bei höherer Temperatur.

Der Sinnersche Kreis lässt sich auf nahezu alle Reinigungsverfahren anwenden. Bei Verfahren ohne Flüssigkeiten spielt der Faktor „Chemie" keine Rolle, während bei thermischen Verfahren der Faktor „Temperatur" dominiert.

Um bei der Reinigung optimale Ergebnisse zu erzielen, werden passende Verfahren oft in Kombination eingesetzt. Eine mögliche Kategorisierung dieser Verfahren ist im Folgenden aufgeführt.

A. Direkt/partiell/geometrieabhängig

Direkt-partielle Reinigungsverfahren sind stark von der Bauteilgeometrie abhängig und sind, je nach Reinheitsanforderung, sehr effektiv bei einfachen Bauteilen, die in gerader Linie vom Strahl erreicht werden. Nicht geeignet sind sie für komplexe Geometrien oder dicht gepackte Bauteile. Zudem besteht aufgrund ihrer partiellen Wirkung ein erhöhtes Risiko für eine erneute Verschmutzung.

- Beispiele:
  - CO_2- oder Schneestrahlreinigung
  - Laserverfahren
  - Spritzreinigung

B. Indirekt gasgetragen/geometrieunabhängig

Gasgetragene Reinigungsverfahren haben nur geringen Einfluss auf partikuläre Verschmutzungen und sind in der Regel für Kontaminationen in geringen Mengen ausgelegt. Ein großer Vorteil dieser Verfahren ist, dass sie unabhängig von der Bauteilgeometrie wirken. Dadurch können sie auch Verunreinigungen in komplexen Strukturen erreichen. Zusätzlich unterstützen gasgetragene Verfahren die Vermeidung von Rekontamination: Da die Verschmutzungen während des Prozesses nicht mehr auf den Oberflächen anhaften, werden sie effektiv entfernt, ohne sich später wieder abzulagern.

- Beispiele:
  - Plasmareinigung (mit Einschränkungen beim Kontaminationsaustrag)
  - Ausheizen (z. B. bake-out)
  - Spülung mit N_2 oder Ozon (geometrieunabhängig nur i. V. m. Vakuumprozessen)
  - Dampfentfettung/Dampfreinigung

C. Indirekt/flüssigkeitsgetragen

Nassreinigungsverfahren, bei denen wässrige Reiniger, organische Lösemittel oder Mischformen verwendet werden, bieten ein breites Anwendungsspektrum. Diese Flüssigkeiten tragen nicht nur die Reinigungskraft direkt an die Verschmutzung heran, sondern transportieren auch die gelösten Verunreinigungen vom Bauteil weg, wodurch eine erneute Verschmutzung verhindert wird. Verfahren dieser Art lassen sich noch detaillierter unterscheiden:

C1. Geometrieabhängig

Geometrieabhängige, flüssigkeitsgetragene Verfahren haben eine hohe partielle Reinigungswirkung, die durch geeignete Maßnahmen wie den Einsatz von beweglichen Düsen bei der Spritzreinigung verbessert werden kann. Eine erneute Kontamination lässt sich vermeiden, wenn der Abtransport der gelösten Verunreinigungen gezielt im Prozess erfolgt. Insbesondere bei komplexen Bauteilen kann es zu Rekontaminationen kommen, wenn das Reinigungsmedium die gelösten Verschmutzungen nicht effektiv abführt.

- Beispiele:
  - Spritzreinigung
  - Flut-/Tauchreinigung
  - Injektionsfluten
  - Ultraschallreinigung

C2. Geometrieunabhängig

Flüssigkeitsgetragene, geometrieunabhängige Reinigungsverfahren haben eine hohe globale bzw. allseitige Reinigungswirkung auf die zu reinigenden Bauteile. Gerade bei sehr komplex aufgebauten Bauteilen können z. B. Hinterschnitte oder Kühlkanäle sehr gut gereinigt werden. Wird ein regelmäßiger Abtransport des verschmutzten Mediums nach dem Ablösen der Verunreinigung aus den Bauteilen sichergestellt, können erneute Verschmutzungen nahezu gänzlich vermieden werden.

- Beispiele:
  - Nassreinigungsverfahren im Unterdruck
  - Druckwechselverfahren im Vakuum und im Überdruck

7. Chemie

Die eingesetzte Chemie spielt eine entscheidende Rolle bei der Wirksamkeit eines Reinigungsverfahrens zur Beseitigung filmischer Verunreinigungen. Sie hilft, die Verunreinigung von der Oberfläche zu lösen und sicher aus dem Umfeld des Bauteils zu entfernen, um eine ungewollte Rückverschmutzung zu vermeiden. Ein besonderer Vorteil wasserbasierter Chemikalien ist ihre Fähigkeit, die verformte Grenzschicht direkt anzugreifen, wodurch filmische Verunreinigungen effektiv von der Oberfläche gelöst und entfernt werden können. Allerdings muss beachtet werden, dass die Chemikalien selbst unter bestimmten Reinheitsanforderungen zu neuen filmischen Verunreinigungen führen können.

8. Spülprozesse

Eigenständige Spülprozesse folgen in der Regel den nasschemischen Reinigungsprozessen und haben einen wesentlichen Einfluss auf den Grad der Bauteilsauberkeit. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, nicht nur die gelösten Ursprungsverunreinigungen, sondern auch Rückstände der Reinigungsmittel gründlich zu entfernen. So wird eine erneute Verschmutzung beispielsweise durch Verschleppung verhindert.

9. Trocknung

Trocknungsprozesse haben bei filmischen und feinstpartikulären Verunreinigungen einen erheblichen Einfluss auf die Erreichbarkeit eines definierten Reinigungsergebnisses und bergen die Gefahr einer erneuten Verunreinigung.[2]

10. Umgebung, Personal und Logistik

Bei der Analyse filmischer Verschmutzungen müssen auch äußere Einflüsse berücksichtigt werden, da zahlreiche Substanzen Bauteile sowohl durch direkten als auch indirekten Kontakt kontaminieren können. Ein zentraler Ansatz dabei ist die Betrachtung der gesamten Prozesskette.

Hierbei sollten insbesondere die Umgebung, das Personal und die Logistik im Fokus stehen, da diese Faktoren maßgeblich zu einer direkten oder indirekten Verschmutzung der Bauteile beitragen können.[3]

11. Medienaufbereitung und -bereitstellung

Wie bei partikulären Verunreinigungen spielt auch bei filmischen Verunreinigungen die Aufbereitung und Bereitstellung der Medien eine entscheidende Rolle für die zu erreichende Sauberkeit. Um eine Rückverschmutzung der Bauteile zu verhindern, müssen Verunreinigungen konsequent aus dem gesamten Reinigungsprozess und der Anlage entfernt werden.

---

[2] Weiterführende Literatur: FiT-Leitlinie, Trocknung in der Bauteilreinigung

[3] Weiterführende Literatur (Auswahl): FiT-Richtlinie, Filmische Verunreinigungen beherrschen, VDA 19 Teil 2: Technische Sauberkeit in der Montage, VDMA-Einheitsblatt 24364: Prüfung auf lackbenetzungsstörende Substanzen

12. Zusammenfassung

Die erfolgreiche Bewältigung filmischer Verunreinigungen erfordert ein tiefes Verständnis der Prozessanforderungen und eine präzise Abstimmung der Reinigungsstrategie auf die spezifischen Herausforderungen. Nur durch eine ganzheitliche Betrachtung aller Einflussfaktoren, einschließlich der Anlagentechnik, Medienaufbereitung und Prozessumgebung, kann eine hohe Bauteilsauberkeit erreicht und Rückverschmutzungen effektiv vermieden werden.

Herausgeber:

Fachausschuss Verfahren und Anlagentechnik des FiT Fachverband.

Leitung:

- Markus Mitschele, HEMO GmbH
- Gerhard Koblenzer, LPW Reinigungssysteme GmbH

Unter Mitwirkung von:

- Mario Fritzmann, LPW Reinigungssysteme GmbH
- Stefan Schaal, Mafac GmbH
- Timo Schießl, FhG IGCV Augsburg
- Kerstin Zübert, Hermann Bantleon GmbH

FiT Fachverband industrielle Teilereinigung e. V.
Hauptstraße 7
72639 Neuffen | Deutschland
T +49 7025 8434 – 100
www.fit-online.org
info@fit-online.org

Version 1.3 vom 17.04.2025

Über FiT Fachverband industrielle Teilereinigung e. V.

Der „Fachverband industrielle Teilereinigung e. V.“ (FiT) fungiert als Schnittstelle zwischen Forschung, Entwicklung und Anwendung industrieller Reinigungstechnik. Der FiT zielt darauf, neue Erkenntnisse zu generieren, vorhandenes Wissen zusammenzutragen und zu bündeln sowie den Austausch innerhalb der Branche und nach außen zu fördern.