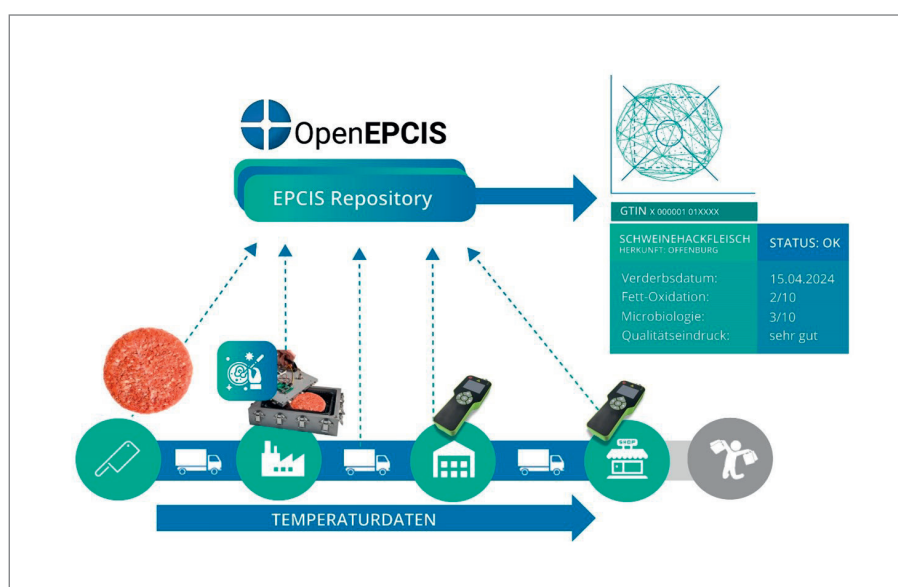


# Mettigel meets KI

## – Überwachung von Gerüchen als Qualitätsmarker am Beispiel Hackfleisch

Maximilian Köhne, Ervienatasia Djaw, Imke Schröer, Sven Boeckelmann, Matthias Brunner, Christoph Wurm & Gina Zeh

Fleisch und Fleischerzeugnisse machen immer noch einen beträchtlichen Beitrag in der Lebensmittelindustrie in Deutschland aus. So belief sich beispielsweise der Umsatz der Schlacht- und Fleisch-verarbeitenden Betriebe im Jahr 2022 auf 47 Milliarden Euro [1]. Als tierisches Rohprodukt ist Fleisch besonders anfällig für Verderbsprozesse, die dessen Qualität durch bspw. Oxidationsprozesse, beeinträchtigen können. Das Verwerfen von Fleisch gewinnt im Hinblick auf den nachhaltigen, ethischen Umgang mit der tierischen Ressource zunehmend an Bedeutung. Angesichts dieser Herausforderungen gewinnen zukünftige Szenarien zur Überwachung der Qualität und Sicherheit von Fleischprodukten zunehmend an Relevanz, insbesondere im Rahmen von Nachhaltigkeitsprojekten wie dem Zukunftslabor 2030 (ZL2030)<sup>1</sup>. Eine verbesserte Produktüberwachung kann dazu beitragen, Verderbsprozesse frühzeitig zu erkennen. Ein vielversprechender Ansatz dazu ist die Verwendung von digitalen Zwillingen. Diese virtuellen Repliken physischer Objekte ermöglichen eine detaillierte Modellierung der Qualität anhand von messbaren Eigenschaften wie Temperatur, Feuchtigkeit und flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) während des gesamten Produktions- und Distributionsprozesses von Fleisch. Durch die Integration von Sensoren und Datenanalysealgorithmen können digitale Zwillinge Unregelmäßigkeiten und potenzielle Probleme frühzeitig erkennen und so die Qualität überwachen. Dies trägt wesentlich zur Verbesserung der Risikoeerkennung bei.



Schematische Darstellung der Datenprozesse entlang der Lieferkette von Hackfleisch. © tsenso GmbH

Digitale Zwillinge benötigen als Abbild der Realität jedoch sehr viele Daten, um den Istzustand des Produktes korrekt wiedergeben zu können und seinen Qualitätsverlauf in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen wie der Temperatur oder der Lagerdauer zu modellieren. Das interdisziplinäre ZL2030-Konsortium, bestehend aus der benelog GmbH & Co KG, dem Bundesinstitut für Risikobewertung, dem Bayerischen Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, dem Max Rubner-Institut Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel, der Universität Bayreuth, dem Fraunhofer IVV, der Technischen Hochschule Deggendorf sowie dem Konsortialführer tsenso GmbH, arbeitet daher an der Datenerhebung durch verschiedenste Messmethoden, wie klassische Mikrobiologie, Next-Generation Sequencing (NGS), Spektroskopie und Volatilom-Analysen. Durch die Integration dieser Daten sollen die wichtigsten chemischen, physikalischen und biologischen Prozesse im Fleisch erfasst werden, um sicherzustellen, dass die Qualitätsprognosen des digitalen Zwillings zuverlässig sind. Als Teil des Konsortiums

erforscht das Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV schnelle und effiziente Methoden zur Detektion der Gasphase über dem Produkt. Besonderes Augenmerk gilt dabei dem Nachweis von VOCs, die für charakteristische Verderbsgerüche wie Ranzigkeit oder Fäulnis von Fleischprodukten verantwortlich sein können, da der menschliche Geruchssinn eine wichtige Rolle bei der individuellen Wahrnehmung und Beurteilung der Fleischqualität spielt.

### Die flüchtigen Verbindungen des Fleischverderbs

Die Analyse der durch den Verderb veränderten Zusammensetzung der Gasatmosphäre und die Identifikation der gebildeten geruchsaktiven Substanzen in der Verpackung erfolgt im Zukunftslabor ZL2030 mittels Gaschromatographie-Ionenmobilitätspektrometrie (GC-IMS). Je nach Probenmatrix (z.B. Hackfleisch), Behandlung sowie Verpackungs- und Lagerbedingungen unterscheidet sich dabei die typische auffindbare

<sup>1</sup> 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 der Förderung der Künstlichen Intelligenz (KI) in der Landwirtschaft mit dem Förderkennzeichen 28DK126G20.

Mikroflora auf den Fleischprodukten. Die im Handel vorherrschenden Vakuum- oder Schutzatmosphärenverpackung (MAP; *modified atmosphere packaging*) fördern ausgehend von oxischen oder (fast) anoxischen Bedingungen die Bildung von VOCs durch z.B. *Pseudomonas spp.*, *Lactobacillales* oder *Enterobacteriaceae*. Dabei entstehen unterschiedliche Substanzen, unter anderem Alkohole, Aldehyde, Ketone, Ester, verschiedene schwefelhaltige Verbindungen, sowie volatile Derivate von Fettsäuren [2]. Acetoin, ein mikrobielles Abbauprodukt von Glucose und Asparaginsäure mit butter-artigem Geruch, wird häufig als Frischemarker in Fleisch gefunden, während 3-Methyl-1-butanol, durch einen stechenden und vergorenen Geruch charakterisiert, oft in verdorbenem Fleisch detektiert wird. Eine Oxidation von ungesättigten Fettsäuren hingegen geht mit der Bildung von Hexanal (ranziger Geruch) einher [3]. Bedingt durch die Diversität der mikrobiellen Akteure und deren emittierten Stoffwechselprodukten ist die Klassifizierung von Fleischprodukten herausfordernd. In einer umfangreichen Herangehensweise werden im Projekt ZL2030 die VOC-Messdaten mit anderen im Projekt erhobenen Messdaten korreliert und so die Präzision der Methodik erhöht. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, den Status der Produktqualität entlang der Lieferkette genauer zu bestimmen.

### Kostengünstige, technische Sensorik für das kontinuierliche Echtzeit-Monitoring

Moderne Sensortechnologien wie z.B. die Halbleitersensoren (MOS-Sensoren) bieten eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Überwachung verschiedener Qualitäts- und Sicherheitsmarker, wie bspw. VOCs, Feuchte, oder auch Temperatur. Sie sind meist kostengünstig, klein und sehr empfindlich, können aber aufgrund ihrer eingeschränkten Selektivität nicht ubiquitär eingesetzt werden. Um die Vorteile von Sensoren optimal zu nutzen, ist die Entwicklung von Sensorsystemen, die auf die Zielmarker zugeschnitten sind, und ein entsprechendes Training der Sensoren auf diese Zielmarker relevant.

Ein möglicher Ansatz für die Entwicklung solcher Sensorsysteme ist SEAN (SEnsorische ANalysekammer). Dabei werden verschiedenste Sensoren für Feuchte, Temperatur, Druck, CO<sub>2</sub> und VOCs in einem kompakten und kostengünstigen System integriert. Über zwei Ventile lässt sich die Gasphase

des Systems im Voraus auf bestimmte Schutzatmosphären wie bspw. in MAP einstellen, ein Sichtfenster ermöglicht eine optische Kontrolle der Proben. Da das System klein gehalten ist, kann es auch zur überwachten Lagerung in Kühlräumen oder Klimakammern verwendet werden. Durch die Kombination mit den Referenzmessungen lassen sich so Verläufe der Produktqualität über einen beliebigen Zeitraum, beispielsweise auch bei Kühlkettenunterbrechungen, überwachen und mit Sensordaten korrelieren. Diese können anschließend wieder für die Verwendung im digitalen Zwilling genutzt werden, um eine Vorhersage der Produktqualität ganzer Chargen zu prognostizieren.

### Monitoring von Qualitätsparametern entlang der Lieferkette

Ein digitaler Zwilling ist eine virtuelle Kopie eines realen Objekts (beispielsweise ein Burgerpatty), kontinuierlich aktualisiert durch Echtzeitdaten. Dies ermöglicht Simulationen und Datenanalysen ohne den Bedarf des direkten Zugriffs auf das physische Produkt. Durch die Einbindung von Sensordaten und IoT (Internet of Things) Technologien stellt der digitale Zwilling eine Verknüpfung zwischen physischer und digitaler Welt dar und erlaubt es, Probleme zu erkennen und zu beheben, bevor sie real auftreten.

Der digitale Zwilling, entwickelt durch die tsenso GmbH, nutzt Basisdaten und ergänzt diese um kontinuierlich, in Echtzeit aktualisierte Daten des physischen Objekts. Durch Interaktion mit anderen digitalen Zwillingen kann er komplexe Szenarien simulieren, was Prozessoptimierung und vorausschauende Wartung ermöglicht. So tragen digitale Zwillinge durch datenbasierte Entscheidungen zur Optimierung von Leistung und Effizienz bei.

Für einen effektiven digitalen Zwilling sind viele Daten erforderlich. An dieser Stelle erweist sich der GS1 EPCIS 2.0 Standard als hilfreich, welcher die Einbindung von IoT-Daten ermöglicht. Identifikationsstandards wie beispielsweise GTIN und Barcodes sorgen für eine eindeutige Identifizierung der Objekte, wobei die zugrundeliegenden Identifizierer auf Barcodes, 2D Codes (QR, Datamatrix) oder RFIDs kodiert sein können. EPCIS 2.0 hat zudem SensorReports eingeführt, die ideal für die Sammlung und Verwendung von IoT-Daten sind. Durch solche Standards kann eine transparentere Gestaltung von Prozessen erreicht und die Performance sowie Effizienz optimiert werden.

EPCIS 2.0 bringt eine weitere bedeutende Neuerung mit sich: Nun können die Ergebnisse von Standing Queries, also voreingestellte Abfragen, als Streaming EPCIS 2.0 Subscrip-



Abb. 1: Sensorische Analysenkammer SEAN: Die für das Projekt ZL2030 entwickelte Messkammer ermöglicht die simultane Messung von Feuchtigkeit, Temperatur und flüchtigen organischen Verbindungen in MAP-verpackten Fleischproben. ©Fraunhofer IVV

tion in Echtzeit bereitgestellt werden. Dies erfolgt über eine Technologie namens Web Sockets in der von benelog entwickelten Lösung und ermöglicht die Realisierung eines Echtzeit-Event-Benachrichtigungssystems. KI-Agenten werden augenblicklich benachrichtigt, wenn ein zuvor definiertes Ereignis eintritt. Die Benachrichtigung erfolgt durch eine automatisch gesendete (Push-) Nachricht.

Nach Erhalt dieser Nachricht starten die KI-Agenten umgehend mit komplexen Analysen. Ein gängiges Beispiel ist ein Vorhersagemodell, das Prognosen zu einem spezifischen Sachverhalt (z.B. Frischegrad eines Produkts) trifft. Die Ergebnisse dieser Vorhersage werden dann zurück ins EPCIS Repository gespeichert. Das hat den Vorteil, dass in

Echtzeit auf neue Ereignisdaten reagiert und entsprechende Maßnahmen umgesetzt werden können.

Als weiteren Schritt bietet EPCIS 2.0 die Möglichkeit, die Analyseergebnisse an sogenannte Decision Support Systeme (DSS) weiterzuleiten. Auch hierzu ist der Einsatz von EPCIS Subscriptions bestens geeignet, der eine schnelle und effektive Reaktion auf aktuelle Daten und Vorhersagen sicherstellt. Das EPCIS Repository in Verbindung mit den digitalen Zwilling ermöglicht in Zukunft einen nachhaltigeren und sichereren Konsum von verderblichen Lebensmittel wie Hackfleisch durch verschiedene Inszenierungsoptionen, wie z.B. ein dynamisches Verfallsdatum. Der Einsatz des digitalen Zwillings in der Lebensmittelwirtschaft soll dann dazu beitra-

gen, die Lebensmittelverschwendung zu senken und gleichzeitig die Qualität der Produkte sowie die gesundheitliche Sicherheit der Verbraucher zu gewährleisten.

#### Literatur

1. <https://de.statista.com/themen/4069/fleischverarbeitung-in-deutschland/#topicOverview>, aufgerufen am 11.03.2024
2. Kosowska, M., M. A. Majcher, and T. Fortuna, Volatile compounds in meat and meat products. *Food Science and Technology*, 2017. 37(1): p. 1-7.
3. Casaburi, A., et al., Bacterial populations and the volatiles associated to meat spoilage. *Food Microbiology*, 2015. 45: p. 83-102.