

Dekontamination von Arbeitsräumen mit UV-C für längere Lebensmittelhaltbarkeit am Beispiel der Braumanufaktur Ludwigslust

Erhöhung der Haltbarkeit von obergäurigem Bier mittels UV-C-Anlage

Florian Wald, M. Sc., Dr. Tatjana Carle, Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Glaß, Prof. Dr. Leif-Alexander Garbe

Im Rahmen des Projektes PHYSICS FOR FOOD & FEED forschen das **Zentrum für Ernährung und Lebensmitteltechnologie (ZELT) gGmbH Neubrandenburg** und die **Braumanufaktur Ludwigslust** an physikalischen Methoden zur Dekontamination der Arbeitsräume in der 2016 gegründeten Brauerei. Das Ziel ist es, die Betriebshygiene zu verbessern und damit die Produkthaltbarkeit der nicht pasteurisierten, ungefilterten Bierspezialitäten zu steigern.

Der Projektpartner **automation & software Günther Tausch GmbH (autosoft)** hat dazu zwei UV-C-Umluftanlagen installiert. Über verschiedene Sensoren wurden autark und online digitale Daten zur Überwachung der Luftqualität und zum Betriebszustand der UV-C-Anlagen erhoben. Zudem haben die Wissenschaftler vom ZELT über 20 Monate hinweg weit mehr als 1.500 mikrobiologische Proben ausgewertet, um die Effizienz der Maßnahmen zu überprüfen. Ein Sensorik-Panel beurteilte mehrmals die geschmacklichen Veränderungen eines in diesem Zeitraum hergestellten obergärigen Bieres.

Ziel des Vorhabens

Innerhalb des Bündnisses PHYSICS FOR FOOD arbeiten Klein- und Mittelständische Unternehmen (KMU) der Region mit dem **Zentrum für Ernährung und Lebensmitteltechnologie (ZELT)**, dem **Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V. (INP) Greifswald** unter der Leitung der **Hochschule Neubrandenburg** in verschiedenen Forschungsprojekten an physikalischen Technologien für Lebensmittel- und Futtermittelsicherheit, Pflanzenschutz und Umwelt. Die Raumluft-Dekontamination mit

UV-C soll insbesondere die Hygienestandards in der Getränkeherstellung erhöhen, indem nachweislich die Zahl an Hefen, Bakterien und Pilzsporen in der Luft verringert wird, was folglich in der Produktionsstätte die Keimzahl auf den Arbeits-Oberflächen absenkt. Neben dem betrieblichen Hygieneplan lag die Herausforderung dieses Vorhabens darin, die Keimreduktion klar abgegrenzt zu bewerten, zumal die UV-C Anlagen nur nachts – außerhalb der Produktionszeiten – in Betrieb sein konnten. Die kontinuierliche Überwachung der Lufthygiene mittels Sensoren spielte eine wichtige Rolle für die Arbeitsplatzsicherheit. Die Datenerhebung fand autonom in digitaler Form statt. Neben der mikrobiologischen Bewertung von Luft, Oberflächen und Bier beurteilte ein Sensorik-Panel aus 20 Personen die Brauergebnisse der Sorte „India Pale Ale“ (IPA). Für eine bessere Vergleichbarkeit fanden Brauung und Abfüllung zum einen vor und zum anderen nach der Installation der UV-C-Geräte statt.

Die Braumanufaktur Ludwigslust

Die Braumanufaktur befindet sich in der Residenzstadt Ludwigslust und ist mit 110 Quadratmetern Produktionsfläche die kleinste Brauerei in Mecklenburg-Vorpommern. Neben einem Sudhaus, einer Flaschenabfüllung sowie einem separaten Kühlhaus gibt es eine Flaschenreinigung und ein Lager für Malz und Flaschen.

India Pale Ale (IPA)

IPA ist ein unfiltriertes, stark hopfenbetontes Bier mit einem hohen Alkoholgehalt, denn ursprünglich musste es auf dem Seeweg von Großbritannien nach Indien – damals noch

um Afrika herum – lange stabil und haltbar bleiben. Zugaben von Fruchtanteilen, Honig, Ingwer oder Orangenschalen galten traditionell als gebräuchlich. Für den typischen Geschmack und die Qualität des Bieres nutzt man in Ludwigslust das Hopfenstopfen. Seit 2012 ist dieses Dry Hopping (auch Kalthopfung genannt) in Deutschland zulässig. Das heißt: Während der Bierreifung darf weiterer Hopfen hinzugegeben werden, um die feineren Aromen und die Haltbarkeit des IPAs zu verbessern.

UV-C-Technologie

UV-C-Strahlung mit einem Spektrum zwischen 100 bis 280 nm zerstört photolytisch durch Absorption energiereicher Strahlung beispielsweise die DNA von Bakterien wie E. coli bei einer Wellenlänge von etwa 260–265 nm. Die Wirkeffizienz liegt bei der eingesetzten Wellenlänge von 253,7 nm noch bei etwa 85%. Schäden können an Proteinen und der RNA entstehen. Die Veränderung der Erbsubstanz führt zum Zelltod. Bei 254 nm besitzt UV-C-Strahlung die effektivste Eindringtiefe. Industriegeräte für die Luftdekontamination erreichen je nach Anwendung und Hersteller 20–100 J/m².

Für die Trinkwasseraufbereitung sind 400 J/m² notwendig, standardmäßig kommen 800–1.200 J/m² zum Einsatz. Zur Dekarbonisierung des Wassers sind bis zu 4.000 J/m² nötig. Brauwasser muss einwandfrei sein. Deshalb ist das Entfernen von Schwebstoffen, Mikroorganismen sowie von gelösten Stoffen und Gasen notwendig. Die UV-C Technologie wird seit Jahrzehnten für die mikrobielle Sterilisation im Brauwasser eingesetzt.

Die indirekte Raumluftbehandlung in der Braumanufaktur Ludwigslust erfolgte mit zwei UV-C Umluftanlagen, die angesaugte, um die UV-C-Leuchtmittel herum geleitete Luft dekontaminieren und am anderen Ende wieder ausblasen. Im Kühlhaus der Braumanufaktur entkeimt ein „UVpro50“-Gerät 50 m³ Luft in der Stunde mit 5 mJ/cm.

Im Abfüllraum, der offen mit dem Sudhaus verbunden ist, wurde das „UVpro300“-Gerät (250 m³ Luft mit 12 mJ/cm) installiert. Entsprechend wirken die beiden UV-C-Umluftanlagen gegen mehr als 99 Prozent der in der Luft enthaltenen Hefen, Pilze und Bakterien. UV-C Strahlung inaktiviert zudem Viren, Allergene und Gerüche.

Automatisierung der eingesetzten Technik und autarke Raumluftüberwachung

Die UV-C-Anlagen wurden im Projekt durch eine Zeitschaltung und die detaillierte Aufzeichnung der Energieverbräuche ergänzt. Kosten, die Laufzeit und insbesondere Ausfälle sind damit nachvollziehbar dokumentiert. Für die Arbeitsplatzsicherheit, insbesondere die Einhaltung der Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) hat das ZELT drei Messgeräte zur Überwachung der Luftqualität im Produktionsbereich installiert. Die Sensoren können Feinstaub, Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Taupunkt sowie Lärm, Sauerstoff, Flüchtige Organische Verbindungen (VOC), Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Ozon messen. Letzteres spielt bei der UV-C-Technologie eine wichtige Rolle. Für Ozon existiert noch kein AGW, weswegen der bisherige MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration) als Referenz verwendet wurde. Die Messwerte sind cloudbasiert für die Wissenschaftler jederzeit einsehbar.

Nach der Installation der Anlagen erfolgten Messungen der UV-C-Exposition im Kühlhaus und der Abfüllanlage. Trotz der niedrigen Exposition und der unauffälligen Ozonkonzentrationen wurde im Hinblick auf die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) entschieden, die UV-C-Umluftanlagen nur in der Nacht einzuschalten, wenn niemand im Betrieb arbeitet. Demnach liegt die maximal zulässige UV-Exposition kumuliert für acht Stunden bei 30 J/m².

Mikrobiologische Probennahmen

Um die Effektivität der UV-C-Behandlung nachzuweisen, sind in 20 Monaten über 1.250 Luftkeimsammlungen, 250 Abstriche und 350 Abklatschproben ausgewertet worden. Die Probennahmen erfolgten vor Arbeitsbeginn und zum Feierabend. Das ZELT hat außerdem Betriebs- und Produktionsmittel mikrobiologisch analysiert.

Die wöchentlichen Probennahmen der Luft erfolgten mit Hilfe eines Luftkeimsammlers „PCE AS1“, der eine definierte Menge Raumluft auf Petrischalen mit Nährmedien saugt. Zwei selektive Agartypen machen Hefen und Pilze sowie Bakterien getrennt voneinander sichtbar. Abstriche (Tupfer) und Abklatschplatten (RODAC) nahmen die Mitarbeitenden an kritischen Punkten in der Brauerei. Die Auswertung der Proben erfolgte nach Postversand im ZELT. Die Platten für die Pilze und Hefen inkubierten bei 26 °C und die für die Bakterien bei 37 °C im Brutschrank. Die Auszählung erfolgte jeweils nach einem Tag, zwei und fünf Tagen.

Sensorik

Die Qualitätsprüfung des Bieres erfolgte durch mikrobiologische Kontrollen, sensorische Verkostungen der Biere und analytische Untersuchungen im Labor. Ein Sensorik-Panel aus 20 erfahrenen Probanden hat im Laufe des Projektvorhabens die für das Pro-

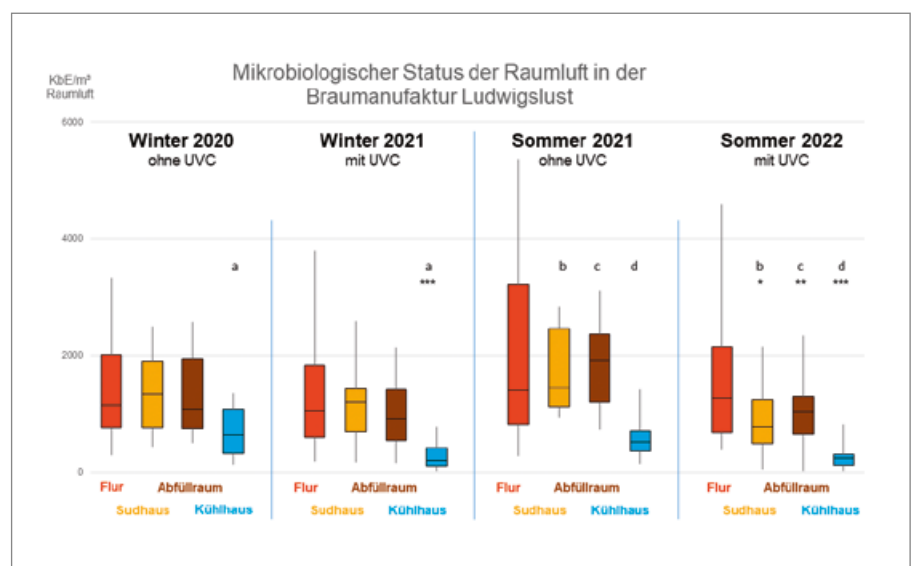
jekt hergestellten Brauungen des IPAs verkostet. Prüfgut vor der Installation der UV-C-Anlagen ist mit Brauergebnissen verglichen worden, während die Anlagen ein Jahr in Betrieb waren.

Es wurde eine hedonische Skala (Beliebigkeitsskala) genutzt und jeweils Geruch und Geschmack des Bieres mit Attributen beschrieben, um Veränderungen nach der jeweils sechswöchigen Lagerung zu detektieren. Nach der Flaschen- und Fassabfüllung waren die Brauungen unterschiedlichen Lagerungsbedingungen ausgesetzt, um analytische oder sensorische Unterschiede feststellen zu können.

Auswertung

Die gesundheitsschädliche Exposition der Umluftentkeimer ist nachweislich gering. Unmittelbar hinter den Lamellen der großen Anlage betrug die biologisch effektive Bestrahlungsstärke 2,22 µW/cm² (0,018% vom Innenraum der Anlage). Wegen der Priorisierung des Arbeitsschutzes waren die Anlagen nur nachts von 19 bis 7 Uhr eingeschaltet. Bei der Überwachung der Luftqualität wurde kein Anstieg von Ozon und Stickoxiden mit den eingesetzten Messgeräten in der Raumluft festgestellt.

Die Ergebnisse der Luftkeimsammlung entsprechen teilweise den Erwartungen, denn der Flur (unbehandelter Referenzort) zeigt



Die Grafik zeigt die Ergebnisse der vier Probennahmeorte des Luftkeimsammlers in der Braumanufaktur Ludwigslust; Ergebnisse für den Winter 20/21 zeigen eine höchst signifikante Reduktion der Luftkeime im Kühlhaus. Im Sommer 2022 konnte im Vergleich zum Sommer 2021 im Sudhaus eine signifikante, im Abfüllraum eine hoch signifikante und im Kühlraum nochmals eine höchst signifikante Reduktion der Mikroorganismen der Luft nachgewiesen werden.

sich in allen vier Halbjahren am höchsten belastet. Im Sommer 2022 sind die Keimbelastungen natürlichen Ursprungs etwas geringer als im Vorjahr 2021. Aufgrund der Distanz ist es allerdings unwahrscheinlich, dass der Einfluss der Anlagen eine Rolle ($p=0,16$) spielt. Das Sudhaus ist direkt mit dem Abfüllraum verbunden, in dem die UV-C-Anlage an der Decke installiert wurde. Im Winter konnte keine signifikante Reduktion der Luftkeime nachgewiesen werden ($p = 0,31$ und $p = 0,08$).

Bei genauerer Betrachtung der Zusammensetzung der verschiedenen Mikroorganismen im Abfüllraum in Kombination mit den Ergebnissen aus dem Sudhaus ist zu erkennen, dass ein sehr hoher Anteil der erfassten Luftkeime ungefährliche Bierhefen (*Saccharomyces cerevisiae*) waren, die die Aussagekraft des Ergebnisses künstlich vermindern. Im Sommer 2021 haben die Geräte nach einem halben Jahr Laufleistung signifikante Unterschiede im Sudhaus ($p = 0,02^*$) und hoch signifikante im Abfüllraum ($p < 0,0002^{**}$) bewirkt. Eindeutig ist die mikrobiologische Reduktion im Kühlhaus, das durch die separierende Tür einen nahezu hermetischen Raum bildet und durch seine Kühlung ursprünglich weniger belastet ist. Eine höchst signifikante Reduktion der Luftkeime ($p < 0,0001^{***}$ und $p < 0,0001^{***}$) ist potenziell auf die installierte UV-C-Anlage zurückzuführen.

Abschließend muss aber festgestellt werden, dass die Keimbelastung der Luft vor Installation der UV-C-Umluftanlagen zu hoch gewesen ist ($> 2000 \text{ KbE/m}^3$). Auch nach der Installation ist die strikte Einhaltung der Hygienekonzepte notwendig, um die Keimreduktion zu begünstigen. Regelmäßige Schulungen des Personals und entsprechende bauliche Maßnahmen zur Vermeidung von Außenluft in der Produktion sind weitere empfohlene Maßnahmen.

Sensorisch wird das India Pale Ale (IPA), das vor der Installation der UV-C-Umluftanlagen produziert und abgefüllt wurde, durch die Probanden als würzig-herb, fruchtig, röstig und säuerlich im Nachtrunk beschrieben. Einzelne Personen haben Fehlparfüm wahrgenommen. Insgesamt ist die durchschnittliche Beliebtheit des obergärigen Bieres vor

der UV-C Behandlung leicht negativ ausgefallen, ohne dass die Lagerung einen signifikanten Unterschied verursachte.

Die Proben, die mit der UV-C-Technologie produziert wurden, haben sensorisch besser abgeschnitten. Die Teilnehmer haben keinen negativen Nachgeschmack mehr wahrgenommen und die Beliebtheit ist insgesamt auf ein positives Urteil angestiegen.

Quellen:

Bergmann & Schäfer et. Al (1993): Optik – Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 3, 9. Auflage. Walter de Gruyter & Co. Berlin ISBN: 3-11-012973-6

Buchholz, K. & Collins, J. (2022): Eine kleine Geschichte der Biotechnologie – Von Bier und Wein zu Penicillin, Insulin und RNA-Impfstoffen. Springer-Verlag, Berlin. Braunschweig. ISBN: 978-3-662-63987-0

Chauhan, O. P. (2019): Non-thermal processing of foods. CRC Press, USA. ISBN 13: 978-1-1380-3584-3

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (2016): Handlungshilfe zur Gefährdungsbeurteilung-Arbeiten an UV-Geräten zur Desinfektion in der Trinkwasserversorgung. Fachbereich Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse. Berlin

Feldmann, H., et. al (2012): Yeast – Molecular and Cell Biology. 2. Vollständig überarbeitete, erweiterte Auflage. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, München. ePub ISBN: 978-3-527-65919-7

Gey, M. H. (2015): Instrumentelle Analytik und Bioanalytik – Biosubstanzen, Trennmethoden, Strukturanalytik, Applikationen. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-46254-6

Grasser, B. & Mattanovich, D. (2019): Recombinant Protein Production in Yeast. Springer Science+Business Media, Wien. ISBN 978-1-4939-9023-8

Kowalski, W. (2009): Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook – UVGI for Air and

Surface Disinfection. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-01998-2

Kunze, W. (2011): Technologie – Brauer & Mälzer. 10. Auflag, VLB Berlin. ISBN 978-3-921690-65-9

Lubkowski, J. & Blazejowski, J. (1989): Thermal Behaviour And Stability Of Amphotericin B. Thermochimica Acta, 155. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam

MUNK, K. (2008): Mikrobiologie – Taschenlehrbuch Biologie. Thieme-Verlag, Stuttgart. ISBN 78-3-13-144861-3

Neuhäuser, A. (2022): Optische Strahlung – Was ist UV-Strahlung? Bundesamt für Strahlenschutz. Salzgitter https://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/einfuehrung/einfuehrung_node.html; Stand 03.2022

Roeske, W. (2007): Trinkwasserdesinfektion – Grundlagen, Verfahren, Anlagen, Geräte, Mikrobiologie, Chlorung, Ozonung, UV-Bestrahlung, Membranfiltration, Qualitätssicherung. 2. Auflage. Oldenbourg Industrieverlag GmbH; München. ISBN: 978-3-8356-3119-9

Schönberger, C. (2013): Hopfenstopfen, Kalthopfung, Dry-Hopping: Was das ist und wie das geht. <https://www.hopfenhelden.de/hopfenstopfen-dry-hoppingkalthopfung/>. Stand: 06.07.2022

Stedel, R. (2008): Chemie der Nichtmetalle – Von Struktur und Bindung zur Anwendung. 3., vollständig neu bearbeitete Auflage. Walter de Gruyter GmbH. Berlin. ISBN 978-3-11-019448-7

Moghtader, S. (2021): UV-C-Anwendungen zur Entkeimung von Oberflächen und Luft.

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. -Fachverband Licht. Frankfurt am Main

Quelle:
Zentrum für Ernährung und Lebensmitteltechnologie gGmbH (ZELT), Neubrandenburg physicsforfood.org