

Einsatz von kaltem Atmosphärendruckplasma im Pflanzenbau

Philipp Aiglstorfer, Timo D. Stark, Heike Mempel

Kurzfassung

Angesichts der gegenwärtigen globalen Herausforderungen, insbesondere des Klimawandels und des prognostizierten Bevölkerungswachstums, gewinnen innovative und nachhaltige Methoden zur Optimierung der Pflanzenproduktion und Qualitätssicherung zunehmend an Relevanz. Diese Entwicklung unterstreicht die wachsende Bedeutung der Nahrungsmittelsicherheit und der Steigerung der Produktionseffizienz. In diesem Kontext präsentiert sich die Plasmatechnologie als ein Beitrag zur Lösung dieser Problemstellung. Insbesondere die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von plasmaaktiviertem Wasser (PAW) im Bereich der Nachernte, Saatgutbehandlung, Pestizidreduktion und Resistenzzüchtung stehen dabei im Fokus. Darüber hinaus eröffnen sich neue Anwendungsfelder im Bereich des Vertical Farming hinsichtlich der Entkeimung von Nährlösungen und der Raumdeseinfizierung.

Schlüsselwörter

Plasmaaktiviertes Wasser, kaltes Atmosphärendruckplasma, reaktive Spezies, Vertical Farming

Use of cold atmospheric pressure plasma in plant cultivation

Philipp Aiglstorfer, Timo D. Stark, Heike Mempel

Abstract

Given the current global challenges, particularly climate change and the projected population growth, innovative and sustainable methods for optimizing crop production and quality assurance are gaining increasing relevance. This development underscores the growing importance of food security and the enhancement of production efficiency. In this context, plasma technology presents itself as a contribution to solving this problem. In particular, the diverse applications of plasma-activated water (PAW) in the areas of post-harvest, seed treatment, pesticide reduction, and resistance breeding are the focus. Additionally, new application fields are emerging in vertical farming concerning the sterilization of nutrient solutions and room disinfection.

Keywords

Plasma-activated water, cold atmospheric pressure plasma, reactive species, Vertical Farming

Einleitung

Die Plasmatechnologie hat sich in den letzten Jahren zu einem vielversprechenden Forschungsfeld entwickelt. Ursprünglich fand die Technologie primär in der Medizin und Biologie Anwendung, wo sie zur Sterilisation von Oberflächen und in der Wundbehandlung eingesetzt wurde [1]. Durch kontinuierliche Forschung und technologische Fortschritte konnten die Effizienz gesteigert und die Kosten gesenkt werden, was ihre Attraktivität für weitere Anwendungsbereiche erheblich steigerte [2, 3]. Insbesondere in der Landwirtschaft und im Gartenbau eröffnen sich dabei neue, vielversprechende Einsatzmöglichkeiten.

Laut Prognosen des World Resources Institute wird die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2050 auf etwa 10 Milliarden Menschen ansteigen [4]. Als Konsequenz ist eine Zunahme konventioneller landwirtschaftlicher Praktiken, insbesondere der Einsatz von Agrochemikalien wie Düngemitteln und Pestiziden, zu erwarten. Obgleich diese Methoden die landwirtschaftliche Produktion steigern, belasten sie erheblich die Gesundheit der meisten Lebewesen, die Umwelt und natürliche Ressourcen [5, 6]. Zusätzlich führt der anthropogene Klimawandel zu einer Erhöhung der Durchschnittstemperatur, auch im europäischen Raum, was die Bildung und Verbreitung von Mikroorganismen auf Agrarprodukten begünstigt [7].

Angesichts dieser Herausforderungen wird aktiv nach innovativen, energie- sowie pflanzenschonenden, automatisierbaren und toxikologisch sicheren Alternativen zu konventionellen Pestiziden und Düngemitteln geforscht, welche einfach und sicher zu handhaben sind. Eine vielversprechende Technologie in diesem Kontext stellen mobile Plasmasysteme dar. Diese Systeme, die beispielsweise mittels dielektrischer Barriereentladung kaltes Plasma bei Atmosphärendruck generieren, eröffnen neue Perspektiven in der Agrarwissenschaft und dem Pflanzenbau. Im Gegensatz zu Hochtemperaturplasma, welches Temperaturen im Bereich von 150.000 K erreichen kann, wird kaltem Plasma eine präzise kalibrierte Energiemenge zugeführt, die ausreicht, um selektiv die Elektronen in Schwingung zu versetzen, während die Ionen weitgehend in ihrem Grundzustand verbleiben. Dadurch erhöht sich die Temperatur des Plasmas nicht über Raumtemperatur [8]. Kaltplasma ist bereits in diversen industriellen Anwendungen etabliert, insbesondere der Oberflächenmodifikation von Polymeren und Textilien [9]. In jüngerer Zeit hat sich das Anwendungsspektrum des kalten Atmosphärendruckplasmas erheblich erweitert.

Die vielfältigen Applikationsmöglichkeiten der Plasmatechnologie in der Landwirtschaft und im Gartenbau sind Gegenstand eines laufenden Forschungsprojekts an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, welches darauf abzielt, das Potential dieser Methode insbesondere für Arzneipflanzen zu analysieren. Das Projekt umfasst die Behandlung des Saatguts und der Nährlösung sowie die direkte Anwendung auf Arzneipflanzen zur Steigerung der qualitativen Eigenschaften. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Integration dieser Technologie in Vertical Indoor Farming-Systeme. Diese Implementierung zielt darauf ab, die ökonomische Effizienz und Rentabilität des kontrollierten Pflanzenanbaus in diesen Systemen zu steigern.

Grundlagen der Plasmatechnologie

Physikalisches Plasma wird häufig als die vierte Phase der Materie klassifiziert, die sich deutlich von den drei klassischen Aggregatzuständen - fest, flüssig und gasförmig - unterscheidet. Diese Zustandsform zeichnet sich durch die höchste Energiedichte aus, die alle anderen bekannten Materiezustände übertrifft. Der britische Physiker Sir William Crookes prägte in diesem Zusammenhang erstmals den Begriff "radiant matter" (dt. "strahlende Materie"), um die Eigenschaften dieses hochenergetischen Zustands zu beschreiben [10]. Der Aggregatzustand von Materie wird durch thermodynamische Variablen wie Druck und Temperatur bestimmt. Mit zunehmender thermischer Energie kommt es zur Destabilisierung der interatomaren und intermolekularen Bindungen, wodurch ein Stoff vom festen in den gasförmigen Zustand übergehen kann. Bei weiterer Energiezufuhr in ein Gas kann es zur Ionisation kommen, einem Prozess, bei dem Elektronen aus den Atomhüllen oder Molekülorbitalen entfernt werden. Das Atom bzw. Molekül bleibt als positiv geladenes Ion (Kation) zurück [11]. Die Ionisation führt zur Entstehung eines Plasmas - eines quasi-neutralen Gemisches aus:

- Freien Elektronen
- Ein- und mehrfach geladenen, positiven Atom- bzw. Molekülionen (Kationen)
- Ein- und mehrfach geladenen, negativen Atom- bzw. Molekülionen (Anionen)
- Angeregten Atomen und Molekülen (Radikale)
- Neutralatomen und -molekülen [11, 12]

Erzeugung von kaltem Plasma

Die Erzeugung von Plasma erfolgt durch die Zufuhr von Energie in ein gasförmiges Medium, was eine Änderung der elektronischen Struktur von Atomen und Molekülen induziert. Als Energiequellen können thermische Energie, elektrischer Strom oder elektromagnetische Strahlung fungieren. Für die Erzeugung nicht-thermischer Plasmen, insbesondere kalter Atmosphärendruckplasmen (CAP - cold atmospheric plasma), werden verschiedene elektrische Entladungsmethoden eingesetzt, die sich in folgende Kategorien einteilen lassen: Glimmentladung, Koronaentladung, dielektrische Barriereentladung, Bogenentladung, Mikro-Hohlkathodenentladung, Gleichstromentladung, Impulsentladung oder Hoch-/Niederfrequenzentladung. Die Entladungsform wird dabei von Parametern wie der Frequenz der Stromquelle (Gleich- oder Wechselstrom), dem Umgebungsdruck (Niederdruck- oder Atmosphärendruck) sowie der Geometrie der Elektroden bestimmt [12, 13].

Zur Generierung kalter Plasmen wird häufig die elektrische Entladungsform gewählt. Diese basiert auf dem Prinzip der gezielten Leitung eines elektrischen Stroms durch ein gasförmiges Medium. Die Initiierung der Gasentladung, auch Zündung genannt, setzt das Vorhandensein primärer Ladungsträger durch eine externe Quelle voraus. Diese Ladungsträger fungieren als Katalysatoren für die Ladungsträgervielfachung, um den Plasmazustand zu erreichen. Für die Aufrechterhaltung einer selbstständigen Gasentladung nach der Zündung bedarf es einer

positiven Ladungsträgerbilanz [12, 14]. Durch das Anlegen eines elektrischen Feldes kommt es zu einer Beschleunigung geladener Teilchen (Elektronen und Ionen), die durch Kollisionen Energie an neutrale Spezies transferieren. Durch die Kollision kann ein gebundenes Elektron aus der Hülle der Atome bzw. Moleküle herausgeschlagen werden und es wird ein weiteres freies Elektron erzeugt. Dieser Mechanismus resultiert in einer kaskadenartigen Elektronenfreisetzung und Bildung reaktiver Spezies [15].

Vorteile von kaltem Plasma

Bei der Erzeugung von kalten Atmosphärendruckplasmen wird ein thermisches Gleichgewicht zwischen Elektronen und Schwerteilchen vermieden, indem dem System nur für sehr kurze Zeit (einige Nanosekunden) Energie zugeführt wird (gepulst). Somit werden nur die deutlich leichteren Elektronen in Schwingung versetzt und die Gastemperatur erhöht sich nicht über Raumtemperatur [16]. Aus diesem Grund eignen sich kalte Plasmen aufgrund ihrer moderaten Temperaturentwicklung besonders für die Behandlung temperaturempfindlicher Materialien wie beispielsweise biologischem Gewebe [17].

Im Bereich der nicht-thermischen Behandlungsmethoden zeichnet sich die Kaltplasmatechnologie durch ihre Kosten- sowie Energieeffizienz aus. Das Anwendungspotenzial erstreckt sich über diverse Bereiche der Lebensmittelindustrie, von der Dekontamination verschiedener Nahrungsmittel wie Fleisch, Milchprodukte, Getreide sowie Obst und Gemüse bis hin zur Sterilisation von Verpackungsmaterialien. Darüber hinaus findet die Technologie auch Anwendung in der Abwasserbehandlung, insbesondere der Wasseraufbereitung [18].

Plasmaaktiviertes Wasser

In Bereichen der Agrarwissenschaft und des Pflanzenbaus empfiehlt sich die Anwendung plasmagenerierter reaktiver Spezies in Form von plasmaaktiviertem Wasser (PAW) oder anderen plasmaaktivierten Flüssigkeiten. PAW bietet im Vergleich zur direkten Plasmaanwendung mehrere Vorteile: Es ist leichter anzuwenden, genauer zu dosieren, besser zu lagern und kann vor Ort aus Leitungswasser oder destilliertem Wasser hergestellt werden. Das Konzept zur Erzeugung von PAW ähnelt der Ozonierung von Wasser, bei der Ozon in das Wasser eingeleitet wird. Die resultierende Flüssigkeit weist anschließend ebenfalls für eine gewisse Zeit reaktive Eigenschaften auf. Dies ermöglicht zum einen eine Selbstdesinfektion des Wassers und zum anderen die Reinigung bzw. Entkeimung von Kontaktflächen [19]. Somit ist PAW im Vergleich zu traditionellen chemischen Desinfektionsmitteln eine umweltfreundliche und kostengünstige Alternative.

Hauptverantwortlich für die reaktiven Eigenschaften des PAW sind reaktive Sauerstoff- und Stickstoffspezies (ROS und RNS) [20]. Zu den primären ROS-Verbindungen zählen Wasserstoffperoxid, Hydroxylradikale und Ozon, während die RNS-Verbindungen vorwiegend Nitrat, Nitrit, Peroxinitrit, Stickoxidradikale und Stickstoff umfassen. Unter diesen weisen Wasserstoffperoxid, Nitrat und Nitrit die höchste Halbwertszeit auf [19]. Abbildung 1 zeigt

schematisch den Entladungsbereich, die Gasphase, den Grenzbereich zwischen Gas und Flüssigkeit und die reaktiven Spezies im PAW [21].

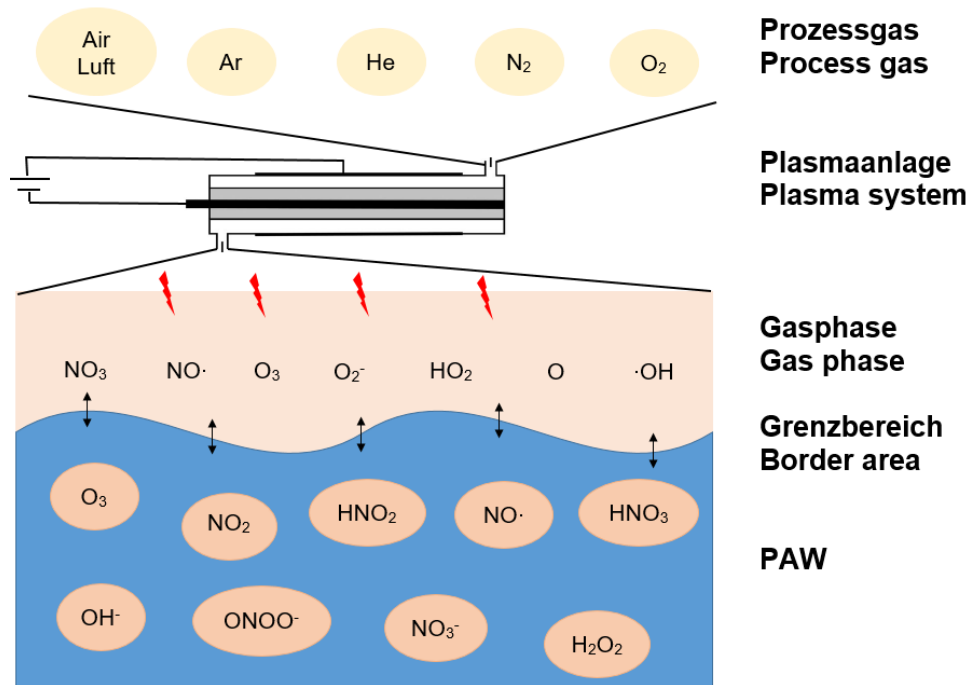


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Bildung von PAW-Komponenten.
Figure 1: Schematic diagram of the formation of PAW components.

Anwendungsmöglichkeiten von plasmaaktiviertem Wasser in der Landwirtschaft und im Gartenbau

Die Plasmatechnologie bietet ein breites Anwendungsspektrum entlang der gesamten Wertschöpfungskette in der Landwirtschaft und im Gartenbau. Das Potenzial dieser Methode erstreckt sich von der Saatgutbehandlung über den Anbau bis hin zu Nachernteprozessen, insbesondere im Bereich Obst und Gemüse. Eine schematische Darstellung dieser vielfältigen Einsatzmöglichkeiten entlang der Produktionskette ist in Abbildung 2 dargestellt.

Anwendung von PAW in der Nachernte

Konventionelle Methoden zur Oberflächendesinfektion und Wasseraufbereitung stützen sich häufig auf oxidative Substanzen wie Chlor, Chlordioxid oder Ozon. Ergänzend werden in der Nacherntebehandlung teilweise auch Pestizide eingesetzt. Diese Verfahren bergen jedoch Nachteile, insbesondere bei der Verwendung von Chlor, aufgrund der Bildung kanzerogener Verbindungen im wässrigen Milieu [22]. Eine vielversprechende Alternative bietet die Anwendung von PAW für die Wasseraufbereitung und zur Dekontamination von Produkten. Die enthaltenen reaktiven Spezies sind maßgeblich für die antimikrobielle Wirkung des PAW verantwortlich, was sich positiv auf die Haltbarkeit der Produkte auswirken kann. Von besonderer Relevanz ist dabei die Interaktion zwischen RNS, insbesondere Stickstoffdioxid (NO_2^-) und Wasserstoffperoxid (H_2O_2), zu Peroxinitrit (ONOO^-), welches Zellmembranen

durchdringen kann. Die primäre Wirkung von RNS auf Mikroorganismen erfolgt durch die Senkung des pH-Wertes durch Bildung von Salpetersäure und salpetriger Säure. Die antimikrobielle Wirkung von PAW wird, neben den reaktiven Spezies, noch von weiteren Faktoren wie dem Redoxpotential, dem pH-Wert, UV-Strahlung und Photonen beeinflusst. Ein weiterer Vorteil des PAW liegt darin, nach einer bestimmten Zeitdauer zu gewöhnlichem Wasser zu zerfallen, ohne toxische Rückstände zu hinterlassen [19, 23].

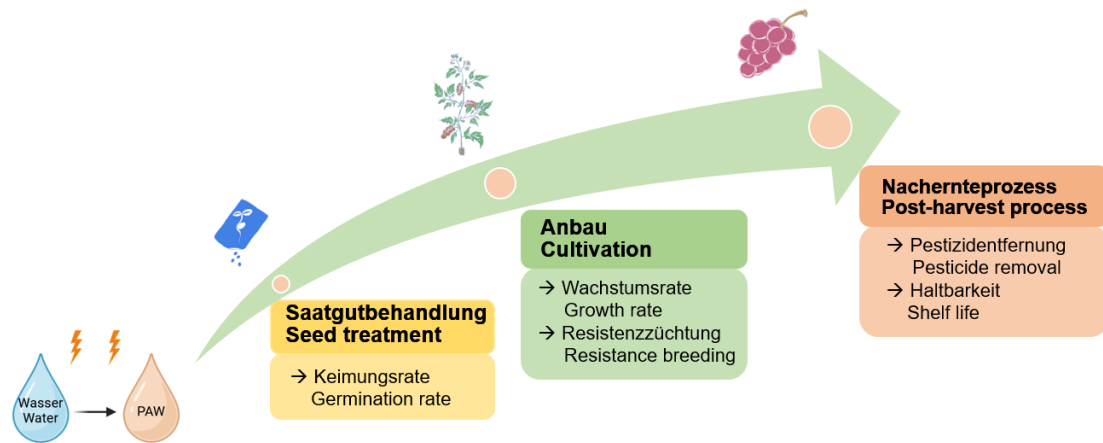


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Anwendungsmöglichkeiten von kaltem Plasma entlang der Wertschöpfungskette (Bildquelle: Wittmann Sabine).

Figure 2: Schematic representation of the possible applications of cold plasma along the value chain. (Image source: Wittmann Sabine).

Die fortschreitende Entwicklung und zunehmende Kommerzialisierung von Plasmageräten zu erschwinglicheren Preisen macht den breiteren Einsatz dieser Technologie in der Landwirtschaft und dem Gartenbau zunehmend realistisch. Die Effektivität von PAW bei der Dekontamination von Oberflächen von Frischprodukten wird von zahlreichen empirischen Studien belegt. [24] behandelten in ihrer Studie Erdbeeren mit PAW, um die Oberflächen zu entkeimen, und stellten eine Keimreduktion von 3,5 log₁₀-Stufen nach einer Behandlungsdauer von 15 Minuten fest. Im Kontrast dazu beobachteten [25] bei Applikation von Kaltplasma (gasförmig) über denselben Zeitraum lediglich eine Reduktion von 1,72 log₁₀-Stufen auf Erdbeeroberflächen.

In einer Studie von [26] wurde die antimikrobielle Effizienz von PAW bei der Behandlung von Birnen untersucht. Hierzu wurden Birnenproben einer Behandlung mit PAW, destilliertem Wasser oder Natriumhypochlorit-Lösung unterzogen und anschließend über mehrere Tage gelagert. Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Inhibierung des Bakterienwachstums in den PAW-behandelten Proben. Zusätzlich konnte bis zum sechsten Tag kein Schimmelpilzwachstum nachgewiesen werden. Hinsichtlich der Qualitätsparameter Farbe und Festigkeit zeigte die PAW-Behandlung keine signifikanten Auswirkungen.

Darüber hinaus finden sich weitere Studien, die sich durch eine Variation sowohl der behandelten Obst- und Gemüsesorten als auch der Zusammensetzung der zu aktivierenden Flüssigkeiten auszeichnen [27, 28].

Anwendung von PAW zur Reduktion von Pestizidrückständen

Pflanzenschutzmittel spielen in der konventionellen Landwirtschaft eine wesentliche Rolle zur Ertragssteigerung und -sicherung. Ihre Anwendung wird jedoch zunehmend kritisiert und ist auch mit komplexen Herausforderungen verbunden, darunter die Entwicklung von Resistenzen bei Schädlingen, Umweltbelastungen sowie potenzielle Risiken für die menschliche Gesundheit [29]. Aus diesem Grund stellt die Reduktion von Pestiziden auf Agrarprodukten einen wichtigen Bereich in der Agrarwissenschaft dar. In diesem Kontext haben sich in jüngster Zeit CAP und PAW als vielversprechende Ansätze zur Minimierung von Pestizidrückständen herausgestellt. Die Degradation der Toxine wird dabei hauptsächlich durch reaktive Spezies wie Hydronium-Ionen, Singulett-Sauerstoff und Hydroxylradikale induziert [30].

[31] untersuchten in ihrer Studie die Effektivität von PAW bei der Reduktion von Pestizidrückständen auf Erdbeeren und Weintrauben. Im Rahmen des Experiments wurden Pestizidstandards (Carbaryl und Chlorpyrifos) in methanolischer Lösung hergestellt, in welche die Früchte anschließend eingetaucht wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass nach einer 30-minütigen Behandlung mit PAW auf beiden Früchten eine signifikante Reduktion der Pestizidrückstände (>70 %) erreicht wurde. Zudem zeigte die PAW-Behandlung keine negativen Auswirkungen auf die Qualität (Festigkeit und Farbe) der Früchte.

[32] untersuchten die Effizienz von PAW zur Reduktion von Pestiziden auf Mangos. Hierfür wurde zunächst Chlorpyrifos oder Cypermethrin auf die Fruchtoberfläche gesprüht und dann getrocknet. Anschließend wurden die kontaminierten Früchte in destilliertes Wasser getaucht und dieses mittels gleitender Bogenentladung aktiviert. Bereits nach 5-minütiger Anwendungsdauer konnte eine signifikante Reduktion (>60 %) der Pestizidkonzentration festgestellt werden. Des Weiteren zeigte die Plasmabehandlung keine negativen Auswirkungen auf die Textur der Früchte und es wurde eine Erhöhung des Carotinoidgehalts festgestellt.

Auch in diesem Bereich finden sich zahlreiche weitere Studien, welche die Effektivität von PAW zur Pestizidreduktion zeigen und dessen Wirksamkeit bei der Verringerung verschiedener weiterer Pestizidrückstände belegen [33, 34, 35].

Anwendung von PAW zur Steigerung der Keimungs- und Wachstumsrate

Eine weitere Einsatzmöglichkeit der Plasmatechnologie liegt in der Saatgutbehandlung zur Optimierung der Keimungs- und Wachstumsrate. Ein Faktor für die reduzierte Keimfähigkeit von Samen diverser Pflanzenspezies ist die mikrobielle Kontamination der Samenoberfläche [36]. PAW bietet in diesem Kontext mehrere Vorteile: Die im PAW enthaltenen reaktiven Spezies besitzen nicht nur eine antimikrobielle Wirkung gegenüber verschiedenen phytopathogenen Mikroorganismen [37, 38], sondern initiieren auch eine oberflächliche Modifikation der Samenschale. Ein Ätzzvorgang bewirkt eine Reduktion der Oberflächenrauheit und Schalendicke, was wiederum die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen begünstigt [39].

[36] untersuchten in ihrer Studie den Einfluss von PAW auf die Keimungsrate von Rettichsamen. Hierfür wurden die Samen zunächst in destilliertes Wasser getaucht und anschließend wurde die Flüssigkeit aktiviert. Nach der Keimung der Samen wurden diese kultiviert und regelmäßig mit PAW bewässert. Die Ergebnisse zeigten eine deutliche Steigerung der Keimungsrate durch PAW-Applikation. Insgesamt wurde eine Keimungsrate von 60 - 100 % in der PAW-Gruppe beobachtet, verglichen mit 40 % in der Kontrollgruppe. [36] vermuten, dass auch die bei der PAW-Erzeugung freigesetzte Wärme zu einer verbesserten Wasseraufnahme und somit zu den beobachteten Effekten beitragen könnte.

[40] untersuchten die Auswirkung einer Behandlung mit PAW auf die Stresstoleranz von Gerstensamen unter Bedingungen wie Sauerstoffmangel, Kälte- und Salzstress. Die Ergebnisse zeigten eine signifikant höhere Keimungsrate bei den PAW-behandelten Samen im Vergleich zur Kontrollgruppe unter identischen Stressbedingungen. Darüber hinaus zeigten die behandelten Keimlinge ein deutlich erhöhtes Wurzel- und Sprossgewicht.

PAW zeigt neben seiner positiven Wirkung auf die Keimungsrate auch das Potenzial, das Pflanzenwachstum zu fördern. Ein wesentlicher Faktor hierbei ist das im PAW enthaltene Wasserstoffperoxid, welches nachweislich die Expression spezifischer, für das Pflanzenwachstum essentieller Gene stimuliert [36, 41]. Die PAW-Erzeugung führt zudem zur Bildung geringer Konzentrationen salpetriger Säure und Salpetersäure, was zu einer moderaten pH-Wert-Absenkung führt, die sich positiv auf das Pflanzenwachstum auswirken kann [42, 43, 44].

Eine Studie von [45] untersuchte die Auswirkung von PAW auf das Wachstum getrockneter Erbsensamen. Die Ergebnisse zeigten eine deutliche Verbesserung verschiedener Wachstumsparameter bei den PAW-behandelten Proben in Bezug auf die Wurzelbildung (Länge und Trockenmasse) sowie den Chlorophyll - a - Gehalt und die Frischmasse im Vergleich zu den Kontrollproben. [45] vermuten, dass diese Effekte primär auf die Entfernung der epikutikulären Wachsschicht durch das PAW und eine damit verbundene verbesserte Benetzbarkeit der Samenoberfläche zurückzuführen sind. Darüber hinaus konnte eine erhöhte Akkumulation von Proteinen und Kohlenhydraten in den PAW-behandelten Pflanzen nachgewiesen werden.

Anwendung von PAW zur Steigerung der Resistenz gegenüber Stressoren

Die zunehmenden klimatischen Veränderungen haben weitreichende Auswirkungen auf die Pflanzenproduktion, einschließlich der Kultivierung von Arzneipflanzen. Laut Marktanalysen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) nutzt ein Großteil der Bevölkerung pflanzliche Arzneimittel. Im Jahr 2016 machten rein pflanzliche Arzneimittel 8 % aller verkauften Medikamente und 14 % aller rezeptfreien Medikamente im deutschen Markt aus [46, 47]. Die Gewinnung der Wirkstoffe für diese Phytopharmaka basiert überwiegend auf der Nutzung von Wildpopulationen [48, 49]. Die kommerzielle Kultivierung von Arzneipflanzen erweist sich jedoch häufig als ökonomisch wenig rentabel, bedingt durch die erforderlichen langen Versuchszeiträume und komplexen Inkulturnahmeprozesse [50]. Zudem unterliegt der Einsatz

von Pestiziden bei Arzneimitteln strengen rechtlichen Rahmenbedingungen, was die Produktion pharmazeutischer Rohstoffe weiter erschwert [51].

In diesem Kontext könnte die Anwendung von PAW einen Ansatz darstellen, um den Anbau von Arzneipflanzen zu erleichtern und wirtschaftlicher zu gestalten. Verschiedene Studien weisen darauf hin, dass PAW das Potenzial besitzt, die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen gegenüber diversen Stressoren und Pflanzenkrankheiten zu erhöhen [40, 52, 53]. Pflanzen verfügen über ein komplexes adaptives Abwehrsystem, welches als Reaktion auf biotische und abiotische Stressfaktoren aktiviert wird. PAW kann diese natürlichen Abwehrmechanismen stimulieren, indem es die Produktion reaktiver Spezies fördert, die als Signalmoleküle fungieren und die Biosynthese sekundärer Metaboliten induzieren. Diese sekundären Metaboliten spielen eine wichtige Rolle bei der Hormonsynthese und der Stresstoleranz der Pflanzen [54]. Des Weiteren ist bekannt, dass PAW auch die Effizienz von Extraktionsprozessen verbessert [55].

Integration der Plasmatechnologie in Vertical Farm-Systeme

Ein weiterer Ansatz besteht in der Einbindung von CAP bzw. PAW in Vertical Farming-Systeme. Vertical Indoor Farming (VIF) ist eine Methode der Pflanzenproduktion in kontrollierten Innenräumen, bei der Pflanzen in vertikalen Schichten kultiviert werden. Diese Systeme nutzen typischerweise mehrstöckige Regale mit integrierten Kunstlichtquellen. Die Pflanzen wachsen in geschlossenen hydroponischen oder aeroponischen Systemen, die eine effiziente Nährstoff- und Wasserversorgung sicherstellen.

Die aktuelle Forschung im Bereich VIF konzentriert sich primär auf die Optimierung der Kultivierungsmethoden, während potenzielle mikrobiologische Risiken bislang wenig untersucht wurden. Dennoch könnten solche Gefahren mittelfristig eine bedeutende Herausforderung darstellen. Ein kritischer Aspekt ist die zirkulierende Nährlösung, die in geschlossenen Kreislaufsystemen als Reservoir für phytopathogene Mikroorganismen dienen kann. Unter geeigneten Bedingungen können sich diese Erreger stark vermehren, was zu Ertragsverlusten und Qualitätseinbußen führen könnte. Darüber hinaus besteht das Risiko, dass humanpathogene Mikroorganismen, wie *Methicillin-resistenter Staphylococcus aureus* (MRSA), durch das Betriebspersonal in die Produktionsumgebung eingebracht werden. Diese können auf Pflanzenoberflächen persistieren und potenziell ein Gesundheitsrisiko für Konsumenten darstellen.

Ein vielversprechender Ansatz zur Bewältigung dieser mikrobiellen Herausforderungen könnte die Applikation von kaltem Plasma innerhalb der VIF sein. Zum einen könnte die CAP-Anwendung zur Aktivierung und somit zur Dekontamination der zirkulierenden Nährlösung beitragen. Zum anderen könnte CAP auch als Raumdesinfektionsmethode eingesetzt werden, um Pflanzenoberflächen und andere Substrate innerhalb der VIF-Umgebung zu dekontaminieren.

Im Vergleich zu konventionellen Oberflächendesinfektionsmethoden wie Natriumhypochlorit, thermischen Verfahren, alkoholbasierten Lösungen und UV-Bestrahlung weist CAP zahlreiche

Vorteile auf. Herkömmliche Verfahren sind häufig mit diversen Herausforderungen wie dem Verbleib toxischer Verbindungen, einem erhöhten Energiebedarf, der Schädigung der zu behandelnden Oberfläche sowie einer Einschränkung der Effizienz aufgrund von Schatteneffekten verbunden [56]. CAP hat nachweislich eine starke antimikrobielle Wirkung gegen ein breites Spektrum an Mikroorganismen, einschließlich Bakterien, Viren und Sporen [57]. Vor allem die oxidative Wirkung der ROS und RNS auf mikrobielle Strukturen wie Lipide, Proteine und Nukleinsäuren ist dabei von zentraler Bedeutung [57, 58]. Im Falle der Oberflächenentkeimung wirken vor allem die UV-Strahlung und reaktive Spezies. Ihre kombinierte Wirkung führt zur Inaktivierung von Keimen durch Degradation der Zellbestandteile sowie zu DNA-Schäden wie Mutationen, Strangbrüchen oder Strukturveränderungen, welche die mikrobielle Replikation hemmen [59, 60].

Studien zur Raumesinfektion mittels Plasmaquellen sind begrenzt. [61] untersuchte die sporozide Wirkung von CAP, welches aus Umgebungsluft erzeugt wurde. Plasmaaktivierte Raumluft wurde in eine Kammer gespült und sollte dort bakterielle Endosporen, welche auf verschiedenen Oberflächen getrocknet vorlagen, unter variablen Bedingungen inaktivieren. Es konnte eine Reduktion der Sporen um mehr als 4 log₁₀-Stufen festgestellt werden. Die Inaktivierungseffizienz nahm jedoch ab, wenn die Endosporen als Agglomerate oder in einer organischen Matrix vorlagen. Auch die Komplexität der jeweiligen Oberflächenmikrostruktur hatte Einfluss auf den Inaktivierungserfolg. Des Weiteren konnte nur eine signifikante Inaktivierung erreicht werden, sofern Wasserdampf in den Plasmastrom injiziert wurde.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Plasmatechnologie eröffnet zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten entlang der gesamten Wertschöpfungskette sowohl in der Landwirtschaft als auch im Gartenbau. Insbesondere die Nutzung von plasmaaktiviertem Wasser gewinnt in Bereichen wie der Nachernte, Pestizidentfernung, Saatgutbehandlung und Resistenzzüchtung zunehmend an wissenschaftlicher Relevanz. Die antimikrobielle Wirksamkeit gegen ein breites Spektrum an Mikroorganismen erweitert das Anwendungspotenzial, beispielsweise im Kontext des Vertical Farming zur Entkeimung von Nährlösungen oder als Methode zur Raumesinfektion in Produktionsumgebungen.

Die Kombination aus Plasmatechnologie und VIF-Systemen eröffnet neue Perspektiven für die Kultivierung hochwertiger Nutzpflanzen, insbesondere im Bereich der Arzneipflanzen unter kontrollierten Bedingungen. Bislang stellte die wirtschaftliche Rentabilität des Anbaus selbst hochpreisiger Arzneipflanzen in Vertical Farm-Anlagen aufgrund erheblicher Betriebskosten für Klimaregulierung, Bewässerung, Belichtung und Sensortechnik eine Herausforderung dar. Eine durch Plasmabehandlung induzierte Qualitätssteigerung, etwa durch die Erhöhung der Wirkstoffkonzentration mittels plasmagenerierter reaktiver Spezies, könnte potenziell die Wertschöpfung erhöhen und somit die wirtschaftliche Tragfähigkeit dieser Produktionssysteme verbessern.

Angesichts dieses vielversprechenden Potenzials plant die Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München (TUM) und

der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), die Forschungsaktivitäten in diesem Bereich zu intensivieren. Diese Kooperation zielt darauf ab, die Grundlagen für eine effiziente Integration der Plasmatechnologie in moderne Anbausysteme für Arzneipflanzen zu schaffen.

Acknowledgements

Das Forschungsprojekt AgroMissionHub wird in Zusammenarbeit zwischen der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, dem Bay. Landesamt für Landwirtschaft (LfL) und der Technischen Universität München (TUM) durchgeführt; wobei letztere als Projektträger fungiert.

Literatur

- [1] Laroussi, M.: Plasma Medicine: A Brief Introduction. *Plasma* 1 (2018), H. 1, S. 47-60.
<https://doi.org/10.3390/plasma1010005>
- [2] Weltmann, K-D.; Kolb, J. F.; Holub, M.; Uhrlandt, D.; Simek, M.; Ostrikov, K. K.; Hamaguchi, S.; Cvelbar, U.; Cernak, U.; Locke, B.; Fridman, A.; Favia, P.; Becker, K.: The future for plasma science and technology. *Plasma Processes and Polymers* 16 (2019), H. 1, 1800118. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800118>
- [3] Mongkolnavin, R.; Damrongsakkul, S.; Chin, O. H.; Subedi, D.; Wong, C. S.: Chapter 9 - Cost-Effective Plasma Experiments for Developing Countries. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4217-1_9. In: Rawat, R. (Hrsg.): *Plasma Science and Technology for Emerging Economies*. 1. Aufl., Springer, Singapore 2017, S. 475-525.
- [4] Ranganathan, J.; Waite, R.; Searchinger, T.; Hanson, C.: How to Sustainably Feed 10 Billion People by 2050 (2018), URL: <https://www.wri.org/insights/how-sustainably-feed-10-billion-people-2050-21-charts>, Zugriff am: 14.01.2025
- [5] Ohta, T.: Chapter 8 - Plasma in Agriculture. DOI: 10.1016/B978-0-12-801365-6.00008-1. In: Misra, N. N.; Schlüter, O.; Cullen, P. J. (Hrsg.): *Cold Plasma in Food and Agriculture: Fundamentals and Applications*. 1. Aufl., Academic Press, San Diego 2016, S. 205–221
- [6] Guo, D.; Liu, H.; Zhou, L.; Xie, J.; He, C.: Plasma-activated water production and its application in agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 101 (2021), S. 4891–4899. DOI: 10.1002/jsfa.11258
- [7] Zingales, V.; Taroncher, M.; Martino, P. A.; Ruiz, M-J.; Caloni, F.: Climate Change and Effects on Molds and Mycotoxins. *Toxins* 14, (2022) H. 7, 445.
<https://doi.org/10.3390/toxins14070445>
- [8] Dinklage, A.; Klinger, T.; Marx, G.; Schweikhard, L.: *Plasma Physics: Confinement, Transport and Collective Effects*. Heidelberg, Springer Science & Business Media 2005, ISBN: 3540808825
- [9] Cullen, P. J.; Lalor, J.; Scally, L.; Boehm, D.; Milosavljevic, V.; Bourke, P.; Keener, K.: Translation of plasma technology from the lab to the food industry, *Plasma Processes and Polymers* 15 (2018) H. 2, 1700085. <https://doi.org/10.1002/ppap.201700085>

- [10] Crookes, W.: On radiant matter spectroscopy: a new method of spectrum analysis. *Proceedings of the Royal Society* 35 (1983), S. 262-271. <https://doi.org/10.1098/rspl.1883.0045>
- [11] Geiß, R.: *Die Verwandlung der Stoffe*. Berlin, Springer Berlin Heidelberg 2017, ISBN: 978-3-662-54708-3
- [12] Dzur, B.: *Praktische Plasmaoberflächentechnik - Leitfaden für Studium und Anwendung*. Bad Saulgau, Leuze Verlag 2011, ISBN: 978-3-87480-263-5
- [13] Sakudo, A.; Yagyu, Y.; Onodera, T.: Disinfection and Sterilization Using Plasma Technology: Fundamentals and Future Perspectives for Biological Applications. *International Journal of Molecular Sciences* 20 (2019), H. 20, 5216. <https://doi.org/10.3390/ijms20205216>
- [14] Conrads, H.; Schmidt, M.: Plasma generation and plasma sources. *Plasma Sources Sci. Technol.* 9 (2000), H. 4, 441. DOI: 10.1088/0963-0252/9/4/301
- [15] Kegel, W. H.: *Plasmaphysik: Eine Einführung*. Heidelberg, Springer-Verlag, 2013, ISBN: 978-3-642-63721-6
- [16] Muranyi, P.; Wunderlich, J.; Heise, M.: Sterilization efficiency of a cascaded dielectric barrier discharge. *Journal of Applied Microbiology* 103 (2007), H. 5, S. 1535–1544. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03385.x>
- [17] Bernhardt, T.; Semmler, M. L.; Schäfer, M.; Bekeschus, S.; Emmert, S.; Boeckmann, L.: Plasma Medicine: Applications of Cold Atmospheric Pressure Plasma in Dermatology. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* 1 (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/3873928>
- [18] Chaitradeepa, G. M.; Hanumantharaju, K. N.; Soumya, G.; Chennappa G.; Lokesh, A. C.: Cold Plasma Technology and its Applications in Food Industry. *Biochem. Cell. Arch.* 23 (2023), H. 1. <https://doi.org/10.51470/bca.2023.23.S1.0000>
- [19] Thirumdas, R.; Kothakota, A.; Annapure, U.; Siliveru, K.; Blundell, R.; Gatt, R.; Valdramidis, V. P.: Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends in Food Science & Technology* 77 (2018), S. 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.007>
- [20] Zhou, R.; Zhou, R.; Wang, P.; Xian, Y.; Mai-Prochnow, A.; Lu, X.; Cullen, P. J.; Ostrikov, K.; Bazaka, K.: Plasma-activated water: generation, origin of reactive species and biological applications. *Journal of Physics D: Applied Physics* 53 (2020), 303001. DOI: 10.1088/1361-6463/ab81cf
- [21] Kaushik, N. K.; Ghimire, B.; Li, Y.; Adhikari, M.; Veerana, M.; Kaushik, N.; Jha, N.; Adhikari, B.; Lee, S-J.; Masur, K.; von Woedtke, T.; Weltmann, K. D.; Choi, E. H.: Biological and medical applications of plasma-activated media, water and solutions. *Biological Chemistry* 400 (2019), H. 1, S. 39–62. <https://doi.org/10.1515/hsz-2018-0226>
- [22] Rico, D.; Martín-Diana, A. B.; Barat, J. M.; Barry-Ryan, C.: Extending and measuring the quality of fresh-cut fruit and vegetables: a review. *Trends in Food Science & Technology* 18 (2007), H. 7, S. 373–386. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.03.011>
-

- [23] Naïtali, M.; Kamgang-Youbi, G.; Herry, J-M.; Bellon-Fontaine, M-N.; Brisset, J-L.: Combined Effects of Long-Living Chemical Species during Microbial Inactivation Using Atmospheric Plasma-Treated Water. *Applied and Environmental Microbiology* 76 (2010), H. 22, S. 7662–7664. <https://doi.org/10.1128/AEM.01615-10>
- [24] Ma, R.; Wang, G.; Tian, Y.; Wang, K.; Zhang, J.; Fang, J.: Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce. *Journal of Hazardous Materials* 300 (2015), S. 643–651. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.061>
- [25] Fernández, A.; Noriega, E.; Thompson, A.: Inactivation of Salmonella enterica serovar Typhimurium on fresh produce by cold atmospheric gas plasma technology. *Food Microbiology* 33 (2013), H. 1, S. 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.08.007>
- [26] Chen, C.; Liu, C.; Jiang, A.; Guan, Q.; Sun, X.; Liu, S.; Hao, K; Hu, W.: The Effects of Cold Plasma-Activated Water Treatment on the Microbial Growth and Antioxidant Properties of Fresh-Cut Pears. *Food Bioprocess Technol* 12 (2019), S. 1842–1851. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02331-w>
- [27] Joshi, H.; Kumar, R.; Meena, D.; Yadav, P. C.: Explosion of plasma technology in agriculture. *International Journal of Chemical Studies* 6 (2018), H. 6, S. 2531-2536. P-ISSN: 2349–8528
- [28] Gao, Y.; Francis, K.; Zhang, X.: Review on formation of cold plasma activated water (PAW) and the applications in food and agriculture. *Food Research International* 157 (2022), 111246. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111246>
- [29] Bourke, P.; Ziuzina, D.; Boehm, D.; Cullen, P. J.; Keener, K.: The Potential of Cold Plasma for Safe and Sustainable Food Production. *Trends in Biotechnology* 36 (2018), H. 6, S. 615–626. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.11.001>
- [30] Pankaj S. K.; Keener, K. M.: Cold plasma: background, applications and current trends. *Current Opinion in Food Science* 16 (2017), S. 49–52. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.07.008>
- [31] Sarangapani, C.; Scally, L.; Gulan, M.; Cullen, P. J.: Dissipation of Pesticide Residues on Grapes and Strawberries Using Plasma-Activated Water. *Food Bioprocess Technol* 13 (2020), S. 1728–1741. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02515-9>
- [32] Phan, K. T. K.; Phan, H. T.; Boonyawan, D.; Intipunya, P.; Brennan, C. S.; Regenstein J. M.; Phimolsiripol, Y.: Non-thermal plasma for elimination of pesticide residues in mango. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 48 (2018), S. 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.009>
- [33] Arcega, D. R.; Hou, C.-Y.; Hsu, S.-C.; Lin, C.-M.; Chang, W.-H.; Chen, H.-L.: Reduction of pesticide residues in *Chrysanthemum morifolium* by nonthermal plasma-activated water and impact on its quality. *Journal of Hazardous Materials* 434 (2022), 128610. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128610>
- [34] Zheng, Y.; Wu, S.; Dang, J.; Wang, S.; Liu, Z.; Fang, J.; Han, P.; Zhan, J.: Reduction of phoxim pesticide residues from grapes by atmospheric pressure non-thermal air
-

- plasma activated water. *Journal of Hazardous Materials* 377 (2019), S. 98-105.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.05.058>
- [35] Ali, M.; Cheng, J.-H.; Sun, D.-W.: Effect of plasma activated water and buffer solution on fungicide degradation from tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit. *Food Chemistry* 350 (2021), 129195. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129195>
- [36] Sivachandiran, L.; Khacef, A.: Enhanced seed germination and plant growth by atmospheric pressure cold air plasma: combined effect of seed and water treatment. *RSC Adv* 7 (2017), S. 1822–1832. DOI: 10.1039/C6RA24762H
- [37] Ghimire, B.; Pendyala, B.; Patras, A.; Baysal-Gurel, F.: Effect of Plasma-Activated Water (PAW) Generated Using Non-Thermal Atmospheric Plasma on Phytopathogenic Bacteria. *Plant Disease* 108 (2014), H. 12, S. 3446–3452.
<https://doi.org/10.1094/PDIS-05-24-0957-SC>
- [38] Guo, J.; Wang, J.; Xie, H.; Jiang, J.; Li, C.; Li, W.; Li, L.; Liu, X.; Lin, F.: Inactivation effects of plasma-activated water on *Fusarium graminearum*. *Food Control* 134 (2022), 108683. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108683>
- [39] Rashid, M.; Rashid, M. M.; Reza, M. A.; Talukder, M. R.: Combined Effects of Air Plasma Seed Treatment and Foliar Application of Plasma Activated Water on Enhanced Paddy Plant Growth and Yield. *Plasma Chem Plasma Process* 41 (2021), S. 1081–1099. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10179-2>
- [40] Gierczik, K.; Vukušić, T.; Kovács, L.; Székely, A.; Szalai, G.; Milošević, S.; Kocsy, G.; Kutas, K.; Galiba, G.: Plasma-activated water to improve the stress tolerance of barley. *Plasma Processes and Polymers* 17 (2020), H. 3, 1900123.
<https://doi.org/10.1002/ppap.201900123>
- [41] Song, I.; Jeon, H.; Priatama, R. A.; Gayathri, S.; Ko, K.; Lee, Y. K.: Effect of plasma-activated water on peanut seed germination and vegetative growth in a hydroponic system. *Plant Biotechnol Rep* 17 (2023), S. 573–583. <https://doi.org/10.1007/s11816-023-00847-4>
- [42] Shoemakerl C. A.; Carlson, W. H.: pH Affects Seed Germination of Eight Bedding Plant Species. *HortScience* 25 (1990) H. 7, S. 762–764.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.25.7.762>
- [43] Al-Sharify, Z. T.; Al-Sharify, A. T.; al-Obaidy, baker W.; al-Azawi, A. M.: Investigative Study on the Interaction and Applications of Plasma Activated Water(PAW). *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 870 (2020), 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/870/1/012042
- [44] Park, D. P.; Davis, K.; Gilani, S.; Alonzo, C-A.; Dobrynin, D.; Friedman, G.; Fridman, A.; Rabinovich, A.; Fridman, G.: Reactive nitrogen species produced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield. *Current Applied Physics* 13 (2013), H. 1, S. 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2012.12.019>
- [45] Rathore, V.; Tiwari, B. S.; Nema, S. K.: Treatment of Pea Seeds with Plasma Activated Water to Enhance Germination, Plant Growth, and Plant Composition. *Plasma Chem Plasma Process* 42 (2022), S. 109–129. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10211-5>
-

- [46] Guilbert, J. J.: The world health report 2002 – reducing risks, promoting healthy life. Education for health (Abingdon, England) 16 (2003) H. 2, S. 230. DOI: 10.1080/1357628031000116808
- [47] N. N.: Phytopharmaka und Homöopathika im Apothekenmarkt (2007), URL: <https://www.iqvia.com/media/iqvia/pdfs/cese/germany/publikationen/infografik/phytopharmaka-homoepathika-2017-infografik-iqvia.pdf?la=de-de&hash=83EE162C7BFADE6D7D7796FF14AA09D5517167D0>, Zugriff am: 17.01.2025.
- [48] Laird, S. A.: Medicinal plants in international trade: conservation and equity issues. In: UNESCO-EOLSS (Hrsg.): Ethnopharmacology, Bd. 2, 2003.
- [49] Schippmann, U. W. E.; Leaman, D.; Cunningham, A. B. A.: Medicinal and aromatic plants – Agricultural, commercial, ecological, legal, pharmacological and social aspects. Wageningen UR Frontis series, Vol. 17, Dordrecht: Springer 2006, DOI: 10.1007/1-4020-5449-1_6
- [50] Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (FNR): Arzneipflanzenproduktion, URL: <https://pflanzen.fnr.de/industriepflanzen/arzneipflanzen/arzneipflanzenproduktion>, Zugegriffen am 17.01.2025.
- [51] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Leitlinie für den integrierten Pflanzenschutz im Sektor Arznei- und Gewürzpflanzen, URL: <https://www.nap-pflanzenschutz.de/integrierter-pflanzenschutz/leitlinien-ips/leitlinie-fuer-den-integrierten-pflanzenschutz-im-sektor-arznei-und-gewuerzpflanzen>, Zugriff am 17.01.2025.
- [52] Zambon, Y.; Contaldo, N.; Laurita, R.; Várallyay, E.; Canel, A.; Gherardi, M.; Colombo V.; Bertaccini, A.: Plasma activated water triggers plant defence responses. Scientific Reports 10 (2020), 19211. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76247-3>
- [53] Aceto, D.; Rotondo, P. R.; Porfido, C.; Bottiglione, B.; Paciolla, C.; Terzano, R.; Minafra, A.; Ambrico, M.; Dilecce, G.; Leoni, B.; Angelini, R. M. De M.; Ambrico, P. F.: Assessing plasma activated water irrigation effects on tomato seedlings. Front.Phys. 12 (2024), 1399910. <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1399910>
- [54] Mittler, R.; Vanderauwera, S.; Gollery, M.; Breusegem, F. V.: Reactive oxygen gene network of plants. Trends in Plant Science 9 (2004), H. 10, S. 490–498. DOI: 10.1016/j.tplants.2004.08.009
- [55] Basak, S.; Annapure U. S.: Recent trends in the application of cold plasma for the modification of plant proteins - A review. Future Foods 5 (2022), 100119. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100119>
- [56] Guettari, M.; Afeni, E. A.: Coronavirus Disinfection Physical Methods. In Fighting the COVID-19 Pandemic. London, Intech Open 2021, ISBN: 978-1-83968-217-9. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94676>

- [57] Scholtz, V.; Vaňková, E.; Kašparová, P.; Premanath, R.; Karunasagar, I.; Julák, J.: Non-thermal Plasma Treatment of ESKAPE Pathogens: A Review. *Front. Microbiol.* 12 (2021), 737635. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.737635>
- [58] Moisan, M.; Barbeau, J.; Crevier, M-C.; Pelletier, J.; Philip, N.; Saoudi, B.: Plasma sterilization. Methods and mechanisms. *Pure and Applied Chemistry* 74 (2002), H. 3, S. 349-358. <https://doi.org/10.1351/pac200274030349>
- [59] Langowski, H. C.; Muranyi, P.; Wunderlich, J.: Plasmatechnologie - Neue Wege zur Entkeimung von Packstoffmaterialien. *Chemie Ingenieur Technik* 78 (2006), H. 11, S. 1697-1706. <https://doi.org/10.1002/cite.200600081>
- [60] Schlegel, H. G.; Eitinger, T.: *Allgemeine Mikrobiologie*. Stuttgart, Georg Thieme Verlag 2007, ISBN: 3134446081.
- [61] Kramer, B.; Hasse, D.; Guist, S.; Schmitt-John, T.; Muranyi, P.: Inactivation of bacterial endospores on surfaces by plasma processed air. *Journal of Applied Microbiology* 128 (2020), H. 4, S. 920–933. <https://doi.org/10.1111/jam.14528>.

Autorendaten

Prof. Dr. Heike Mempel ist Professorin für Technik im Gartenbau und Qualitätsmanagement und leitet das Applied Science Centre for Smart Indoor Farming an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.

Dr. Timo Stark ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Lebensmittelchemie und Molekulare Sensorik der TU München.

M.Eng. Philipp Aiglstorfer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt AgroMissionHUB in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Heike Mempel.

Bibliografische Angaben / Bibliographic Information

Wissenschaftliches Review / Scientific Review

Erfolgreiches Review am 26.02.2025

Empfohlene Zitierweise / Recommended Form of Citation

Aiglstorfer, Philipp; Stark, Timo; Mempel, Heike: Einsatz von kaltem Atmosphärendruckplasma im Pflanzenbau. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): *Jahrbuch Agrartechnik 2024*. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2025. S. 1-17

Zitierfähige URL / Citable URL

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202502071047-0>

Link zum Beitrag / Link to Article

<https://www.jahrbuch-agrartechnik.de/artikelansicht/einsatz-von-kaltem-atmospharendruckplasma-im-pflanzenbau.html>

Dieser Beitrag wird unter einer CC-BY-NC-ND 4.0 Lizenz veröffentlicht.