

Die Reinraumwelt von morgen

Ansätze aus dem akademischen Nachwuchs

Die Themen Energie(krise), Fachkräftemangel und technologische Neuerungen prägen die Schlagzeilen unserer Zeit. Diesen Herausforderungen und Veränderungen muss auch die Reinraumtechnik begegnen. Die hier beschriebenen Ansätze zur energieoptimierten Reinraumsteuerung, Attraktivitätssteigerung des Reinraums als Arbeitswelt und Nutzung smarter Technologien im Bereich Reinraumkleidung zeigen hierfür exemplarische Wege auf und/oder liefern Gedankenanstöße für die aktive Gestaltung der Reinraumwelt von morgen.



Theresa Zolg



Maike Beck



Prof. Dr. Andreas Schmid

An der Fakultät Life Sciences der Hochschule Albstadt-Sigmaringen hat die Reinraumtechnik einen hohen Stellenwert, allen voran im Bachelorstudiengang Pharmatechnik, in dem es neben Vorlesungen auch ein Praktikum zum Themenfeld gibt, sowie im Masterstudiengang Facility and Process Design. Im Rahmen von Projekt-, Bachelor- oder Masterarbeiten bearbeiten Studierende aktuelle und zukunftsorientierte Fragestellungen, meist in Zusammenarbeit mit Unternehmen und häufig mit einem direkten oder indirekten Bezug zur Reinraumtechnik.

Dieser Übersichtsbeitrag gibt Einblick in drei dieser studentischen Arbeiten. Eine Masterthesis eröffnet und bewertet Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz im Bereich der Reinraumsteuerung. Ein Thema, das aufgrund der aktuellen Lage hohe Relevanz hat. Eine Bachelorthesis betrachtet den Reinraum und seine Attraktivität als Arbeitswelt, mit einem Fokus auf das Wohlbefinden des Personals. Aspekte, die in Zeiten des Arbeits- und Fachkräftemangels vermutlich an Bedeutung gewinnen werden. Darüber hinaus adressiert eine Projektarbeit das Potential moderner Technologien, die bei Smart Clothes zum Einsatz kommen, im Bereich Reinraumbekleidung.

Energieoptimierte Reinraumsteuerung ^[1]

Der Betrieb von Reinräumen ist bekannterweise sehr energieintensiv. So verbrauchen Reinräume bis zu 25-mal mehr Energie als Produktionsgebäude anderer Gewerbe oder Verwaltungsgebäude ^[2]. Der hohe Energiebedarf ist in erster Linie auf die Prozessanforderungen sowie den dadurch bedingten Luftwechsel zurückzuführen. Die angewendeten Luftwechselzahlen basieren dabei meist nur auf Erfahrungswerten. So werden hinsichtlich der Konzentration luftgetragener Partikel Konditionen erzeugt, die wesentlich unter den definierten Grenzwerten liegen. Bevor die Luft in den Reinraum gelangt, wird sie mit Hilfe einer raumlufttechnischen Anlage aufbereitet. Schätzungsweise 50-75 % des Gesamtenergiebedarfs eines Gebäudes können dabei dem Betrieb der raumlufttechnischen Anlage zugeschrieben werden ^[2].

Gerade die Verwendung von großen Mengen Außenluft stellt aufgrund der aufwändigen Luftaufbereitung ein sehr energieintensives Verfahren dar. Allein schon die Wahl der Luftführung und -aufbereitung hat einen massiven Einfluss auf den Energiebedarf. Sofern die Hygieneanforderungen dies zulassen, soll für die Versorgung der Reinräume ein Umluftbetrieb mit getrennter Außenluftauf-

bereitung gewählt werden. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass der Anteil der Außenluft bedarfsweise der aufbereiteten Umluft zugeführt und so die notwendige Energie für die Aufbereitung der Außenluft minimiert werden kann.

Generell wird der Grundstein für die Einsparung von Energie bereits in der Planungsphase von Reinräumen und der dazugehörigen raumlufttechnischen Anlage gelegt. Die bedarfsgerechte Auslegung der Anlage sowie der Räumlichkeiten stellt dabei einen wesentlichen Aspekt dar. Doch auch für Bestandsgebäude gibt es Mittel und Wege, um den Energieverbrauch zu minimieren (siehe Tabelle 1).

Eine dieser Möglichkeiten stellt der Absenkbetrieb dar. In den produktionsfreien Zeiten soll der Reinraum auf einem absoluten Minimum, im sogenannten Absenkbetrieb, betrieben werden. Hierfür wird der Außenluftanteil sowie die Luftwechselzahl auf ein Mindestmaß reduziert. Die Regelung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit soll weitestgehend eingestellt werden. Ob der Absenkbetrieb automatisiert über ein ERP-System oder manuell eintreten soll, ist von den betrieblichen Gegebenheiten abhängig. Bevor der Absenkbetrieb eintritt, muss sichergestellt werden,



© Robert Kneschke - stock.adobe.com

dass sich das Produkt in Lagerräumen befindet, in denen die notwendigen Raumkonditionen eingehalten werden. Auch ist darauf zu achten, dass sich kein Personal mehr im Reinraum befindet und dieser auch nicht mehr betreten werden kann. Vor dem Start der Produktion soll mit Hilfe des ERP-Systems und mit entsprechender Vorlaufzeit der Produktionsbetrieb aufgenommen werden.

Eine weitere Möglichkeit stellt die bedarfsgerechte Steuerung der Luftwechselzahl in den Personalschleusen dar. Personalschleusen werden in der Regel nur temporär genutzt. Ein erhöhtes Personenaufkommen tritt dabei meist nur zu Pausenzeiten oder Schichtwechseln auf. Bei diesem Konzept soll in Abhängigkeit der anwesenden Personenzahl die Luftwechselzahl in der Schleuse verändert werden. Je höher die Zahl der anwesenden Personen ist, desto höher sollte auch die Luftwechselzahl sein, um die definierten Grenzwerte hinsichtlich der Konzentration luftgetragener Partikel einhalten zu können. Die raumlufttechnische Anlage soll mit Hilfe von RFID-Chips, welche das Personal an sich trägt, erkennen, wie viele Personen sich in der Schleuse befinden und die Luftwechselzahl entsprechend anpassen. Sobald sich keine Person mehr in der Schleuse befindet, soll der Absenkbetrieb einsetzen.

Doch nicht nur die Personalschleuse kann bedarfsgerecht gesteuert werden. Dieses Konzept kann man auch auf einen Reinraum übertragen, in welchem die gesamten Raumkonditionen bedarfsgerecht gesteuert werden. Mit der Un-

terstützung eines Produktionsplanungssystems kann die raumlufttechnische Anlage direkt auf zu erwartende Veränderungen der Raumkonditionen reagieren. Hierzu sind vorab umfassende Aufzeichnungen von Temperatur, Feuchte und Partikelkonzentration durchzuführen. Nur so kann eine Verknüpfung von Prozessschritten und Personaltätigkeiten zu der Veränderung von Umgebungsbedingungen geschaffen werden. Kombiniert man dies mit einem kontinuierlichen und intelligenten Monitoringsystem, welches Veränderungen im Raum wahrnimmt und entsprechende Maßnahmen einleitet, sollte die Gefahr einer Grenzwertverletzung durch ungeplante Ereignisse im Reinraum minimiert werden.

Arbeitswelten Reinraum^[3]

Arbeiten wo, wann und wie man will

Die Digitalisierung ermöglicht uns heutzutage eine nie dagewesene Mobilität und Flexibilität – und das in den meisten Arbeitsbereichen. Für die Arbeit in einem Reinraum gilt das allerdings nicht: Die Gestaltung des Arbeitsplatzes „Reinraum“ wird von anderen Motiven als dem individuellen Geschmack der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bestimmt. Können diese in einem „herkömmlichen“ Büro den Arbeitsbereich mit persönlichen Gegenständen gemütlicher und ansprechender gestalten, ist dies für den Arbeiter bzw. die Arbeiterin im Reinraum, vor allem aufgrund hygienischer Anforderungen, nicht machbar.

Abb. 2: Smart Cleanroom Clothing – Entwicklung von Szenarien © HS Albstadt-Sigmaringen

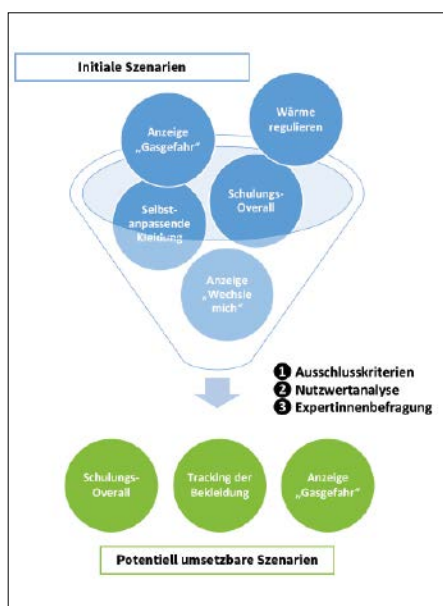


Abb. 1: Beispielhafte Farbgestaltung eines Reinraumes (links: traditionell, rechts: mit Farbakzenten)

© Daldrop + Dr.Ing.Huber GmbH + Co. KG

Tabelle 1: Konzepte zur energieoptimierten Reinraumsteuerung

| Konzept | Vorteile | Mögliche Defizite |
|---|--|--|
| Absenkbetrieb | Erhebliche Energieeinsparung in produktionsfreien Zeiten. | Nur anwendbar, sofern es produktionsfreie Zeiten gibt. Es muss sichergestellt werden, dass der GMP-Status des Reinraums im Absenkbetrieb nicht verletzt wird. |
| Bedarfsgerechte Steuerung der Luftwechselzahl in den Personalschleusen | Energieverbrauch von temporär genutzten Räumen wird gesenkt. | Bei starkem Personenwechsel kann es für das System schwierig sein, sich einzupendeln. Hier sollte lieber auf eine definierte Luftwechselzahl gesetzt werden. Bei der Nutzung von RFID-Chips sind Vorgaben zum Datenschutz zu beachten. Darüber hinaus wird bei der Verwendung von RFID-Chips in der Reinraumkleidung der Einschleusevorgang zwischen schwarz/Zone nicht registriert. |
| Bedarfsgerechte Steuerung der Raumkonditionen & kontinuierliches Monitoring | Räume und auch Prozesse können an ihrem Energieoptimum gefahren werden. Wärme- und Feuchtelasten werden gezielt abgeführt. | Starke, plötzlich auftretende Emissionen können nur schwer ausgeglichen werden. Erhöhter Aufwand für die Vorbereitung (umfassende Messungen im Reinraum, Auswahl von repräsentativen Messstellen). |

Reinräume sind vor allem auf Funktionalität und Effektivität ausgerichtet. Entwickelt als optimale, hochtechnologisierte Produktions- und Fertigungsumgebungen werden sie den Bedürfnissen der dort arbeitenden Menschen dabei selten gerecht. Das Wohlbefinden am Arbeitsplatz ist aber nicht unerheblich für die Produktivität. Deswegen müsste in Zukunft versucht werden, die Attraktivität des Arbeitsplatzes „Reinraum“ durch verschiedene Möglichkeiten zu steigern.

Schon kleine Veränderungen in Farbe, Beleuchtung und Lüftung des Raumes können eine große Wirkung sowohl auf das Wohlbefinden, als auch auf die Konzentration und die Effektivität der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter erzielen.

Individuelle Farbgebung für mehr Modernität

Die Farben in Reinräumen sind in der Regel in Weiß und Grau, um Verunreinigungen und Verfärbungen sichtbar zu machen. Zukünftig könnten jedoch auch neue Farbpaletten eingesetzt werden, um eine angenehmere und modernere Arbeitsumgebung zu schaffen – ohne dabei die Funktionalität des Raums zu beeinträchtigen. Durch farbige Akzente an den Wänden kann der Raum optisch aufgelockert werden (siehe Abb. 1). Dies hat mehrere Effekte: so fühlen sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nicht nur wohler, die Farbunterschiede verhindern zudem auch den sogenannten „Weißbrausch“ des Auges.

Natürliche Beleuchtung den ganzen Tag

Durch Glaswände und transparente Raumgestaltung wird zwar versucht, so viel Tageslicht wie möglich in die Reinräume zu bekommen. Für die Gewährleistung kontrollierter Lichtbedingungen, kommt der künstlichen Beleuchtung in Reinräumen immer noch große Bedeutung zu. Um dem monotonen gelblichen Standardlicht etwas entgegenzuwirken, kann innerhalb des Reinraums durch das DALI-System der Verlauf des Tageslichtes nachempfunden werden [4]. Verschiedene Forscher haben herausgefunden, dass Licht sowohl einen visuellen als auch einen nicht-visuellen Einfluss auf uns Menschen hat. So wirkt rot-gelbliches Licht (Sonnenaufgang 3700 Kelvin) entspannend, bläuliches Licht (Mittagssonne 6.500 Kelvin) dagegen anregend auf den Körper [5]. Daher sollte am Morgen gelbliches Licht eingesetzt werden, welches nach und nach in bläuliches Licht übergeht. So bleibt die Konzentration der Mitarbeiter im Laufe des Tages erhalten. Richtung Abend wird das Licht in den Arbeitsräumen ins Rötliche getaucht. Dieser Farbverlauf entspricht ungefähr dem natürlichen Sonnenlicht innerhalb eines Tages.

Kontrollierte Raumluft zum Durchatmen

Um eine kontrollierte und angenehme Luftatmosphäre in Reinräumen zu gewährleisten, spielt die Lüftung hier ebenso eine wichtige Rolle. Um die Wärmelasten im Raum abzutransportieren, wird meist kältere Luft eingeblasen. Dies kann beim Personal als unangenehmer Luftzug empfunden werden. Um dies zu verhindern, wurden unter-

schiedliche Winkeleinstellungen der Lamellen in den Auslässen in einer Strömungssimulation geprüft. Dabei war die Winkeleinstellung von 45°/45° am effektivsten für das Wohlbefinden des Personals aber auch für die das Produkt und die Herstellung: Damit ist der Strömungsverlauf der Luft kegelförmig und eine Induktion entsteht. Dadurch spüren die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter keinen unangenehmen oder störenden Luftzug innerhalb des Reinraums. Des Weiteren kann bei der Planung der Lüftungstechnik in den Reinräumen die Anordnung der Auslässe berücksichtigt werden. Auslässe müssen unbedingt entsprechend der Anlagen und der Laufwege und Arbeitsplätze des Personals geplant werden. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sollten z.B. nicht direkt unter einem Auslass arbeiten oder der Auslass direkt über einer Anlage platziert werden. So kann auch hierdurch ein unangenehmer und störender Luftzug vermieden werden.



Die Zukunft kann man am besten voraussagen, wenn man sie selbst gestaltet“ (Alan Kay)

Smart Cleanroom Clothing^[6]

Smart Clothes vereinen die bekannten Funktionen traditioneller Bekleidung mit Funktionen bzw. Fähigkeiten moderner Technologien. Darunter versteht man ein „auf Textilien beruhendes System, das eine beabsichtigte und verwertbare Antwort als eine Reaktion, entweder auf Veränderungen in der Umgebung/im Umfeld oder auf ein Signal/eine Eingabe von außen zeigt“^[7]. Bisher werden smarte Textilien hauptsächlich im Bereich Sicherheitsbekleidung und in der Überwachung von Vitalparametern bei Patienten oder Sportlern eingesetzt.

Im Rahmen einer Projektarbeit^[6] wurden verschiedene Szenarien entwickelt, wie solche Technologien nutzbringend in Reinraumbekleidung für die pharmazeutische Industrie integriert werden könnten. Alle Szenarien (siehe Abb. 2) wurden zunächst gegen Ausschlusskriterien (u.a. „nicht GMP- und reinraumgerecht umsetzbar“) geprüft und anhand einer Nutzwertanalyse bewertet. Als gewichtete Kriterien für die Nutzwertanalyse wurden herangezogen: Waschbarkeit, Akzeptanz durch Personal, Qualifizierungsaufwand, Tragekomfort, Kosten. Unter Einbezug von Fachexpertinnen aus dem Textilsektor wurden die Szenarien in der Folge auf Umsetzbarkeit hin überprüft und auf Basis der Rückmeldungen teilweise angepasst.

Ergebnis sind drei potentiell umsetzbare Konzepte: ein Schulungs-Overall mit trackbaren Sensoren, ein Tracking der Reinraumbekleidung per RFID-Technologie (RFID = radio-frequency identification) sowie eine optische Warnung bei Gas in der Umgebungsluft (siehe Abb. 2).

Der Schulungs-Overall ist zunächst in Schnitt, Haptik und anderen Eigenschaften einem herkömmlichen Reinraumoverall möglichst ähnlich. In die Kleidung, vor allem im Arm- und Beinbereich, werden zahlreiche Sender/Transponder (z.B. RFID) integriert. Der Raum, in dem das korrekte, kontaminationsfreie Anlegen von Reinraumbekleidung trainiert werden soll, muss mit einem entsprechenden Lesesystem ausgestattet sein. Mit entsprechender Software ist nach dem Ankleidevorgang eine Auswertung der Bewegungen möglich. RFID-Transponder würden ebenso für das zweite Szenario, ein Tracking der Reinraumbekleidung bei regulärer Nutzung, zum Einsatz kommen. Ein waschbarer RFID-Transponder wird z.B. in den Armbereich eines Reinraumoveralls eingearbeitet. Hierüber wäre es zum einen möglich, das Kleidungsstück einer bestimmten Person zuzuordnen, sodass Personen nach jedem Waschzyklus die dieses wieder zurückerhalten würden. In die Bekleidung integrierte RFID-Transponder könnten als Ausweis fungieren und berührungsloses Bedienen (von z.B. Türen) ermöglichen. Zudem könnten bei entsprechender Auslesung Wechselfristen für die Reinraumbekleidung nachverfolgt werden.

Beim dritten Szenario kann die Reinraumbekleidung über integrierte gasdetektierende Fasern relevante Gase in der Umgebungsluft sichtbar machen^[8]. Ein konzentrationsabhängiger Farbumschlag der Fasern kann im direkten Sichtfeld der Person (z.B. Arm) erkannt werden.

Ob aus den drei vorgeschlagenen Szenarien anwendbare und belastbare Produkte der Kategorie Smart Cleanroom Clothing entstehen können, müsste in Machbarkeitsstudien untersucht werden.

Fazit und Ausblick

„Die Zukunft kann man am besten voraussagen, wenn man sie selbst gestaltet“ (Alan Kay). Getreu diesem Motto gilt es den Herausforderungen unserer Zeit aktiv zu begegnen. Steigende Energiepreise und die Zielsetzung der Klimaneutralität bis 2045 erfordern eine Effizienzsteigerung in allen Gesellschaftsbereichen, darunter auch im energieintensiven Reinraumumfeld. Mit unterschiedlichen Ansätzen zur energieoptimierten Reinraumsteuerung, wie z.B. einer bedarfsgerechten Steuerung der Luftwechselzahl, könnte hier ein gewisser Beitrag geleistet werden. Ein weiteres schon jetzt dominierendes Thema, das sich in den kommenden Jahren noch weiter verschärfen wird, ist der Fachkräftemangel. Mit modernen, kreativen Farb- und Raumkonzepten, physiologischer Beleuchtung und einer behaglichen Belüftung kann es gelingen, dem Reinraum mehr Wohlfühlatmosphäre zu verleihen und somit die Attraktivität einer Reinraumtätigkeit und gleichzeitig deren Effizienz zu steigern. Eine weitere Herausforderung

und zugleich Chance ist es technologische Neuerungen im Reinraumumfeld zu erproben und zu etablieren. Inwieweit, wie hier adressiert, Technologien aus dem Bereich Smart Textiles Anwendung im Bereich der Reinraumbekleidung finden können und werden, muss die Zukunft zeigen. Neben Automation und Robotik sind unterschiedliche digitale Lösungen und smarte Technologien schon heute fester Bestandteil der Reinraumwelt. Moderne Sensorik gepaart mit Big Data und KI sowie weiteren zukunftsweisenden Möglichkeiten werden, unter Wahrung der regulatorischen Vorgaben, den digitalen Wandel weiter vorantreiben.

Quellen

- [1] Zolg, T. (2022) Konzeptentwicklung für eine energieoptimierte Reinraumsteuerung. Masterthesis, Hochschule Albstadt-Sigmaringen.
- [2] Loomans, M., Ludlage, T., van den Oever, H., Molenaar, P., Kort, H. & Joosten, P. (2020). Experimental investigation into cleanroom contamination build-up when applying reduced ventilation and pressure hierarchy conditions as part of demand controlled filtration. *Building and Environment*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106861>
- [3] Beck, M. (2021) Arbeitswelten Reinraum. Bachelorthesis, Hochschule Albstadt-Sigmaringen.
- [4] Del Viva, L., Fazakas, R., & Villegas Sanchez, C. (2016). Accelerate SSL Innovation for Europe. http://lightingforpeople.eu/2016/wp-content/uploads/2015/08/SSLerate-D3.6_part2_v3.pdf [abgerufen am 11.04.2023]
- [5] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (2018) Nicht-visuelle Wirkungen von Licht auf den Menschen. DGUV Information 215-220. <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3247> [abgerufen am 11.04.2023]
- [6] Leber C. (2021) Smart Cleanroom Clothes. Projektarbeit, Hochschule Albstadt-Sigmaringen.
- [7] Deutsches Institut für Normung e. V. (2020) Smarte (Intelligente) Textilien – Definitionen, Klassifizierung, Anwendungen und Normungsbedarf. DIN CEN ISO/TR 23383:2020.
- [8] Owyung, R. E., Panzer, M. J., & Sonkusale, S. R. (2019). Colorimetric Gas Sensing Washable Threads for Smart Textiles. *Scientific Reports*, 9(1), 5607. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42054-8>

KONTAKT

Theresa Zolg

Masterabsolventin Facility and Process Design
Fakultät Life Sciences
Hochschule Albstadt-Sigmaringen
Tel.: +49 7571 732-820
theresa.zolg@hs-albsig.de
www.hs-albsig.de

Maike Beck

Daldrop + Dr.Ing.Huber GmbH + Co. KG,
Neckartaiflingen
Tel.: +49 7127 1803-242
maike.beck@daldrop.com
www.daldrop.com

Prof. Dr. Andreas Schmid

Dekan
Fakultät Life Sciences
Hochschule Albstadt-Sigmaringen,
Sigmaringen
Tel.: +49 7571 732-8262
schmida@hs-albsig.de
www.hs-albsig.de

COOL BLEIBEN BEI COMPLIANCE



Anhang 1 ist da! Wir hoffen, Sie bleiben trotzdem cool.

Compliance, also die Einhaltung von Vorschriften und Regeln, ist auch für uns wichtig, daher helfen wir Ihnen, die Änderungen, die Ihre Reinigungs- und Desinfektionsprotokolle betreffen, zu verstehen und umzusetzen.

Contec bietet eine Palette an schnell wirkenden Sporiziden, wasserlosen Desinfektionsmitteln und einem rückstandsarmen Reinigungsmittel, mit denen sie die neuen Anforderungen erfüllen können. Unser erfahrenes Team von Mikrobiologen und technischen Experten unterstützt Sie bei Erstellung Ihrer Kontaminationskontrollstrategie (CCS), der Auswahl und Validierung von Desinfektionsmitteln und dem Reststoffmanagement.

Ausführliche Informationen zu Anhang 1, Ihre Strategie zur Kontaminationskontrolle und unserer Palette an geeigneten Reinraum-Produkten finden Sie unter contecinc.com/de/annex-1-update

Sauberkeit ist das Wichtigste

CONTEC
CLEANROOM