



Win Labuda

Zur Geschichte des Reinen Arbeitens

Clear & Clean - Forschungslabor
Ausgabe 1-2020

Mit zunehmender Industrialisierung ergab sich in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts - wahrscheinlich zunächst im Bereich der Kleinserien-Fertigung von Optikteilen - die Notwendigkeit dem Phänomen „technische Sauberkeit“ größere Aufmerksamkeit zu widmen. Dies Insbesondere nach der Erfindung achromatisch korrigierter Linsensysteme durch Josef von Fraunhofer im Jahre 1830 und der Errichtung des Mechanischen Ateliers von Carl Friedrich Zeiss im Jahre 1846. So waren es wohl hochwertige Fernrohre und Mikroskope, deren Fertigung erhöhte Anforderungen an die partikuläre und Oberflächen-Reinheit der Glas- und Metalloberflächen mit sich brachte. Zeitgleich war in der Medizin die Erkenntnis gewachsen, dass mangelnde Reinheit ungeahnte Folgen für Leben und Gesundheit von Patienten haben konnte. Man hatte erkannt, dass Ärzte mit ungereinigten Händen Keime von Leichen oder kranken Menschen auf Gesunde übertrugen, welche dann durch Ansteckung oder Sepsis zu Tode kamen. Ein gewisses Bewusstsein für die möglichen Auswirkungen unsichtbarer Teilchen einerseits und Mikroben andererseits trat allmählich in das Bewusstsein der Menschen. Mit etwas mehr Studium der römisch-lateinischen Literatur hätte man es aber auch früher wissen können: Der römische Gelehrte Marcus Terentius Varro (116 - 27 v. Chr.) schreibt bereits in seinem Buch „Rerum Rusticarum, lib.1, cap 12 zum Thema Infektions-Krankheiten über die vermuteten Bakterien und Viren: „Tiere, die so klein sind, dass die Augen sie nicht sehen können und die durch die Luft in den Körper gelangen - durch Mund und Nase - und verschiedene Krankheiten verursachen.“

Schon im alten China existierte eine ganz besondere Art von Contamination Control [8]. Um ihre Oberflächen beim Malen staubfrei zu halten begaben sich die chinesischen Lackierkünstler in ihren Dschunken aufs Meer, wo die Luft nahezu staubfrei ist. Einige tausend Jahre später war es dann die Medizin, in der man die Notwendigkeit für spezifische Reinheitsbedingungen erkannte. Im Sankt-Elisabeth-Krankenhaus in Kiel wurden separate Operations-Räume für septische und aseptische Operationen eingerichtet. Wenn man so will, war das der erste Reinraum in der Medizin.

Im aufkeimenden Sektor der Feinwerktechnik entstanden in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts außerhalb der optischen Industrie weitere Fertigungs-Prozesse, bei denen die Ausbeute durch staubhaltige Umgebungsluft reduziert werden konnte. Dies betraf insbesondere die Herstellung von Uhren aber auch von Präzisions-Kugellagern für Kreiselkompassse. So gab es zwischen Technik und Medizin ein historisches Nebeneinander, wenngleich mit unterschiedlicher Zielsetzung. Waren es bei der Medizin humanitäre und hygienische Gründe, welche die Ärzte motivierten, lagen die Gründe der Ingenieure für den Einsatz der Techniken des Reinen Arbeitens zunächst im militärischen

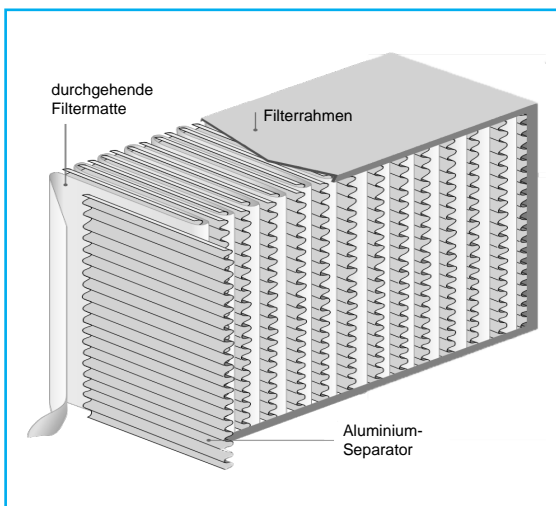


Abb. 2 moderner HEPA-Filter, Schnittbild - das wichtigste Element beim Bau von Reinräumen. (Schema: Wikimedia Commons)

und erst später im industriellen Bereich. Anfang der vierziger Jahre stellte sich bei den ersten Versuchen des Manhattan-Projekts zum Bau der Atombombe das Problem, geeignete Feinfilter zu bekommen mit deren Hilfe man die Umgebungsluft hochgradig von radioaktivem Staub reinigen konnte. Aus dieser Notwendigkeit heraus entstand dann der HEPA-Filter.

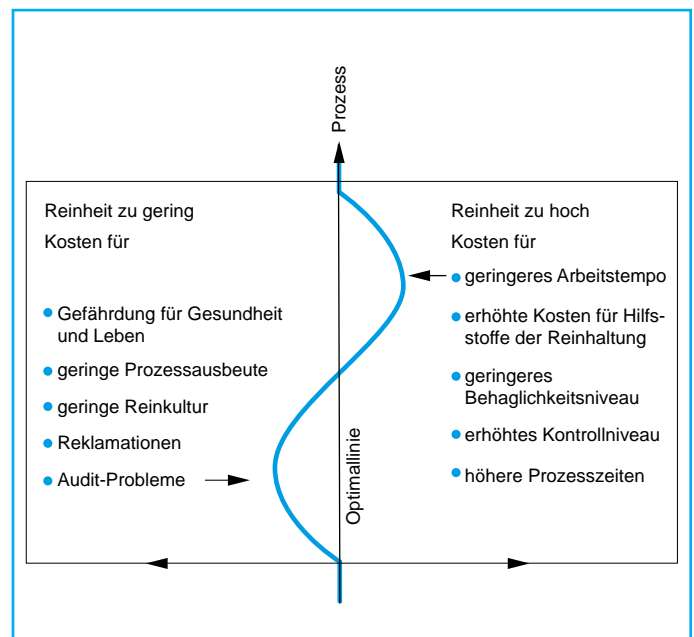
Von Reinheit und Reinraum

Reinraumtechnik Reinheitstechnik oder einfach Reintechnik ?

Der Begriff Reinraumtechnik steht zunächst einmal für eine bestimmte Kombination von Gebäude- und Belüftungstechnik. Sie ist eine der Voraussetzungen für die Durchführung bestimmter Fertigungs-Prozesse in Staub-reduzierter Luft. Reinraumtechnik gehört somit als Unterbegriff zu den „Techniken des Reinen Arbeitens“. Die Semantik des Begriffs schließt im gebräuchlichen Sinne aber auch die partikuläre Reinheit des mit „Reinraum“ bezeichneten Volumens, die Luft- und Oberflächenreinheits-bezogenen Messverfahren, die Reinraum-Bekleidung, die in Reinräumen eingesetzten Reinigungs-Hilfsmittel und das Reinraum-Verbrauchsmaterial ein.

Reinheit ist keine absolute Größe. So bezieht sich der Begriff Reinraum in Wahrheit auf einen „reineren“ Raum relativ zum „weniger reinen“ Raum. Denn weder ist ein „Reinraum“ absolut rein noch ist ein „Standard- Fertigungsraum“ z. B. für die Herstellung von Damenschuhen absolut unrein. Zudem bezieht sich die Reinheitsangabe für Reinräume bisher lediglich auf die dort vorhandene Anzahl der luftgetragenen Partikel pro Volumen-Einheit, nicht jedoch auf die Anzahl der insgesamt darin befindlichen Partikel. Während wir mit dem Begriff Reinraum im Allgemeinen die Vorstellung von einem Raumgebilde mit reduzierter wenngleich homogener Partikel-Verteilung ver-

Abb. 3 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. (Schema: Win Labuda)



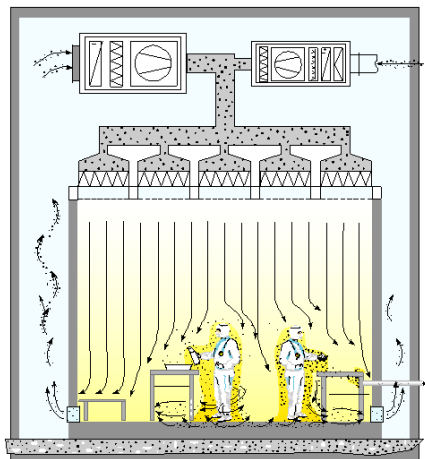
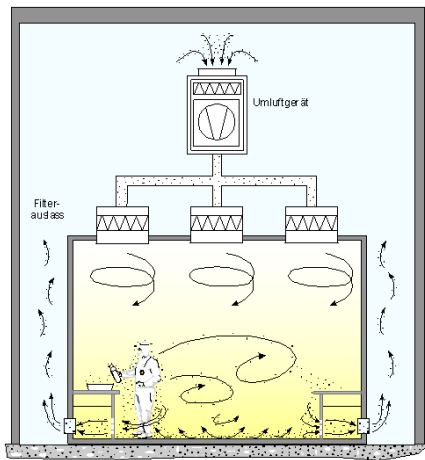


Abb. 4 Strömungsprinzipien, oben „turbulenter Reinraum“, unten „Laminarströmungs-Reinraum“ (Schemen: Rudolf Simon - Wikimedia Commons)



Abb. 5 SMIF-pod für 6" Wafer
(Foto: 邱銘乾 - Wikimedia Commons)

binden so müssen wir bei genauerem Studium erkennen dass diese Annahme nicht ganz der Realität entspricht. Vielmehr entstehen im Betriebszustand von Reinräumen durch unterschiedliche Strömungs-Bedingungen sog. hotspots - das sind Orts-Volumina mit erhöhter bzw. verminderter Partikeldichte.

Zudem wird in vielen Fällen die Anzahl der orts-residenten Partikel an Reinraum-Wänden und Objekt-Oberflächen diejenige der Luft-getragenen sogar deutlich übertreffen. Nimmt man all dies als gegeben an, dann zeigt sich Reinraum als unzureichend definierter Oberbegriff. Solche unpräzise definierten Oberbegriffe sind jedoch oftmals die Grundlage für gleichermaßen schwache Unterbegriffe. Diese finden wir beispielsweise in den Begriffen Reinraum-Tauglichkeit, Reinraum-Handschuh oder Reinraum-Verpackung. Immer wieder wird von Anwendern die Frage gestellt, ob man Reinraum-Tücher lediglich für die Raumpflege benutzen darf oder „auch sonst“. Infolge solcher semantischen Unzulänglichkeiten definieren denn auch unzählige Verbrauchsmaterial-Anbieter den Begriff Reinraum-Tuch, Handschuh oder Papier ganz nach ihrem Geschmack. Schlimmer noch: Sie empfehlen freimütig in welchen ISO-Luft-Reinheitsklassen man das von ihnen vertriebene oder gar zertifizierte Material bedenkenlos einsetzen könne. All dies trägt nur zur Verwirrung des Anwenders bei der von den vielfältigen Begriffs-Unsicherheiten überfordert ist.

Wenn dem Begriff „Reinraumtechnik“ also die präzise Semantik fehlt, mag es an der Zeit sein, über einen zutreffenderen Oberbegriff nachzudenken. Zur Diskussion gestellt wird von uns „Reintechnik“ als Oberbegriff der z. Zt. gerade an Durchsetzung gewinnt. Dieser Begriff ließe sich durch eine Anzahl sinnvoller Unterbegriffe diversifizieren. Gelegentlich liest man neuerdings auch den Begriff „Reinheits-Technik“, dem es jedoch an phonetischer Abgrenzung zum Begriff „Heiztechnik“ mangelt und der außerdem eine kleinkarierte Aura hat.

Spezifikations-gemäß unterliegt in einem Reinraum lediglich die Umgebungsluft einer kontinuierlichen Reinheits-Überwachung. Dieser war früher durch den US-Federal Standard 209 ist seit 2001 gemäß ISO 14644-1 genormt. Gliederungs-Elemente der Norm sind neun Luftreinheits-Klassen und sechs Partikel-Durchmesser. Die kontinuierliche Erhaltung einer bestimmten Luftreinheit in Reinräumen erfolgt jedoch selten für sich sondern zumeist mit dem Ziel der Gewährleistung einer Prozess-optimierten Oberflächen-Reinheit. Bei der Produktion von Halbleiter-Chips ist es beispielsweise die Wafer-Oberfläche, welche rein gehalten werden muss, um die Defektdichte darauf möglichst gering zu halten. Ausbeute-relevanter Parameter ist also letzten Endes die Oberflächenreinheit.

Oberflächenreinheit lässt sich nicht gleichermaßen leicht herbeiführen wie Luftreinheit, noch lässt sie sich problemlos messen. Während die Luft mit den in ihr vorhandenen Parti-

keln in einem bestimmten Raumvolumen in weiten Grenzen homogen verteilt ist, schwankt die partikuläre Reinheit der Raumbooberflächen in domänenartiger Verteilung sehr deutlich. Sorgfältig geschulte Mitarbeiter der Reinraum-Service-Dienstleister müssen also turnusgemäß durch manuell durchgeführte Reinigungs-Prozeduren die Prozess-verträgliche Oberflächenreinheit im Reinraum wieder herstellen [4]. Menschen die in solchen Räumen arbeiten, tragen zudem eine Spezial-Bekleidung damit die Luft- und Oberflächen-Verunreinigung der Arbeits-Umgebung durch den Menschen in Prozess-kompatiblen Grenzen gehalten wird. Daraus erwachsen weitere Industrie- und Dienstleistungszweige wie beispielsweise Reinraum-Wäschereien, Hersteller von Reinigungstüchern, Overalls oder Reinhaltungs-Dienstleister. Alle Maßnahmen der Reinraumtechnik dienen letzten Endes jedoch nur einem Ziel: der Erhaltung oder Verbesserung der Reinheit funktioneller Oberflächen. Dafür gibt es im Reinraum-Betrieb drei bestimmende Faktoren: wirksame Schutzkleidung, wirksames Arbeits-Zubehör und effizientes Personal-Training.

Die Pioniere des Reinen Arbeitens

Die Anwendung der Techniken des Reinen Arbeitens reicht zurück bis weit vor unsere Zeit. Wie so oft in der Medizin- und Technik-Geschichte war es auch hier: Ein sich verdichtendes soziales oder technisches Bedürfnis fand seine Lösung durch erfinderisch begabte Männer. Sowohl eine Reihe herausragender Erfinder als auch zwei technische Arbeits-Gruppen sind als Pioniere der Techniken des Reinen Arbeitens bekannt geworden:

- Ignaz Semmelweis, (1818-1886) der im Jahre 1847 im Allgemeinen Krankenhaus in Wien als Erster in der Medizin Handwaschungen mit Chlorkalk einföhrte und dadurch die nachgeburtliche Mütter-Sterblichkeitsrate von 12,3 auf unter 2 % verringern konnte. Semmelweis ist der Begrönder der Asepsis und einer der Väter der Krankenhaus-Hygiene.

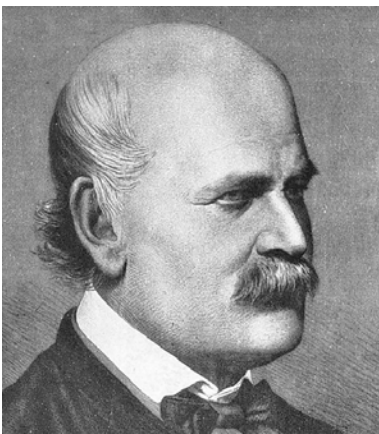


Abb. 6 Ignaz Semmelweis, Begrönder der Asepsis (Kupferstich von Jenö Doby, Bild: Wikimedia Commons)



Abb. 7 Gustav Adolf Neuber baute in Kiel das erste Krankenhaus (1886) nach aseptischen Grundlagen (Foto: Wikimedia Commons)

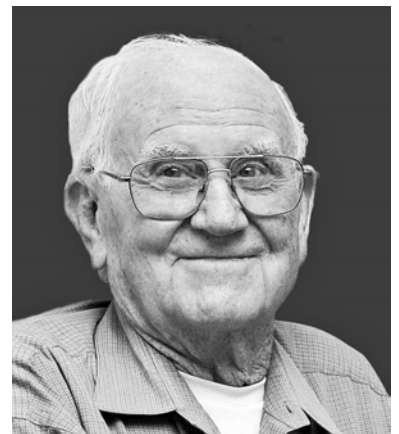


Abb. 8 Willis Whitfield, der Erfinder des modernen Reinraums mit Laminar-Strömung (14.05.1962) US-Pat. 3,158,457 (Foto: Sandia)



Abb. 9 Wallace H. Coulter, Erfinder des Coulter-Prinzips für die Teilchenzählung



Abb. 10 Alvin Lieberman, „Vater“ des Partikel-Zählers

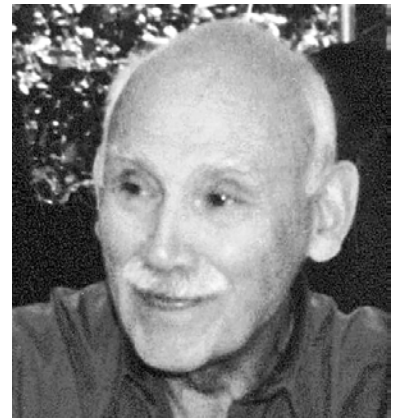


Abb. 11 Edward Paley, Texwipe fertigte die ersten „Reinraum-Tücher“

- Gustav Adolf Neuber, (1850-1932) der 1884 im Sankt-Elisabeth-Krankenhaus in Kiel eine Trennung der Operationsräume nach septischen und aseptischen Operationen einführte und damit einen wesentlichen Beitrag zur modernen Chirurgie leistete.
- Willis Whitfield (1919-2012) von den Sandia National Laboratories USA, brachte 1961 seine Ideen von der turbulenzarmen Verdrängungsbelüftung als fundamentales Prinzip der Reinraum-Technik zu Papier. Ohne seine Erfindung wäre die moderne Mikro-Elektronik nicht denkbar.
- Hugh Howorth, (1909-2004) der 1961 in England kleine Operationskammern mit laminarem Luftstrom entwickelte, um die nachoperative Komplikationsrate bei den von dem orthopädischen Chirurgen Sir John Charnley durchgeführten Hüft-Operationen zu senken, was am Ende auch gelang.
- Wallace Coulter (1913-1998) erfand 1953 einen elektronischen Zähler für Partikel in Flüssigkeiten. Somit waren Partikel nun sowohl quantifizierbar als auch nach Feret-Durchmesser klassifizierbar geworden.
- Die Arbeitsgruppe Manhattan-Project entwickelte in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts den HEPA-Filter (high efficiency particulate air filter). Damals bestand die Aufgabe, die radioaktiven Partikel, die bei den ersten Versuchen zur Herstellung einer Atombombe entstanden aus der Raumluft herauszufiltern.
- In den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelten die Technologen Ulrich Kaempf, Mihir Park, Dave Trasher und Barclay Tullis bei dem amerikanischen Technologie-Konzern "Hewlett-Packard" eine standardisierte, modulare Fertigungs-Plattform für die Herstellung von Halbleiter-Scheiben (Wafer). Die Erfinder nannten die Technologie SMIF für „Standard Mechanical Inter Face“. Dabei handelt es sich um eine Fertigungs-Technik, bei der alle Fertigungsschritte vom

Einfahren der Silizium-Scheiben bis zum fertigen Wafer isoliert von einer normalen Fertigungs-Umgebung stattfinden.

Aber auch in der Liga der weniger bekannten Erfinder und Entrepreneurе gab es unvergessliche Persönlichkeiten: Einer von ihnen war der amerikanische Physiker Alvin Lieberman. Er war neben Wallace Coulter einer der Väter der elektronischen Partikelmessung. Ohne diese Technik wäre es nicht möglich gewesen, Technologien wie den Techniken des Reinen Arbeitens das physikalisch-mathematische Gerüst zu geben. Außerdem war Lieberman einer derjenigen, die eloquent am Federal Standard 209 mitgearbeitet hatten. Aus seiner Feder sind zudem einige Bücher und eine Unzahl von Aufsätzen geflossen. Ein Technologie-Preis des IEST Institute of Environmental Science and Technology in den USA trägt seinen Namen.

Ein anderer amerikanischer Erfinder/Entrepreneur aus dem Bereich der *Contamination Control* war Edward Paley (1924-2012). Er hatte in den 60er Jahren eine visionäre Idee in Bezug auf den zunehmenden Reinheitsbedarf zukünftiger HiTech-Industrien: Paley ahnte, dass die Strukturen der damals aufkommenden Mikroelektronik mit der Zeit immer kleiner würden, während die Verunreiniger - Staub und Schmier - ihre ursprüngliche Größe behielten. Aus dieser zunehmenden Differenz der Strukturen sah er bedeutende Industrien erwachsen. Im Jahr 1964 gründete er die Texwipe Inc. und begann Spezial-Produkte für das wischende Reinigen zu entwickeln, die damals Innovations-Charakter hatten. Als Paley das Unternehmen 2001 für 100 Millionen Dollar verkaufte, arbeiteten dort 400 Mitarbeiter. Es heißt, Paleys überaus großzügige Gattin Florence habe nach dem Verkauf eine Million Dollar an die Texwipe-Mitarbeiter verteilt.

Die Anfangsjahre



Abb. 12 Reinraum-Kopfbekleidung
(Foto: Rudolf Simon - Wikimedia Commons)

Wir sprechen über das Ende der fünfziger Jahre, als die Reinraumtechnik in den Industrieländern, insbesondere jedoch in den USA, eine erste Phase des Aufschwungs hatte. Zunächst musste jedoch eine verbindliche Norm geschaffen werden und so erfolgte im Jahr 1963 in den USA die Veröffentlichung des US Federal Standard 209 "Cleanroom and Workstation requirements, Controlled Environment". Der Standard 209 wurde bis zum Jahr 1992 fünf Mal dem Stand der Technik angepasst und 2001 durch eine ISO-Norm abgelöst (ISO 14644-1). Wie immer, wenn sich eine Technologie im Anfangsstadium befindet musste zunächst viel experimentiert werden denn es gab noch keine homogen gewachsene Reinraum-Typologie. Vor allem aber gab es selbst zu Beginn der achtziger Jahre noch kein gewachsenes Reinheits- und Hygiene-Bewusstsein der im Reinraum eingesetzten Mitarbeiter. In einem großen Reinraum im Südwesten Deutschlands beispielsweise musste der amerikanische Betreiber das Tragen des vorgeschriebenen Mundschutzes durch Entlassungs-Androhung durchsetzen. In einem Reinraum im französischen Essonne - so heißt es - traf man anfangs auch mal den einen oder anderen Operator mit

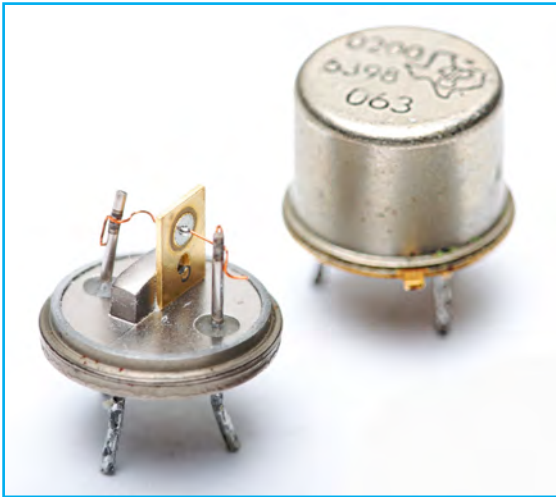


Abb. 13 Transistor (Foto: Marcin Wichary, Quelle: <https://www.flickr.com/photos/mwichary/3949281947/in/album-72157622284092113/> - das Foto wurde digital nachbearbeitet)

brennender Zigarette an. Die Reinraum-Technik entwickelte sich in Deutschland ab Mitte der fünfziger Jahre zunächst langsam. In den Sechzigern wurde sie von der zunehmenden Germanium-Transistor-Fabrikation befruchtet, die damals eher in Sauber-Räumen als in Reinräumen erfolgte. Es folgte dann jedoch relativ schnell - etwa ab 1962 - die Silizium-Technologie, die aus den USA zu uns herüber kam. Nun wurden auch die Fertigungs-Umfelder zunehmend reiner. In den frühen Jahren des Reinen Arbeitens - etwa um das Jahr 1960 - waren es vor allem weiße Kittel mit Armbündchen, die während des Arbeitens einen Teil der Partikel vom gefertigten Produkt fern hielten, später - Anfang der 70er Jahre - wurden bereits zunehmend Kopfhäuben getragen und auch setzte sich das ganztägige Tragen von Handschuhen durch.

Die Fertigungs-Umfelder mussten auch schon deshalb reiner werden, weil wir anfangs bei der Germanium-Technik ungefähr 12 verschiedene Transistor-Typen aus einer Diffusion herausgelesen hatten - und zwar manuell. Aber natürlich waren das trotz höherer Reinheit immer noch keine beherrschten Fertigungsprozesse im heutigen Sinne. Erst nachdem die Rundfunk-Branche sich für den Einsatz von Transistoren entschieden hatte um die verschleißanfällige Radoröhre abzulösen, musste die relativ geringe Fertigungs-Ausbeute für Transistoren steigen, damit deren Preise in marktkonforme Regionen gelangen konnten und nun wurde es ernst mit der Reinheit.

Das Erscheinen der ersten Transistoren im Elektronik-Markt war eine Herausforderung für uns alle. Der Autor erinnert sich, dass ein Siemens-Ausbilder im Jahr 1956 alle seine Lehrlinge zusammenrief. Er hielt ein zylindrisches Gebilde von etwa 10 mm Durchmesser mit drei herausgeführten Drähten in die Höhe, dann sagte er mit wehevoller Stimme: „Dieses Teil wird eure Zukunft mehr verändern als der 2. Weltkrieg uns verändert hat.“ Das war damals für uns eine absolut unverständliche Weissagung und in der Lehrwerkstatt Anlass zu unzähligen ironisierenden Imitationen mit den sonderbarsten Objekten aber letzten Endes hat sie sich dann an der Mikrochip-Technologie bewahrheitet und zwar in einem Maße, in dem wir es selbst zur Jahrtausendwende noch nicht für möglich gehalten hätten.



Abb. 14 Tragbares Transistorradio „Transita“ der Firma Nordmende aus den 1960er Jahren (Foto: Wikimedia Commons)

Nur dreißig Jahre waren vergangen bis 1986 der erste große Reinraum der Siemens AG in Regensburg für die Herstellung von Speicher-Chips gebaut wurde. Es gab am Siemens-Standort Villach in Österreich bereits eine gut funktionierende Produktion von Halbleiter-Schaltkreisen geringerer Speicherkapazität. Auch gab es etwa zur gleichen Zeit bereits Reinräume der Halbleiterfertigung bei IBM-Sindelfingen, Texas Instruments in Freising, bei Intermetall (später Micronas) in Freiburg, bei Bosch in Reutlingen, bei Philips-Valvo (seit 2003 NXP) in Hamburg und beim Halbleiterwerk Dresden. Von den Genannten war aber damals außer Siemens-Regensburg

Abb. 15 Infineon Standort Regensburg (Foto: Infineon)



lediglich noch IBM-Sindelfingen in der Lage 1-Megabyte-Chips in Großserie zu fertigen. Der Fertigungs-Beginn des 1MB-Chip wurde bei IBM in Sindelfingen sogar im Beisein des zu der Zeit amtierenden Bundeskanzlers Kohl vollzogen.

Der Siemens-Reinraum in Regensburg war ein über Luftschleusen zugänglicher Reinraum des „open ballroom“-Typs. Siemens hatte mit dem Projekt ein eindeutiges Zeichen gesetzt. Man war nicht gewillt, die europäischen Märkte den amerikanischen und (damals noch den japanischen) Mitbewerbern zu überlassen. Für den Fertigungs-Prozess hatte der Siemens-Konzern eine Lizenz des japanischen Unternehmens Toshiba erworben. Dennoch: Ein Jahr lang gelang es den Regensburger Technologen nicht, eine ausreichend hohe Prozessausbeute zu erreichen. Die Fehlerquelle war schwer zu finden und zudem nicht an einem einzelnen Prozessschritt auszumachen. Erst nach 12 Monate langer, intensiver Suche war der Fehler gefunden: Eine Prozess-Chemikalie mit einem geringfügig zu hohen Reinheitsgrad stellte sich als die Ursache heraus.

Die Siemens AG machte in Regensburg im ersten Jahr einen Verlust von knapp 1 Million DM pro Kalendertag. Damals wurde uns allen klar, dass mit den Fertigungs-Systemen an der vordersten Technologiefront bisher nicht vorstellbare Risiken verbunden waren. Aus einem kleinsten, unbeachtet gebliebenen Detail, konnte auch für einen Großkonzern ein kommerzielles Desaster in Milliardenhöhe werden. Der Regensburger Reinraum steht heute noch, wenngleich mehrfach erweitert. Heute werden dort Chip-Gehäuse entwickelt so wie Chip-Karten und Sensor-Chips gefertigt.

Im vergangenen halben Jahrhundert ist die Kapazität der Speicher-Chips von 64 Kilobyte auf einige hundert Gigabyte gewachsen. Dies ist eine Steigerung um das 16-Millionenfache, und damit wohl das größte Wachstum, das irgendeine Reinheits-abhängige Technologie jemals aufzuweisen hatte.

Die Reinraumtechnik brauchte sich, nachdem Mitte der 80er Jahre die Reinraum-Klasse 10 nach Federal-Standard üblich geworden war, im Hinblick auf eine Verbesserung der Luftreinheit nicht im gleichen Maße weiter zu entwickeln wie z. B. die Lithografie oder andere Struktur-relevante Fertigungs-Prozesse. Sie ist vielmehr stets den Anforderungen der Fertigungs-Ingenieure gerecht geworden, und heute werden rein-technisch gesehen Fertigungs-Umfelder unterstützt, in denen 256 G-byte-Chips gefertigt werden. Das spricht für sich. Der Reinraum hat sich als technologische Fertigungs-Architektur bei vielen Industrien im höchsten Maße bewährt. In Deutschland haben in den Aufbaujahren der Reinraumtechnik für die Großprojekte vor allem solche Reinraumbauer wie Meissner & Wurst und Zander die Szene bestimmt.

Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass *Reinraum* zunächst einmal ganz generell gesehen ein Verunreinigungs-reduziertes Raumgebilde ist. Das muss nicht unbedingt eine architektonische Struktur im Sinne eines Gebäudes sein. Vielmehr kann man es auch als reine Prozess-Kammer innerhalb einer Maschine oder eines Apparates verstehen. Wenn wir diesen Aspekt beispielsweise im Hinblick auf den technischen Fortschritt betrachten, dann ist diese Entwicklung unübersehbar. Die Diffusionsöfen in der Halbleiterfertigung beispielsweise sind heute ganz anders konstruiert als noch vor 20 Jahren. Früher war es gefährlich, wenn ein Operator beispielsweise mit TiO_2 -haltigen Materialien in die Ofenzone kam. Das ist heute alles sehr viel intelligenter und abgeschlossener gelöst. Es ist anzunehmen, dass immer mehr Maschinen entstehen, in denen sich inhärent reine Räume im Sinne von Kammern befinden. Das sind Maschinen die zunehmend Selbstreinigung-Mechanismen haben werden, so dass es des äußeren Reinraums nicht mehr im gleichen Maße bedarf wie früher. Diese Entwicklung wird auch erheblichen Einfluss auf den Bedarf an Reinraum-Verbrauchsmaterial und auf die Reinhaltung von Reinraum-Interiors als Dienstleistung haben.

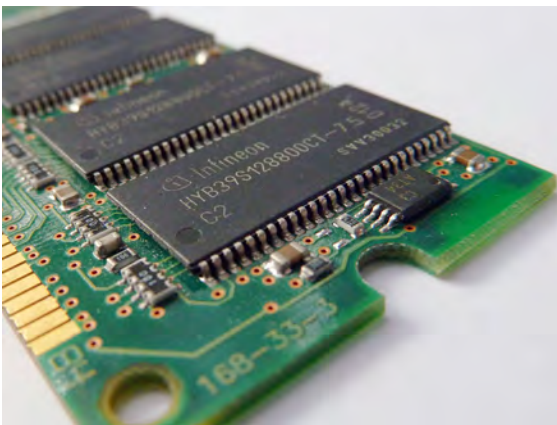


Abb. 16 Arbeitsspeicher in Form eines ICs auf einem SDRAM-Modul (Foto: Laserlicht - Wikimedia Commons)

Gerhard Rauter, damals Technischer Direktor der Infineon AG Dresden, sagte in seinem viel beachteten Lübecker Symposiums-Vortrag im Jahr 2002 zur Zukunft der Reinraum-Industrie: *"In unseren SMIF-Reinräumen wären wir schon heute in der Lage, mit einfachen Kitteln anstelle von Reinraum-Overalls zu arbeiten, aber wir wissen es nicht genau und dann macht man es eben nicht."*

Insbesondere die Computer-Technologie und deren Märkte haben die Entwicklung von Speicher-Chips sehr beeinflusst und in der Folge auch die Techniken des Reinen Arbeitens. Computer-Chips haben heute Leiterzug-Breiten im 18- oder versuchsweise 10 Nanometer-Bereich. Diese Entwicklung hat man noch vor 20 Jahren nicht für möglich gehalten. Der Autor erinnert sich gut an den Vortrag eines Physikers der Universität Köln, der 1988 behauptet hatte, das Ende der möglichen Leiterzug-

breiten-Reduzierung stände kurz bevor, denn ab irgendeiner Leiterzugbreite wäre kein Elektronenfluss mehr möglich. Das hat sich jedoch bisher noch nicht bewahrheitet.

Große Equipment-Hersteller der Halbleiter-Branche wie *ASML*, *Applied Materials*, *Varian*, *Canon*, *Süss* oder *Lam Research*, sind sehr innovativ und entsprechend erfolgreich. Wir müssen andererseits damit rechnen, dass eingedenk der komplexeren Strukturen der Endprodukte nun auch komplexer strukturierte Verunreinigungen bereits in geringsten Mengen auf den Fertigungs-Prozess wirksam werden können. Dies zeigt sich beispielsweise bei der ionischen und molekularen Kontamination (AMC). Auch wird die Applikation von Nanopartikeln und die damit verbundene Messtechnik einen erheblichen Bedeutungszuwachs erfahren und unzählige neue Anwendungen mit sich bringen.

Normung in der Reinraumtechnik

Die Normung in der Reinraumtechnik lässt sich in mehrere Abschnitte unterteilen wie u. a.:

- Normen für Industrielle Reinräume
- Normen für Medizin und Pharma-Reinräume
- Normen für den militärischen Einsatz
- Normen für das Reinraum-Verbrauchs-Material

Die erste in der Geschichte des Reinen Arbeitens bekannt gewordene Norm war die „US Air Force Technical Order 00-25-203“ aus dem Jahr 1961. Im April 1963 trafen sich dann etwa zweihundert mit Reintechnik-Aufgaben befasste Vertreter der US-Behörden so wie aus Wissenschaft und Industrie bei den Sandia Laboratories in Albuquerque, USA. Dort wurde eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen, die aus je einem Vertreter der amerikanischen Waffengattungen der Militärs, der Behörden wie beispielsweise der Atomenergie-Behörde, der Luft- und Raumfahrtbehörde und aus einer Reihe von Reinraum-Fachleuten aus der Industrie bestand. Ihnen wurde die Aufgabe mit auf den Weg gegeben, eine nationale US-Norm für den Betrieb von Räumen mit erhöhter Luftreinheit zu formulieren. Es ist erstaunlich, dass diese nationale Norm - der "Federal Standard 209 - Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones" - noch im gleichen Jahr vorgestellt werden konnte. Erst im Jahr 2001 wurde der Federal Standard dann abgelöst von der Norm ISO 14644-1. Diese Norm hat nun internationale Gültigkeit erlangt, so dass die Normung der Reinraumtechnik ein weltweit akzeptiertes Fundament gefunden hat.

Das US-amerikanische IEST - Institute of Environmental Sciences and Technology in Schaumburg Illinois USA hat zudem in den Jahren seines Bestehens seit 1952 bzw. 1997 insgesamt 39 Arbeitsgruppen ins Leben gerufen, die sich den unterschiedlichen Aspekten der Reinraumtechnik angenommen und so genannte „Recommended Practices“ erarbeitet haben. Die

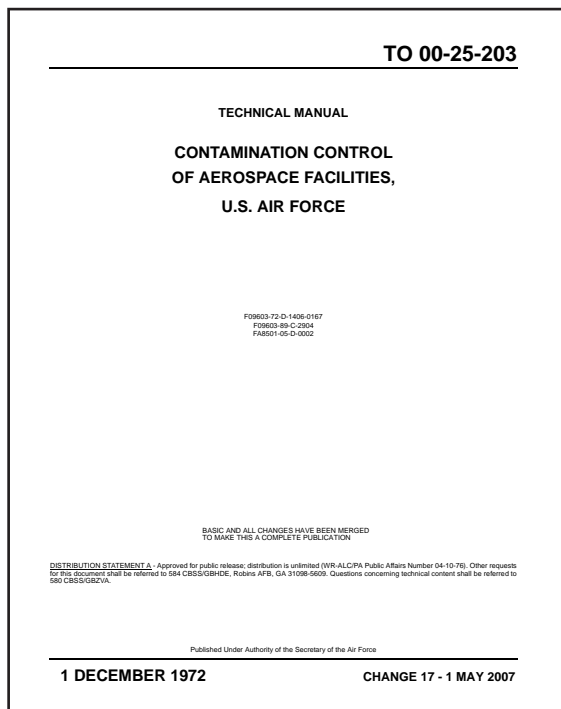


Abb. 17 Die „US Air Force TO 00-25-203“ war 1961 die erste in der Geschichte des Reinen Arbeitens bekannt gewordene Norm, hier in der 17. Änderung abgebildet.

Arbeitsgruppen des IEST bestehen aus Vertretern der Reinraum-gebundenen Industrien, der technischen Behörden, der Waffengattungen des Militärs und der Universitäts-Institute. Insofern sind die IEST-Arbeits-Gruppen vergleichbar mit denen des deutschen VDI. IEST Recommended Practices haben keinen staatlichen Normencharakter wie beispielsweise die ASTM in den USA oder in Deutschland die DIN-Normen aber sie sind für viele Normungsaufgaben eine bisher bewährte Lösung, wobei allerdings nicht außer Acht gelassen werden darf, dass manche Recommended Practices dringend einer Neufassung bedürfen, ein Projekt das gerade jetzt von der ISO-Arbeitsgruppe TC 209 auf internationaler Basis in Angriff genommen wird.

Bereits seit einigen Jahrzehnten wird vom Verein Deutscher Ingenieure die Richtlinie VDI 2083 herausgegeben, in der die besonderen Belange der Reintechnik (Reinraumtechnik) im Hinblick auf die diversen Anforderungen in bester Weise behandelt sind.

Normung ist für den breiten geregelten Einsatz von Massenprodukten sicherlich unverzichtbar aber nur so weit sie auch tatsächlich einem Bedürfnis breiter Anwenderkreise entspricht. Ist diese Voraussetzung nicht gegeben, so wird Normung zur lästigen kostenträchtigen bürokratischen Pflichtübung. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie zur fragwürdigen Einnahmequelle für diejenigen wird, die sich durch die Ausgabe vollkommen überflüssiger „Qualitäts-Zertifikate“ an gutgläubigen Produkt-Anwendern bereichern oder aber auf dem Umweg über die Versagung derselben zum eigenen Nutzen den freien Warenverkehr behindern möchten. Versuche in dieser Richtung hat es in den vergangenen Jahrhunderten mehr als genug gegeben.

Medizin und Pharmaindustrie

Wenn in dieser Abhandlung bisher zumeist die Reinnräume der Halbleiterfertigung behandelt wurden und nicht so sehr die Pharma-Reinnräume, dann liegt dies vor allem daran, dass

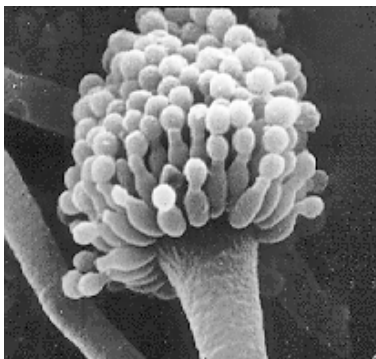


Abb. 18 *Aspergillus fumigatus*, Pilz, Elektronen-Mikroskop (Foto: Wikimedia Commons)

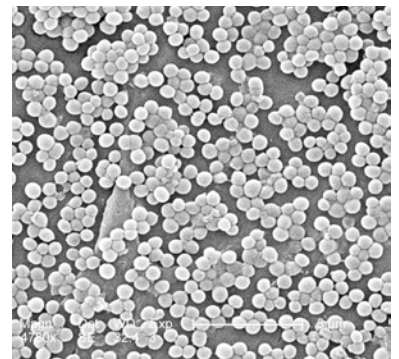


Abb. 19 Ausschnitt aus einer MRSA-Kolonie, Elektronen-Mikroskop - 4780fach (Foto: Wikimedia Commons)

die Reinraumtechnik zweifellos von der Halbleiter-Industrie die größten Impulse erhalten hat. Der wesentliche Unterschied zwischen den drei Reinraum-Arten ist der, dass die in Pharma-Reinräumen gefertigten Produkte bei ihrer späteren Anwendung in vielen Fällen mit dem Menschen in Berührung kommen - mit seinem Blut oder seinem Gewebe. Sie sind daher stets auch eine potenzielle Gefahr für die Gesundheit.

Während in Reinräumen der Halbleitertechnik die Verunreinigung der Produkt-Oberfläche mit Partikeln und organischen Schichten die Vermeidens-Strategie bestimmt, so sind es in Pharma-Reinräumen Bakterien, Viren, andere Mikroben und Endotoxine die über das Produkt als Zwischen-Träger mit dem Menschen, dem Patienten - in Berührung kommen könnten. Weil hier die zum großen Teil die Partikel-Problematik entfällt und der Fokus im Wesentlichen auf der Desinfektion der Reinraum-Oberflächen und der Vermeidung der Keim- und Endotoxin-Übertragung vom arbeitenden Menschen auf das gefertigte Produkt liegt.

Die größte Herausforderung stellt sich insbesondere im Bereich der Krankenhaus-Hygiene. Wir beklagen beispielsweise immer noch eine viel zu hohe Zahl an Todesfällen durch nosokomial-Bakterien. Hier sind wir gefordert, die kritischen Oberflächen in Krankenzimmern, Intensiv-Stationen aber auch in Operations-Räumen ausreichend zu desinfizieren. Das betrifft auch die Hand-Hygiene. Viele Wissenschaftler und Ärzte arbeiten unablässig an dieser Aufgabe und erste Erfolge sind unübersehbar.

Ehrungen und Preise

Vormals waren es vor allem die USA wo den Protagonisten der Reinraumtechnik ein ehrendes Andenken bewahrt wurde. Das IEST-Institut in Schaumburg, Illinois hat eine ganze Reihe von Ehrungen ausgeschrieben, die sich auf die Arbeit führender Reinraum-Technologen beziehen. Um nur einige zu nennen: Willis-J.-Whitfield-Award, James-R-Mildon-Award, Robert-L.-Mielke-Award und nicht zuletzt der Al-Lieberman-Mentoring-Award. Insbesondere der Letztere eröffnet einen Einblick in die humane Geisteshaltung des Namensgebers. Die Ehrung ist mit den Worten versehen: *„Für bedeutende Beiträge zum Erfolg Anderer durch Rat und Lehre so wie die Bereitschaft Wissen zu teilen.“*



Abb. 20 Heinz Fissan, VDI-Ehrenmedaille in Gold 2003

Auch in Europa werden herausragende Leistungen zunehmend durch Preise und Ehrungen honoriert. Bekannt gewordene Persönlichkeiten der amerikanischen und europäischen Reinraumtechnik wurden früher mit dem "Hall-of-Fame-Award" der amerikanischen Zeitschrift "Cleanrooms" ausgezeichnet. Dazu gehörten beispielsweise der englische Autor William Whyte und der Schweizer Hans Schicht (1937 - 2018). In Deutschland wurde dem bedeutenden Aerosolforscher und Wegbereiter der Nanotechnologie Heinz Fissan die VDI-Ehrenmedaille in Gold verliehen (2003). Lothar Gail (1999) und Horst Weißsieker (2010) erhielten die VDI-Ehrenplakette - beide für ihre exzel-

lente Repräsentations- und Normungsarbeit. Aus dem gleichen Kreis erhielt die Plakette (2014) auch Udo Gommel von der VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik.

Als willkommene Stifter haben sich in jüngster Zeit sowohl Frank Duvernell von der profi-con GmbH als auch das Fraunhofer Institut IPA hervorgetan. Beide stifteten je einen jährlich vergebenen Preis zur Förderung von Innovation in der Reinraumtechnik.

Gedanken zum Thema *Industrie 4.0*



Abb. 21 In seinem Buch „Now. Next. Future“ diskutiert Frank Duvernell 2017 die Vision *Industrie 4.0*.

Die Zukunfts-Diskussion ist in der deutschen Reintechnik-Industrie z. Zt. ganz und gar von den möglichen Veränderungen der Arbeitsabläufe im Rahmen einer als *Industrie 4.0* bezeichneten Zukunftsvision bestimmt. Sie wird gelegentlich auch *4. industrielle Revolution* genannt. Der Begriff wurde von der deutschen Bundesregierung geprägt, um im historischen Kontext die 4. Stufe der bisherigen industriellen Gesamt-Entwicklung zu kennzeichnen. *Industrie 4.0* steht für die Verzahnung der industriellen Produktion mit moderner Informations- und Kommunikations-Technik. Die Autoren Frank Duvernell und Gernot Dittel nehmen sich in dem Buch „Now Next Future“ der aufgezeigten Entwicklung kenntnisreich an und beschreiben sehr engagiert und farbenfroh einige durch die Verbindung von Produktion und IT erhofften Synergien. Der Autor der Ihnen vorliegenden Schrift konnte sich zu *Industrie 4.0* bisher kein abschließendes Urteil bilden und schlüpft daher in die Rolle eines kontrovers argumentierenden Diskussionspartners:

Wir sehen auch deswegen keinen revolutionären Wandel auf unsere Industrien zukommen weil schon die bisherigen technologischen Übergänge von der Elektronenröhre zum Transistor, von der mechanischen Rechen-Maschine zum elektronischen Taschenrechner und vom ersten 16-Kilobyte-PC zur 200 GB-SD-Karte stattgefunden haben, ohne dass es dadurch zu einer merklichen Veränderung unserer Wirtschafts-Struktur oder gar zu sozialen Spannungen gekommen wäre. Dafür fehlt *Industrie 4.0* außerdem die vorausgegangene erfinderische Großtat, die in der Vergangenheit mit der Einführung der Dampfmaschine Auslöser der bekannten sozialen Umwälzungen war.

Es stehen der Einführung von Mechanisierungs- und Vernetzungs-Systemen höherer Dichte und Komplexität gleich mehrere Argumente entgegen:

- die unübersichtliche Kostenlage
- gravierende Sicherheitsbedenken
- der Mangel an geeigneten Schnittstellen
- Ein vorhersehbarer Spezialkräfte-Mangel,
- Die große Anzahl von Klein- und Mittelstands-Betrieben (550.000)
- die Bedenken der Gewerkschaften
- die Sinnfrage: Was soll das alles?

Daher ist es nicht ganz unwahrscheinlich, dass sich *Industrie 4.0* im Sinne einer Sublimierung als übergangslose Folge von *Industrie 3.0* (IT, Internet, Vernetzung) und nicht als „Revolution“ zeigt. Der ganze *Industrie 4.0* - Hype mit den eher akademischen Grenzziehungen zwischen den vier Zeitabschnitten industrieller Entwicklung erinnert an eine journalistisch wiederbelebte Kondratjew - Theorie aus dem Jahr 1932. Die Forderungen der Gewerkschaften nach einem „gerechten“ Anteil an der erwarteten Wertschöpfungs-Steigerung sind sicher verständlich und die angenommene Schnittstellen-Problematik mit den bereits in Betrieb befindlichen Automatisierungs-Systemen wird sich nicht innerhalb von kurzer Zeit beheben lassen. Vor Allem ist es jedoch die große Zahl von 550.000 deutschen zumeist Klein- und Mittelstands-Unternehmen des produzierenden Gewerbes, die sich in einem Maße retardierend auf den Fortschritt auswirken muss, so dass mit rapiden, geschweige denn mit revolutionären Veränderungen unserer Wirtschaftsstruktur durch den angedachten Vernetzungs- und Automatisierungs-Schub kaum zu rechnen ist. Es ist zudem eine neue Erfahrung, dass ein ähnlicher Begriff wie *Industrie 4.0* in den USA nicht zu existieren scheint, obgleich solche Entwicklungen normalerweise dort ihren Ursprung haben. Und am Ende wird so Mancher sicher auch nachdenklich die Frage stellen: Was soll uns das nützen? Wird das Heer von Arbeitslosen das eine solche Industrie „automatisch“ produzieren würde, überhaupt in der Lage sein die Kaufkraft zu generieren, die es bräuchte um solch einen drastischen Paradigmenwechsel zu finanzieren?

Ausblick



Abb. 22 Präzisions-Reinigungstuch Microweb™ UDG
(Foto: Clear & Clean)

Wenn wir unseren Fokus auf das Reine Arbeiten ein wenig erweitern und den Blick auf das Thema Reinheit in Umwelt und Natur allgemein lenken, so fällt die Voraussicht nicht schwer, dass die Bedeutung der mikrobiellen Verunreinigung insbesondere von Böden und Gewässern das alles beherrschende Thema der kommenden Jahrzehnte sein wird. Bisher hat es die Politik nicht vermocht, Berufsstände von Notwendigkeiten zu überzeugen, die für unser Leben und unsere Gesundheit existenziell sind. Das betrifft beispielsweise den Verzicht auf Antibiotika und die Reduzierung von Pflanzen-Schutzmitteln in der Landwirtschaft und von Mikropartikeln in den Meeren. Es kann sein, dass uns dieser Mangel an Überzeugungskraft der Wissenschaftspolitik und an Durchsetzungs-Fähigkeit oder Ignoranz der Demokratie-basierten Systeme am Ende zum irreparablen Schaden gereicht - nämlich dann, wenn wir es nicht vermögen, die fortschreitende Kontamination unserer landwirtschaftlichen Böden, der Gewässer und der Luft auf ein erträgliches Maß im Sinne des Allgemeinwohls zu vermindern und zu verhindern.

Literatur

- [1] EN ISO 14644 - Beuth-Verlag, Berlin
 - [2] Plagemann, Karin "Zum 150. Geburtstag von Gustav Adolf Neuber" (1850-1932) *Schleswig Holsteinisches Ärzteblatt* 12/2000 Seiten 16-20
 - [3] Holbrook, Daniel "Controlling Contamination": „The Origins of Clean Room Technology" *History and Technology: An International Journal*, Vol. 25 No 3, Sept. 2009
 - [4] Labuda, Win "Reinheit als Systemparameter", Zeitschrift *ReinraumTechnik* 3/2002, Wiley/Git-Verlag Darmstadt.
 - [5] Günther, Siegmund "Lippersheim, Hans" Allgemeine deutsche Biografie (ADB) Baden 18, Dunker & Humblot, Leipzig 1883, S. 734 f (Hans Lippersheim erfand 1608 das Fernrohr etwa zeitgleich mit Jacob Metius Adrianszoon, Zacharias Janssen und Galileo Gallilei)
 - [6] Dieter Gerlach "Geschichte der Mikroskopie" Harri Verlag GmbH, Nov. 2008, ISBN-10:3817117817, ISBN-13: 978- 3817117819
 - [7] Austin and Timmerman „Design and Operation of Cleanrooms", Business News Publishing Company, Detroit 1965
 - [8] Galatowitsch, Sheila „A brief history of cleanrooms", *Solid State Technology Journal* 03/2009
 - [9] Duvernell, Frank „Now. Next. Future - Using Cleanroom Technology" - Verlag Cleanroom Media GmbH, 1. Auflage 2017 - ISBN 978-3-00-057580-8
-

Über den Autor



Bild 2018

Win Labuda ist ein deutscher Fachautor für das Gebiet *Reine Technologien*. Seit 1985 hat er 40 Arbeiten zum Thema Techniken des Reinen Arbeitens veröffentlicht. Außerdem ist er Gründungsgesellschafter der Clear & Clean Werk für Reintechnik GmbH und des Clear & Clean-Forschungslabors für Oberflächenreinheit.