

Biomimetische Riechsysteme

Elektronische Nasen (E-Nasen) sind technische Systeme, die Gassensoren und Mustererkennungsverfahren nutzen, um chemische Signale in der Luft zu detektieren und geruchlich (olfaktorisch) zu bewerten. Dabei geht es weniger um die präzise Bestimmung von Einzelkomponenten als vielmehr um die Identifikation von olfaktorischen Fingerabdrücken, die dann bekannten Geruchsqualitäten zugeordnet werden. Dem natürlichen Geruchsvermögen von Säugetieren, Fischen oder Insekten sind künstliche Riechsysteme bislang allerdings noch in vielen Leistungsparametern unterlegen. E-Nasen finden daher aktuell nur in wenigen, eng umrissenen Einsatzbereichen Anwendung. Wenn es um besondere olfaktorische Herausforderungen wie die Suche nach Verschütteten oder das Aufspüren von Explosivstoffen geht, verlässt sich der Mensch weiterhin meist auf den Geruchssinn von Tieren. Neuartige biochemische Sensorkomponenten und moderne maschinelle Lernverfahren ermöglichen es jedoch heute, die biologischen Prozesse der Geruchserfassung und -verarbeitung immer besser nachzuahmen und könnten E-Nasen zukünftig konkurrenzfähig zu den natürlichen Vorbildern werden lassen.

Anders als traditionelle chemische Analyseverfahren wie die Gaschromatographie und die Massenspektrometrie sind E-Nasen biomimetisch, orientieren sich also in Aufbau bzw. Funktion eng am biologischen Vorbild. Die Rolle der olfaktorischen Sinneszellen wird in technischen Riechsystemen von arrayartig angeordneten Gassensoren übernommen, die reversibel auf Geruchsstoffe in der Umwelt reagieren und das chemische Signal in ein elektronisches Signal umwandeln. An die Stelle der zentralnervösen Verarbeitungsstationen treten computerbasierte Mustererkennungs- und Klassifikationsverfahren, welche die Sensordaten analysieren und interpretieren. Um die Übersetzung der olfaktorischen Signaturen in Geruchseindrücke zu ermöglichen, muss das System im Vorfeld mit entsprechenden Beispieldatensätzen der zu erkennenden Geruchsqualitäten angelehrt werden.

Gängige E-Nasen-Systeme nutzen häufig Sensoren auf der Basis von leitfähigen Po-

lymeren oder Metalloxiden, deren elektrischer Widerstand durch die Adsorption und Desorption von bestimmten flüchtigen organischen Verbindungen (Volatile Organic Compounds = VOC) in charakteristischer Weise verändert wird. Neben chemoresistiven Nachweismethoden finden aber auch gravimetrische, optische und potentiometrische Messprinzipien Anwendung. Je nach Umsetzung weisen solche künstlichen Riechsysteme aber oft nur ein eingeschränktes Detektionsspektrum, eine geringe Empfindlichkeit, eine niedrige Spezifität und/oder ein geringes Auflösungsvermögen auf. Die Nutzung von biochemischen Sensorkomponenten stellt einen relativ neuen Ansatz dar, die Leistungsparameter von E-Nasen zu verbessern.

Konkret wird dabei der Einsatz von isolierten Geruchsrezeptoren, Duftstoff-Bindeproteinen und VOC-affinen Peptiden erforscht. Letztere sind kleine Moleküle aus Aminosäuren, die räumliche Strukturen bilden, an die sich Geruchsstoffe mit komplementärer Geometrie nach dem sog. Schlüssel-Schloss-Prinzip anlagern können. Sie gelten unter anderem deshalb als besonders vielversprechend, weil sie sich aufgrund ihrer geringen Größe und Komplexität verhältnismäßig leicht und kostengünstig herstellen und manipulieren lassen. Dies ermöglicht das Design von VOC-affinen Proteinen, die eine hohe Spezifität gegenüber einer vorgegebenen Zielsubstanz zeigen. Ein biohybrider Sensor zur Detektion von Explosivstoffen konnte so bereits realisiert werden.

Bei der Interpretation der Sensordaten spielen maschinelle Lernverfahren eine zentrale Rolle. Anhand von Beispieldaten soll das System selbstständig Gesetzmäßigkeiten und Muster im olfaktorischen Signalraum erlernen und so idealerweise in die Lage versetzt werden, später auch unbekannte Eingangsdaten korrekt zu interpretieren. Für diese Aufgabe werden zunehmend Netzwerke aus sog. künstlichen Neuronen genutzt, die in ihrer Anordnung und Verknüpfung natürliche Neuroarchitekturen nachahmen. Künstliche neuronale Netze mit einer tiefen Architektur bilden beispielsweise die Basis für Deep Learning – eine Form des maschinellen Lernens, bei

der Merkmalszusammenhänge sukzessive auf mehreren Hierarchieebenen analysiert werden. Durch den Einsatz eines solchen Netzwerks konnte Google in jüngster Vergangenheit z. B. bemerkenswerte Erfolge bei der automatisierten Voraussage von Geruchsqualitäten erzielen. Weitere Varianten von künstlichen neuronalen Netzen, die sich in ihrer Organisation und Funktion noch stärker an Verarbeitungszentren des Nervensystems orientieren, sind sog. Convolutional Neural Networks und Spiking Neural Networks. Auch hier konnten vor kurzem vielversprechende Ergebnisse bei der Klassifikation von Geruchsmustern demonstriert werden.

Leistungsstarke und zuverlässige E-Nasen könnten z. B. zur Sicherstellung der Qualität von Lebensmitteln und anderen Industrieprodukten oder zur Überwachung der Emissionen von Industrieanlagen eingesetzt werden. Ein besonders aussichtsreiches Anwendungsgebiet stellt die medizinische Atemgasanalyse dar. Über den Nachweis von charakteristischen Markersubstanzen in der Atemluft kann dieses nichtinvasive Diagnoseverfahren wichtige Beiträge zur Früherkennung von Organleiden, Krebserkrankungen und anderen Krankheiten leisten. Weitere Anwendungsfelder ergeben sich überall dort, wo sich der Mensch derzeit noch auf den Geruchssinn von Tieren (insbesondere Hunden) verlässt – beispielsweise bei der Detektion von Explosivstoffen und Waffen, bei der Suche nach Drogen und beim Aufspüren von vermissten Personen. Auch in der militärischen Kampfmittelaufklärung könnten E-Nasen zukünftig wertvolle Fähigkeiten bei der Detektion und Identifikation von B- und C-Kampfstoffen eröffnen. Bis es soweit ist, gilt es allerdings, die Reaktionszeit und das Regenerationsvermögen der Sensoren weiter zu steigern, die Nachweisempfindlichkeit und das Auflösungsvermögen weiter zu verbessern und die Robustheit und Zuverlässigkeit von biomimetischen Riechsystemen unter wechselhaften und mitunter widrigen Umweltbedingungen weiter zu erhöhen.

Dr. Carsten Heuer