



Win Labuda

Reinheit als Systemparameter

Clear & Clean - Forschungslabor
überarbeitete Ausgabe 1-2018

Der Begriff Reinheit ist über lange Zeiträume der Menschheitsgeschichte in einem absoluten Sinne gebraucht worden. Rein wurde stets im Hinblick auf das Höchstmaß vorstellbarer Reinheit betrachtet, im deutlichen Unterschied zur lebensnahen Unreinheitserfahrung. Es gab in der früheren Reinheitsbetrachtung eine deutliche Analogie zu der „Reinheit des Himmels“ im Gegensatz zum „irdischen Schmutz“ (Franz Kafka, Briefe an Milena Jesenská).

Die Reinheitsvorstellung änderte sich mit zunehmendem wissenschaftlichen Erkenntnisstand und mit der Möglichkeit durch technische Instrumente den Nachweis materie-gebundener Unreinheit zu erbringen. Dies gilt insbesondere für das Mikroskop, welches bei Beginn des 17. Jahrhunderts von mehreren Erfindern, u. a. Galileo Galilei vorgestellt wurde.

Der Reinheitsbegriff

Diesem Aufsatz liegt der Gedanke zugrunde, dass für jedes reinheits-abhängige System ein Reinheitsoptimum besteht, welches gleichzeitig die optimale Ökonomie des Systems kennzeichnet (siehe Abb. 1). Reinheit ist also (im Sinne dieses Aufsatzes) das Maß an Verunreinigung, bei dessen Überschreitung die Funktionalität eines Systems beeinträchtigt wird. Dies gilt für soziologische, biologische, ökologische und technische Systeme gleichermaßen.

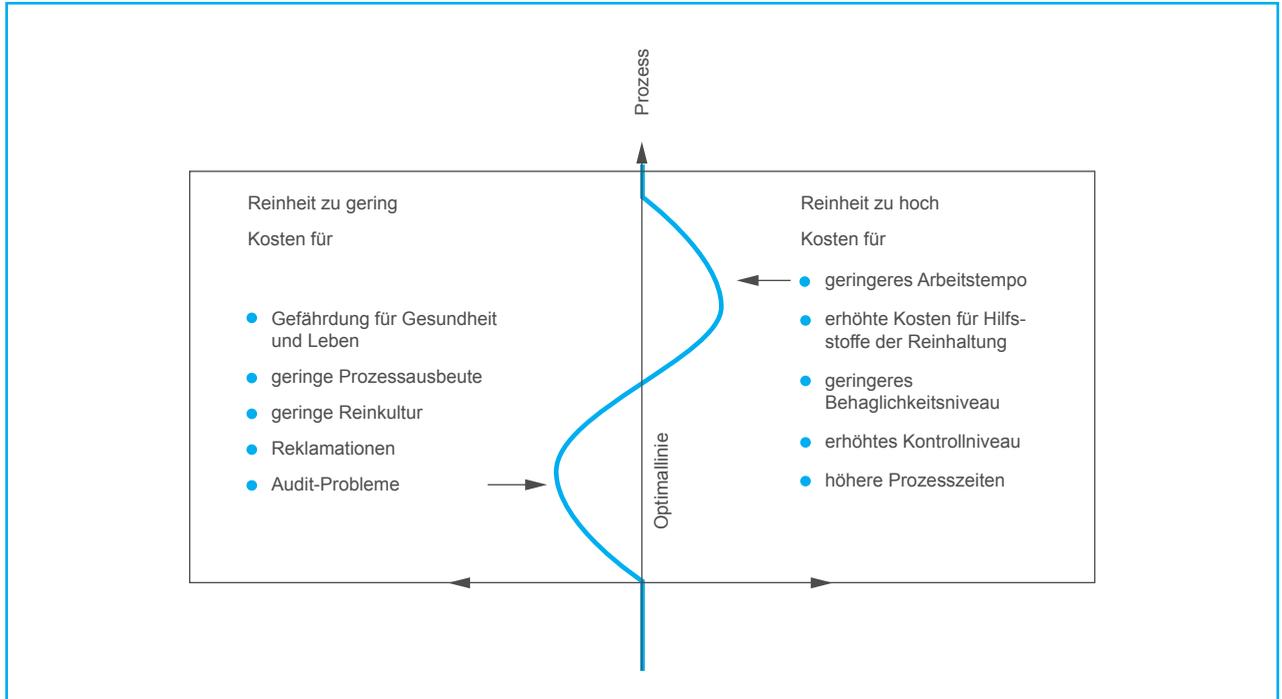


Abb. 1 In jedem Prozess mit einer Abhängigkeit von bestimmten Reinheitskriterien besteht ein optimales Reinheitsniveau. Abweichungen davon erhöhen stets die Fertigungskosten. Diese Tafel zeigt die verschiedenen Kostenarten, welche durch ein zu geringes oder zu hohes Reinheitsniveau entstehen.



Abb.2 Ignaz Philipp Semmelweis, Kupferstich von Jenő Doby, 1860

Reine Fertigungsverfahren - Neue Verunreiniger

Das Wort Reinheit ist in unserem Sprachgebrauch mehrdeutig. Im Kindesalter wird mit ihm die lästige Körperhygiene verbunden, in der Jugend die sexuelle Abstinenz des jungen Mädchens und für die Gläubigen verschiedener Religionen wird geistige Reinheit durch ein rituelles Bad oder durch Teilwäsungen bewirkt. Der Verbraucher kennt den Begriff aus der Waschmittelwerbung der Chemiekonzerne. Gibt man das Wort Reinheit in die Google-Suchmaschine des Internet ein, so beziehen sich etwa die Hälfte der Antworten auf geistige und die andere Hälfte auf technische Reinheitsphänomene. Im technischen Zeitalter wurde man Ende des 19. Jahrhunderts mit der Notwendigkeit von Reinheit zunächst im Rahmen der Hygiene konfrontiert. Man erkannte, dass bestimmte Verunreinigungen lebensbedrohliche Krankheiten und Seuchen hervorriefen. Bedeutendes Geschehen in diesem Zusammenhang war die Entdeckung von biologischer Verunreinigungen (Abb. 3) als Ursache des „Kindbettfiebers“ durch den ungarischen Gynäkologen Ignaz Phillip Semmelweis (Abb. 2) im Jahre 1847.

Er ist gewissermaßen der Vater der „Contamination Control“. Durch von ihm entwickelte Maßnahmen der Handreinigung der behandelnden Ärzte wurde die Mütter-Sterblichkeit in seinem Krankenhaus auf 2 % gesenkt, während zuvor bis zu 12 % der gebärenden Frauen daran starben.

Mit zunehmender Industrialisierung war es dann u.a. das Problem der chemischen Reinheit, mit der Wissenschaft und Technik mehr und mehr konfrontiert wurden. Hier ist Reinheit eine Bezeichnung für die Beschaffenheit chemischer Substanzen bezüglich des Fremdstoff-Gehaltes, welche deren Einsatz-Möglichkeiten stark beeinflusst. Man unterscheidet in der Chemie nach verschiedenen Reinheitsgraden, wie z. B. roh, technisch, rein, reinst, chemisch rein und analyserein.

In der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde die Oberflächen-Reinheit zur wesentlichen Voraussetzung für einige moderne Fertigungsverfahren. Zu diesen Verfahren gehören beispielsweise die Herstellung von Impfstoffen, künstlichen Hüftgelenken, vergüteten optischen Linsen, Laserspiegeln und Objektiven, integrierter Halbleiterschaltungen, Tonträgern, Speicherplatten, oder die Bereitstellung hochreiner Behälter für chemische Stoffe. Aber auch im Instandhaltungs-Bereich von Anlagen und Geräten ist die Oberflächen-Reinheit oftmals eine wesentliche System-Komponente. Dafür sind die Reinhaltung lasertechnischer Geräte und der Ätzkammern in den Plasma-Ätzmaschinen gute Beispiele. Die angeführten Produkte lassen sich bei den heute bestehenden Anforderungen nur in einer Umgebung fertigen, welche sowohl durch eine hohe Oberflächen- als auch eine hohe Luftreinheit gekennzeichnet ist. Auf der Grundlage dieser erhöhten Reinheits-Anforderungen entstand zum Ende des 20. Jahrhunderts die Reinraumtechnik.



Abb. 3 Bakterieller Verunreiniger (Streptococcus pyogenes), Ursache des Kindbettfiebers

Im Rahmen neuer Technologien gewinnen bei Beginn des 21. Jahrhunderts auch Nano-Partikel, einzelne Ionen oder Moleküle als potentielle Verunreiniger im Rahmen moderner Fertigungsprozesse an Bedeutung. Hier ist ein erheblicher Forschungsbedarf entstanden weil die Entfernung solcher Materieteilchen von Oberflächen bisher nicht ausreichend gesichert ist.

Einhergehend mit dieser Entwicklung nahmen sich die technischen Normenverbände des Problems Reinheit an und beschrieben die Anforderungen an reine Arbeitsplätze und Produkte in Arbeits-Richtlinien, welche dem Ingenieur eine gute Anleitung für die Techniken des Reinen Arbeitens sind. In Deutschland geschah dies durch die Aktivitäten des VDI-Verein Deutscher Ingenieure, welcher mit der Richtlinie VDI 2083 ein informatives Werk geschaffen hat.

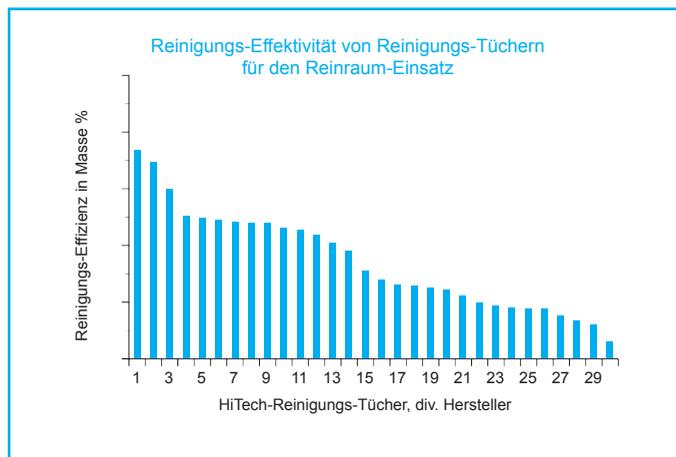
Reinheit ist im Rahmen der neuen Technologien jedoch nicht nur ein materieorientierter Parameter vieler technischer und biologischer Systeme, sondern kann sich auch auf materiefreie Verunreinigungen beziehen wie elektrische und magnetische Felder, Ionen oder ionisierende Strahlung. Auch diese „Verunreinigungen“ sind geeignet, Systeme in ihrer Funktionalität zu beeinflussen und so gewinnt die materielose Verunreinigung ständig an industrieller Bedeutung. Man denke an das Phänomen elektrostatischer Ladungen (ESD), welches schon heute markante fertigungstechnische Auswirkungen hat.

In den vergangenen Jahrzehnten konnten viele industrielle Reinigungsaufgaben, welche zuvor manuell durchgeführt wurden, automatisiert werden. Beispiele sind die Reinigungsverfahren der Tafelglasproduktion, die Reinigung feinmechanischer Masseteile, die Leiterplatten-Reinigung und die Reinigung präzisionsoptischer Glasoberflächen. In den Bereichen der Anlagen- und Gerätewartung jedoch haben sich die wischenden Reinigungsverfahren fester denn je etabliert. So hat sich der Markt für Reinigungstücher weltweit auf über 1 Milliarde US-Dollar entwickelt. Die Erforschung der Wirksamkeit verschiedener textiler Konstruktionen von Reinigungstüchern auf die Dauer der erforderlichen Reinigungszeit verschiedener Oberflächen- und Verunreinigungsarten steht jedoch noch am Anfang.

Wie rein ist eine Oberfläche?

Um dem Phänomen technische Reinheit gerecht zu werden, sollte für technische Systeme in Medienreinheit und Oberflächen-Reinheit unterschieden werden. Während die Reinheit der Flüssigkeiten und Gase weitgehend durch automatisierte analytische Verfahren einerseits und Partikelzählgeräte und Analytoren andererseits messbar geworden ist, bleibt die praktische Erfassung z. B. der Oberflächen-Reinheit im Wesentlichen wegen der unzureichenden messtechnischen Basis auch heute noch auf visuelle Prüfungen, Schätzungen und Hochrechnungen oder auf Flächen geringer Abmessungen beschränkt. Der

Abb. 4 zeigt die gemessene Reinigungs-Effektivität eines repräsentativen Spektrums international bekannter Hersteller



Grund dafür ist die geradezu unendlich scheinende Differenz zwischen einer technischen Oberfläche der Ausdehnung von beispielsweise einem Quadratmeter relativ zu einer Partikelgröße von z. B. 0,5 µm. Würden solche Partikel dicht aneinandergereiht einen Quadratmeter Oberfläche bedecken, so befänden sich 4000 Milliarden Partikel auf der Oberfläche. In Wahrheit sind es gemessen an diesem Beispiel jedoch immer nur relativ geringe Partikelmengen, welche auf Oberflächen vorhanden sind. Um deren genaue Menge messtechnisch zu erfassen, bedürfte es der mikroskopischen Ansicht von etwa 44 Millionen Bildfeldern, welche mikroskopisch ausgewertet werden müssten, um eine zuverlässige Information z. B. über den Partikelbelag einer Oberfläche zu gewinnen. Das ist in der Praxis nicht möglich und so wurden eine Vielzahl von Verfahren vorgestellt, welche jedoch zum Beispiel schon bei Oberflächen geringer Rauigkeit an Aussagekraft einbüßen.

Im Schatten dieser Unzulänglichkeit blühen in der Praxis eine Vielzahl von Fehlannahmen und Unternehmen mit Aussagen zum Thema Oberflächen-Reinheit, welche sich oftmals an der Vermutungs-Grenze bewegen und sowohl gelegentlich angepriesene Messgeräte, als auch die Gebrauchsgüter solcher industriellen Produkte betreffen, welche zur Herbeiführung erwünschter Oberflächen-Reinheiten geschaffen wurden. Das sind in erster Linie die Medien des wischenden Reinigens in Rollen- oder Tücher-Form. In diesem Zusammenhang zeigt Abb. 4 die gemessene Reinigungs-Effektivität eines repräsentativen Spektrums von Präzisions-Reinigungstüchern der international bekannten Hersteller. Der erhebliche Unterschied zwischen dem effizientesten und dem ineffizientesten Tuch reflektiert den Zustand der Unsicherheit beim Anbieter als auch beim Anwender. Dieser Zustand wird auch durch die amerikanischen Prüfungs-Empfehlungen für Reinigungstücher zum Gebrauch im Reinraum reflektiert. In einer umfangreichen Expertise rät das DTNW Textilforschungszentrum, Institut an der Universität Duisburg davon ab, die Prüfungsempfehlun-

gen der amerikanischen Normungsinstitute IES und ASTM als Grundlage für die Beurteilung der Gebrauchseigenschaften von Reinigungstüchern zum Gebrauch im Reinraum zu benutzen.

Oberflächen-Reinheit als Systemparameter

Betrachten wir als Beispiel für die Anlagenwartung ein Laserschneidsystem für Stahlplatten (siehe Abb. 5 und 6) so ist unsere reinheitsbezogene Größe die Kontinuität der Oberflächen-Reinheit der Laserspiegel. Übersteigt die Spiegel-Verunreinigung ein bestimmtes Maß, so verändert sich zunächst die Schnittbreite des Laserstrahls durch die veränderten Fokussierungseigenschaften und später kommt es zum katastrophischen Ausfall. Es verbrennen die Spiegel durch deren erhöhte Wärme-Absorption. So kommt es zum Anlagenstillstand und zum Auswechseln der Spiegel. Reinheit ist bei diesem Beispiel also ein wichtiger Systemparameter, welcher Auswirkungen auf die Kontinuität des Anlagenbetriebs hat.

Als Vermeidens-Strategie bietet sich eine turnusmäßige Wartung der Spiegel an (Abb. 7). Dabei kommt es zwangsläufig zu einem geplanten Maschinenstillstand in Abhängigkeit von der Reinigungszeit. Die Reinigungszeit steht jedoch unter anderem in direkter Abhängigkeit von der Materialqualität der Reinigungs-Medien. In der Analogie zu einem Regelkreis wäre die Oberflächen-Reinheit hier die Regelgröße, die langsame Verunreinigung der Spiegel wäre die Störgröße. Was bei diesem System zum Regelkreis fehlt ist ein Messfühler für die

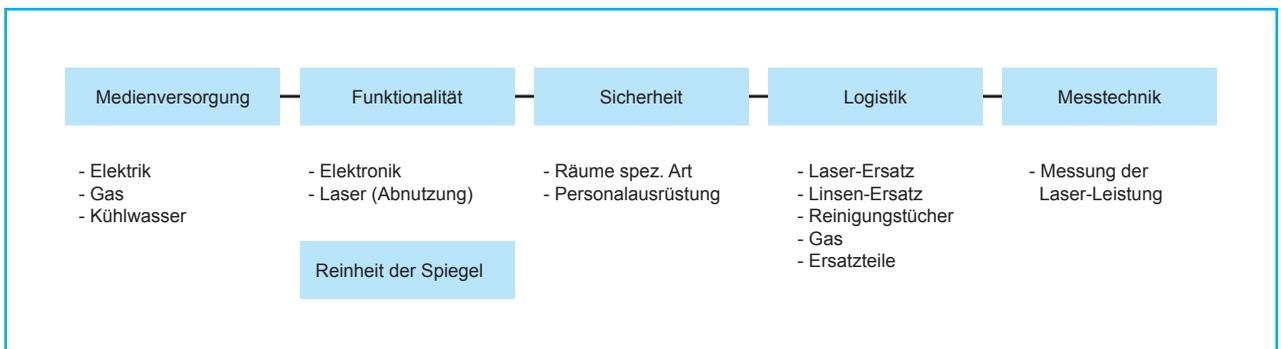


Abb. 5 Systemparameter zur Erhaltung der kontinuierlichen Betriebsbereitschaft einer Laser-Schneid-Anlage für Bleche

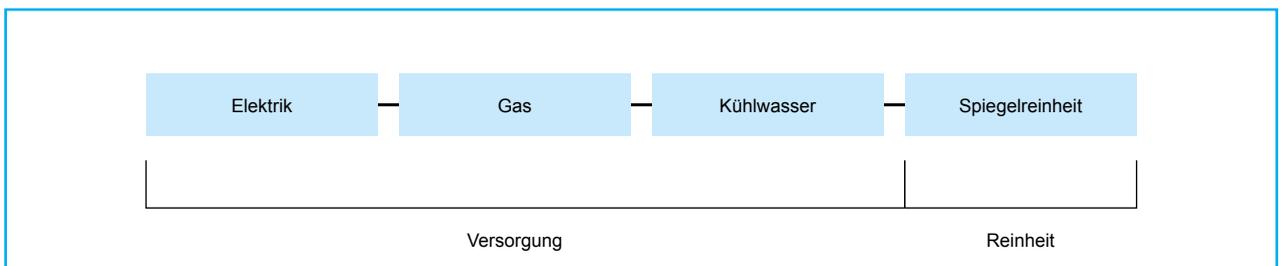


Abb. 6 Funktionsparameter zur Erhaltung der Laser-Schneid-Anlage für Bleche

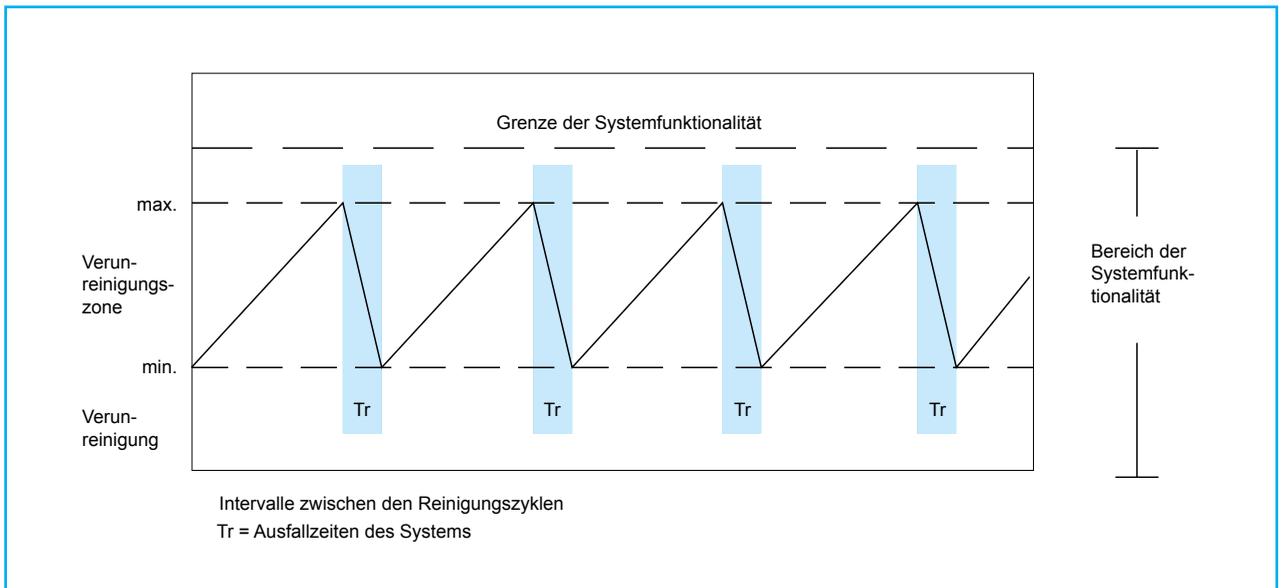


Abb. 7 Vermeidungsstrategie durch abgestimmte Reinigungsintervalle

Oberflächen-Reinheit und als Stellglied eine Reinigungsvorrichtung, welche in Abhängigkeit von dem gemessenen Grad der Verunreinigung automatisch einen Reinigungsvorgang einleitet. In der Praxis wird dieser Stöorzustand jedoch vorweggenommen durch eine manuelle, vorbeugende Maschinenwartung. Diese erfolgt in Zeitabständen, welche erfahrungsbasiert sicherstellen, daß der Stöorzustand unterhalb der katastrophischen Systemausfallgrenze bleibt.

Für einige reinheitsgebundene Fertigungssysteme verbietet sich der Steuer- oder Regelkreis, aus folgendem Grunde: Ist eine Sollwertabweichung erkennbar, so ist der Schaden für den Prozess nicht mehr vermeidbar. Dies gilt z. B. für den Plasma-Ätz-Prozess in den Systemen der Halbleiterfertigung: Haben sich in den Ätzkammern ausreichend dicke Verunreinigungsschichten gebildet, so fallen mehr oder weniger große Teile davon auf den im Ätzprozess befindlichen Wafer. Dadurch würde der Wafer ganz oder teilweise zerstört. Wafer sind bis zum Prozess-Ende sogenannte Teilfertigprodukte. Der Fertigungsprozess erfolgt in über 200 Prozess-Schritten über einen Zeitraum von etwa 4-8 Wochen. Bei der Zerstörung eines Wafers mit einigen hundert Chips zu einem beliebigen Zeitpunkt beinhaltet die Zerstörung also den Materialwert des Wafers einschließlich des Teilfertigwertes bis zum Zeitpunkt der Zerstörung. Das Beispiel zeigt deutlich, daß nicht alle reinigungs-relevanten Vorgänge in ökonomischer Weise automatisierbar sind und manuelle Reinigungs-Prozeduren ihre Berechtigung haben können. Solche Prozeduren verursachen jedoch einen vergleichsweise hohen Aufwand. Dieser ergibt sich aus:

Hausaufgaben für Anwender und Lieferanten

- Arbeitszeitkosten der Instandhalter
- applikationsbezogener Effektivität der Reinigungs-Medien
- Dauer des Maschinenstillstands

Sollen die unerschlossenen Potenziale der manuellen Reinigungs-Prozeduren vorbeugender Wartungsvorgänge und deren mittelbarer Kosten ausgelotet werden, so bedarf es gezielter Untersuchungen von vergleichendem Charakter. Solche Untersuchungen betreffen im Wesentlichen ein statistisches Phänomen, in dem nur eine große Anzahl durchgeführter Reinigungs-Prozeduren und Reinigungs-Medien eine Aussagerelevanz ergeben können. Sie sollten deshalb in einem entsprechendem Maßstab geplant und nachvollziehbar dokumentiert werden. Solche umfangreichen Prüfungen sind bei Instandhaltern erfahrungsgemäß nicht übermäßig beliebt, weshalb es sinnvoll erscheint, für eine solche Prüfung im großen Maßstab eine ausreichende Vorbereitung durchzuführen und die Instandhalter entsprechend zu unterrichten und zu motivieren. Dies allein genügt jedoch nicht. Eine solche Prüfung sollte nicht ohne Einbindung namhafter Hersteller der Reinigungs-Medien stattfinden, weil dem Anwender möglicherweise nicht alle Einzelheiten der sachgerechten Applikation von Reinigungs-Medien bekannt sind. Beispiel dafür ist die hoffnungslose Übertränkung der Reinigungs-Medien mit Lösungsmitteln im Rahmen der Reinigungsarbeiten bis zu dem Zustand einer nicht mehr vorhandenen Reinigungswirkung. Vor Beginn einer solchen Prüfung ist also die Applikation von Lösungsmitteln zu spezifizieren und auch zu trainieren - andernfalls können die erhaltenen Ergebnisse nicht relevant sein. Gleiches gilt beim Einsatz von Präzisions-Reinigungstüchern für deren vorschriftsgemäße Faltung vor dem jeweiligen Einsatz. Der Trainingszustand der Instandhalter im Hinblick auf die Applikation der Reinigungs-Medien ist eine wesentliche Voraussetzung für eine sachgerechte und vor Allem kostensenkende Wartung. In der Praxis der Halbleiterfertigung ergibt sich die Möglichkeit die vorgeschlagene Prüfung im Rahmen der Instandhaltung von Plasmaätzmaschinen durchzuführen, Dies scheint deswegen von Vorteil, weil über die Stillstandszeiten dieser Anlagen ohnehin Buch geführt wird und der Vergleich der Stillstandszeiten in der Folge des Einsatzes verschiedener Reinigungs-Medien möglich ist.

Für jedes reinheits-abhängige System besteht ein Reinheitsoptimum, welches gleichzeitig die optimale Ökonomie des Systems kennzeichnet.

Das System Erhaltung der Anlagen-Betriebs-Bereitschaft reagiert in irgendeiner Weise auf die manuellen Reinigungs-Prozeduren, welche hier zu den kostenbestimmenden Systemparametern gehören. Wie es unter den verschiedenen Voraussetzungen reagiert, das gilt es zu erforschen. Im Umkehrschluss darf nun jedoch eine wichtige Feststellung nicht fehlen: Wenn denn angenommen werden muss, dass System-Funktionalität von den Gebrauchs-Eigenschaften der Reinigungs-Medien abhängig ist, und gleichzeitig über die Prüfmethode für diese Medien weltweit kurzfristig keine Einig-

Reinheit ist das Maß an Verunreinigung, durch dessen Überschreitung die Funktionalität eines Systems beeinträchtigt würde.

Fazit

keit zu erzielen ist, dann besteht die Gefahr, dass die Kräfte des Marktes über die Kräfte der Vernunft siegen und am Ende durch downgrading einer geringen Reduzierung der Materialkosten eine markante Erhöhung der Fertigungskosten gegenübersteht – und dies oftmals ohne dass es bemerkt wird. Nicht zuletzt muß es Aufgabe aller Hersteller von Reinigungs-Medien sein, die wesentlichen Parameter derselben wie Reinigungs-Effektivität und Partikelabrieb auf der Basis evon sinnvollen Prüfmethode zu spezifizieren. Wenn es nicht bald dazu kommt, dann sind die Normungsgremien gefordert, hier eine DIN-ISO-Vorschrift zu erarbeiten.

- Medien für manuelle Reinigungs-Prozeduren haben Einfluss auf die wartungsbedingten Stillstandszeiten eines Systems
- Während seiner Stillstandszeiten produziert das System keinen Gewinn/Zeiteinheit
- Reinigungs-Medien stehen somit im Spannungsfeld zwischen ihrem Materialpreis und der mit ihrer Hilfe möglichen Verkürzung der System -Stillstandszeiten
- Der Materialpreis von Reinigungs-Medien kann unter zwei Gesichtspunkten betrachtet werden: Das sind:
 - a - die meßbare Verkürzung der Stillstandszeiten (oder bei unveränderter Stillstandszeit)
 - b - der geringere Verbrauch an Reinigungsmedien
- Der Kenntnisstand über den Ablauf und die ökonomischen Potenziale manueller Reinigungs-Prozeduren in der Industrie ist zu gering. Die Durchführung von entsprechenden Untersuchungen ist angezeigt.
- Geringe Reduzierung der Materialkosten können bei Produkten mit deutlicher Auswirkung auf die Stillstandszeiten der Systeme deutliche Erhöhungen der Fertigungskosten hervorrufen, ohne dass es bemerkt wird.