

EFFIZIENZSTEIGERUNG IM MRO VON FLUGZEUGANTRIEBEN DURCH PROZESSKETTENINTEGRIERTE NEUAUSRICHTUNG VON REINIGUNGSPROZESSEN

F.-H. Rögner, Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP,
Winterbergstr. 28, 01277 Dresden, Deutschland

Zusammenfassung

Reinigungsprozesse im MRO (Maintenance, Repair, Overhaul) von Flugzeugantrieben sind erhebliche Kostentreiber, weil unvollständig formulierte Sauberkeitsanforderungen, Nacharbeit und blockierte Anlagenkapazitäten zu langen Durchlaufzeiten führen. Ein wesentliches Einsparpotenzial liegt darin, Reinigungsprozesse nicht isoliert, sondern als integralen Bestandteil der gesamten Prozesskette zu planen und zu steuern. Durch prüfbare Sauberkeitsspezifikationen nach der neu erstellten DIN 4878-1 kann der Aufwand auf „so viel Reinigung wie nötig“ reduziert und damit unnötiger, kostentreibender Aufwand vermieden werden. Ergänzend ermöglichen geeignete Sensorik und KI-basierte Auswertung ein erweitertes Prozessverständnis, frühere Fehlererkennung und sinkende Nacharbeitskosten. Insgesamt verspricht die prozesskettenintegrierte Neuausrichtung von Reinigungsprozessen eine deutliche Senkung von Prozesskosten, Kapazitätsengpässen und Stillstandszeiten im MRO.

Keywords

MRO, DIN 4878-1, Sauberkeitsspezifikation, Reinigungsprozesse, Effizienz, Prozesskette, Kosten

1. AUSGANGSSITUATION UND MOTIVATION

Die Instandhaltung, Reparatur und Überholung von Flugzeugantrieben zählen zu den technisch anspruchsvollsten und zugleich kostenintensivsten Bereichen der Luftfahrt. Triebwerkskomponenten sind während des Betriebs extremen thermischen, mechanischen und chemischen Belastungen ausgesetzt. Entsprechend vielfältig sind die Verunreinigungen, die im Rahmen von MRO-Prozessen sicher entfernt werden müssen. Dazu gehören Öle, Fette, Verbrennungsrückstände, Korrosionsprodukte, Partikel, Beschichtungsreste sowie prozessbedingte Verunreinigungen aus vorhergehenden Bearbeitungsschritten. Eine zuverlässige Reinigung ist damit eine wesentliche Voraussetzung für Inspektion, zerstörungsfreie Prüfung, Reparatur, Beschichtung und erneute Freigabe der Bauteile.

Gleichzeitig stellen gerade hartnäckige oder schwer zugängliche Verunreinigungen eine technologische Herausforderung dar. Geometrisch komplexe Bauteile, enge Spalte, Kühlluftbohrungen, raue Oberflächen oder thermisch gealterte Rückstände erschweren eine vollständige und reproduzierbare Reinigung. Unzureichend gereinigte Oberflächen können aber nachfolgende Prozessschritte erheblich beeinträchtigen, beispielsweise durch nicht durchführbare Rissprüfungen oder fehlerhafte Prüfergebnisse, unzureichende Haftung von Beschichtungen oder Wiederholarbeiten in der Reparatur. Reinigung ist daher nicht lediglich ein vorbereitender Hilfsprozess, sondern integraler Bestandteil der Prozesskette und beeinflusst unmittelbar Qualität, Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit der gesamten MRO-Kette.

Der Handlungsspielraum wird dabei wesentlich durch Herstellervorgaben, zugelassene Reinigungsmedien und

freigegebene Prozessparameter bestimmt. Diese Vorgaben bilden einen unverzichtbaren regulatorischen Rahmen, stellen jedoch in der Praxis nicht immer sicher, dass der erforderliche Sauberkeitszustand eindeutig beschrieben und objektiv prüfbar und damit sicher erreichbar ist. Häufig wird festgelegt, wie gereinigt werden soll, während weniger präzise definiert ist, welche Sauberkeitsanforderung für den jeweils nachfolgenden Prozessschritt tatsächlich erforderlich ist.



BILD 1: Reinigung als qualitäts- und kostenwirksame Schnittstelle in der MRO-Prozesskette von Flugzeugantrieben. (Die Grafiken wurden mit KI generiert)

Aus dieser Situation ergibt sich ein erhebliches Optimierungspotenzial. Werden Reinigungsprozesse isoliert betrachtet oder überwiegend erfahrungsbasiert gesteuert, entstehen unnötige Aufwände durch Überreinigung, Nacharbeit, verlängerte Durchlaufzeiten und blockierte Anlagenkapazitäten. Eine prozesskettenintegrierte Betrachtung setzt daher an der Schnittstelle zwischen Sauberkeitsanforderung, Reinigungsverfahren, Prüfbarkeit und nachfolgendem Prozessbedarf an. Ziel ist es, Reinigung so auszulegen, dass sie weder unzureichend noch unnötig intensiv erfolgt, sondern den funktional erforderlichen Zustand zuverlässig, reproduzierbar und wirtschaftlich erreicht. [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]

2. PROBLEMSTELLUNG IN DER AKTUELLEN MRO-PRAXIS

In der aktuellen MRO-Praxis von Flugzeugantrieben wird der Reinigungserfolg häufig indirekt und erst nachgelagert bewertet. Im Vordergrund stehen meist freigegebene Reinigungsmedien, zulässige Prozessparameter und Herstellervorgaben, während der tatsächlich erforderliche Sauberkeitszustand eines Bauteils nur unzureichend beschrieben ist. Damit ist zwar festgelegt, wie gereinigt werden darf, jedoch nicht immer, welches funktionale Reinigungsergebnis, d.h. welche Sauberkeitsanforderung für die anschließende Prüfung, Reparatur oder Beschichtung erforderlich ist.

Diese Lücke führt dazu, dass Abweichungen häufig erst in nachfolgenden Prozessschritten sichtbar werden, etwa bei der zerstörungsfreien Prüfung, bei der Bewertung von Oberflächen oder bei der Haftung nachfolgender Beschichtungen. Ist ein Bauteil dann nicht ausreichend vorbereitet, wird Nacharbeit erforderlich. Dadurch verlängert sich nicht nur die Durchlaufzeit des einzelnen Bauteils; zugleich werden Reinigungskapazitäten erneut belegt, obwohl sie für weitere Komponenten benötigt würden.

Besonders kritisch ist, dass sowohl unzureichende Reinigung als auch Überreinigung wirtschaftliche Nachteile verursachen können. Während unvollständig gereinigte Bauteile Wiederholprozesse, Prüfverzögerungen und Qualitätsrisiken auslösen, bindet eine zu intensive Reinigung unnötig Zeit, Medien, Energie und Anlagenkapazität. Ohne prüfbare Zielgrößen bleibt der Reinigungsaufwand daher schwer planbar und nur begrenzt optimierbar.

Die Problemstellung besteht somit nicht allein in der technischen Entfernung hartnäckiger Verunreinigungen, sondern vor allem in der fehlenden Verbindung zwischen Reinigungsprozess, prüfbarer Sauberkeitsanforderung und nachfolgender Prozesswirkung. Eine belastbare Effizienzsteigerung im MRO setzt deshalb voraus, Reinigungsergebnisse eindeutig zu spezifizieren und die qualitätsbestimmenden Wirkzusammenhänge gezielt zu überwachen. [9], [10], [11]

3. WIRTSCHAFTLICHE AUSWIRKUNGEN UNZUREICHENDER REINIGUNGSSPEZIFIKATIONEN

Konkrete, allgemein belastbare Prozentangaben zum Anteil von Reinigungsprozessen am Gesamtaufwand eines Triebwerks-MRO sind in öffentlich zugänglichen Quellen kaum ausgewiesen. Verfügbare Markt- und Branchenanalysen beziffern zwar den hohen wirtschaftlichen Stellenwert des Engine-MRO insgesamt: Für 2023 wurde das Segment auf 39,3 Mrd. US-Dollar geschätzt und damit rund 45 % des kommerziellen MRO-Aftermarkets zugeordnet; für 2025/2026 werden weiter steigende MRO-Aufwendungen und Engpässe durch Arbeits-, Material- und Kapazitätsrestriktionen beschrieben. Die Reinigung erscheint darin jedoch meist nicht als eigene Kostenkategorie, sondern ist in Arbeitszeit, Werkstattprozessen, Vor- und Nachbereitung sowie indirekten Durchlaufzeitkosten enthalten. [12], [13], [14]

Für die Bewertung der wirtschaftlichen Auswirkungen ist deshalb weniger ein einzelner Prozentwert entscheidend als die Rolle der Reinigung als wiederkehrender Engpass- und Schnittstellenprozess. Wird der erforderliche Sauberkeitszustand nicht vorab definiert, entstehen zusätzliche Kosten vor allem durch Wiederholreinigung, Wartezeiten, verzögerte Prüfungen sowie verschobene Reparatur- oder Beschichtungsprozesse. [1], [12], [15]

Damit wirken unpräzise Sauberkeitsspezifikationen wie ein Kostenmultiplikator: Ungenügende Reinigung führt zu Nacharbeit und Qualitätsrisiken, Überreinigung bindet unnötig Medien, Energie, Personal und Anlagenzeit. Gerade bei ausgelasteten Engine-Shops kann jeder zusätzliche Umlauf durch die Reinigung die Termintreue beeinträchtigen und Engpässe in der gesamten Prozesskette verstärken. Wirtschaftlich relevant ist Reinigung daher nicht nur als direkter Arbeits- oder Medienaufwand, sondern als Hebel für Durchsatz, Planbarkeit und Vermeidung nicht wertschöpfender Wiederholprozesse, zumal nicht eingehaltene Ausliefertermine im Fall von Flugzeugturbinen mit erheblichen finanziellen Sanktionen verbunden sind.

Ein prozesskettenintegrierter Ansatz bedient genau diese wirtschaftliche Schnittstelle. Die Reinigungsanforderung wird aus dem Bedarf der nachfolgenden Prozessschritte abgeleitet: Benötigt eine zerstörungsfreie Prüfung beispielsweise eine gut benetzbare Oberfläche, muss diese Anforderung bereits vor der Reinigung als prüfbares Ziel mit eindeutigen Grenzwerten definiert werden. Gleiches gilt für Reparatur-, Beschichtungs- oder Montageprozesse, bei denen Oberflächenzustand, Restverunreinigungen und Reproduzierbarkeit unmittelbar qualitätsrelevant sind.

Damit verschiebt sich der Fokus von der technisch maximal möglichen Reinigung hin zum funktional erforderlichen Sauberkeitszustand. Diese Abkehr von „so viel wie möglich“, „haben wir schon immer so gemacht“ oder „wir dürfen sowieso nichts ändern“ zugunsten von „so viel wie nötig“ reduziert unnötige Prozesszeit, Medien- und Energieeinsatz sowie Anlagenbelegung und schafft zugleich eine stabilere Grundlage für die Qualitätssicherung.

4. ROLLE DER DIN 4878-1 FÜR SAUBERKEITSSPEZIFIKATION UND QUALITÄTSSICHERUNG

Die für eine Veröffentlichung im November 2026 angekündigte DIN 4878-1 liefert einen methodischen Rahmen, um Sauberkeitsanforderungen nicht mehr pauschal oder erfahrungsbasiert zu formulieren, sondern aus den technischen Erfordernissen des jeweiligen Folgeprozesses abzuleiten. Damit wird der bisher häufig unscharfe Begriff „sauber“ in prüfbare Zielgrößen überführt. Aufgabe der Reinigung ist es, jede relevante Oberfläche gezielt in einen Zustand zu versetzen, der die fehlerfreie Durchführung der nachfolgenden Arbeitsschritte ermöglicht. Da sich dieser Zustand je nach Prüf-, Beschichtungs-, Montage- oder Reparaturprozess unterscheidet, ist eine allgemeingültige Sauberkeitsanforderung fachlich nicht ausreichend. [16], [17], [18]

Für das MRO von Flugzeugantrieben bedeutet dies, dass Sauberkeitsspezifikationen als verbindende Schnittstelle zwischen OEM-Vorgaben, Reinigungsverfahren und Qualitätssicherung genutzt werden können. Die Norm unterstützt die strukturierte Klärung, welche Verunreinigungen relevant sind, welche Oberflächen betroffen sind, welche Grenzwerte oder Bewertungskriterien gelten und mit welchen Prüfmethoden der Reinigungserfolg nachgewiesen wird. Dadurch wird aus einer rein parameterorientierten Reinigung eine ergebnisorientierte Prozessführung.

Aufbau einer Sauberkeitsspezifikation nach DIN 4878-1

vom Folgeprozess zur prüfbaren Anforderung



BILD 2: Struktureller Aufbau einer Sauberkeitsspezifikation nach DIN 4878-1, schematisch nach [18] und [19].

Der Nutzen der DIN 4878-1 liegt vor allem darin, Grenzwerte, Prüfmethoden und Verantwortungsübergänge so zu verknüpfen, dass Reinigungsergebnisse planbar, vergleichbar und dokumentierbar werden. Damit entsteht

eine fachliche Grundlage für bedarfsgerechte Reinigung, ohne Qualitätssicherung und Prozessstabilität zu schwächen. Die Veröffentlichung in JOT 7/2026 ordnet diese Argumentation in den Kontext der neuen DIN 4878-1 ein und hebt die Bedeutung klarer, konfliktarmer Sauberkeitsspezifikationen hervor. [16], [17], [18]

Kostenwirkung klarer Sauberkeitsspezifikationen



So viel Reinigung wie nötig – nicht so viel wie möglich.

BILD 3: Kostenwirkung klarer Sauberkeitsspezifikationen und bedarfsgerechter Reinigung, schematisch nach [18] und [19].

5. TECHNOLOGISCHE ERWEITERUNG DURCH SENSORIK UND KI

Der sinnvolle und auf das jeweilige Wirkprinzip des Reinigungsprozesses ausgerichtete Einsatz von Sensorik und KI bietet die Möglichkeit, Reinigung im MRO nicht nur nach festen Parametern ablaufen zu lassen, sondern den Prozesszustand und das Reinigungsergebnis kontinuierlich besser zu erfassen. Dazu ist es erforderlich, mit Inline- und Offline-Messverfahren das Kurz- und Langzeitverhalten von Reinigungsprozessen zu untersuchen, um qualitätsbestimmende Parameter zu ermitteln und den Einfluss auf die Reinigungsqualität für den ganz konkreten Reinigungsprozess zu verstehen. Im Ergebnis können dann relevante Prozessgrößen oder kritische Oberflächenzustände zeitnah überwacht werden. Dadurch wird frühzeitig sichtbar, ob ein Prozess stabil läuft oder ob sich Abweichungen entwickeln, bevor diese erst in nachgelagerten Prüf- oder Reparaturschritten auffallen.

Ergänzend ermöglicht das Monitoring von Reinigungsergebnissen eine stärkere Kopplung zwischen Sauberkeitsspezifikation und realem Bauteilzustand. Die erfassten Daten können genutzt werden, um Trends zu erkennen, Grenzwertüberschreitungen nachvollziehbar zu dokumentieren und Ursachen für unzureichende Reinigung systematisch einzugrenzen. KI-basierte Auswertgorithmen eröffnen hierbei zusätzliche

Potenziale: Sie können Muster in Prozess- und Prüfdaten erkennen, Korrelationen zwischen Reinigungsparametern und Folgeproblemen herstellen und Hinweise auf beginnende Prozessdrifte liefern.

Auf dieser Grundlage wird perspektivisch eine adaptive Prozesssteuerung möglich. Reinigungszeiten, Medienwechsel, Nachspülung oder Prüfindensität könnten stärker am tatsächlichen Bedarf ausgerichtet werden, anstatt pauschal mit Sicherheitszuschlägen zu arbeiten. Damit lassen sich Nacharbeit, Überreinigung und unnötige Anlagenbelegung reduzieren, ohne die Qualitätssicherung zu schwächen. Sensorik und KI sind damit keine eigenständige Lösung, sondern ein logischer technologischer Baustein, um prüfbare Sauberkeitsanforderungen effizienter und reproduzierbarer umzusetzen.

6. UMSETZUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG BESTEHENDER HERSTELLERVORGABEN

Die Umsetzung optimierter Reinigungsprozesse im MRO von Flugzeugantrieben muss innerhalb eines eng definierten regulatorischen und herstellerseitigen Rahmens erfolgen. Für zugelassene Instandhaltungsbetriebe sind die freigegebenen Instandhaltungsdaten maßgeblich; dazu zählen insbesondere Aircraft, Component und Engine Maintenance Manuals, Service Bulletins sowie lufttüchtigkeitsrelevante Anweisungen. EASA weist für Überholungen ausdrücklich darauf hin, dass ein Unternehmen den in den Instandhaltungsdaten definierten Umfang von Demontage, Reinigung, Inspektion, Reparatur, Montage und Prüfung vollständig einhalten muss, wenn ein Bauteil als „overhauled“ freigegeben werden soll. [20], [21]

Damit sind wesentliche Randbedingungen vorgegeben: zugelassene Reinigungsmedien, verbotene oder eingeschränkte Chemikalien, zulässige Temperaturen, Konzentrationen, Einwirkzeiten, mechanische Belastungen, Spül- und Trocknungsschritte sowie Anforderungen an Dokumentation und Rückverfolgbarkeit. Besonders kritisch ist die Materialverträglichkeit. Hersteller- und luftfahrttechnische Vorgaben beschränken beispielsweise den Einsatz bestimmter Medien bei Titan, hochfesten Stählen, Leichtmetallen, Beschichtungen, Dichtungen oder Verbundwerkstoffen, weil Fehlanwendungen Korrosion, Spannungsrissbildung, Versprödung oder Schädigung funktionaler Oberflächen verursachen können. [22], [23], [24]

Optimierung bedeutet daher nicht, bestehende OEM-Vorschriften zu umgehen, sondern deren Spielräume fachlich begründet zu nutzen. Innerhalb freigegebener Medien- und Parameterfenster können Prozessführung, Chargierung, Vorreinigung, Medienpflege, Prüfzeitpunkt, Sensorik, Datenbewertung und Schnittstellenorganisation verbessert werden. Gleichzeitig sollten ältere Vorgaben kritisch mit dem aktuellen Stand der Technik abgeglichen werden, insbesondere wenn sie primär parameterorientiert sind und keinen prüfbaren Zielzustand definieren. Änderungen außerhalb freigegebener Vorgaben erfordern dagegen eine formale Bewertung, Qualifizierung und Freigabe durch die zuständigen Verantwortlichen bzw. den OEM.

Ein tragfähiger Transformationspfad verbindet deshalb

regulatorische Compliance mit prozesskettenintegrierter Weiterentwicklung. Zunächst werden geltende Vorgaben, relevante Bauteile, Folgeprozesse und Qualitätsrisiken erfasst. Darauf aufbauend lassen sich prüfbare Sauberkeitsanforderungen, zulässige Optimierungsfenster und notwendige Absicherungsversuche definieren. So kann die Effizienz von Reinigungsprozessen gesteigert werden, ohne Lufttüchtigkeit, Herstellervorgaben oder Freigabefähigkeit der instandgesetzten Komponenten zu gefährden.



BILD 4: Umsetzung optimierter Reinigungsprozesse innerhalb von OEM- und regulatorischen Vorgaben.

7. ERWARTETER NUTZEN UND EINSARPOTENZIALE

Das zentrale Nutzenpotenzial einer prozesskettenintegrierten Neuausrichtung von Reinigungsprozessen liegt in der Senkung nicht wertschöpfender Kosten. Besonders relevant ist die Reduktion von Nacharbeit, weil jeder zusätzliche Reinigungsdurchlauf erneute Arbeitszeit, Medien- und Energieverbrauch, Dokumentationsaufwand sowie Verzögerungen in nachfolgenden Prüf-, Reparatur- oder Beschichtungsschritten verursacht. Werden Sauberkeitsanforderungen vorab prüfbar definiert und an den tatsächlichen Bedarf des Folgeprozesses gekoppelt, lassen sich solche Wiederholschleifen deutlich reduzieren.

Ein zweiter wesentlicher Hebel ist die Verkürzung der Durchlaufzeit. Reinigungskapazitäten zählen in ausgelasteten MRO-Prozessketten häufig zu kritischen Engpassressourcen. Werden Prozesse unnötig lange gefahren oder Bauteile aufgrund fehlender Zielgrößen mehrfach gereinigt, sinkt der verfügbare Durchsatz der Anlage. Eine bedarfsgerechte Reinigung nach dem Prinzip „so viel wie nötig“ entlastet diese Kapazitäten und verbessert die Planbarkeit des gesamten Shops.

Kosteneinsparungen entstehen damit nicht nur direkt im Reinigungsschritt, sondern auch durch den Wegfall unkalkulierbarer Wartezeiten und damit eine stabilere Terminplanung.

Darüber hinaus lassen sich direkte Betriebskosten senken, wenn nicht pauschal mit hohen Sicherheitszuschlägen gereinigt wird. Eindeutige Grenzwerte, geeignete Prüfmethode und klare Verantwortungsübergänge reduzieren Verbrauchskosten für Reinigungsmedien, Entsorgung, Energie und Anlagenbetrieb. Insgesamt entsteht ein Einsparpotenzial, das sich aus vermiedener Nacharbeit, höherem Durchsatz, geringeren direkten Prozesskosten und reduzierten Fehlerfolgekosten zusammensetzt. [12], [13], [18], [19]

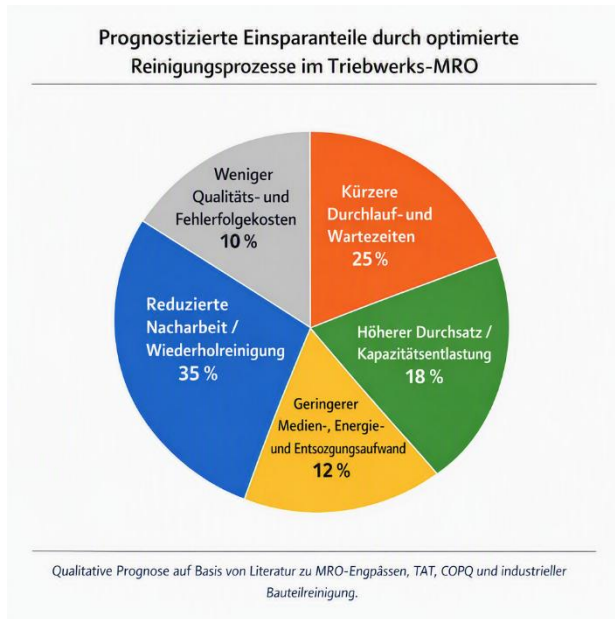


BILD 5: Prognostizierte Einsparanteile durch optimierte Reinigungsprozesse im Triebwerks-MRO. Die Darstellung ist eine qualitative Abschätzung auf Basis veröffentlichter Angaben zu MRO-Engpässen, Turnaround Time, Cost of Poor Quality sowie Kostenwirkungen industrieller Bauteilreinigung. [25], [26], [27], [28], [29], [30]

8. FAZIT UND AUSBLICK

Es zeigt sich, dass Reinigungsprozesse im MRO von Flugzeugantrieben weit über ihren unmittelbaren Prozessschritt hinaus wirken. Sie beeinflussen die Prüfbarkeit, Reparaturfähigkeit, Beschichtbarkeit und Freigabefähigkeit von Bauteilen und damit auch Durchlaufzeit, Kapazitätsauslastung und Kosten. Unklare Sauberkeitsanforderungen führen zu Nacharbeit, Wiederholreinigung, Wartezeiten oder Überreinigung und werden dadurch zu einem wesentlichen wirtschaftlichen Risiko.

Die neue DIN 4878-1 nimmt dabei eine zentrale Rolle ein. Sie schafft einen methodischen Rahmen, um Sauberkeitsspezifikationen systematisch, nachvollziehbar und entlang der Prozesskette herzuleiten. Damit wird „sauber“ durch technisch begründete, prüfbare und auf den Folgeprozess bezogene Zielgrößen ersetzt. Entscheidend ist nicht der vorgeschriebene Reinigungsprozess an sich,

sondern der Sauberkeitszustand des Bauteils, der für den nächsten Arbeitsschritt und die spätere Bauteilfunktion erforderlich ist. [9], [18], [19]

Für das Triebwerks-MRO bedeutet dies einen Perspektivwechsel: Reinigungsmedien und Prozessparameter bleiben durch OEM- und regulatorische Vorgaben begrenzt, können aber innerhalb zulässiger Spielräume gezielter genutzt werden. Die DIN 4878-1 unterstützt dabei, relevante Verunreinigungen, betroffene Oberflächen, Grenzwerte, Prüfmethode und Verantwortungsübergänge so zu beschreiben, dass Reinigungsergebnisse planbar und qualitätssicher nachweisbar werden. Sensorik, Monitoring und KI-basierte Datenauswertung können diese Spezifikationen künftig durch frühere Drift-Erkennung und adaptivere Prozessführung unterstützen.

Das größte wirtschaftliche Potenzial liegt folglich in der Vermeidung nicht wertschöpfender Prozessschleifen. Klare Sauberkeitsspezifikationen verbessern First-Pass-Ergebnisse, verkürzen Durchlaufzeiten, entlasten kritische Reinigungskapazitäten und senken direkte wie indirekte Fehlerfolgekosten. Damit wird Reinigung zu einem strategischen Hebel für Qualität, Termintreue und Wirtschaftlichkeit im MRO.

Durch die praktische Anwendung der Norm auf konkrete MRO-Prozessdaten, Bauteilgruppen und zulässige OEM-Parameterfenster können belastbare Sauberkeitsanforderungen, wirtschaftlich sinnvolle Prüfstrategien und qualifizierte Optimierungsmaßnahmen entwickelt werden. Die DIN 4878-1 bildet damit nicht nur eine formale Grundlage für Spezifikationen, sondern den methodischen Schlüssel, um Reinigungsprozesse im MRO von Flugzeugantrieben technisch sicher, regulatorisch konform und wirtschaftlich effizient weiterzuentwickeln. [9], [18], [19], [20], [21]

9. SCHRIFTTUM

- [1] Boeing Global Services: Aircraft Engine Overhaul Guide. Online-Veröffentlichung, Boeing, Chicago, USA, o. J. URL: <https://services.boeing.com>. Zugriff am: 30.07.2026.
- [2] Federal Aviation Administration (FAA): Advisory Circular AC 43-4B – Corrosion Control for Aircraft. Advisory Circular, U.S. Department of Transportation, Washington, D. C., USA, 2018.
- [3] U.S. Air Force: TO 1-1-691 – Cleaning and Corrosion Prevention and Control. Technical Order, United States Air Force, USA, aktuelle Fassung.
- [4] NAVAIR: 01-1A-509-2 – Cleaning and Corrosion Control. Technical Manual, Naval Air Systems Command, USA, aktuelle Fassung.
- [5] Ecoclean GmbH: Parts cleaning in the aerospace industry. Online-Fachinformation, Ecoclean GmbH, Filderstadt, Deutschland, o. J. URL: <https://ecoclean-group.net>. Zugriff am: 30.07.2026.
- [6] Kolene Corporation: Jet Engine Component Cleaning. Online-Fachinformation, Kolene Corporation, Detroit, USA, o. J. URL: <https://kolene.com>. Zugriff am: 30.07.2026.
- [7] SOCOMORE: Aerospace MRO Engine & Equipment. Online-Fachinformation, SOCOMORE, Vannes, Frankreich, o. J. URL: <https://www.socomore.com>. Zugriff am: 30.07.2026.
- [8] FinnSonic Oy: Aviation solutions. Online-Fachinformation, FinnSonic Oy, Lahti, Finnland, o. J. URL: <https://www.finnsonic.com>. Zugriff am: 30.07.2026.
- [9] DIN 4878-1:2026-02: Bauteilsauberkeit – Teil 1: Verfahren für die Herleitung und Erstellung einer Sauberkeitsspezifikation. Norm-Entwurf, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2026.
- [10] Fraunhofer-Gesellschaft: Sauberkeitsspezifikation. Online-Fachinformation, Fraunhofer, München, o. J. URL: <https://www.fraunhofer.de>. Zugriff am: 30.07.2026.
- [11] N. N.: Normentwurf DIN 4878-1 Bauteilsauberkeit veröffentlicht. Online-Fachbeitrag, o. O., o. J. Zugriff am: 30.07.2026.
- [12] Oliver Wyman: Global Fleet and MRO Market Forecast 2024–2034. Marktbericht, Oliver Wyman, New York, USA, 2024. Zugriff am: 30.07.2026.
- [13] Aviation Week Network: Commercial Aviation Fleet & MRO Forecast. Marktanalyse zum kommerziellen Luftfahrt-MRO, Aviation Week Network, USA, aktuelle Ausgabe. Zugriff am: 30.07.2026.
- [14] Alton Aviation Consultancy: Global MRO demand and capacity outlook. Branchenanalyse zu MRO-Nachfrage, Kapazitätsengpässen und Kostenentwicklung, Alton Aviation Consultancy, USA, aktuelle Veröffentlichung. Zugriff am: 30.07.2026.
- [15] Lufthansa Technik AG: Engine Services – Engine overhaul and repair processes. Online-Fachinformation zu Prozessschritten der Triebwerksüberholung, Lufthansa Technik AG, Hamburg, Deutschland, o. J. Zugriff am: 30.07.2026.
- [16] Rögner, F.-H.: Grundlagen der industriellen Bauteilreinigung. Seminarunterlage „Industrielle Bauteilreinigung verstehen – Produktqualität sichern“, Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP, Dresden/Braunschweig, 2026.
- [17] Rögner, F.-H.; Weile, D.: Planung, Fehlersuche und Fehlerprävention bei der industriellen Bauteilreinigung. Seminarunterlage „Industrielle Bauteilreinigung verstehen – Produktqualität sichern“, Fraunhofer FEP, Dresden/Braunschweig, 2026.
- [18] Rögner, F.-H.: Neue DIN 4878-1 – mehr Klarheit, weniger Konflikte. JOT Journal für Oberflächentechnik, Ausgabe 7/2026, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2026.
- [19] Rögner, F.-H.: Richtig sauber spart RICHTIG Geld! Vortrag SurfaceTechnology GERMANY, Stuttgart, 05.05.2026, Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP, Dresden, 2026.
- [20] European Union Aviation Safety Agency (EASA): Easy Access Rules for Continuing Airworthiness and Maintenance Organisation Requirements, Part-145. Regelwerk zu genehmigten Instandhaltungsbetrieben und Nutzung genehmigter Instandhaltungsdaten, Köln, aktuelle Fassung. Zugriff am: 30.07.2026.
- [21] European Union Aviation Safety Agency (EASA): AMC and GM to Part-145 – Maintenance Data and Overhaul Requirements. Acceptable Means of Compliance and Guidance Material zu Umfang und Anwendung genehmigter Instandhaltungsdaten, Köln, aktuelle Fassung. Zugriff am: 30.07.2026.
- [22] Federal Aviation Administration (FAA): Advisory Circular AC 43.13-1B – Acceptable Methods, Techniques, and Practices: Aircraft Inspection and Repair. Advisory Circular, U.S. Department of Transportation, Washington, D. C., USA, aktuelle Fassung.
- [23] Federal Aviation Administration (FAA): Advisory Circular AC 20-107B – Composite Aircraft Structure. Advisory Circular zu Bewertung, Reparatur und Instandhaltung von Faserverbundstrukturen, U.S. Department of Transportation, Washington, D. C., USA, aktuelle Fassung.
- [24] U.S. Department of Defense: MIL-STD-1568 – Materials and Processes for Corrosion Prevention and Control in Aerospace Weapons Systems. Military Standard zu Werkstoff- und Prozessanforderungen für Korrosionsschutz in Luftfahrtanwendungen, USA, aktuelle Fassung.
- [25] Oliver Wyman: Aviation MRO in Demand Amid Supply and Labor Constraints. Branchenanalyse zu MRO-Wachstum, Kostenmanagement, Material- und Arbeitsengpässen sowie Turnaround-Time-Entwicklung, Oliver Wyman, New York, USA, 2025. Zugriff am: 30.07.2026.
- [26] Bain & Company: Aircraft engine maintenance and repair to peak in 2026, worsening capacity shortage for commercial aviation. Presseinformation zu Engpässen im Engine-MRO, Turnaround-Time-Anstieg und Kapazitätslücken, Bain & Company, Boston, USA, 2024. Zugriff am: 30.07.2026.
- [27] EASE Inc.: How Manufacturing Scrap Rates and Rework Affect Cost of Quality and OEE. Fachbeitrag zu Nacharbeit, Ausschuss, Cost of Quality und OEE-Wirkung, EASE Inc., 2026. Zugriff am: 30.07.2026.
- [28] TeepTrak: Scrap, Rework & the Cost of Poor Quality in 2026. Fachbeitrag zu Cost of Poor Quality, versteckten Fehlerkosten, Nacharbeit und First-Time-Through, TeepTrak, 2026. Zugriff am: 30.07.2026.
- [29] Better Engineering: The Hidden Economics of Industrial Cleanliness – How Great Cleaning Reduces Total Manufacturing Cost. Online-Fachbeitrag zu First-Pass-Yield, Nacharbeit, Durchsatz, Verbrauchsmitteln und versteckten Reinigungskosten, Better Engineering, 2026. Zugriff am: 30.07.2026.

- [30] Grintek: Industrial Cleaning Costs – Strategies for Significant Reduction. Online-Fachbeitrag zu Kostenfaktoren industrieller Reinigung, insbesondere Arbeitszeit, Chemikalien, Energie, Wasser, Entsorgung und Produktionsstillstand, Grintek, 2026. Zugriff am: 30.07.2026.