

Fraunhofer IOSB

*vis*IT

Technologien für Nachhaltigkeit

Lebensmittelproduktion, Recycling, resiliente Wassersysteme und Energieversorgung

www.iosb.fraunhofer.de

ISSN 1616-8240

Impressum

visIT erscheint etwa drei Mal pro Jahr und informiert über ausgewählte Forschungsthemen des Fraunhofer IOSB. Für die Bestellung von Einzelheften, ein kostenloses visIT-Abo sowie für Adressänderungen und Abbestellungen schicken Sie bitte eine E-Mail an publikationen @iosb.fraunhofer.de

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. habil.
Jürgen Beyerer

Redaktion
Dipl.-Phys. Ulrich Pontes
Lena Kaul, M.A.

Layout
Anja Wollfarth, M.A.

Druck
Stober Medien GmbH
Industriestraße 12,
76344 Eggenstein

Anschrift der Redaktion
Fraunhofer-Institut für
Optronik, Systemtechnik und
Bildauswertung IOSB
Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe
Telefon +49 721 6091-300
Fax +49 721 6091-413
presse@iosb.fraunhofer.de

© Fraunhofer IOSB
Karlsruhe 2024

Ein Institut der
Fraunhofer-Gesellschaft
zur Förderung der angewandten
Forschung e. V. München

25. Jahrgang
ISSN 1616-8240

Bildquellen
Titelbild: stock.adobe/Vladyslav, Oulaphone, Simonforstock, Tetiana; iStock/sl-f; indigo

Alle anderen Abbildungen
© Fraunhofer IOSB,
Ausnahmen sind gekennzeichnet

Themen

Editorial **3**
Jürgen Beyerer, Georg Maier, Robin Gruna

Hyperspektrale Identifikation von Mineralen **4**
Christoph Hilgers, Thomas Längle

Entfernung von Schadstoffen aus Bauabfällen **6**
Paul Bäcker, Felix Kronenwett

Herausforderungen in der Kunststoffsortierung **8**
Lukas Roming, Felix Kronenwett

ASKIVIT – Altholz in Sperrmüll: Zu schade für die Verbrennung **10**
Lukas Roming, Robin Gruna

PA-NIRSort – Mit KI und hyperspektraler Bildgebung Pyrrolizidinalkaloid-haltige Beikräuter sicher erkennen **12**
Georg Maier, Felix Kronenwett

Sensortechnologien gegen Lebensmittelverschwendung **14**
Anna Taphorn, Benedikt Fischer

MetallKiDD – Rückgewinnung von Technologiemetallen mithilfe KI-gestützter Sortierung **16**
Henning Schulte, Manuel Bickel

KI-iREPro – KI-basierte Bildauswertung für stockgenaues Weinreben-Monitoring und effizientere Erntelogistik **18**
Benedikt Fischer, Pascal Gauweiler

Nachhaltiges Management von Aquaponik-Systemen: Ein ganzheitlicher Ansatz **20**
Thomas Rauschenbach, Divas Karimanzira

Agent4Heat: Optimale Betriebsführung Cross-Sektoraler Energiesysteme – unter Beachtung der dynamischen Charakteristik von Wärmenetzen **22**
Stefan Klaiber, Jonas Pemsel

Editorial

Liebe Freunde des Fraunhofer IOSB,



Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer



Dr.-Ing. Georg Maier



Dr.-Ing. Robin Gruna

Bedürfnisse der Gegenwart so zu befriedigen, dass die Möglichkeiten zukünftiger Generationen nicht eingeschränkt werden – so definiert das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung den heute allgegenwärtigen Nachhaltigkeitsbegriff. Die Bedeutung nachhaltigen Handelns und Wirtschaftens ist in der Breite der Gesellschaft angekommen, jüngste Entwicklungen und Krisen heben die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen jedoch hervor. Die Klimakrise mit all ihren Konsequenzen, vermehrte Ressourcenknappheit und globale Konflikte sind nur wenige Beispiele, die dies untermauern.

Mit den 17 Nachhaltigkeitszielen der 2030-Agenda haben die Vereinten Nationen einen programmatischen Rahmen zur Verwirklichung einer weltweiten nachhaltigen Gesellschaft geschaffen. Technische Innovationen spielen dabei eine Schlüsselrolle: Sie helfen, Ressourcen effizienter zu nutzen, den Energiebedarf zu reduzieren, Kreislaufwirtschaften zu etablieren und umweltfreundliche Alternativen zu entwickeln. Das Fraunhofer IOSB forscht seit vielen Jahren an Technologien, die für die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele eine Schlüsselrolle spielen – in den Bereichen Lebensmittelproduktion und Landwirtschaft, Recycling und sichere Materialversorgung, resiliente Wassersysteme und Energieversorgung. In diesem Sinne widmet sich dieses Heft unserem Beitrag zu Technologien für Nachhaltigkeit.

In einem Gastbeitrag erläutert Christoph Hilgers die Potenziale des Einsatzes von Hyperspectral Imaging für den effizienten und ressourcenschonenden Bergbau. Paul Bäcker, Felix Kronenwett, Lukas Roming und Henning Schulte zeigen auf, wie Machine-Vision-Systeme unter Einsatz von KI-Verfahren aktuelle Herausforderungen beim Recycling von Bauschutt, Kunststoff, Elektrogeräten und Sperrmüll lösen helfen. Anna Taphorn, Pascal Gauweiler und Felix Kronenwett erläutern, wie sich diese Technologien für die Lebensmittelproduktion von morgen einsetzen lassen. Thomas Rauschenbach beschreibt die Entwicklung hierarchischer Kontrollstrukturen für effektive und nachhaltige Aquaponiksysteme. Stefan Klaiber widmet sich der Effizienzsteigerung eines Wärmenetzbetriebes.

Zur besseren Einordnung sind alle Beiträge mit den Logos der entsprechenden UN-Nachhaltigkeitsziele versehen.

»Technologien für Nachhaltigkeit« sind ein zukunftsweisendes Thema, das uns in den nächsten Jahren verstärkt begleiten wird.

Wir wünschen viel Freude und Anregungen bei der Lektüre unseres Heftes!

Fraunhofer IOSB, im März 2024



Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer



Dr.-Ing. Georg Maier



Dr.-Ing. Robin Gruna

Hyperspektrale Identifikation von Mineralen



Prof. Dr.
Christoph Hilgers

Institutsleiter
Institut für Angewandte Geowissenschaften KIT

christoph.hilgers@kit.edu



Prof. Dr.-Ing.
Thomas Längle

Abteilungsleiter
Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 212
thomas.laengle
@iosb.fraunhofer.de

Hintergrund

Die Identifikation von Mineralen in Gesteinen ist eine wichtige Grundlage für den Berg- und Tunnelbau sowie für die Erkundung von Lagerstätten und Rohstoffvorkommen (Exploration). Dies beinhaltet das Auffinden von Lagerstätten, die Bewertung der Rohstoffqualität oder die Analyse und Sortierung von Gesteinskörnung.

Auch in Zukunft wird die Rohstoffgewinnung aus Lagerstätten den wesentlichen Anteil des globalen Bedarfs decken müssen, da die globale Bevölkerung von derzeit 8 Mrd. Menschen bis 2100 auf ca. 11 Mrd. Menschen steigen, der globale Wohlstand zunehmen wird und Kreisläufe nicht vollständig geschlossen werden können [1]. Der Großteil der 17 UN-Nachhaltigkeitsziele mit ihren circa 140 evaluierbaren Einzelmaßnahmen (Agenda 2030), fast alle basierend auf Rohstoffen, werden wohl nicht erreicht. Bei rund einem Drittel der Zielvorgaben sind sogar Rückschritte zum Basisjahr 2015 zu verzeichnen [2]. Der Rohstoffbedarf an nichtmetallischen Mineralen wird von 2017 bis 2060 von 44 Mrd. Tonnen auf 86 Mrd. Tonnen und an Metallen von 9 Mrd. Tonnen auf 20 Mrd. Tonnen ansteigen [3], was mit erhöhten Eingriffen in den Naturraum einhergehen wird.

Einsatz neuer Technologien mittels hyperspektraler Bildgebung

Die Entwicklung und Nutzung neuer Technologien mittels hyperspektraler Bildgebung könnte den ökologischen Fußabdruck durch gezieltere Nutzung, geringeren Flächenverbrauch und geringeren Abraum reduzieren. Auch in Deutschland könnte die hyperspektrale Bildgebung bspw. bei der Bewertung von Rohstoffqualitäten, oder bei der Bohrkleinanalyse während einer Tiefbohrung für die diskutierten, saisonalen Wasserstoff- und dauerhaften CO_2-Speicher, oder den gewünschten Ausbau der Geothermie u.a. an Bedeutung gewinnen. Die hyperspektrale Identifikation von Mineralen beruht auf der Interaktion elektromagnetischer

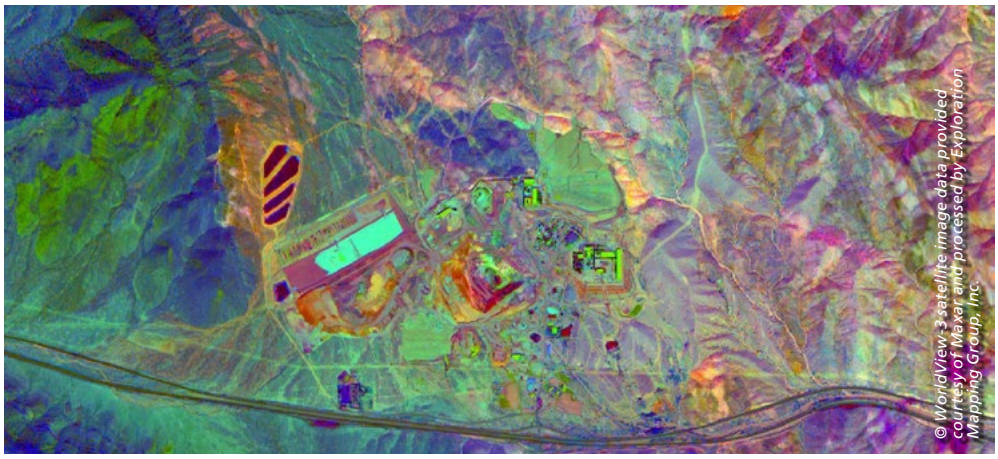


Abb. 1: Hyperspektrales Satellitenbild einer Lagerstätte.



Abb. 2: Die Gewinnung von Baustoffen in einer Lagerstätte mit unterschiedlichen Rohstoffqualitäten.

Wellen mit dem Gestein. Ein Vorteil der hyperspektralen Methode ist beispielsweise die Skalierung von der Satellitenbeobachtung bis in den mikroskopischen Bereich, die räumliche Zuordnung des gesuchten Minerals und die einfache, kontaktfreie Identifikation von Mineralen in Gesteinen ohne aufwendige Analyse.

Die Minerale können durch charakteristische Spektralmerkmale von Absorption und Peaks im sehr nahen Infrarot (VNIR – very near infrared, 400–1100 nm für Metalle wie Eisen-, Mangan-, Seltenerd-Erze und andere), im kurzwelligen Licht (SWIR – short wavelength infrared, 1100–2500 nm für Tonminerale, Karbonate) sowie im mittleren und thermischen Infrarot (TIR, 8000–14 000 nm für Silikate) identifiziert werden [4].

Studien zeigen die ersten erfolgreichen Aufsuchungen von Lagerstätten durch Auswertung satelliten- und drohnenbasierter, hyperspektraler Fernerkundung (z.B. [5], [6]) (siehe Abb. 1). Auch in einer Lagerstätte mit unterschiedlichen Rohstoffqualitäten (Abb. 2) oder in einem einzelnen Gesteinsstück kann die Verteilung der Minerale identifiziert und kartiert werden [7].

Die hyperspektrale Bildgebung (HSI – hyperspectral imaging) ist allerdings noch teuer, zeitaufwendig und die spektralen Kurven variieren u. a. mit dem Mineralanteil im Gestein und der räumlichen Auflösung [6, 7].

1 UN, World population prospects 2022 (2022), (medium fertility rate), https://population.un.org/wpp/Download/Standard/MostUsed/.

2 UN, Ziele für nachhaltige Entwicklung (2023), https://www.un.org/Depts/german/millennium/SDG%20Bericht%202023.pdf.

3 OECD, Global Material Resources Outlook to 2060 (2019), https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264307452-en.pdf?expires=1706467794&id=id&accname=ocid43023314&checksum=54E7675E4062CB7026EE00CAD9E44085.

4 Geoscience Australia, Spectral Geology (2023), https://www.ga.gov.au/scientific-topics/disciplines/spectral-geology

5 Booysen, R.; Jackisch, R.; Lorenz, S.; Zimmermann, R.; Kirsch, M.; Nex, P. A. M. & Gloaguen, R., Detection of REEs with lightweight UAV-based hyperspectral imaging. Scientific Reports 10(1) (2020). https://doi.org/10.1038/s41598-020-74422-0.

6 Wan, Yq.; Fan, Yh. & Jin, Ms., Application of hyperspectral remote sensing for supplementary investigation of polymetallic deposits in Huaniushan ore region, northwestern China. Scientific Reports 11, 440 (2021). https://doi.org/10.1038/s41598-020-79864-0.

7 Manß, Y.; Hilgers, C.; Buddenbaum, H. & Stanjek, H., Visualising mineralogical heterogeneities and texture in a mudstone concretion using hyperspectral imaging (2017). https://doi.org/10.1127/zdgg/2017/0118.

Entfernung von Schadstoffen aus Bauabfällen



Paul Bäcker M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 292
paul.baecker
@iosb.fraunhofer.de



Felix Kronenwett M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 411
felix.kronenwett
@iosb.fraunhofer.de

Reduzierung von Treibhausgasen durch Bauschutt-Recycling

Die Produktion neuer Baustoffe trägt global mit etwa elf Prozent zu den Treibhausgasemissionen bei. Angesichts der aktuellen Wohnungsknappheit und dem politischen Willen, neue Wohnungen zu bauen, ist es daher dringend notwendig, umweltschonendere Alternativen zu finden. Eine solche Alternative bietet das Recycling von Bauschutt, beispielsweise aus dem Abbruch von Gebäuden. Für qualitativ hochwertige Recyclingprodukte ist sortenreines Material erforderlich. Das Fraunhofer IOSB hat in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP bereits in der Vergangenheit innovative sensorgestützte Sortierlösungen entwickelt, um diese Anforderung zu erfüllen. So wurden im Projekt »BauCycle« Lösungen zum Ressourcenschutz, zur Wiederverwendung von Baumaterialien sowie zur hochwertigen Verwertung von Baustoffen erarbeitet.

Jedoch ergeben sich Herausforderungen durch Schadstoffe im Bauschutt, die sowohl gesundheits- als auch umweltschädlich sein können. Diese Schadstoffe müssen frühzeitig identifiziert, separiert und sachgerecht behandelt werden, um die gesetzlichen Grenzwerte einzuhalten. Zusätzlich sind bei der Untersuchung dieser Materialien spezielle Schutzmaßnahmen für die Forschenden unerlässlich.

Asbest-Erkennung in Gebäudeschutt: Das Projekt DIANA

Ein häufiges Problem auf Abbruchbaustellen stellt Asbest dar, das in älteren Gebäuden zur Isolierung und Stabilisierung verwendet wurde. Asbestfasern können, wenn sie eingeatmet werden, erhebliche Gesundheitsschäden verursachen. Nach einer Schätzung des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales enthalten ca. 20 Prozent des Baubestandes in Deutschland asbesthaltige Baustoffe, deren Einsatz 1991 für den Hoch- und 1994 für den Tiefbau untersagt wurde. Diese sind bei Instandhaltungs- und Abbrucharbeiten selektiv zu entfernen.

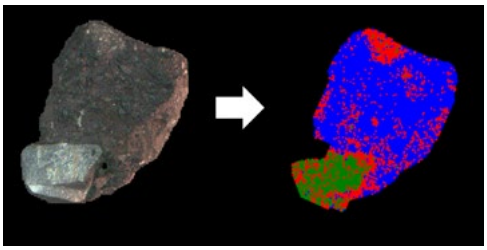


Abb. 1: Pixelweise Klassifizierung eines Stückes Straßenaufbruchs. Es werden sowohl die ungebundene Mineralik (grün) als auch die Teeranhaftungen (rot) korrekt erkannt.

Im Rahmen des Projekts »DIANA« entwickeln wir am Fraunhofer IOSB gemeinsam mit Projektpartnern des Fraunhofer IBP eine zerstörungsfreie und kostengünstige Methode zur Detektion von Asbest mittels bildgebender Sensoren. Diese Methode ermöglicht es, asbestbelastete Bauabfälle effektiv von konventionellem Bauschutt zu unterscheiden und somit Risiken zu minimieren. Für die Weiterverarbeitung muss gewährleistet sein, dass Bauschutt kein Asbest enthält.

Es werden Asbestmineralien sowie reale Asbestproben, gesammelt auf Baustellen, sensoriell untersucht. Hyperspektrale Sensoren ermöglichen es, Asbest mittels Verfahren des maschinellen Lernens effektiv zu detektieren (Abb. 2).



Abb. 2: Messaufbau zur Untersuchung von Bauschuttproben mittels hyperspektralen Kameras im Visible and Near-Infrared (VNIR) und Short-Wave Infrared (SWIR) Bereich.

Ausgehend von Laboruntersuchungen wird am Fraunhofer IOSB ein miniaturisierter Handsensor entwickelt, der eine kosten-günstige Alternative zu teuren High-End-Spektrometern darstellt und flexibel auf Abbruchbaustellen eingesetzt werden kann.

Darüber hinaus wird ein bildgebendes Verfahren entwickelt, das die spezifischen optischen Eigenschaften von Asbestfasern nutzt, um diese durch intelligente Datenauswertung mit hohem Durchsatz zu erkennen.

Schadstofferkennung im Straßenaufbruch

Ein weiteres Feld ist das Recycling von Straßenaufbruch, der bis in die 1980er Jahre oft Teer als Bindemittel enthielt. Dieser enthält giftige Kohlenwasserstoffverbindungen. Im Projekt »InnoTeer« wird am Fraunhofer IOSB ein Verfahren entwickelt, das mit einer Hyperspektralkamera im mittleren Infrarotbereich (2700 nm bis 5300 nm) teerhaltige Materialien identifiziert. Eine besondere Herausforderung ist dabei die Heterogenität des Straßenaufbruchs, der je nach Beschaffenheit unterschiedliche Beimischungen enthalten kann. Ein speziell trainiertes neuronales Netz ist in der Lage, trotz dieser Störeinflüsse zwischen den spektralen Verläufen von Teer, Bitumen und bindemittelfreier Mineralik zu unterscheiden. Durch die pixelweise Auswertung der Hyperspektraldaten kann eine Teerkontamination zuverlässig festgestellt werden (Abb. 1). Diese Methode erkennt in über 95 Prozent der Fälle Teer korrekt, sogar bei partiellen Anhaftungen. Die Integration dieser Technologie in Sortiersysteme soll zukünftig die Menge an recyclebarem, unbelastetem Straßenaufbruch erhöhen und somit Ressourcen schonen. Im Rahmen des Projektes wird zudem untersucht, ob die bei der Sortierung gewonnenen Daten auch in weiteren Prozessschritten genutzt werden können, z. B. bei der Dekontamination der teerhaltigen Anteile mittels eines neuartigen Pyrolyseverfahrens (Fraunhofer UMSICHT) oder der Gewinnung neuer Recyclingbaustoffe (Fraunhofer IBP).

Weitere Informationen zu InnoTeer finden Sie auf der Webseite www.iosb.fraunhofer.de/innoteer.

Fast Facts

1. Sensorgestürzte Sortierung von Bauschutt ermöglicht sortenreines Recycling.
2. Bildgebende Sensorik detektiert Asbest in Bauabfällen.
3. Teer-Detektion per Hyperspektralkamera eröffnet Weg zu höherer Recyclingquote von Straßenaufbruch.

Herausforderungen in der Kunststoffsortierung



Lukas Roming M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 317
lukas.roming
@iosb.fraunhofer.de



Felix Kronenwett M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 411
felix.kronenwett
@iosb.fraunhofer.de

In Deutschland werden jährlich im Schnitt zwölf Millionen Tonnen Kunststoff verbraucht. Dabei gehören die Kunststoffe Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) zu den weltweit wichtigsten Werkstoffen. Viele Alltagsprodukte und moderne Technologien wären ohne ihren Einsatz undenkbar. Von den jährlich anfallenden rund 6,3 Millionen Tonnen kunststoffhaltiger Abfälle werden 53 Prozent thermisch und 47 Prozent werkstofflich verwertet.

Sensorgestützte Sortieranlagen können einen wichtigen Beitrag leisten, um Recyclingquoten zu erhöhen. Dabei werden die Abfälle in sortenreine Stoffströme sortiert, wodurch eine weitere Aufbereitung möglich ist. Ein wesentlicher Bestandteil bildet die sensorgestützte Sortierung. Es werden hierzu hyperspektrale Sensoren eingesetzt, die im nahen oder mittleren Infrarot-Bereich Merkmale erfassen können. Damit lassen sich Kunststoffarten anhand der Molekülstruktur, d. h. ihres chemischen Aufbaus, unterscheiden. Dennoch bestehen Herausforderungen, wie die Detektion von Verbundverpackungen, Einsatz von Additiven (z. B. Weichmacher, Flammschutzmittel etc.) sowie die erschwerte Detektion schwarzer Kunststoffe. Die Abteilung Sichtprüfsysteme des Fraunhofer IOSB ist an zwei Projekten beteiligt, die mit neuen Ansätzen das Ziel verfolgen, Recycling kunststoffhaltiger Abfälle zu optimieren. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Waste4Future

Im Fraunhofer-Leitprojekt »Waste4Future« werden neue Recycling-Möglichkeiten geschaffen, um aus Kunststoffabfällen hochwertige Ausgangsstoffe zu gewinnen. Hierfür wird ein ganzheitliches, entropiebasiertes Bewertungsmodell entwickelt, das die bisher prozessgeführte Recyclingkette zu einer stoffgeführten Kette reorganisiert: Das Bewertungsmodell findet nun die optimale Verwertungskette auf Basis der Materialstromzusammensetzung und unter Einbeziehung der benötigten Energie der einzelnen Recycling-Pfade. Hierfür wird ein Hybridsensor zur Materialidentifikation und -charakterisierung entwickelt. Existierende Lösungen wie die konventionelle RGB-Kamera oder die Hyperspektralkamera werden dabei um die Sensoriken Radar, aktive Thermographie und Laserlichtschnitt-Sensor erweitert. Zur Zusammenführung der Sensordaten werden neuartige Fusionsverfahren entwickelt, die auf aktuellen Methoden des maschinellen Lernens basieren. Die für das Verfahren gesetzten Ziele beinhalten Wirschaftlichkeit, hohe Reinheitsgrade für die Kunststoffsortierung und eine robuste Materialcharakterisierung einschließlich schwarzer Kunststoffe und bisher nicht erfasster Kriterien, wie der Alterungszustand von Kunststoffen.

Die Auswertung hyperspektraler Aufnahmen von thermisch gealterten sowie von mehrfach extrudierten Kunststoffproben ermöglichte es, ein Regressionsmodell zur Schätzung des Alterungszustandes von Kunststoffabfällen zu entwickeln. Damit lässt sich auf die Qualität des daraus zu gewinnenden Rezyklates schließen [1]. Zusätzlich wird am Fraunhofer IOSB ein Demonstrator entwickelt, der mit den genannten fünf Sensorprinzipien ausgestattet ist. Dieser dient zur erweiterten Charakterisierung und Sortierung von Kunststoffströmen auf Basis KI-gestützter Datenauswertung.

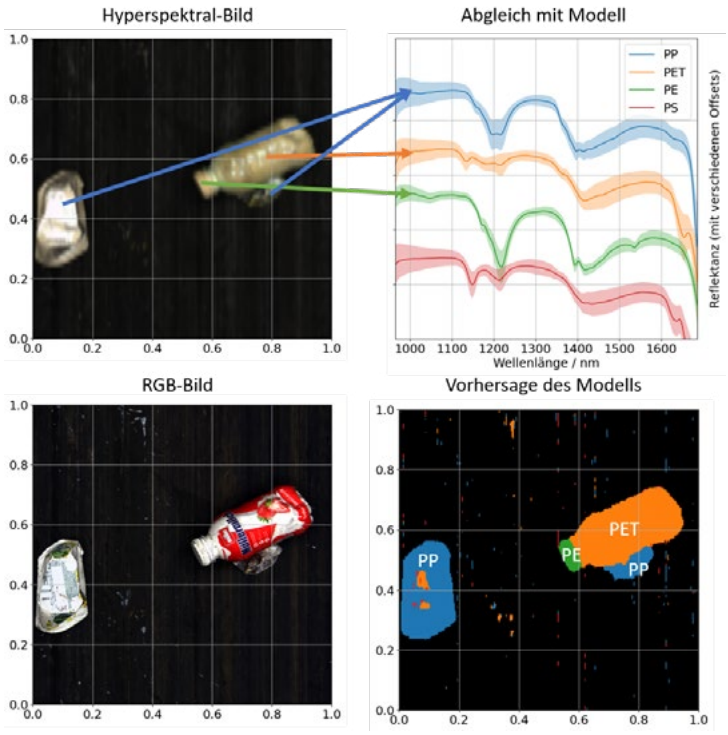


Abb. 1: Links oben: Hyperspektralaufnahme von Leichtverpackungsabfällen, dargestellt in Falschfarben. Rechts oben: Mittelwertspektren aus den Hyperspektral-Bildern verschiedener Kunststoffe. Links unten: RGB-Bild der Proben. Rechts unten: Klassifikationsergebnis des KI-Modells.

K3I-Cycling

Um den Lebenszyklus von Verpackungen zu verlängern, werden im Projekt »K3I-Cycling« die Stellschrauben entlang der gesamten Wertschöpfungskette betrachtet. Dabei wird der Weg einer Verpackung vom Verbraucher, über den Sammler, die Sortierung, die chemische Aufbereitung bis hin zum Rezyklat und neuen Produkt untersucht. Zu diesem Zweck entwickelt »K3I-Cycling« mittels eines Artificial Neural Twin eine neue, offene und standardisierbare KI-Schnittstelle. Diese soll sektorübergreifend relevante Informationen im Sinne eines Leichtverpackungs-Produktpasses[1] sammeln. Dadurch wird erstmals die digitale Vernetzung aller Stakeholder entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht.

Eine kritische Stelle der Wertschöpfungskette, an der großes Verbesserungspotenzial besteht, liegt in der Sortierung. Deshalb entwickelt das Fraunhofer IOSB KI-Verfahren, die eine bessere Sortierqualität erzielen. Für das Einlernen einer KI ist ein umfangreicher Datensatz unabdingbar. Dieser konnte bei dem Entsorger Lobbe Holding GmbH & Co KG in der Sortieranlage in Iserlohn aufgenommen werden. Insgesamt wurden zwei Kameras installiert: eine konventionelle Kamera im visuellen Bereich sowie eine Hyperspektralkamera im Nahinfrarot-Bereich. Im Gegensatz zu einer RGB-Kamera, die nur drei Kanäle besitzt, liefert die verwendete Hyperspektralkamera mehrere hundert Kanäle im Bereich von 900 bis 1700 Nanometer. Eine Aufnahme dieser Kamera ist in Abb. 1 links oben in Falschfarben zu sehen. Jeder Pixel enthält ein materialspezifisches Spektrum, das mithilfe von KI-Verfahren klassifiziert werden kann. Die aus den Aufnahmen ermittelten Spektren sind rechts oben für die Kunststoffe PE, PS, PET und PP dargestellt. Trotz der Varianzen innerhalb einer Stoffklasse (dargestellt als Schlauch um jedes Spektrum) lässt sich ein klarer Trend mit charakteristischen Hoch- und Tiefpunkten im Spektrum erkennen. Verschiedene KI-Modelle wurden dazu trainiert, auf Basis eines gemessenen Spektrums das Material des Abfallprodukts zu bestimmen. Das Ergebnis eines linearen Regressionsmodells ist rechts unten in Abb.1 visualisiert. Die vier dargestellten Objekte wurden richtig klassifiziert, wobei sogar der Deckel der Getränkeflasche korrekterweise als PE (Polyethylen) erkannt wurde.

1 Der digitale Produktpass ist ein Datensatz zur Beschreibung der Komponenten, Materialien und chemischen Substanzen für ein Produkt.

2 F. Kronenwett et al., »Regression-based Age Prediction of Plastic Waste using Hyperspectral Imaging«, in OCM 2023-Optical Characterization of Materials: Conference Proceedings, KIT Scientific Publishing, 2023, S. 51.

ASKIVIT

Altholz in Sperrmüll: Zu schade für die Verbrennung



Lukas Roming M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 317
lukas.roming
@iosb.fraunhofer.de



Dr.-Ing. Robin Gruna

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 263
robin.gruna
@iosb.fraunhofer.de

Die verstärkte Nutzung von Holz als Baumaterial ist ein wichtiger Hebel, um nationale und internationale Ziele im Kampf gegen den Klimawandel zu erreichen und den CO2-Fußabdruck zu minimieren [1]. Durch den steigenden Bedarf gewinnt Altholz als Ersatz für Frischholz immer mehr an Bedeutung. Verwertbares Altholz ist mittlerweile selbst in Deutschland zu einer knappen Ressource geworden, da es gemäß nationaler Gesetzgebung nur dann als Rohstoff wiederverwendet werden darf, wenn es frei von Holzschutzmitteln und anderen Verunreinigungen wie PVC ist [2]. Obwohl die Hälfte des Sperrmülls aus Holz besteht, wird aktuell nur etwa die Hälfte dieses Altholzes als Recyclingmaterial verwendet [3]. Gründe dafür sind eine aufwendige Trennung von Verunreinigungen und die Vielfalt der Materialien im Sperrmüll. Das Projekt »ASKIVIT – Altholzgewinnung aus Sperrmüll durch künstliche Intelligenz und Bildverarbeitung im VIS-, IR- und Terahertz-Bereich« zielt darauf ab, eine Lösung für die automatisierte Sortierung von Sperrmüll zu entwickeln. Auf der Grundlage eines multisensorischen Ansatzes in Verbindung mit künstlicher Intelligenz sollen Holz, holzbasierte Materialien und Nichteisenmetalle extrahiert werden.

Demonstrator zur Datenaufnahme mit vier verschiedenen Sensoren

Abbildung 1 zeigt einen Demonstrator, der am Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI aufgebaut wurde. Der Aufbau beinhaltet eine konventionelle RGB-, eine Hyperspektral- und eine Thermographiekamera (betrieben durch das Fraunhofer WKI) sowie einen Terahertz-Sensor (entwickelt und betrieben durch

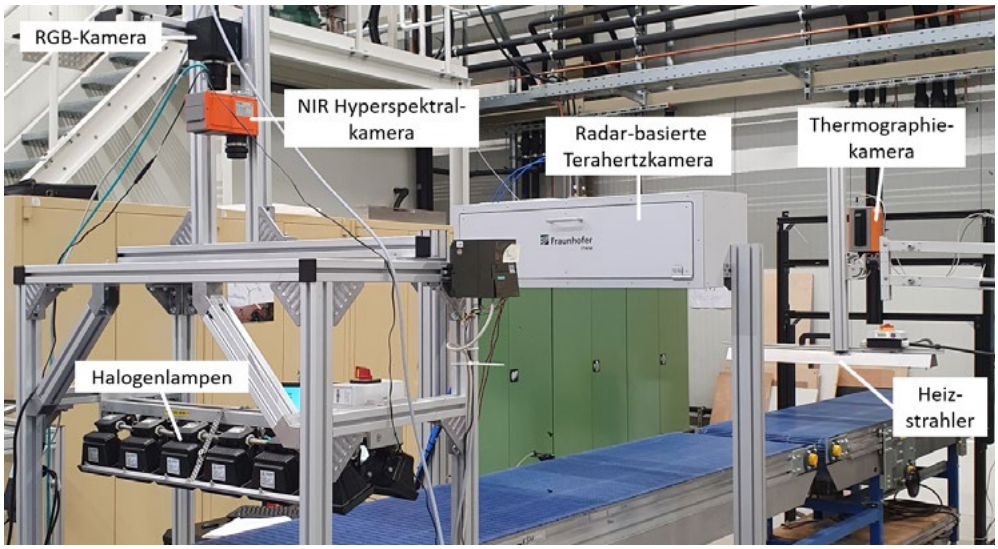


Abb. 1: Messaufbau am Fraunhofer WKI. Die RGB- und NIR-Hyperspektralkamera sind mit Halogenlampen als Beleuchtung ausgestattet. Analog dazu befindet sich vor der Thermographiekamera ein Heizstrahler zur Erwärmung der Proben.

das Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM). Damit konnten Sensordaten verschiedenster Proben aus dem Sperrmüll aufgenommen werden. Anschließend folgte die Nachbearbeitung der Daten. Insbesondere ist für das Terahertz-System eine Rekonstruktion von 3D-Volumen-Daten auf Basis der gemessenen Signale erforderlich. Während die RGB- und NIR-Hyperspektralkamera oberflächlich messen, ist der Terahertz-Sensor in der Lage, durch das Material hindurchzuschauen. Das ist aufgrund der größeren Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung möglich. Aus selbigem Grund kann auch die Thermographiekamera teilweise durch dünne Schichten, wie Lacke, Folien oder Papier, hindurchblicken [4].

Analyse der Messergebnisse

Ein Auszug aus den Aufnahmen ist in Abbildung 2 zu sehen. In der linken Spalte befinden sich alte, lackierte Fensterkanteln. Das zugehörige RGB-Bild zeigt die Farbe und Oberfläche des Lackes, lässt jedoch die Holzstruktur nicht erkennen. Das gleiche gilt für das Nahinfrarot-(NIR-)Bild, das weniger von der Farbe des Lackes beeinflusst wird. Die Thermographie-Aufnahme zeigt die Holztextur mit ihrem charakteristischen Jahresringmuster unter dem Lack, sodass diese Probe mithilfe von Thermographie eindeutig als Holz identifiziert werden kann.

Spalte 2 zeigt ein häufiges Problem bei der Sortierung von schwarzen Polymeren. Diese können mit herkömmlichen Sensoren aufgrund der hohen Absorption von schwarzen Pigmenten im NIR- oder sichtbaren Wellenlängenbereich nicht detektiert werden. Die roten Gummimatten sind im RGB-Bild deutlich sichtbar, während die schwarzen auf dem Hintergrund des schwarzen Probenhalters kaum erkennbar sind. Das gilt auch für das NIR-Bild. In der Thermographie hingegen haben sowohl roter als auch schwarzer Gummi ein deutlich besseres Signal und können daher leicht vom Hintergrund unterschieden werden.

Spalten 3 und 4 zeigen Schaumstoff bzw. Metall auf Holzhackschnitzel. Schaumstoff und Metall lassen sich in nahezu allen Bildern von Holzhackschnitzel unterscheiden. In der Thermographie erscheint Metall dunkler als Holz, da es die Strahlung vom Heizstrahler weniger absorbiert und eine höhere Wärmekapazität sowie einen geringeren Emissionsgrad als Holz aufweist. Im Gegensatz dazu erscheint Schaumstoff aufgrund seiner geringen Wärmekapazität sehr hell.

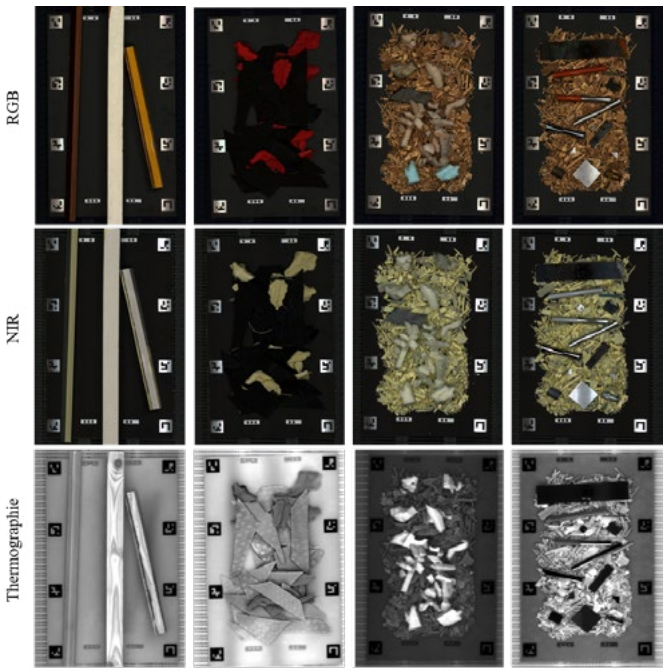


Abb. 2: Aufnahmen der Sensoren verschiedener Sperrmüllproben. In einer Zeile sind die Aufnahmen eines Sensors. In den Spalten befinden sich beginnend von links: Fensterkantel, Kunststoffmatten, Schaumstoff auf Holzhackschnitzel und Metall auf Holzhackschnitzel.

Es lässt sich festhalten, dass die verschiedenen Sensoren sich in ihrer Fähigkeit, spezifische Merkmale von Sperrmüll zu erfassen, ergänzen. Durch Kombination der Sensoren kann eine präzisere Identifizierung und Sortierung von Altholz in Sperrmüll erzielt werden. Dies trägt zur Steigerung der Wiederverwertung von Altholz bei und reduziert den Anteil, der in die Verbrennung gelangt und die damit einhergehenden CO_2-Emissionen [4].

1 A. Purkus et al. »Evaluation der Charta für Holz 2.0: Methodische Grundlagen und Evaluationskonzept«, No. 68, Thünen Report, 2019.

2 G. Ludwig, E. Gawel und N. Pannicke-Prochnow. »Altholz in der Kaskadennutzung – eine Bestandsaufnahme für Deutschland«, Wasser, Energie und Umwelt: Aktuelle Beiträge aus der Zeitschrift Wasser und Abfall II, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.

3 B. Bilitewski, J. Wagner und J. Reichenbach, »Bewährte Verfahren zur kommunalen Abfallbewirtschaftung. Informationssammlung über Ansätze zur nachhaltigen Gestaltung der kommunalen Abfallbewirtschaftung und dafür geeignete Technologien und Ausrüstungen«, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2018.

4 L. Roming et al., »Increasing the reuse of wood in bulky waste using artificial intelligence and imaging in the VIS, IR, and terahertz ranges«, OCM 2023 – Optical Characterization of Materials: Conference Proceedings, 2023.

PA-NIRSort

Mit KI und hyperspektraler Bildgebung Pyrrolizidinalkaloid-haltige Beikräuter sicher erkennen



Felix Kronenwett M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 411
felix.kronenwett
@iosb.fraunhofer.de



Dr.-Ing. Georg Maier

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 649
georg.maier
@iosb.fraunhofer.de

Hintergrund

Pyrrolizidinalkaloide (PA) sind sekundäre Pflanzenstoffe und dienen in erster Linie der Pflanze zum Schutz gegen Fraßfeinde. Wenn sich in der Ernte von Nutzpflanzen PA-haltige Beikräuter befinden, können PAs als Verunreinigung in Lebensmittel (Salate, Kräuter, Tees) oder pflanzliche Arzneimittel gelangen. Aufgrund ihrer lebertoxischen und genotoxischen Wirkungsweise stellen sie eine potenzielle Gesundheitsgefahr dar. PA-Pflanzen sind besonders im Arznei- und Gewürzpflanzenanbau ein Problem, denn schon wenige Pflanzen pro Hektar genügen, um die Ernte für den Handel unbrauchbar zu machen. Eine Bekämpfung bzw. Reduktion der PA-Beikräuter bereits auf dem Feld ist zumeist nur mechanisch und mit sehr hohem Personalaufwand möglich. Darüber hinaus ist importierte, getrocknete Ware oftmals höher als zulässig mit PAs belastet.

Entwicklung eines sensorgestützten Sortiersystems

Im Verbundprojekt »Detektion und Entfernung von Pyrrolizidinalkaloid-haltigen Unkräutern aus Kulturpflanzen nach der Ernte – PA-NIRSort« wurde am Fraunhofer IOSB in Kooperation mit dem Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz (Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen Julius Kühn-Institut (JKI)) ein industrietauglicher sensorgestützter Sortieransatz entwickelt, der potenziell PA-belastete Kulturpflanzenchargen aufreinigen kann [1] (siehe Abb. 1). Hierfür wurden spektrale Eigenschaften unterschiedlicher Pflanzen, insbesondere von PA-Bildnern, untersucht sowie Methoden zur echtzeitfähigen, robusten Unterscheidung dieser Pflanzen entwickelt. Sensorisch lag der Fokus auf hyperspektraler Bildgebung (HSI) im kurzwelligen Infrarot. Aufgrund des geringen Gewichts und hohen Luftwiderstands des getrockneten Materials lag eine besondere Herausforderung in der Materialzuführung und dem -transport. Durch die Nutzung von Luftkammern über einem Förderband konnte diese Problematik entschärft werden.



Abb. 1: PA-belastete Pflanzenteile werden mittels pneumatischer Schnellschaltventile ausgeschleust.

KI-basierte Pflanzenerkennung unter Echtzeitbedingungen

Für die Datenauswertung wurden Ansätze des maschinellen Lernens verfolgt, darunter aktuelle Verfahren des Deep Learning (siehe Abb. 2). Diese wurden für den echtzeitfähigen Einsatz optimiert. Mittels Bildverarbeitung identifizierte Objektregionen werden durch im Projekt entwickelte tiefe neuronale Netze spektral ausgewertet. Jedem erfassten Objekt wird dabei eine Pflanzenart zugeordnet. Je nach Konfi-

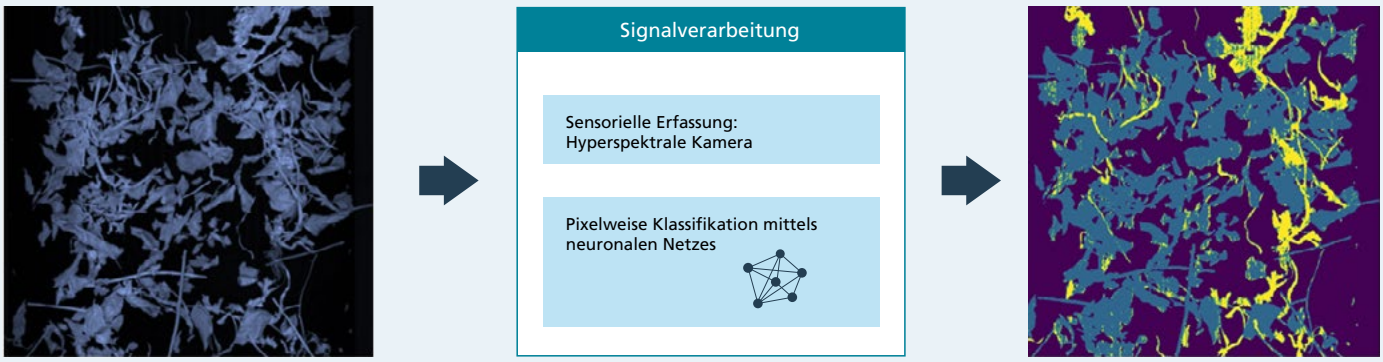


Abb. 2: PA-belastete Pflanzenpartikel (gelb) werden mittels KI-basierter hyperspektraler Bildverarbeitung detektiert.

guration des Sortiersystems wird entschieden, ob ein Partikel ausgeschleust werden soll. Es konnte gezeigt werden, dass mittels HSI im kurzwelligen Infrarot in Kombination mit Verfahren des Deep Learning die Unterscheidung der untersuchten Pflanzenarten möglich ist. Für die betrachteten Kulturen wurden für unter Laborbedingungen gewonnene Daten Detektionsraten von nahezu 100 Prozent erzielt [2, 3]. Diese Art von Sensorik eignet sich für den Einsatz in der sensorgestützten Sortierung. Somit konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, eine Sortierlösung zur Abtrennung von PA-haltigen Pflanzenbestandteilen aus Kulturpflanzenchargen unter Verwendung dieser Technologie zu entwickeln.

Aufreinigung von kontaminiertem Material

Die KI-basierte Auswertung wurde in ein prototypisches Sortiersystem integriert. Es wurden Sortierversuche für verschiedene Nutzpflanzen mit unterschiedlichen Anteilen an PA-Kontamination durchgeführt. Für die so entstandenen Sortierfraktionen wurde im Labor der PA-Gehalt ermittelt, um den Sortiererfolg zu bewerten. Die in den Sortierversuchen betrachteten Szenarien mit einem hohen Kontaminationsanteil von fünf Prozent bzw. zehn Prozent PA-Bildnern führten zu einer durchschnittlichen Reduktion der PA-Belastung der aufgereinigten Fraktion um ca. 70 Prozent. Dies deutet darauf hin, dass für eine grenzwertkonforme Aufreinigung mehrere Sortierdurchläufe notwendig sind. Unter der Annahme gleichbleibender Trennschärfe würde so bereits durch drei Sortierdurchläufe eine Reduktion der PA-Belastung von über 99 Prozent erreicht werden.

Fast Facts

1. Hyperspektrale Bildgebung liefert informationstragende Merkmale über Pflanzen.
2. KI-basierte, echtzeitfähige Datenauswertung ermöglicht die Detektion PA-haltiger Beikräuter.
3. Sensorgestützte Sortierung führt zu Reduktion der PA-Belastung.

Projektträger

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

1 N. Tron et al., »NIRS basierte Detektion und Entfernung Pyrrolizidinalkaloid-haltiger Unkräuter aus Kulturpflanzen nach der Ernte-PA-NIRSort«, in Journal of Cultivated Plants/Journal für Kulturpflanzen, 72.4, 2020.

2 J. Krause et al., »Detection of pyrrolizidine alkaloid containing herbs using hyperspectral imaging in the short-wave infrared«, OCM 2021 – Optical Characterization of Materials conference proceedings, 2021.

3 F. Kronenwett et al., »KI und Qualität-Detektion und Entfernung Pyrrolizidinalkaloid-haltiger Beikräuter im Erntegut mittels sensorgestützter Sortierung«, Julius-Kühn-Archiv 476, 2023.

Das Verbundprojekt »Detektion und Entfernung von Pyrrolizidinalkaloid-haltigen Unkräutern aus Kulturpflanzen nach der Ernte – PA-NIRSort« wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (FKZ 220132165) gefördert.

Sensortechnologien gegen Lebensmittelverschwendung



Anna Taphorn M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 285
anna.taphorn
@iosb.fraunhofer.de



Benedikt Fischer M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 591
benedikt.fischer
@iosb.fraunhofer.de

Hintergrund

Im Handel müssen Frische und Sicherheit von Lebensmitteln kontinuierlich sichergestellt werden. Insbesondere bei Obst und Gemüse ist die Haltbarkeit kurz, variabel und von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Wenn ein bevorstehender Verderb nicht rechtzeitig erkannt wird, landen frische Lebensmittel meist in der Tonne und tragen zum globalen Problem der Lebensmittelverschwendung bei. Allein in der EU werden jährlich ca. 58 Mio. Tonnen aller erzeugten Lebensmittel weggeworfen. Das entspricht einem Wert von etwa 132 Mrd. Euro.

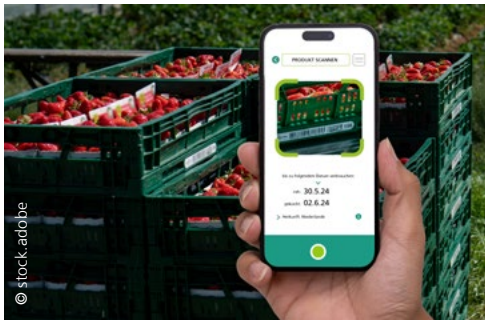


Abb. 1: Smarter Lebensmitteltransportbehälter für Obst und Gemüse.

Der Handel kann dem durch eine vorausschauende Steuerung des Verkaufszeitpunkts und der Preisgestaltung entgegenwirken. Wenn minderwertige Ware frühzeitig aussortiert wird, verlängert sich zudem die Haltbarkeit der verbleibenden Produkte. Stetige Qualitätskontrollen entlang der Lieferkette sind somit unerlässlich, um Anzeichen für Verderb frühzeitig zu erkennen. Bei einem Großteil der durchgeführten Kontrollen werden destruktive Methoden eingesetzt, bei denen Produkte z. B. durch Saftentnahme oder durch Messgeräte beschädigt werden. Diese sind kostenintensiv, zeitaufwendig und führen zu weiteren Lebensmittelverlusten. Daher gewinnen nicht-destruktive Ansätze der Qualitätskontrolle mit Nahinfrarot-Technologien immer mehr an Bedeutung.

Nahinfrarot-Bildgebung (NIR) nutzt die Reflexions- und Absorptionseigenschaften von Objekten im nahinfraroten Lichtspektrum. Bei Obst und Gemüse ermöglicht diese Technik die Erkennung von Merkmalen wie Feuchtigkeitsgehalt, Zuckergehalt oder innere Beschädigungen. Durch die spektrale Analyse können Informationen über Reife, Qualität und Frische gewonnen werden. So wird mithilfe von NIR-Bildgebung eine schnelle Bewertung von Lebensmittelprodukten ermöglicht, ohne diese zu beschädigen.

Ein Messplatz im Großhandel

In Zusammenarbeit mit einem Großhändler wurde ein Prototyp eines multisensorischen Scanners zur Qualitätsbewertung von frischen Lebensmitteln im Wareneingang entwickelt [1] (Abbildung 2). Ziel des Scanners ist die schnelle, zerstörungsfreie Erhebung verschiedener Qualitätsparameter von Obst und Gemüse, damit der Handel effizienter agieren und Frischwarenverkäufe besser planen kann.

Der Prototyp beinhaltet u. a. eine multispektrale NIR-Flächenkamera, um eingehende Waren kistenweise zu erfassen. Daneben kommen auch andere Sensoren wie Radar-Antennen



Abb. 2: Das multisensorische Messsystem erfasst Obst und Gemüse kistenweise und zeigt anschließend eine KI-basierte Auswertung an.

zum Einsatz. Durch die konstanten Bedingungen bei der Erfassung werden die Daten standardisiert und vergleichbar. Die digitalisierten Parameter ergeben somit ein Gesamtbild, durch das sich umfassende Analysen und Prognosen ableiten lassen.

Durch die Erfassung von Echtwelt-Daten im Großhandel-Betrieb konnten maschinelle Lernverfahren trainiert werden und erlauben so eine hohe Flexibilität der integrierten Sensorauswertung.

Datenfusion im Projekt »FriDa – Frische Daten«

Im Rahmen des Projekts »FriDa – Frische Daten« wurde mit Beteiligung des Fraunhofer IOSB ein hyperspektraler Bilddatensatz von frischen Lebensmitteln aufgenommen. Die Auswertung der Daten hat gezeigt, dass es möglich ist, den aktuellen Frischezustand der Lebensmittel mithilfe von Hyperspektralkameras automatisiert und zerstörungsfrei zu bestimmen. Außerdem ist es möglich, Prognosen über die verbleibende Haltbarkeit der Lebensmittel zu treffen. Dafür wurden in dem Projekt umfassende Lagerversuche bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen durchgeführt und Prognosemodelle für die Haltbarkeit entwickelt.

In der Praxis sind die Produkte oft unterschiedlichen Umgebungsbedingungen entlang der Lieferkette ausgesetzt, ein Transport unter Idealbedingungen ist nicht garantiert. Um diese Schwankungen zu berücksichtigen, haben die Projektbeteiligten einzelne Lebensmitteltransportbehälter mit integrierten Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren ausgestattet (Abbildung 1). Mithilfe der Temperatur- und Feuchtigkeitsdaten können die Haltbarkeitsprognosen in Echtzeit angepasst werden. Diese Technologien können den Informationsfluss entlang der Lebensmittellieferkette verbessern und ermöglichen es allen Akteuren, bessere, datenbasierte Entscheidungen zu treffen, um so Lebensmittelverluste zu vermeiden.

Fast Facts

1. Effizientere Planung im Handel reduziert Verschwendung.
2. NIR ermöglicht zerstörungsfreie Analyse von Lebensmitteln.
3. Sensordatenfusion entlang der Lieferkette verbessert Haltbarkeitsprognose.

Projektträger

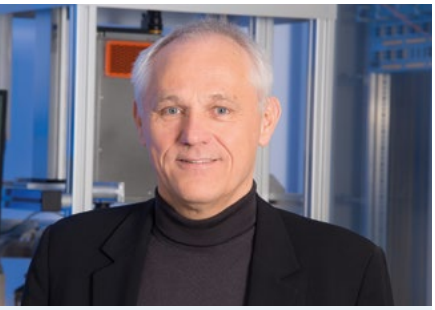
Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

1 Ein Projekt von Fraunhofer IOSB, IZFP, IVV, CCIT und FOOD sowie Industrie-Partnern.

»FriDa – Frische Daten« ist ein Projekt mit Beteiligung von Fraunhofer IOSB, tsenso GmbH, Euro Pool System Int. (Deutschland) GmbH, Institut für angewandte Systemtechnik Bremen GmbH und Universität Bonn. Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

MetallKiDD

Rückgewinnung von Technologiemetallen mithilfe KI-gestützter Sortierung



Dipl.-Wirt.-Ing.
Henning Schulte

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 275
henning.schulte
@iosb.fraunhofer.de



Dr. Manuel Bickel

Wuppertal Institut für Klima,
Umwelt, Energie gGmbH

Tel. +49 202 2492 190
manuel.bickel
@wupperinst.org

Motivation

Die Entwicklung unserer modernen Gesellschaft basiert in hohem Maße auf der Nutzung von Metallen. Neben Massenmetallen wie Eisen, Aluminium und Kupfer spielen Technologiemetalle eine zunehmend wichtige Rolle. Ohne sie wäre die Digitalisierung, wie wir sie derzeit erleben, nicht vorstellbar. Lithium findet sich etwa in Akkumulatoren für mobile Geräte, Indium und Gallium in Displays und Tantal wird in Kondensatoren in der Mikroelektronik verwendet. Technologiemetalle bilden die Grundbausteine digitaler Technologien und der IT-Infrastruktur. In der Folge ist die Umsetzbarkeit der zunehmenden Digitalisierung zum einen durch die Weiterentwicklung der Technik bedingt und zum anderen durch die Verfügbarkeit der benötigten Materialien. Sie sind für bestimmte, insbesondere elektronische, Funktionalitäten einzelner Komponenten unabdingbar und bisher mit bestehender Technik noch kaum substituierbar. Gerade wenn die Materialkonzentration verschwindend gering ist, z. B. weil der physikalische Effekt durch eine Dotierung erreicht wird, ist die Rückgewinnung erheblich erschwert und die Wirtschaftlichkeit ist oft deutlich eingeschränkt. Geringe Recyclingraten sind die Folge. Außerdem sind Technologiemetalle im Vergleich wirtschaftlich nur begrenzt verfügbar und die meisten befinden sich daher auf der Liste der »critical raw materials« der EU. [1, 2]

Das Projekt

Im Verbundprojekt MetallKIDD (gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV)) hat das Fraunhofer IOSB zusammen mit den Projektpartnern Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, VDI Technologiezentrum GmbH und der Folkwang Universität der Künste untersucht, wie der Einsatz von KI zur optimierten Kreislaufführung von Metallen beitragen kann. Hierfür wurden bestehende Wertschöpfungsketten betrachtet und Vorschläge für konkrete Handlungsfelder erarbeitet. Ein Fokus lag bei unseren Untersuchungen auf KI-Technologien. Denn die fortschreitende Nutzung von KI in zahlreichen Anwendungsfeldern generiert einen zusätzlichen Bedarf an Hardware und Energie. KI kann jedoch auch einen Beitrag zur Verbesserung des Metallmanagements leisten, z. B. durch Optimierung des Recyclings und der Wiedergewinnung von Technologiemetallen. Entsprechend steigt die Notwendigkeit, am Ende des Produktlebenszyklus (End of Life, EOL) die verwendeten Rohstoffe wieder zu gewinnen, um diese erneut in den Produktionszyklus einzufügen. Hier wird KI zum Hoffnungsträger für die Effizienzsteigerung in Recyclingprozessen, z. B. bei der Separierung entsprechender Bauteile, in denen die erwähnten Technologiemetalle Verwendung finden [3].

Sortierung mit KI am Ende des Produktlebenszyklus (EOL)

In heutigen Recyclingprozessen am EOL werden die Stoffströme größtenteils durch mechanische Schwerkraft-Trennungsmethoden (Rütteln, Schütteln, Sieben) nach dem Schreddern separiert, um die entstehenden Fraktionen einzeln zu verwerten. Wenn es um Fraktionen mit wertvollen oder problematischen Bestandteilen geht und die Schwerkraft-Trennung an ihre Grenzen stößt, werden vermehrt Methoden auf der Basis optischer Verfahren eingesetzt. Hier bieten neu-

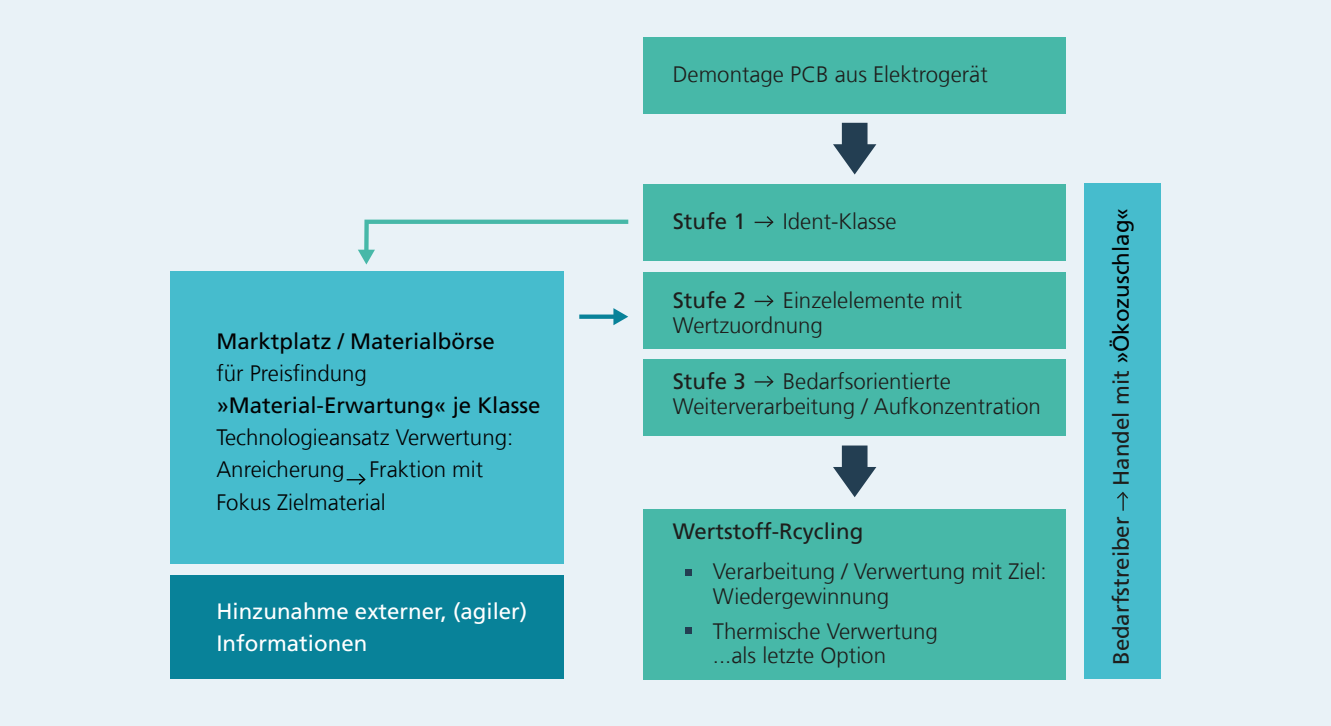


Abb. 1: Prinzip-Bild Recycling in der Zukunft.

artige KI-unterstützte Sensoren und Sensorkombinationen vielversprechende Perspektiven für die Zukunft. Durch die Kombination verschiedener Sensortechnologien, z. B. klassische kamerabasierte Objekterkennung zusammen mit 3D-Daten, kann die Unterscheidung von Elektronikbauteilen verbessert werden. Denn das Aussehen und die räumliche Information werden so kombiniert. Gleiches gilt, wenn Text-Informationen auf dem Gehäuse von Elektronikbauteilen miteinbezogen werden, um bessere Sortierentscheidungen zu treffen.

Neben dem Separieren von mehr oder weniger homogenen Objekten im Stoffstrom nach vorher festgelegten physikalischen Parametern gibt es einen anderen Ansatz: die gezielte Bildung von Fraktionen basierend auf Aspekten wie ihrem Wert oder dem Anteil einzelner Bestandteile. Wenn es möglich ist, Bauteile mit gleichen oder ähnlichen Wert- / Materialklassen zu identifizieren, kann eine strukturierte Separierung erfolgen, bei der Fraktionen mit erhöhten Anteilen bestimmter Materialien entstehen. Diese Fraktionen können dann gezielter in für bestimmte Metallkombinationen vorgesehene Recyclingrouten gegeben werden, sodass die Rückgewinnungsrate einzelner Metalle erhöht wird.

Herausforderung für die Zukunft

Das nachhaltige Metallmanagement der Zukunft sollte kreislauforientiert sein und alle Phasen des Lebenszyklus umfassen: von der Extraktion über die Herstellung und das Produktdesign über die Nutzung bis hin zum Recycling. Ein produktzentrierter Ansatz ist wichtig, um die Mischung von Materialien in Produktarchitekturen und Schredderstoffströmen zu berücksichtigen. Denn die Qualität der Materialien sinkt im Mischungszustand. Das Ziel ist es, die Exergie des Metallsystems auf einem hohen Niveau zu halten, da dies die Arbeitsfähigkeit des Systems beeinflusst. Mit jeder Bearbeitung des Materials im Rahmen des Recyclingprozesses sinkt jedoch die Exergie. [4]

1 UNEP (2013) »Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure., A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel«,. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.

2 Studie EU: »Study on the critical raw materials for the EU 2023«, Fifth list 2023 of critical raw materials for the EU, 2023, verfügbar unter: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1.

3 Projektwebsite MetallKIDD, »Design eines zirkulären Metallmanagements mittels Metallstrategie und KI-Unterstützung für ein digitales Deutschland«, Wuppertal Institut, 2021, verfügbar unter https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/1951.

4 Neill, B. Cobos-Becerra, L., Mathies, F., Dagar, J., Unger, E., Froehling, M., Reuter, M. A., Schlatmann, R ., »Cost versus environment? Combined life cycle, techno-economic, and circularity assessment of silicon- and perovskite-based photovoltaic systems«, Journal of Industrial Ecology, 2023, verfügbar unter https://doi.org/10.1111/jiec.13389.

KI-iREPro

KI-basierte Bildauswertung für stockgenaues Weinreben-Monitoring und effizientere Erntelogistik



Pascal Gauweiler M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 407
pascal.gauweiler
@iosb.fraunhofer.de



Benedikt Fischer M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)

Tel. +49 721 6091 591
benedikt.fischer
@iosb.fraunhofer.de

Hintergrund

In der Weinproduktion ist die Weinqualität eng mit dem Ertrag pro Rebe verbunden. So führt ein Rebstock mit bewusst reduzierten Traubenclustern zu einem qualitativ besseren Wein. Weniger Trauben bedeutet jedoch auch, dass bei Krankheitsbefall oder Nährstoffmangel der mögliche Ertrag weiter gesenkt wird. Deshalb ist ein Monitoring jedes Rebstocks für Winzer*innen unerlässlich, um rechtzeitig gegenzusteuern. Da jedoch die zu erfassenden Rebstockmerkmale im Vegetationszyklus gleichzeitig sichtbar werden, muss diese Bewertung von mehreren tausend Pflanzen auch nahezu gleichzeitig stattfinden. Die Merkmale werden aktuell noch zeitaufwendig visuell bewertet.Aufgrund der hohen Anzahl ist diese Bewertung fehleranfällig und die Genauigkeit nimmt im Laufe der Zeit ab. Die langfristige und genaue Dokumentation jedes einzelnen Rebstocks über Jahre hinweg gestaltet sich ebenfalls als schwierig. Um diesen Prozess zu automatisieren, wurde eine Multisensorplattform mit Datenbankanbindung entwickelt, auf welcher die relevanten Rebstockmerkmale mit KI-Modellen erkannt, ausgewertet und dokumentiert werden.

Multisensorplattform

Die Multisensorplattform ist mit einer speziellen Kamera, wie in Abbildung 1 zu sehen ist, ausgestattet, die neben den typischen Farb-Kanälen auch zwei zusätzliche Kanäle im nahen Infrarot besitzt. Dadurch werden Details wie Blattverfärbungen sichtbar, die für das menschliche Auge unsichtbar sind. Die Routinearbeit des Weinerzeugers beginnt schon in den frühen Morgenstunden.

Um eine Datenaufnahme auch bei Dämmerung zu ermöglichen, ist die Kamera mit einem breitbandigen LED-Blitzlicht gekoppelt. Ein GPS-Sensor liefert die Position, an der das Bild aufgenommen wurde. Dadurch ist eine Zuordnung des Bildinhalts zum einzelnen Rebstock möglich. Dies wird noch verbessert durch eine Kamera, die Tiefeninformtionen enthält (sogenannte Time-of-Flight Kamera, ToF). Dadurch

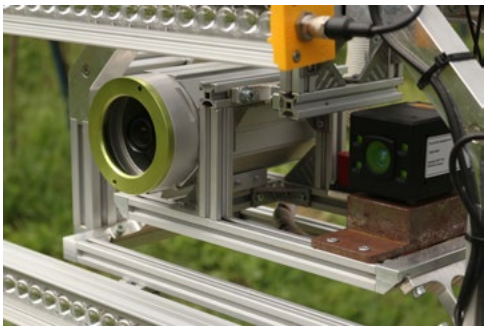


Abb. 1: Die fünfkanalige Kamera (links) kann Verfärbungen sichtbar machen, die für den Menschen nicht sichtbar sind. Daneben sitzt die Tiefenkamera, dahinter das GPS-Modul.



Abb. 2: Die Multisensorplattform wurde auf ein Quad montiert.

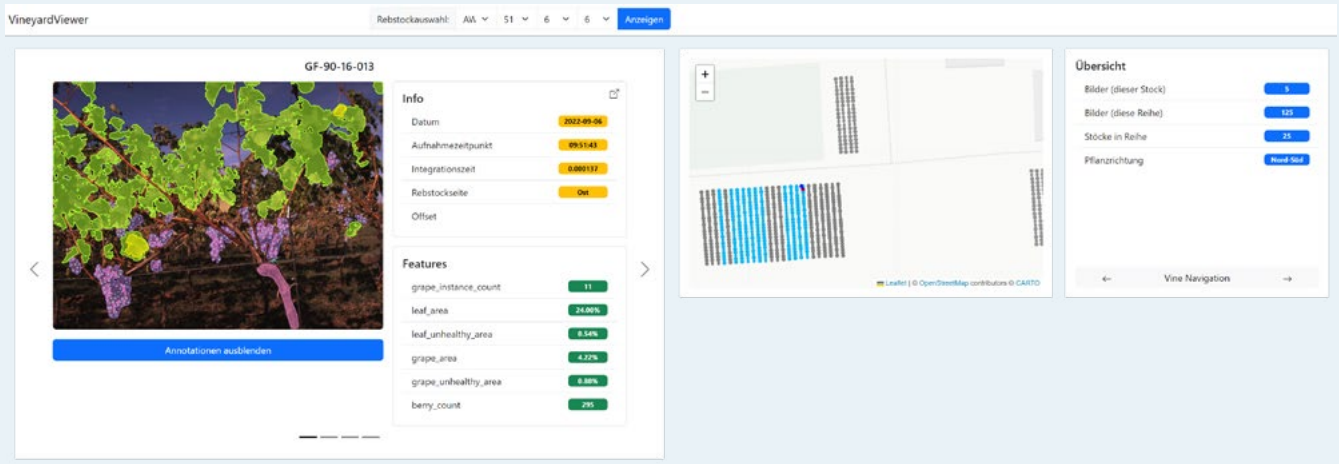


*Abb. 3: Mit dem VineyardViewer wird jede Pflanze zu jedem Zeitpunkt betrachtet und langfristig dokumentiert. Mit KI-Modellen können verschiedene Merkmale sichtbar gemacht und dem/der Winzer*in als Report ausgegeben werden.*

kann beispielsweise der Vordergrund vom Hintergrund leichter getrennt werden.

Die gesamte Technik wurde für das Projekt auf ein Quad montiert, da dieses schmal genug ist, um durch die Reihen zu fahren und ohne Schulung bedienbar ist (siehe Abb. 2). Um die bei der Fahrt entstehenden Vibrationen zu reduzieren, sind die Kameras an einem gedämpften Pendel montiert. Zur Energieversorgung dient eine Akkubox. Bedient wird das System während der Fahrt mittels eines Tablets.

VineyardViewer

Nach der Datenaufnahme werden die Bilder dem VineyardViewer übergeben, einem Tool zur Datenverarbeitung. Dort werden automatisch die relevanten Bilder, auf denen eine Pflanze vollständig abgebildet ist, gespeichert und entsprechend der Geoinformation identifiziert. Über die Benutzeroberfläche kann jede Rebe individuell ausgewählt und betrachtet werden, wie in Abbildung 3 zu sehen. So ist der Reifeverlauf das ganze Jahr über einsehbar und langfristig dokumentiert.

In der Software sind verschiedene KI-Modelle für die Bildauswertung hinterlegt, durch die Mangelerscheinungen und Krankheiten erkannt werden. Die Ergebnisse können dem/der Winzer*in als Report ausgegeben werden. Damit kann jeder Rebstock individuell behandelt werden und es wird Pflanzenschutz- und Düngemittel gespart. Außerdem können die Modelle auch ertragsrelevante Parameter ausgeben, wie die Anzahl der Triebe oder Traubencluster. Damit ist es möglich, schon im frühen Pflanzenstadium den Ertrag zu schätzen, was eine frühzeitige Planung der Ressourcen bei der Genossenschaft oder Lagerung ermöglicht.

Fast Facts

1. KI- basierte Bildauswertung für effizienteren Pflanzenschutz und Erntelogistik.
2. Automatisierter prozess mittels Multisensorplattform mit Datenbankanbindung.
3. Langfristige Dokumentation des Pflanzenstatus.

Projektträger

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

Nachhaltiges Management von Aquaponik-Systemen: Ein ganzheitlicher Ansatz



Prof. Dr.-Ing. habil.
Thomas Rauschenbach

Direktor Fraunhofer
IOSB-AST
Abteilungsleiter UWR

Tel. +49 3677 461 124
thomas.rauschenbach
@iosb-ast.fraunhofer.de



Dr.-Ing. Divas
Karimanzira

Unterwasserfahrzeuge
(UWR)

Tel. +49 3677 461 175
divas.karimanzira
@iosb-ast.fraunhofer.de

Was ist Aquaponik?

Aquaponik-Produktionssysteme (s. Abb. 1) sind eine nachhaltige und effiziente Methode zur Lebensmittelproduktion, die Aquakultur (Fischzucht) und Hydroponik (Pflanzenzucht im Wasser) in einem geschlossenen Kreislaufsystem kombiniert [1, 2]. In diesem System liefern die Fischabfälle Nährstoffe für die Pflanzen und die Pflanzen filtern und reinigen das Wasser für die Fische, wodurch ein natürliches Ökosystem innerhalb der künstlichen Umgebung des Gewächshauses entsteht.

Vorteile und Herausforderungen der Aquaponik-Produktion

Dieses System ist äußerst nachhaltig, da es nur minimale Abfälle produziert und nur wenig Energie benötigt. Außerdem verbraucht es weniger Wasser als herkömmliche Anbaumethoden und benötigt keine schädlichen Pestizide oder chemischen Düngemittel. Das Aquaponik-System hat auch positive Auswirkungen auf die Umwelt, da es den Bedarf an Transport und Lagerung von Lebensmitteln reduziert und die ganzjährige Produktion von lokalem Obst, Gemüse und Fisch ermöglicht. Außerdem bietet es städtischen Verbraucher*innen einen jahreszeitunabhängigen Zugang zu hochwertigen, lokal angebauten Produkten, unterstützt die lokale Wirtschaft und bietet frische und nahrhafte Lebensmitteloptionen.

Das Management von Aquaponik als Rezirkulationssystem mit zwei Akteuren kann jedoch verschiedene Herausforderungen mit sich bringen [3]. Es kann schwierig sein, sicherzustellen, dass die Nährstoffniveaus im System sowohl für die Fische als auch für die Pflanzen gut ausbalanciert sind. Denn die Fischabfälle müssen in eine Form umgewandelt werden, die von den Pflanzen genutzt werden kann, ohne für die Fische giftig zu werden. Die Aufrechterhaltung eines angemessenen Sauerstoffgehalts sowohl im Fischbecken als auch in den Pflanzenbeeten ist für die Gesundheit der Fische und das Wachstum der Pflanzen von entscheidender Bedeutung. Krankheitsausbrüche in der Fischpopulation können sich direkt auf die Gesundheit der Pflanzen auswirken. Es kann außerdem eine Herausforderung sein, die Wachstumsraten der Pflanzen und die Fütterungsraten der Fische synchron

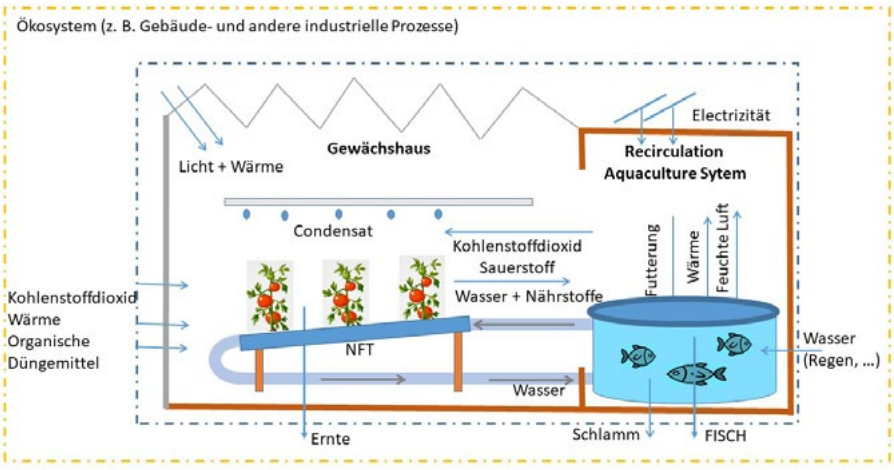


Abb. 1: Aquaponik im Ökosystem

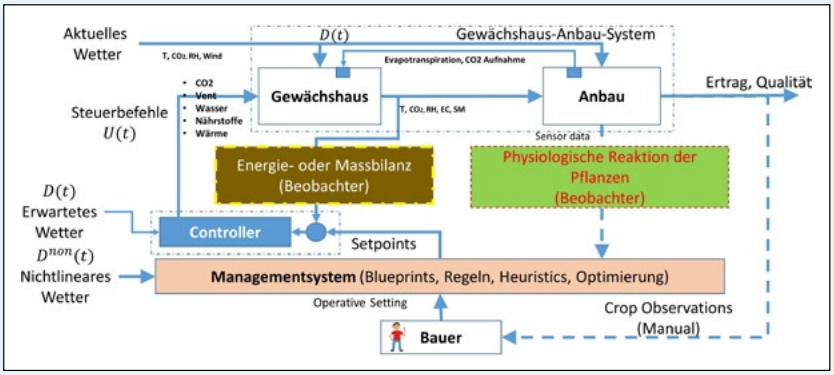


Abb. 2: Hierarchische Steuerungsstruktur für effektives Management mit Fisch- und Pflanzenbeobachtermodulen

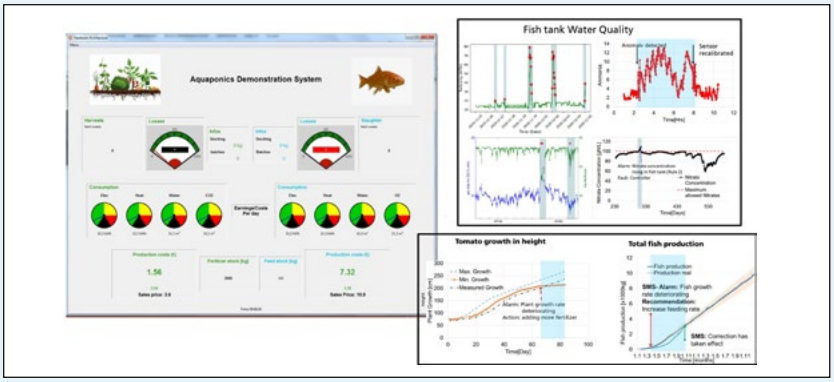


Abb. 3: Softwarekomponenten, Beispielhaft Anomalieerkennung in Wasserqualität, Fisch- und Pflanzenwachstum

zu halten. Je größer das System wird, desto komplexer werden das Gleichgewicht und die Effizienz des Nährstoffkreislaufs.

Ganzheitlicher Managementansatz für Aquaponik-Systeme

Für ein Aquaponik-System wird ein ganzheitlicher Managementansatz benötigt, der die Interdependenz aller Elemente innerhalb des Systems berücksichtigt, einschließlich der Pflanzen, der Fische und der physischen Umgebung, in der diese existieren. Es wird eine hierarchische Managementstruktur (Abb. 2) zur Systemführung verfolgt, wobei die oberste Ebene für die Überwachung des optimalen Ressourcenaustauschs zwischen Pflanzen und Fischen sowie für das Management des allgemeinen Gleichgewichts von Nährstoffaustausch, Wasserqualität und Umweltbedingungen verantwortlich ist [4]. Die zweite Ebene konzentriert sich auf die Regulierung der einzelnen Systemkomponenten.

Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt einen Teil der Softwareentwicklung. Als Ergebnis kann das integrierte Managementsystem Designempfehlungen für neue Aquaponiksysteme sowie Wachstumsprognosen für Pflanzen und Fische liefern. Das Frühwarnsystem erkennt einen Rückgang des gelösten Sauerstoffs oder einen Anstieg des ungebundenen Ammoniaks im Fischbecken, was auf ein mögliches Problem hinweist, das die Gesundheit der Fische beeinträchtigen könnte. Dies löst einen Alarm für den Systemmanager aus, der Korrekturmaßnahmen ergreifen kann, z. B. die Anpassung der Belüftung oder des Wasserflusses, um optimale Sauerstoffwerte für die Fische zu gewährleisten. Das Modell prognostiziert ein mögliches Nährstoffungleichgewicht, was negative Folgen auf das Pflanzenwachstum haben kann. Solche Frühwarnungen ermöglichen es dem Systemmanager, die Fütterung der Fische anzupassen oder eine zusätzliche Filterung zu installieren, um die Nährstoffwerte auszugleichen, bevor die Pflanzengesundheit beeinträchtigt wird. Durch die Analyse des Fischverhaltens und der Wasserqualitätsparameter erkennt das Modell außerdem frühzeitig Anzeichen eines möglichen Krankheitsausbruchs in der Fischpopulation. Diese Frühwarnung veranlasst den Systemmanager, eine gründliche Bewertung der Fischgesundheit durchzuführen und vorbeugende Maßnahmen zu ergreifen, um die Ausbreitung von Krankheiten innerhalb des Aquaponiksystems zu verhindern.

Schlussfolgerungen

Durch die Implementierung der hierarchischen Kontrollstruktur können Aquaponiksysteme sowohl auf Makro- als auch auf Mikroebene effektiv gemanagt werden. So wird sowohl ein sicherer Betrieb als auch die Nachhaltigkeit des Ökosystems gewährleistet und gleichzeitig auf die spezifischen Bedürfnisse der einzelnen Systemkomponenten eingegangen.

1 J. E. Rakocy et al., »Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system«, Acta Horticulturae, 648, 2004, S. 63-69.

2 S. Goddek et al.,»Aquaponics and Global Food Challenges«,in Aquaponics Food Production Systems, Springer, Cham, 2019, S. 1–17.

3 D. Karimanzira, T. Rauschenbach»An intelligent management system for aquaponics«, in at – Automatisierungstechnik 69(4), 2021, S. 345–350, https://doi.org/10.1515/auto-2020-0036.

4 D. Karimanzira, T. Rauschenbach, »Crop Growth Observers Required to Reach Full Automation of a Greenhouse«, in Modern Concept Development in Agronomy 8(4), MCDA. 000691, 2021, https://doi.org/10.31031/MCDA.2021.08.000691.

Agent4Heat

Optimale Betriebsführung cross-sektoraler Energiesysteme unter Beachtung der dynamischen Charakteristik von Wärmenetzen



Dr.- Ing. Stefan Klaiber

Cross-sektorale
Energiesysteme (KES)

Tel. +49 3677 461 105
stefan.klaiber
@iosb-ast.fraunhofer.de



Jonas Pemsel, M. Eng.

Abteilung Kognitive
Energiesysteme (KES)

Tel. +49 3677 461 191
jonas.pemsel
@iosb-ast.fraunhofer.de

Status Quo der Betriebsführung von Wärmenetzen

Die Wärmeversorgung über Wärmenetze gilt im Kontext der Wärmewende als eine Schlüsseltechnologie zur Erschließung und Nutzung erneuerbarer Wärmequellen und damit zum notwendigen Übergang zu einer klimaneutralen und nachhaltigen Wärmeversorgung. Infolge von Netzverdichtungen, Netzerweiterungen und der Erschließung neuer Gemeinden ist zukünftig damit zu rechnen, dass der Anteil der über Wärmenetze mit thermischer Energie versorgten Gebäude in Deutschland deutlich zunimmt [1]. Um diese Technologie effektiv zu nutzen und die Potenziale zu erschließen, müssen einige technische, wirtschaftliche und regulatorische Herausforderungen bewältigt werden. Eine solche Herausforderung ist die Einsatzplanung der an der Wärmeerzeugung und -verteilung beteiligten Komponenten des Netzes. Hierbei können bei der sektorübergreifenden Einsatzplanung, v. a. beim Stromsektor, Synergie- und Flexibilisierungspotenziale ausgeschöpft werden. Nach heutigem Stand kommen zur Einsatzplanung von Wärmeerzeugungsanlagen und -speichern jedoch Optimierungsmodelle zum Einsatz, die auf Methoden der gemischt-ganzzahlig linearen Optimierung (GGLP) beruhen und Fernwärmenetze nur sehr abstrahiert und vereinfacht abbilden. Andererseits existieren im Bereich der Simulation von Fernwärmenetzen sehr detaillierte und leistungsfähige Modelle, die das thermodynamische Verhalten der betrachteten Systeme und die daraus resultierende Flexibilität realitätsnah abbilden können.

Forschungsvorhaben

Im Projekt »AGENT4Heat« soll das durch die bisher vereinfachte Darstellung in der Einsatzplanung nicht nutzbare Flexibilitätspotenzial von Fernwärmenetzen quantifiziert und nutzbar gemacht werden. Letzteres erfolgt durch agentenbasierte Ansätze zur Integration und Kombination von Simulations- und Planungsmethoden. An dem durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für drei Jahre geförderten Projekt arbeitet das Fraunhofer IOSB-AST gemeinsam mit der Iqony Energies GmbH. Die entworfenen Ansätze werden am Beispiel der Fernwärmeschiene Saar der Iqony Energies GmbH [2] demonstriert (siehe Abb. 1).



Abb. 1: Agentenbasierte Ansätze zur Integration und Kombination von Simulations- und Planungsmethoden am Beispiel der Fernwärmeschiene Saar der Iqony Energies GmbH

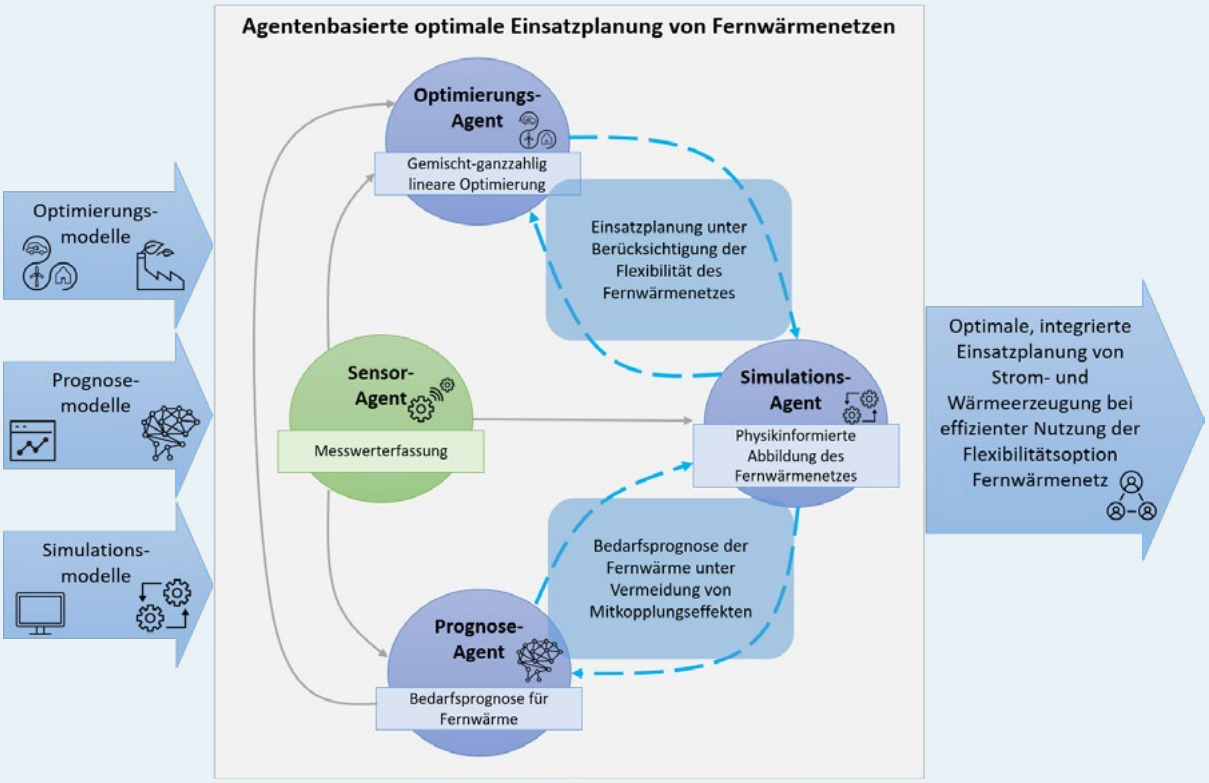


Abb. 2: Agentenbasierte optimale Einsatzplanung von Fernwärmenetzen

Agentensystem als innovativer Betriebsführungsansatz

Erforscht und entwickelt wird ein neuartiger agentenbasierter Ansatz für die optimale Betriebsführung sektorengekoppelter Energiesysteme mit Wärmenetzen (siehe Abb. 2). Hierzu wird zunächst der konkrete Anwendungsfall der Fernwärmeschiene Saar analysiert, indem historische Messdaten aufgezeichnet, vorhandene Simulations- und Optimierungsmodelle der Projektpartner er-fasst und das grundsätzliche Flexibilitätspotenzial des Anwendungsobjektes ermittelt werden. Im nächsten Schritt wird das zu entwickelnde Agentensystem für die Einsatzplanung des Fernwärmenetzes im Querverbund konzipiert. Hierbei nutzen die Agenten elementare Funktionen, um das physikalische Verhalten des Wärmeversorgungssystems mathematisch zu modellieren. Für den konkreten Anwendungsfall sind ein Prognose-, Simulations-, Optimierungs- und Messwert-Agent geplant. Der Simulationsagent bildet das Fernwärmenetz als physikinformiertes Simulationsmodell ab und quantifiziert die konkrete Dynamik des Netzes. Der Prognoseagent ist für die Vor-hersage der dynamischen Wärmeverbräuche verantwortlich und erzeugt damit die Datengrundlage für den Simulationsagenten. Der Optimierungsagent beinhaltet das mathematische Modell für die Berechnung des optimalen Einsatzes der Wärmeerzeuger unter Berücksichtigung der ermittelten Wärmenetzdynamik und der Sektorenkopplungspotenziale. Für den Abruf von Messwerten aus Sensoren wird der Messwertagent realisiert. Für den Aufbau des Agentensystems werden bereits existierende Simulations- und Optimierungsmodelle genutzt und erweitert mit dem Ziel, bereits vorhandene Tools und deren Potenzial bestmöglich zu integrieren. Die Vor- und Nachteile des neuartigen agentenbasierten Ansatzes werden anhand eines Vergleichs mit den bisher genutzten Methoden zur Einsatzplanung am realen Anwendungsfall der Fernwärmeschiene Saar identifiziert.

Bedeutung der Projektergebnisse für die Wärmewende

Neben einer höheren Modellgenauigkeit verspricht der beschriebene Ansatz der agentenbasierten Modellierung auf wichtige Fragestellungen einzuzahlen, wie die Übertragbarkeit der Lösung auf neue Use Cases. Zudem lassen sich die Modelle sehr gut an neue Komponenten des zu optimierenden Energiesystems (dezentrale Erzeugung, Nahwärmenetze, Technologieinnovationen) anpassen und erweitern. Der im Rahmen des Projektes erstellte Prototyp schafft die Basis für eine Implementierung der Lösung auch bei anderen Fernwärmenetzen, die von der Iqony (z. B. Fernwärmeschiene Ruhr) oder Dritten betrieben werden. Damit kann die zu entwickelnde Lösung einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung des Wärmenetzbetriebes leisten – und damit zum Gelingen der Wärmewende.

1 M. Blesl, et al., »Transformation und Rolle der Wärmenetze«, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam, 2023, https://doi.org/10.48485/pik.2023.004.

2 Iqony Energies GmbH,https://www.fvs.de/de/kundeninformationen/einspeisung-versorgung (07.02.2024)

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
info@iosb.fraunhofer.de
www.iosb.fraunhofer.de

Fraunhofer IOSB Karlsruhe
Fraunhoferstraße 1
76131 Karlsruhe
Telefon +49 721 6091-0

Fraunhofer IOSB Ettlingen
Gutleuthausstraße 1
76275 Ettlingen
Telefon +49 7243 992-0

Institutsteil für angewandte Systemtechnik IOSB-AST
Am Vogelherd 90
98693 Ilmenau
Telefon +49 3677 461-0
info@iosb-ast.fraunhofer.de
www.iosb-ast.fraunhofer.de

Institutsteil für industrielle Automation IOSB-INA
Campusallee 1
32657 Lemgo
Phone +49 5261 94290-22
juergen.jasperneite@iosb-ina.fraunhofer.de
www.iosb-ina.fraunhofer.de

Zweigstellen & Kontaktbüro

Forschungsgruppe IT-Sicherheit für Kritische Infrastrukturen ENERGIE UND WASSER
Wilhelmsplatz 11
02826 Görlitz

Fraunhofer-Zentrum für die Sicherheit Sozio-Technischer Systeme SIRIOS
c/o Fraunhofer FOKUS
Kaiserin-Augusta-Allee 31
10589 Berlin

Fraunhofer-Forschungsgruppe Smart Ocean Technologies SOT
Alter Hafen Süd 6
18069 Rostock

Forschungsgruppe Aktive Laserfasern
c/o HENSOLDT Optronics GmbH
Carl-Zeiss-Str. 22
73447 Oberkochen

Kontaktbüro Beijing
Unit 0602G, Tower D1
DRC Liangmaqiao Office Building
19 Dongfangdonglu, Chaoyang District
100600 Beijing, PR China
muh@fraunhofer.com.cn



Zur ePaper-Ausgabe