



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SPEKTRALANALYTIK

Studie zur Identifikation und Bewertung von
Potenzialen durch Spektralanalytik für die
Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken

Im Auftrag der Wirtschaftsförderung Raum Heilbronn GmbH



goto.tecintelli.de/CoLBm6H/

MANAGEMENT SUMMARY

Die vorliegende Studie ist im Rahmen des Projektes TRANSFORMOTIVE entstanden und untersucht die Potenziale der Spektralanalytik für die Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken. Ziel der Potenzialanalyse ist es, einen fundierten Überblick über den technologischen Stand, aktuelle Markt- und Entwicklungstrends sowie konkrete Anwendungsmöglichkeiten der Spektralanalytik zu geben und auf dieser Grundlage eine strategische Entscheidungsgrundlage für die weitere Ausrichtung von TRANSFORMOTIVE-Aktivitäten in der Region Heilbronn-Franken zu bilden. So trägt die Studie dazu bei, zu prüfen, ob das Thema "Spektralanalytik" in der Region für eine Umsetzung der Regionalen Innovationsstrategie Heilbronn-Franken und der Innovationsstrategie Baden-Württembergs geeignet ist. Zudem fließen die Ergebnisse in das Projekt ein, welches branchenübergreifend Transformationspotenziale in der Region adressiert.

Die Studie richtet sich insbesondere an Entscheidungsträger in Wirtschaftsförderung, Clustermanagement und Politik. Diese erhalten konkrete Handlungsempfehlungen, wie und ob das Potenzial der Spektralanalytik in der Region adressiert und verankert werden kann. Des Weiteren wird durch die Studie eine Informationsgrundlage geschaffen, welche in mögliche Folgeaktivitäten und -projekte überführt und dort zielgerichtet genutzt werden kann. Eine letzte Zielgruppe der Studie sind regionale Unternehmen, die sich für das Thema interessieren. So erhalten zum Beispiel Technologieanbieter durch die Studie einen Überblick über ungenutzte Potenziale in der Region, während Technologieanwender Perspektiven erhalten, wie sie die Technologie in ihre eigenen Prozesse integrieren oder welche neuen Rollen sie selbst als Teil einer spektralanalytischen Wertschöpfungskette – etwa als Zulieferer von Komponenten, Systemmodulen oder softwarebasierten Lösungen – spielen können.

Die Studie verbindet bewusst eine allgemeinverständliche Einführung in die Spektralanalytik mit einem Ausblick auf technologische Entwicklungsrichtungen und potenzielle Anwendungsfelder. Sie zeigt, dass Spektralanalytik eine etablierte, aber zugleich hochdynamische Querschnittstechnologie ist, deren Einsatzperspektiven sich durch technologische Fortschritte deutlich erweitern. Miniaturisierung, Inline- und Echtzeitfähigkeit sowie die zunehmende Verknüpfung mit datenbasierter Auswertung und Künstlicher Intelligenz eröffnen neue Möglichkeiten für Qualitätssicherung, Prozessautomatisierung, Effizienzsteigerung und datengetriebene Innovationen.

Ein zentrales Ergebnis der Studie ist, dass die Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken über sehr gute strukturelle Voraussetzungen verfügt, um diese Potenziale zu nutzen. Die Region ist geprägt durch eine starke industrielle Basis, eine breite Wertschöpfungsstruktur sowie ein leistungsfähiges Innovations- und Forschungsökosystem, insbesondere im Bereich Digitalisierung und KI. Entlang der gesamten

Wertschöpfungskette der Spektralanalytik – von Anwendern über Komponenten- und Systemanbieter bis hin zu Software- und Analysekompetenzen – sind relevante Akteure regional vertreten.

Gleichzeitig zeigt die Analyse, dass Spektralanalytik bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) bislang nicht flächendeckend etabliert ist. Der Einsatz erfolgt häufig punktuell und überwiegend laborbasiert, während prozessnahe Anwendungen noch vergleichsweise selten sind. Informations- und Wissensdefizite, begrenzte personelle Ressourcen sowie der hohe operative Druck in vielen KMUs erschweren eine systematische Auseinandersetzung mit neuen Technologien. Daraus ergibt sich ein Spannungsfeld zwischen der Sicherung des operativen Tagesgeschäfts und der notwendigen Zukunftsgestaltung.

Vor diesem Hintergrund leitet die Studie zentrale Handlungsempfehlungen für Clustermanagement, Wirtschaftsförderung sowie Unternehmen ab, welche nicht auf einzelne Technologien abzielen, sondern auf übergreifende Ansatzpunkte zur Aktivierung und Umsetzung. Diese umfassen insbesondere die gezielte Information und Sensibilisierung von Unternehmen, die Vernetzung relevanter Akteure, niedrigschwellige Möglichkeiten zum Ausprobieren neuer Anwendungen, die Initiierung gemeinsamer Projekte sowie die strategische Profilierung der Region. Ziel dieser Maßnahmen ist es, Unternehmen – insbesondere KMU – dabei zu unterstützen, Potenziale der Spektralanalytik zu erkennen, erste Erfahrungen zu sammeln und schrittweise in konkrete Anwendungen zu überführen.

Die Studie zeigt auf, dass die Potenziale der Spektralanalytik für die Region erheblich sind, ihre Wirksamkeit jedoch maßgeblich von Sichtbarkeit, Aktivierung und Umsetzung abhängt. Mit dem anstehenden Projekt SpektraCon zeichnen sich bereits erste konkrete Schritte ab, um die gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis zu überführen und die identifizierten Potenziale einer breiten Unternehmenslandschaft zugänglich zu machen.

Als Teil der projektbasierten Maßnahmen kann insbesondere der Aufbau eines „Spektral-Hubs“ als zentrale Innovationsplattform dazu beitragen, Anwendungsbeispiele, Akteure und Unterstützungsangebote rund um die Spektralanalytik sichtbar zu machen und insbesondere KMU einen niedrigschwelligen Einstieg zu ermöglichen.

Insgesamt liefert die Potenzialanalyse eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die relevanten, regionalen Akteure. Sie zeigt auf, wie Spektralanalytik genutzt werden kann, um Innovationsprozesse zu unterstützen, neue Wertschöpfung zu erschließen und die Wettbewerbsfähigkeit der Region Heilbronn-Franken nachhaltig zu stärken.

Hinweis zur Sprachverwendung:

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Folgenden das generische Maskulinum verwendet. Die verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich dabei ausdrücklich auf alle Geschlechter.

Abkürzungsverzeichnis

AutoML	automatisiertes maschinelles Lernen
ATR	abgeschwächte Totalreflexion
CNN	Convolutional Neural Network
DL	Deep Learning
FTIR	Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie
HSI	Hyperspektrale Bildverarbeitung
IR	Infrarot
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
LIBS	Laser-Induced Breakdown Spectroscopy
MIR	mid-infrared / mittleres Infrarot
ML	Machine Learning
NIR	Nahinfrarot
OES	Optische Emissionsspektroskopie
PAT	Process Analytical Technology
PdM	Predictive Maintenance
SVM	Support Vector Machine
THz	Terahertz
UV	Ultraviolett
Vis	visible (sichtbare Spektroskopie)
XAS	Röntgenabsorptionsspektroskopie
XPS	Röntgenphotoelektronenspektroskopie

Inhalt

8 Einleitung

Zielsetzung und Methodik

15 Technologie-Überblick

Grundlagen der Spektral-
analytik und Trends

36 Anwendungsfelder und Markttrends

Etablierte Anwendungen und
Potenziale

47 Regionalanalyse

Unternehmensstruktur,
Herausforderungen und
Entwicklungsperspektiven

59 Handlungsempfehlungen

Optionen zur Stärkung der
Spektralanalytik in der
Wirtschaftsregion

66 Fazit und Ausblick

Kernaussagen und Anschluss-
fähigkeit

SPEKTRALANALYTIK

Eine innovative Querschnittstechnologie mit vielfältigen
Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten sowie
unterschätzten wirtschaftlichen Potenzialen

EINLEITUNG

Die vorliegende Studie wurde für das Projekt TRANSFORMATIVE erstellt und adressiert die Eignung von Spektralanalytik im Rahmen einer Umsetzung der Regionalen Innovationsstrategie Heilbronn–Franken sowie der Innovationsstrategie Baden–Württemberg. Beide Strategien verfolgen das Ziel, Zukunftstechnologien nicht nur zu identifizieren, sondern deren Umsetzung aktiv zu unterstützen und in regionale Wertschöpfungsstrukturen zu überführen. Vor diesem Hintergrund dient die Potenzialanalyse der Spektralanalytik als fundierte Entscheidungs- und Orientierungsgrundlage für eine mögliche strategische Fokussierung und Weiterentwicklung des Themenfeldes in der Region.

Ein zentrales Arbeitspaket von TRANSFORMATIVE ist die Strategieumsetzung. Die vorliegende Studie knüpft genau hier an: Sie untersucht, ob und in welchem Umfang Spektralanalytik das Potenzial besitzt, als Querschnittstechnologie einen Beitrag zur regionalen Transformation zu leisten sowie Innovationen wie neue Produkte und Services hervorzubringen, und wie entsprechende Aktivitäten gezielt angestoßen und begleitet werden können.

Neben der Darstellung technologischer Grundlagen und aktueller Trends werden Anwendungspotenziale aufgezeigt, die sich durch den Einsatz der Technologie für Unternehmen und Wertschöpfungsketten ergeben können.

Die Wahl der Spektralanalytik ist dabei eng mit den strukturellen Stärken und Entwicklungszielen der Wirtschaftsregion Heilbronn–Franken verknüpft. Die Technologie adressiert zentrale Themenfelder der Regionalen Innovationsstrategie wie Digitalisierung und Industrie 4.0, Qualitätssicherung, Ressourceneffizienz, Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft. Gleichzeitig bietet sie vielfältige Anknüpfungspunkte für die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Industrie und Wissenschaft sowie für den Aufbau spezifischer regionaler Kompetenzen. Bestehende Initiativen und Akteure im Bereich datengetriebener Analytik, künstlicher Intelligenz und Mikroelektronik bilden hierfür eine wichtige Grundlage.

Im Aufbau gliedert sich die Studie in zwei Hauptteile. Der erste Teil führt in die Spektralanalytik als Technologie ein und beleuchtet technologische Entwicklungen, Anwendungsfelder und Einsatzmöglichkeiten. Der zweite Teil fokussiert die Wirtschaftsregion Heilbronn–Franken und analysiert bestehende Kompetenzen, Akteure und Strukturen. Darauf aufbauend werden regionale Potenziale herausgearbeitet und Handlungsempfehlungen abgeleitet, die Impulse für eine weiterführende Umsetzung und Vernetzung geben.

Ausgangssituation

Die Region Heilbronn-Franken ist traditionell stark von der Automobilindustrie geprägt und gehört zu den zentralen industriellen Wertschöpfungsräumen in Baden-Württemberg.

Mit der Transformation der gesamten Branche – hin zu Elektromobilität, neuen Antriebskonzepten, Leichtbau, Digitalisierung und nachhaltigen Produktionsweisen – stehen die Regionen, ansässige Unternehmen und ganze Wertschöpfungsketten vor erheblichen strukturellen Veränderungen (e-mobil BW, 2023). Diese Transformation betrifft nicht nur die Automobilhersteller selbst, sondern in besonderem Maße auch die eng verflochtenen Branchen des Maschinen- und Anlagenbaus sowie der Metall- und Elektroindustrie, die einen Großteil der regionalen Wirtschaftsleistung tragen.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Fähigkeit der Unternehmen, sich frühzeitig an veränderte Markt-, Technologie- und Qualitätsanforderungen anzupassen, weiter an Bedeutung. Insbesondere KMU stehen dabei vor der Herausforderung, ihre bestehenden Kernkompetenzen weiterzuentwickeln, neue Anwendungsfelder zu erschließen und gleichzeitig ihre Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Umfeld zu sichern. Neben technologischen Fragestellungen spielen dabei auch organisatorische, qualifikatorische und strategische Aspekte eine wichtige Rolle.

Das Netzwerk TRANSFORMATIVE begleitet diesen Transformationsprozess mit einer Vielzahl von Aktivitäten, Projekten und Vernetzungsangeboten. Ziel ist es, Unternehmen dabei zu unterstützen, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln, Produktionsinnovationen umzusetzen und die Qualifikation ihrer Mitarbeitenden gezielt weiterzuentwickeln. Die vorliegende Studie wurde im Rahmen des Projekts TRANSFORMATIVE erstellt, das die aktive Unterstützung der regionalen Wirtschaft im Strukturwandel zum Ziel hat. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Befähigung von KMU, den Übergang in neue Technologie- und Anwendungsfelder erfolgreich zu gestalten.

Die Transformation der Industrie vollzieht sich dabei auf mehreren Ebenen. Zum einen erfordert sie die Erschließung neuer Geschäftsfelder und Anwendungen, die häufig auf bestehenden technologischen und prozessualen Kernkompetenzen aufbauen. Zum anderen sind Anpassungen und Weiterentwicklungen der bisherigen Geschäftsmodelle notwendig, z.B. durch den Einsatz neuer Produktionsmethoden, den Umgang mit neuen Materialien, die fortschreitende Digitalisierung von Prozessen, steigende Qualitäts- und Dokumentationsanforderungen sowie einen höheren Automatisierungsgrad in der Fertigung.

In diesem Kontext kommt der Spektralanalytik als Schlüssel- und Querschnittstechnologie für Qualitäts- und Materialanalysen eine besondere Bedeutung zu. Spektralanalytische Verfahren ermöglichen es, material- und chemiespezifische Informationen schnell, präzise und meist zerstörungsfrei zu erfassen. Damit adressieren sie zentrale Anforderungen der industriellen Transformation, etwa die Sicherstellung hoher Qualitätsstandards, die Charakterisierung neuer Materialklassen, die Inline-Überwachung von Produktionsprozessen oder die datenbasierte Optimierung von Fertigungsabläufen.

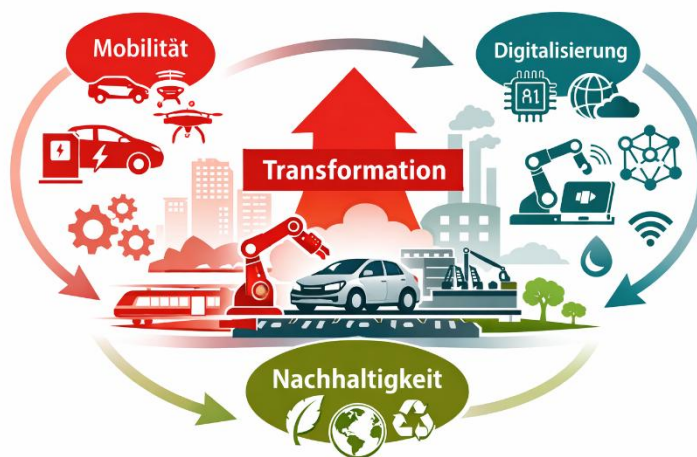


Abbildung 1: Herausfordernde Transformation in neue Technologie- und Anwendungsfelder (Quelle: TECINTELLI)

Spektralanalytik ist jedoch nicht allein als Messtechnik zu verstehen. Der eigentliche Mehrwert entsteht zunehmend durch die Auswertung, Interpretation und Integration der gewonnenen Daten in digitale Prozesse. Die Kombination von Spektralanalytik mit datengetriebener Analytik, Softwarelösungen und Methoden der Künstlichen Intelligenz eröffnet neue Möglichkeiten – von der automatisierten Qualitätssicherung über prädiktive Verfahren bis hin zu neuen datenbasierten Services und Geschäftsmodellen. Gerade für technologieorientierte Softwareunternehmen und Systemintegratoren ergeben sich hier zusätzliche Entwicklungsperspektiven.

Auch wenn Spektralanalytik seit vielen Jahren in Forschung und Industrie etabliert ist, erfährt das Technologiefeld aktuell eine neue Dynamik. Sinkende Kosten, fortschreitende Miniaturisierung, zunehmende Echtzeitfähigkeit sowie die wachsende Integration in digitale Systeme erweitern die Einsatzmöglichkeiten deutlich. Dadurch wird Spektralanalytik für neue Anwendergruppen zugänglich und gewinnt auch in bislang wenig erschlossenen Anwendungsfeldern an Bedeutung.

So entfaltet Spektralanalytik ihre Wirkung entlang einer breiten Wertschöpfungskette. Neben Anwendern in Industrie und Produktion sind Komponenten- und Gerätehersteller, Systemintegratoren, Softwareanbieter sowie Forschungseinrichtungen beteiligt. Ergänzt wird dieses Netzwerk durch Aus- und

Weiterbildungsangebote, die den Aufbau und die Sicherung entsprechender Kompetenzen unterstützen. Diese Vielfalt an Akteuren verdeutlicht, dass Spektralanalytik nicht isoliert zu betrachten ist, sondern als Bestandteil eines vernetzten technologischen Ökosystems.

Zielsetzung und Nutzen der Potenzialanalyse

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die wirtschaftliche und technologische Relevanz der Spektralanalytik für Unternehmen in der Region Heilbronn–Franken systematisch zu erfassen, zu bewerten und in Bezug auf die aktuellen Transformationsanforderungen der Industrie einzuordnen. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), die im Zuge des Strukturwandels vor der Aufgabe stehen, bestehende Kompetenzen weiterzuentwickeln und neue Technologie- und Anwendungsfelder zu erschließen. Es werden die Potenziale spektralanalytischer Verfahren konkretisiert und deren Beitrag zur Bewältigung zentraler technologischer und marktlicher Herausforderungen in der Region aufgezeigt.

Ein Schwerpunkt der Studie sind dabei die Automobilwirtschaft, die Metall- und Elektroindustrie sowie das verarbeitende Gewerbe, die sowohl die industrielle Struktur der Region prägen als auch in besonderem Maße vom Wandel der Mobilität, steigenden Qualitätsanforderungen und zunehmender Prozessdigitalisierung betroffen sind. Typische Anwendungsbranchen der Spektralanalytik wie die Lebensmittel-, Pharma-, Chemie- oder Geologiebranche werden in dem Kapitel "Anwendungsfelder und Markttrends" vorgestellt. Der Fokus in der Auswertung liegt allerdings auf den im Projekt TRANSFORMATIVE adressierten Industriesektoren

Inhaltlich basiert die Studie auf einer technologie- und marktorientierten Analyse. Sie erfasst den aktuellen Stand der Technik relevanter spektralanalytischer Verfahren, identifiziert zentrale technologische Entwicklungslinien und beleuchtet aktuelle Markttrends sowie wirtschaftliche Einsatzfelder. Dabei wird untersucht, in welchen industriellen Anwendungen die Spektralanalytik heute bereits eingesetzt wird und welche neuen Anwendungs- und Geschäftspotenziale sich zukünftig für Unternehmen in der Region ergeben können. Ein besonderer Fokus liegt auf der Frage, wie KMU von diesen Entwicklungen profitieren können – sei es als Anwender, Integratoren oder Anbieter spektralanalytischer Lösungen.

Ein weiterer Bestandteil der Studie ist die Regionalanalyse. Ziel ist es, relevante Akteursgruppen entlang der Wertschöpfungskette in der Region Heilbronn–Franken zu identifizieren und deren Rollen im Kontext der Spektralanalytik zu beleuchten. Dazu zählen Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen, Technologieanbieter, Systemintegratoren sowie industrielle Anwender. In der Region bestehen bereits erste Vernetzungsansätze zwischen relevanten Akteuren. Diese vorhandenen Strukturen bilden eine wichtige Ausgangsbasis, die im Rahmen der Studie systematisch erfasst werden, um in der weiteren Entwicklung des

Themas bestehende bestehende Kompetenzen zu bündeln, neue Kooperationen anzustoßen und nachhaltige Entwicklungs- und Transferpotenziale im Bereich der Spektralanalytik zu erschließen.

Die Studie richtet sich an regionale Akteure aus Wirtschaftsförderung, Forschung und Netzwerkorganisationen und liefert Ansatzpunkte für den gezielten Ausbau von Kooperationen, Transferformaten und Unterstützungsangeboten im Rahmen der industriellen Transformation der Region Heilbronn-Franken.

Diese sollen Unternehmen dabei unterstützen, neue Technologie- und Absatzschwerpunkte zu identifizieren, den Einstieg in spektralanalytische Anwendungen zu erleichtern und bestehende Kompetenzen strategisch weiterzuentwickeln. Auf Basis der technologischen, marktlichen und regionalen Analyse werden hierfür Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Methodik und Ergebnisstruktur

Die vorliegende Studie basiert auf einem mehrstufigen, kombinierten Analyseansatz, der qualitative und quantitative Methoden miteinander verknüpft. Ziel war es, technologische Entwicklungen, Anwendungspotenziale und regionale Besonderheiten der Spektralanalytik systematisch zu erfassen, einzuordnen und in eine Entscheidungsgrundlage für Unternehmen und regionale Akteure zu überführen. Die Methodik wurde dabei so gewählt, dass sie sowohl einen fundierten Überblick über das Technologiefeld ermöglicht als auch konkrete, regional relevante Potenziale sichtbar macht.

Methodisches Vorgehen

Ausgangspunkt der Untersuchung bildeten qualitative Interviews mit ausgewählten Experten aus dem Arbeitsgruppe Spektralanalytik der Wirtschaftsförderung. Diese Gespräche dienten der Konkretisierung der Informationsbedarfe, der Aufnahme unterschiedlicher Perspektiven auf die Potenziale der Spektralanalytik sowie der Einordnung technologischer und marktlicher Entwicklungen aus regionaler Sicht. Die gewonnenen Einschätzungen flossen sowohl in die Ausgestaltung der nachfolgenden Analysen als auch in die Interpretation der Ergebnisse ein.

Darauf aufbauend erfolgte eine systematische Identifikation technologischer Entwicklungen und Trends in der Spektralanalytik. Hierzu wurde ein KI-gestützter Ansatz zur automatisierten Auswertung von Fachinformationen eingesetzt. Analysiert wurden unter anderem Webseiten von Forschungsinstitutionen, einschlägige wissenschaftliche Publikationen sowie weitere relevante Informationsquellen. Grundlage hierfür war der Aufbau eines domänenspezifischen Wissensmodells, das gezielt auf das Themenfeld der Spektralanalytik ausgerichtet wurde. Dieses Wissensmodell ermöglicht es, relevante Technologien, Funktionsprinzipien, Anwendungen und Entwicklungsrichtungen strukturiert zu erfassen und in

Beziehung zueinander zu setzen. Gleichzeitig schafft es eine Grundlage für weiterführende Monitoring- und Vertiefungsanalysen über den Rahmen dieser Studie hinaus.

Ein zentraler Bestandteil der Methodik war die Identifikation potenzieller Anwendungsfelder der Spektralanalytik in der Region Heilbronn-Franken. Hierzu wurden die Webseiten von 619 durch die Wirtschaftsförderung als relevant identifizierten Unternehmen automatisiert analysiert. Mithilfe einer KI-basierten, funktionssemantischen Analyse wurden Hinweise auf bestehende Kompetenzen, Produkte, Prozesse und Herausforderungen der Unternehmen ausgewertet. Ziel war es, jene Anwendungsbereiche zu identifizieren, in denen die Leistungsfähigkeit spektralanalytischer Verfahren grundsätzlich einen Mehrwert bieten kann, insbesondere im Kontext von Qualitätskontrolle sowie Prozessautomatisierung.

Ergänzend zur Sekundärdatenanalyse wurde eine Online-Umfrage unter Unternehmen der Region durchgeführt. Diese diente der Einordnung und Validierung der identifizierten Anwendungspotenziale aus Unternehmenssicht. Im Fokus standen dabei die Bedeutung von Qualitätssicherung entlang der Wertschöpfungskette, der aktuelle und zukünftige Automatisierungsbedarf in der Qualitätsanalyse sowie bestehende Erfahrungen mit spektralanalytischen Verfahren. Darüber hinaus wurden Hemmnisse bei der Technologieadaption und Unterstützungsbedarfe im Hinblick auf den Einstieg in neue Technologiefelder erhoben.

Die Ergebnisse aus der automatisierten Analyse und der Online-Umfrage wurden abschließend zusammengeführt und qualitativ eingeordnet. Dieser integrative Ansatz ermöglicht es, technologische Impulse aus der globalen Entwicklung der Spektralanalytik mit den spezifischen Strukturen, Bedarfen und Einschätzungen der regionalen Unternehmen zu verknüpfen.



Abbildung 2: Primäre Elemente des Vorgehens zur Erstellung dieser Studie (Quelle: TECINTELLI)

Struktur und Logik der Ergebnisse

Zunächst wird ein Überblick über relevante Technologien und grundlegende Anwendungsfelder der Spektralanalytik gegeben. Darauf aufbauend werden technologische Entwicklungsrichtungen und Trends vorgestellt, die sich aus der Analyse nationaler und internationaler Veröffentlichungen ableiten lassen. Diese Trends werden nicht als abschließend oder deterministisch verstanden, sondern als derzeit erkennbare Entwicklungsrichtungen, deren Relevanz sich je nach Anwendungsfeld und zeitlichem Horizont unterschiedlich ausprägen kann.

Im Anschluss werden Anwendungsfelder und Markttrends der Spektralanalytik betrachtet. Dabei liegt der Fokus auf branchenübergreifenden Einsatzszenarien, die für die Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken von besonderer Bedeutung sind. Die Darstellung verbindet etablierte Anwendungen mit potenziellen neuen Einsatzfeldern, die sich aus technologischen Weiterentwicklungen und veränderten Anforderungen an Qualitätssicherung und Prozessüberwachung ergeben.

Ein weiterer Schwerpunkt der Ergebnisdarstellung ist die Regionalanalyse. Sie beleuchtet die Unternehmens- und Akteursstruktur der Region, ordnet relevante Akteure entlang der Wertschöpfungskette ein und zeigt auf, in welchen Bereichen bereits Kompetenzen vorhanden sind und wo sich Entwicklungspotenziale abzeichnen. Die Ergebnisse der Webseitenanalyse und der Online-Umfrage liefern hierzu eine empirische Grundlage, um sowohl bestehende Stärken als auch Hemmnisse und Unterstützungsbedarfe sichtbar zu machen.

Abschließend werden die Erkenntnisse aus den technologischen, marktlichen und regionalen Analysen zusammengeführt. Auf dieser Basis werden Handlungsempfehlungen abgeleitet, die sich sowohl an Unternehmen als auch an regionale Akteure richten. Ziel ist es, konkrete Ansatzpunkte zur Erschließung der identifizierten Potenziale aufzuzeigen und Impulse für weitere Aktivitäten im Kontext der industriellen Transformation der Region Heilbronn-Franken zu geben.

TECHNOLOGIE-ÜBERBLICK

Die vorliegende Studie fokussiert sich auf spektralanalytische Verfahren, die elektromagnetische Strahlung im Bereich zwischen Ultraviolett- (UV) und Infrarotstrahlung (IR) nutzen. Dieser optische Spektralbereich bildet die technologische Grundlage für einen Großteil der heute industriell relevanten Anwendungen der Spektralanalytik und adressiert insbesondere die in dieser Studie betrachteten Branchen und Anwendungsfelder. Optische spektroskopische Verfahren sind in der industriellen Praxis weit verbreitet, technologisch ausgereift und zunehmend auch für den prozessnahen Einsatz geeignet. Sie kommen insbesondere dort zum Einsatz, wo material- und oberflächenbezogene Informationen schnell, präzise und häufig zerstörungsfrei benötigt werden, etwa in der Qualitätskontrolle, der Prozessüberwachung oder der Materialcharakterisierung.

Andere spektralanalytische Verfahren, die außerhalb dieses Wellenlängenbereichs liegen, wurden im Rahmen dieser Studie nicht vertieft betrachtet. Hochenergetische Verfahren wie die Gamma- oder Röntgenspektroskopie haben ihren Schwerpunkt vor allem in spezialisierten Forschungs- oder medizinischen Anwendungen. Analysen im Radiofrequenz- oder Mikrowellenbereich werden primär in Bereichen wie Telekommunikation, Funktechnik oder Radar eingesetzt und adressieren damit andere technologische und marktliche Fragestellungen als jene, die im Fokus dieser Studie stehen.

Grundlagen und Prinzipien der Spektralanalytik

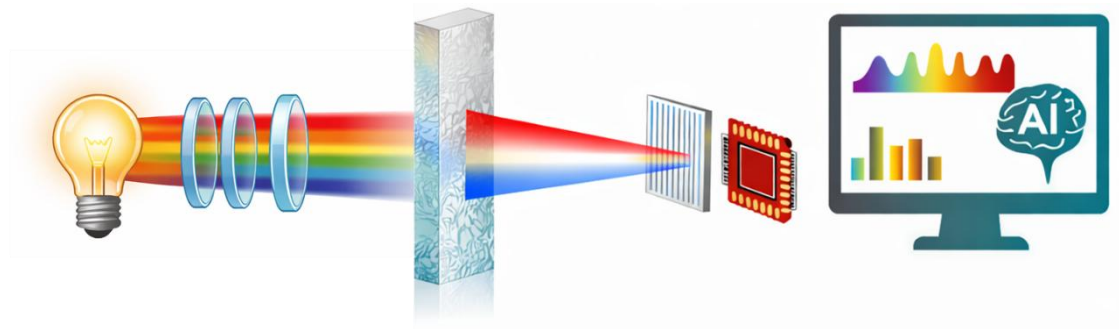
Spektralanalytik bezeichnet eine Gruppe analytischer Verfahren, mit denen Eigenschaften von Materialien durch die Untersuchung ihrer Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung bestimmt werden. Ziel ist es, aus der spektralen Verteilung der Strahlung Rückschlüsse auf die stoffliche Zusammensetzung, den strukturellen Aufbau sowie physikalische und chemische Eigenschaften der untersuchten Materie zu ziehen.

Das grundlegende Prinzip der Spektralanalytik beruht darauf, dass Atome, Moleküle oder Festkörper charakteristische Energiezustände besitzen. Treffen Photonen elektromagnetischer Strahlung auf Materie, kann es zu einer Wechselwirkung kommen, sofern die Energie der Strahlung mit der Energiedifferenz zwischen zwei dieser Zustände übereinstimmt. Diese Wechselwirkung äußert sich typischerweise in der Absorption, Emission oder Streuung von Strahlung (Banwell & McCash, 1994). Die dabei entstehenden spektralen Signaturen sind materialspezifisch und können somit zur Identifikation und Charakterisierung genutzt werden. Im Gegensatz zu rein bildgebenden oder mechanischen Prüfverfahren ermöglicht die

Spektralanalytik somit einen indirekten, überwiegend zerstörungsfreien Zugang zu mikroskopischen und makroskopischen Materialeigenschaften (Hollas, 2004).

Aufbau eines spektroskopischen Messsystems

Ein typisches spektroskopisches System besteht aus mehreren funktionalen Komponenten. Zentrale Elemente sind eine Strahlungsquelle (häufig verbunden mit einer Beleuchtungsoptik), die elektromagnetische Strahlung in einem definierten Spektralbereich erzeugt, eine Wechselwirkungszone mit dem Arbeitsgegenstand (Probe) sowie einem Sensor (häufig verbunden mit einer Optik) und einem Auswertungssystem.



Strahlungsquelle mit
Beleuchtungsoptik

Arbeitsgegenstand
(Probe)

Optik und Sensor

Auswertungsanalytik

Abbildung 3: Vereinfachter Aufbau eines spektroskopischen Messsystems am Beispiel der Absorption (Quelle: TECINTELLI)

Die Strahlungsquelle kann breitbandig oder monochromatisch sein und wird je nach Verfahren durch Lampen, Laser oder Plasmen realisiert. Die von der Quelle emittierte Strahlung wird auf die Probe gerichtet, wo sie mit dem Material wechselwirkt. Anschließend wird die veränderte Strahlung – beispielsweise absorbiert, emittiert oder gestreut – erfasst.

Zur spektralen Zerlegung der Strahlung kommen optische Elemente wie Prismen, Beugungsgitter oder interferometrische Anordnungen zum Einsatz (Skoog et al., 2018). Sensoren wandeln die optischen Signale in elektrische Messgrößen um, die digitalisiert und weiterverarbeitet werden. Der Aufbau kann je nach Anwendungsfall stark variieren, beginnend vom kompakten, mobilen Sensorsystem bis hin zu komplexen Laboraufbauten.

Messprinzipien und Analyse spektraler Daten

Absorptions-, Emissions-, Reflexions- und Streumessungen bilden die grundlegenden physikalischen Messprinzipien der Spektralanalytik. Bei der Absorptionsspektroskopie wird die Abschwächung einer einfallenden Strahlung durch die Probe analysiert. Die gemessene Absorption ist dabei direkt mit der Konzentration und Art der absorbierenden Probe verknüpft.

Emissionsspektroskopische Verfahren erfassen hingegen die von der Probe selbst ausgesandte Strahlung, die beispielsweise nach thermischer, elektrischer oder optischer Anregung entsteht. Die emittierten Spektrallinien oder -bänder sind charakteristisch für bestimmte Atome oder Moleküle und erlauben auf diese Weise eine eindeutige Identifikation.

Ergänzend dazu basieren reflektierte und gestreute Messungen auf der Wechselwirkung der einfallenden Strahlung mit der Probenoberfläche beziehungsweise der Probenstruktur (Neumann, 2012). Bei reflexionsspektroskopischen Verfahren wird die von der Oberfläche zurückgeworfene Strahlung analysiert.

Das eigentliche Ergebnis der Spektralanalytik besteht in der Auswertung der gemessenen Spektren. Dazu werden die Rohdaten zunächst vorverarbeitet, etwa durch Rauschunterdrückung, Kalibrierung oder Normierung. Anschließend erfolgt die Extraktion relevanter spektraler Merkmale wie Peak-Positionen, Intensitäten oder Bandformen.

Zur Interpretation werden diese Merkmale mit Referenzdaten, physikalischen Modellen oder statistischen Verfahren verglichen. Zunehmend kommen auch multivariate Auswerteverfahren und datengetriebene Methoden zum Einsatz, um komplexe Zusammenhänge zu erfassen und robuste Aussagen zu ermöglichen.

Das elektromagnetische Spektrum in der Spektralanalytik

Die Spektralanalyse kann über einen breiten Bereich des elektromagnetischen Spektrums durchgeführt werden, wobei die eingesetzten Wellenlängen in Abhängigkeit von der jeweiligen Methode variieren. Genutzt werden unter anderem Ultraviolett- (UV), sichtbare (VIS), infrarote (IR), Terahertz-, Röntgen- oder Mikrowellenstrahlung. Jeder dieser Spektralbereiche ist durch eine spezifische Photonenenergie und damit durch unterschiedliche Wechselwirkungsmechanismen mit Materie gekennzeichnet.



Abbildung 4: Strahlungsspektrum (Quelle: TECINTELLI)

Grundsätzlich gilt, dass die Energie elektromagnetischer Strahlung mit abnehmender Wellenlänge zunimmt. Kurzwelligere Strahlung wie UV- oder Röntgenstrahlung besitzt eine hohe Photonenenergie und kann elektronische Übergänge oder innere Atomschalen anregen (Banwell & McCash, 1994). Diese hohe Energie führt zu einer starken Wechselwirkung mit dem Material, allerdings häufig auch zu einer geringen Eindringtiefe. Entsprechend eignen sich diese Spektralbereiche besonders für die Analyse von Oberflächen, dünnen Schichten oder für die elementare Zusammensetzung von Materialien. Anwendungen finden sich beispielsweise in der Oberflächenanalytik, der Schichtdickenmessung oder der Untersuchung von Defekten und Verunreinigungen.

Im sichtbaren Spektralbereich (Licht) liegen die Photonenenergien niedriger, sodass hier vor allem elektronische Übergänge in Atomen oder Molekülen angeregt werden. Die gemessenen Spektren hängen oft direkt mit sichtbaren Eigenschaften eines Materials zusammen, etwa seiner Farbe, seiner Durchsichtigkeit oder seinem allgemeinen optischen Verhalten. In der Materialanalytik wird dieser Bereich insbesondere zur Untersuchung von Farbstoffen, Pigmenten, Halbleitermaterialien sowie zur Prozess- und Qualitätsüberwachung eingesetzt.

Langwelligere Strahlung im infraroten Bereich weist eine geringere Photonenenergie auf und interagiert bevorzugt mit molekularen Schwingungs- und Rotationszuständen. Dadurch sind diese Spektralbereiche besonders sensitiv gegenüber chemischen Bindungen und funktionellen Gruppen. Sie eignen sich in hohem Maße zur Analyse organischer Materialien, Polymere, Beschichtungen und biologischer Substanzen. Aufgrund der vergleichsweise größeren Eindringtiefe können zudem auch Volumeneigenschaften oder verborgene Strukturen untersucht werden, beispielsweise bei mehrschichtigen Materialien.

Mikrowellen- und niederenergetische Terahertzstrahlung dringen in vielen Materialien besonders tief ein und reagieren sensibel auf Feuchtegehalt oder strukturelle Inhomogenitäten. Diese Eigenschaften prädestinieren sie für Anwendungen in der zerstörungsfreien Prüfung, der Prozessüberwachung sowie der Analyse von Verbundwerkstoffen.

Der gewählte Spektralbereich bestimmt somit maßgeblich die Art der zugänglichen Materialinformationen. Während hochenergetische, kurzwellige Strahlung vor allem für oberflächennahe und elementare Analysen geeignet ist, ermöglichen langwellige Spektralbereiche eine detaillierte Untersuchung chemischer Bindungen, organischer Materialien und volumetrischer Eigenschaften.

Nutzenfunktionen der Spektralanalytik

Die zentrale Funktion der Spektralanalytik in der Materialanalyse liegt in der Identifikation und Quantifizierung chemischer Elemente und Verbindungen innerhalb eines Materials. Durch die Auswertung der von einer Probe absorbierten, emittierten oder gestreuten elektromagnetischen Strahlung lassen sich sowohl die chemische Zusammensetzung als auch strukturelle Eigenschaften sehr genau bestimmen. Dies ermöglicht eine tiefgehende Charakterisierung von Werkstoffen – von der chemischen Zusammensetzung bis hin zu strukturellen Eigenschaften auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen – und bildet eine wichtige Grundlage für Anwendungen in der Qualitätskontrolle, etwa beim Wareneingang und -ausgang.

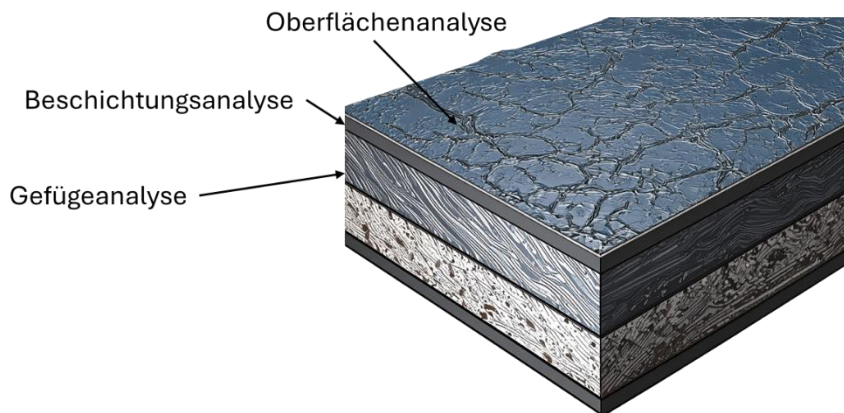


Abbildung 5: Analyseebenen der Spektralanalytik (Quelle: TECINTELLI)

Oberflächencharakterisierung

Ein wesentlicher Anwendungsbereich der Spektralanalytik ist die Charakterisierung von Materialoberflächen. Da viele spektralanalytische Verfahren nur eine geringe Eindringtiefe besitzen, sind sie besonders sensitiv gegenüber oberflächennahen Eigenschaften. Auf diese Weise lassen sich Rückschlüsse auf die Sauberkeit von Oberflächen ziehen, beispielsweise durch den Nachweis organischer Rückstände oder Kontaminationen (Heckner, 2017). Darüber hinaus können spektrale Signaturen genutzt werden, um Rückschlüsse auf Rauheit und Oberflächenchemie zu ziehen, ohne diese direkt geometrisch zu vermessen. Auch die Bestimmung von Beschichtungsdicken sowie die Identifikation von Korrosionsprodukten

gehören zu den etablierten Einsatzfeldern, insbesondere bei metallischen Werkstoffen und funktionalen Beschichtungen.

Bestimmung der chemischen Zusammensetzung

Neben der Oberflächenanalyse zählt die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung zu den Kernkompetenzen der Spektralanalytik. Abhängig vom eingesetzten Spektralbereich und Messprinzip können einzelne Elemente, Legierungsbestandteile oder auch geringste Verunreinigungen identifiziert und quantitativ erfasst werden (Skoog et al., 2018). Element- und molekülspezifische Spektrallinien oder -bänder ermöglichen dabei eine eindeutige Zuordnung. Diese Fähigkeit ist u.a. in der Werkstoffprüfung und der Prozessüberwachung von Bedeutung.

Gefügeanalyse

Über die reine Bestimmung der chemischen Zusammensetzung hinaus ermöglicht die Spektralanalytik auch Aussagen zur inneren Struktur von Werkstoffen auf mikrostruktureller Ebene. Veränderungen in spektralen Linienformen, Intensitäten oder Bandbreiten können Hinweise auf die Mikrostruktur, Korngrößen, Phasenverteilungen sowie auf Inklusionen oder strukturelle Inhomogenitäten liefern. Damit lassen sich Rückschlüsse auf prozessbedingte Unterschiede und auf mechanische oder funktionale Materialeigenschaften ziehen, ohne dass die Probe zerstört wird.

Phasen- und Kristallstrukturanalyse

Ergänzend zur Gefügeanalyse erlaubt die Spektralanalytik die Untersuchung der atomaren und molekularen Ordnung von Materialien. Spektrale Signaturen liefern Informationen über den Kristallinitätsgrad, die Art der Kristallstruktur sowie über das Vorliegen unterschiedlicher Phasen oder Polymorphe (Motz, 2021), da diese die Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung beeinflussen. Auch Veränderungen intermolekularer Wechselwirkungen oder Ordnungszustände lassen sich anhand spezifischer spektraler Merkmale (z.B. Änderung von Linienbreiten oder Bandaufspaltung) identifizieren. Diese Analysen sind insbesondere für die Entwicklung, Optimierung und Qualifizierung von Materialien relevant, deren physikalische Eigenschaften stark von der strukturellen Ordnung auf atomarer Ebene abhängen.

Abgrenzung zu bildgebenden Verfahren

Im Vergleich zu bildgebenden Verfahren wie optischer oder elektronischer Mikroskopie bietet die Spektralanalytik wichtige Vorteile. Während bildgebende Methoden primär geometrische und morphologische Informationen (z.B. Oberflächenbeschaffenheit) liefern, ermöglicht die Spektralanalytik einen direkten Zugang zu chemischen und physikalischen Materialeigenschaften. Sie erlaubt die Identifikation von Elementen, chemischen Bindungen und Phasen auch dann, wenn diese optisch nicht unterscheidbar sind.

Darüber hinaus ist die Spektralanalytik häufig zerstörungsfrei, kontaktlos und für den Inline- oder Atline-Einsatz in Produktionsumgebungen geeignet.

Technologieansätze

Ultraviolett und sichtbare Spektroskopie (UV/Vis)

Die UV/Vis-Spektralanalytik basiert auf der Wechselwirkung von ultravioletter und sichtbarer elektromagnetischer Strahlung mit Materie. Dabei werden Elektronen in Atomen oder Molekülen durch die Absorption von Photonen in höhere elektronische Energiezustände angeregt. Die dabei absorbierten Wellenlängen sind charakteristisch für bestimmte chemische Bindungen, funktionelle Gruppen oder elektronische Übergänge und hängen direkt von der Molekül- und Bandstruktur des Materials ab (Merten & Willmann, 2005). Das resultierende Absorptionsspektrum stellt somit einen materialspezifischen Fingerabdruck dar, der sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen erlaubt.

Der zentrale Nutzen der UV/Vis-Spektralanalytik liegt in der Identifikation und Konzentrationsbestimmung von chemischen Verbindungen. Die Intensität der Absorption erlaubt eine quantitative Bestimmung von Stoffgehalten, während die spektrale Lage der Absorptionsbanden zur Identifikation der chemischen Zusammensetzung genutzt wird. Darüber hinaus eignet sich das Verfahren zur Detektion von Verunreinigungen sowie zur Beurteilung optischer Eigenschaften wie Farbe, Transparenz oder Absorptionsverhalten. Aufgrund der kurzen Messzeiten und der einfachen Signalinterpretation ist UV/Vis besonders für schnelle Prüfaufgaben geeignet.

Einsatzschwerpunkte der UV/Vis-Spektralanalytik liegen in Branchen mit hohem Bedarf an prozessnaher und quantitativer Analytik. Dazu zählen insbesondere die Kunststoff- und Beschichtungsindustrie, die chemische Industrie, die Pharma- und Biotechnologie sowie die Lebensmittelindustrie. Auch in der Halbleiterfertigung, der Umweltanalytik und der Materialentwicklung wird UV/Vis zur Qualitätsüberwachung und Prozesskontrolle eingesetzt. Aufgrund der berührungslosen Messung eignet sich das Verfahren besonders für Inline- und Atline-Anwendungen in industriellen Produktionsprozessen.

Zu den wichtigsten Vorteilen der UV/Vis-Spektralanalytik zählen die zerstörungsfreie Messung, die hohe Messgeschwindigkeit sowie die vergleichsweise einfache und robuste Messtechnik. Das Verfahren ist gut automatisierbar, kosteneffizient und lässt sich gut in bestehende Produktionslinien integrieren. Einschränkungen ergeben sich hingegen aus der begrenzten chemischen Selektivität bei komplexen Materialsystemen und der geringen Eindringtiefe, die die Analyse vorwiegend auf oberflächennahe oder optisch aktive Materialien beschränkt.

Infrarotspektroskopie (IR)

Die IR-Spektroskopie umfasst sowohl den mittleren Infrarotbereich (MIR) als auch den nahen Infrarotbereich (NIR). Sie beruht auf der Anregung molekularer Schwingungen durch die Absorption von Infrarotstrahlung. Trifft Strahlung mit einer Frequenz auf ein Molekül, die der Energie einer seiner Schwingungsmoden entspricht, wird diese absorbiert und das Molekül in einen angeregten Schwingungszustand versetzt (Banwell & McCash, 1994). Welche Wellenlängen dabei absorbiert werden, ist maßgeblich von der Bindungsstärke, der Masse der beteiligten Atome sowie der Symmetrie der Schwingung abhängig.

Die wesentliche Funktion der IR-Spektralanalytik liegt in der Identifikation chemischer Bindungen und funktioneller Gruppen. Dadurch eignet sich das Verfahren besonders zur qualitativen Materialidentifikation, zur Unterscheidung ähnlicher Stoffe sowie zur Detektion von Verunreinigungen oder Alterungsprozessen. Darüber hinaus lassen sich Zusammensetzungsänderungen, Feuchtegehalte oder Vernetzungsgrade erfassen. Aufgrund der kurzen Messzeiten und der minimalen Probenvorbereitung eignet sich IR besonders für schnelle, zerstörungsfreie Prüfungen.

Der Einsatzschwerpunkt der IR-Spektralanalytik liegt vor allem bei organischen und polymeren Materialien. Typische Anwendungsfelder finden sich in der Kunststoff- und Elastomerindustrie, der Chemie- und Pharmaindustrie, der Beschichtungs- und Lacktechnik sowie in der Lebensmittel- und Verpackungsindustrie. Auch in der Werkstoffentwicklung, der Wareneingangskontrolle und der Inline-Qualitätsüberwachung fester Stoffe wird IR-Spektroskopie häufig eingesetzt, da sie sich gut in industrielle Prozesse integrieren lässt.

Zu den Vorteilen der IR-Spektralanalytik zählen die zerstörungsfreie und berührungslose Messung, die hohe chemische Sensitivität gegenüber funktionellen Gruppen sowie die schnelle und robuste Analytik. Das Verfahren ist vergleichsweise kosteneffizient und für industrielle Umgebungen gut geeignet. Einschränkungen ergeben sich aus der begrenzten Eindringtiefe der Infrarotstrahlung sowie aus Überlagerungen von Absorptionsbanden bei komplexen Materialsystemen. Zudem ist die Analyse anorganischer Materialien oder reiner Metalle nur eingeschränkt möglich.

Raman-Spektroskopie

Die Raman-Spektralanalytik basiert auf der inelastischen Streuung von monochromatischem Licht, meist aus einer Laserquelle. Im Gegensatz zur Absorptionsspektroskopie wird das Licht nicht aufgenommen, sondern an den Molekülen gestreut (Hollas, (2004)). Ein sehr kleiner Anteil des gestreuten Lichts erfährt dabei eine Frequenzverschiebung, die der Energie molekularer Schwingungsmoden entspricht. Das resultierende Raman-Spektrum ist damit stark von der molekularen Struktur und Bindungsanordnung abhängig (Banwell & McCash, 1994).

Die Raman-Spektralanalytik hat ihren Schwerpunkt in der detaillierten chemischen und strukturellen Charakterisierung von Materialien. Das Verfahren ermöglicht die Identifikation von Molekülen, Phasen und Kristallmodifikationen sowie die Unterscheidung chemisch ähnlicher Substanzen. Darüber hinaus lassen sich Spannungszustände, Kristallinität, Polymorphie sowie chemische Veränderungen infolge von Alterung oder Degradation erfassen. Aufgrund der hohen Ortsauflösung eignet sich Raman auch für punktuelle Analysen auf Mikro- und Submikrometerebene.

Die Raman-Spektralanalytik eignet sich somit vor allem zur Analyse organischer und anorganischer Materialien, insbesondere dort, wo IR-Spektroskopie an Grenzen stößt. Typische Anwendungsfelder sind die Prozessanalytik, die Qualitätskontrolle und die Identifikation von Materialien. Darüber hinaus wird Raman-Spektroskopie in der Chemie- und Pharmaindustrie, der Halbleiter- und Elektronikfertigung, der Werkstoffentwicklung sowie in der Batterieforschung eingesetzt. Ein besonderer Vorteil ist die Möglichkeit, Messungen durch transparente Materialien oder Verpackungen hindurch durchzuführen.

Zu den Vorteilen zählen die zerstörungsfreie und kontaktlose Messung, die geringe Probenvorbereitung sowie die hohe chemische Spezifität. Auch ist das Verfahren unempfindlich gegenüber Wasser, was es besonders attraktiv für feuchte oder wässrige Proben macht. Einschränkungen ergeben sich aus der vergleichsweise geringen Signalintensität des Raman-Effekts, wodurch leistungsstarke Laser und empfindliche Sensoren erforderlich sind. Zudem kann störende Fluoreszenz in bestimmten Materialien die spektrale Auswertung erschweren.

Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR)

FTIR ist eine spezielle Ausprägung der Infrarotspektroskopie, bei der das Spektrum nicht durch sukzessives Abtasten einzelner Wellenlängen erfasst wird. Stattdessen wird ein sogenanntes Interferogramm aufgenommen, das die Information aller infrarotrelevanten Frequenzen gleichzeitig enthält. Mithilfe einer mathematischen Fourier-Transformation wird dieses Interferogramm in ein klassisches IR-Spektrum überführt. Dieses Messprinzip ermöglicht eine hohe Frequenzgenauigkeit, eine verbesserte Signal-zu-Rausch-Rate sowie kurze Messzeiten, selbst bei schwachen Signalen.

Der wesentlichen Nutzen der FTIR-Spektralanalytik liegt in der schnellen und hochauflösenden Identifikation chemischer Bindungen und funktioneller Gruppen. Das Verfahren erlaubt eine präzise Materialidentifikation, die Analyse von Mischungen sowie die Überwachung chemischer Veränderungen, etwa durch Alterung, Oxidation oder Vernetzung. Darüber hinaus eignet sich FTIR für quantitative Analysen, da Intensitäten einzelner Banden mit Stoffkonzentrationen korrelieren. Die Kombination aus hoher Messgeschwindigkeit und reproduzierbaren Ergebnissen macht FTIR besonders attraktiv für standardisierte Prüfprozesse.

Die FTIR-Spektralanalytik eignet sich somit vor allem für die Analyse organischer und polymerer Materialien sowie komplexer Stoffsysteme. Typische Anwendungsbereiche finden sich in der Kunststoff- und Kautschukindustrie, der Chemie- und Pharmaindustrie, der Beschichtungs- und Klebstofftechnik sowie in der Lebensmittel- und Umweltanalytik. Auch in der Qualitätskontrolle, der Wareneingangsprüfung und der Prozessüberwachung wird FTIR häufig eingesetzt. Durch verschiedene Messmodi, wie Transmission, Reflexion oder ATR (abgeschwächte Totalreflexion), lässt sich das Verfahren flexibel an unterschiedliche Probenformen und industrielle Anforderungen anpassen.

Zu den Hauptvorteilen der FTIR-Spektralanalytik zählen die hohe Signalqualität, die hohe spektrale Auflösung sowie die schnelle Datenerfassung. Das Verfahren ist robust, gut automatisierbar und für den Routineeinsatz in industriellen Umgebungen geeignet. Einschränkungen ergeben sich aus der begrenzten Eindringtiefe der Infrarotstrahlung sowie (entsprechend der „klassischen“ IR-Spektralanalytik) aus möglichen Überlagerungen von Banden bei komplex zusammengesetzten Materialien.

Optische Emissionsspektroskopie (OES)

Die OES basiert auf der Anregung von Atomen oder Ionen in einem hochenergetischen Plasma oder durch elektrische Funkenentladung. Beim Zurückfallen der angeregten Teilchen in energetisch niedrigere Zustände wird elektromagnetische Strahlung emittiert, deren Wellenlängen charakteristisch für die jeweiligen chemischen Elemente sind (Mackus et al., 2009). Das entstehende Emissionsspektrum weist linienartige Signaturen auf, die eine eindeutige Zuordnung der Elemente erlauben. Darüber hinaus steht die Intensität dieser Linien in direktem Zusammenhang mit der Konzentration der jeweiligen Elemente im Material.

Die zentrale Nutzenfunktion der OES liegt in der schnellen und präzisen qualitativen und quantitativen Elementanalyse, insbesondere bei metallischen Werkstoffen. Das Verfahren ermöglicht die Bestimmung von Haupt- und Legierungselementen ebenso wie von Spurenelementen und Verunreinigungen. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit und Reproduzierbarkeit eignet sich OES besonders für die Materialklassifizierung, die Legierungsidentifikation sowie für die Überwachung von Zusammensetzungsgrenzen in der industriellen Qualitätssicherung.

Der Einsatzschwerpunkt der optischen Emissionsspektroskopie liegt in der Metallverarbeitung und -herstellung. Typische Anwendungsfelder finden sich in der Stahl- und Aluminiumindustrie, der Gießerei- und Umformtechnik, dem Maschinen- und Anlagenbau sowie in der Automobil- und Luftfahrtindustrie. OES wird häufig in der Wareneingangsprüfung, der Produktionsüberwachung und der Endkontrolle eingesetzt, vor allem dort, wo schnelle und zuverlässige Aussagen zur chemischen Zusammensetzung erforderlich sind.

Zu den wesentlichen Vorteilen der OES zählen die hohe Genauigkeit bei der Elementanalyse, die kurze Messdauer sowie die Möglichkeit, ein breites Elementspektrum gleichzeitig zu erfassen. Das Verfahren ist in industriellen Umgebungen etabliert und liefert gut reproduzierbare Ergebnisse. Allerdings ergeben sich Einschränkungen aus der notwendigen Anregung der Probe, die in der Regel mit einer lokalen, minimal zerstörenden Materialabtragung verbunden ist. Zudem ist OES primär auf leitfähige, metallische Materialien beschränkt und liefert keine direkten Informationen über chemische Bindungen oder molekulare Strukturen.

Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

LIBS basiert auf der Erzeugung eines kurzlebigen Plasmas durch einen hochenergetischen, gepulsten Laserimpuls, der auf die Oberfläche der Probe fokussiert wird. Durch die hohe Energiedichte werden Materialbestandteile lokal verdampft, atomisiert und ionisiert. Beim anschließenden Abkühlen des Plasmas emittieren die angeregten Atome und Ionen charakteristische Strahlung, deren spektrale Linien eindeutig den enthaltenen chemischen Elementen zugeordnet werden können (Skoog et al., 2018). Das entstehende Emissionsspektrum bildet somit die Grundlage für die elementare Analyse des Materials.

Kernfunktion der LIBS ist die schnelle, direkte und orts aufgelöste Elementanalyse. Das Verfahren ermöglicht die qualitative und – bei entsprechender Kalibrierung – auch quantitative Bestimmung von Haupt-, Neben- und Spurenelementen. Aufgrund der punktuellen Messung können zudem elementare Verteilungen, Schichtaufbauten oder Inhomogenitäten erfasst werden. Die Fähigkeit, Messungen nahezu in Echtzeit durchzuführen, prädestiniert LIBS für Prozessüberwachung und Materialsortierung.

Die LIBS-Technologie wird daher vor allem in Bereichen eingesetzt, in denen eine flexible, robuste und prozessnahe Elementanalyse erforderlich ist. Typische Anwendungsfelder finden sich in der Metall- und Werkstoffindustrie, der Recycling- und Rohstoffsartierung sowie in der Energie- und Umwelttechnik. Ein besonderer Vorteil ist die Eignung für Inline- und Remote-Messungen sowie der Verzicht auf aufwendige Probenvorbereitung.

Im Vergleich zu anderen Verfahren bietet LIBS daher eine breite Einsetzbarkeit für nahezu alle Materialklassen, eine hohe Messgeschwindigkeit und die Möglichkeit der orts aufgelösten Analyse. Das Verfahren ist automatisierbar und auch unter rauen industriellen Bedingungen einsetzbar. Einschränkungen ergeben sich dagegen aus der lokal minimal zerstörenden Messung sowie aus Herausforderungen bei der quantitativen Auswertung, da Plasmazustände und Matrixeffekte das Emissionsverhalten beeinflussen können. Für präzise Konzentrationsbestimmungen ist daher eine geeignete Kalibrierung erforderlich.

Übersichtstabelle

Verfahren	Einsatzbereiche	Vor- / Nachteile (der Spektroskopieansätze untereinander)
UV/Vis	Konzentrationsmessung von Lösungen, Kunststoffindustrie, Beschichtungen, Farben, Bestimmung von Nitrat- und Phosphatgehalten in Lebensmitteln, Wirkstoffquantifizierung in pharmazeutischen Lösungen	+ Einfach, kostengünstig, schnell; gut für quantitative Analysen – Kaum materialspezifisch, eingeschränkt für feste Stoffe
IR	Materialidentifikation, Polymer- und Kunststoffanalyse, Feuchte- und Bindungsanalyse, Identitätsprüfung von pharmazeutischen Rohstoffen, Bestimmung organischer Verbindungen in geologischen Proben	+ Gute chemische Fingerabdrücke organischer Materialien – Geringe Eindringtiefe, oft Probenvorbereitung nötig
Raman	Werkstoffidentifikation, Kristallinität, Spannungs- und Phasenanalyse, Polymorphie-Analyse von Arzneistoffen (Pharma), Mineralidentifikation (Geologie)	+ Kaum Probenvorbereitung, gut für feste Stoffe – Schwaches Signal, störanfällig durch Fluoreszenz
FTIR	Qualitätskontrolle von Polymeren, Beschichtungen, Klebstoffen, Analyse von Fetten und Ölen in Lebensmitteln, Überwachung chemischer Reaktionsprozesse in der Prozesschemie	+ Höhere spektrale Auflösung und Reproduzierbarkeit als klassisches IR – Empfindlich gegenüber Wasser, begrenzte Inline Fähigkeit

Verfahren	Einsatzbereiche	Vor- / Nachteile (der Spektroskopieansätze untereinander)
OES	Legierungs- und Elementanalyse von Metallen (Stahl, Aluminium) in Produktion und Wareneingang, Spurenelementanalyse in geologischen Gesteinsproben, Elementgehaltsbestimmung in pharmazeutischen Ausgangsstoffen	+ Sehr schnelle und präzise Elementanalyse – Zerstörend, nur für leitfähige Materialien geeignet
LIBS	Elementanalyse von Metallen, Schlacken, Pulvern, Recyclingmaterialien, Schnell-Screening von Böden und Sedimenten (Geologie), Inline-Elementanalyse in chemischen Produktionsprozessen	+ Inline- und Remote-fähig, kaum Probenvorbereitung – Geringere Genauigkeit als OES, komplexe Kalibrierung

Weitere Ansätze

Neben den in dieser Studie behandelten Kerntechnologien existiert eine Vielzahl weiterer spektralanalytischer Ansätze, die vor allem in der Grundlagenforschung oder in hochspezialisierten Anwendungsfeldern eingesetzt werden und daher für typische industrielle Einsatzszenarien nur eingeschränkt geeignet sind. Diese Verfahren erfordern häufig einen hohen apparativen Aufwand sowie laborähnliche Umgebungsbedingungen und haben somit nur eine begrenzte Robustheit gegenüber industriellen Prozessbedingungen.

Eine erste Gruppe von Technologieansätzen bilden hochenergetische spektroskopische Verfahren im Röntgen- und Gammastrahlungsbereich. Dazu zählen unter anderem Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS), Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) oder Mößbauer-Spektroskopie (Banwell & McCash, 1994, Motz, 2021). Diese Methoden liefern äußerst detaillierte Informationen zur elektronischen Struktur, zu Oxidationszuständen oder zur chemischen Umgebung einzelner Elemente. Aufgrund der erforderlichen Vakuumbedingungen, der komplexen Messtechnik und sicherheitsrelevanter Aspekte werden sie jedoch überwiegend in Laborumgebungen und Forschungseinrichtungen eingesetzt.

Ein weiteres Ansatzfeld umfasst niederenergetische spektroskopische Verfahren im Mikrowellen- und Radiowellenbereich, wie die Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) oder die Elektronenspinresonanz (ESR) (Skoog et al., 2018). Diese Techniken ermöglichen Analysen molekularer Strukturen, chemischer Umgebungen und von dynamischen Prozesse. Trotz ihrer hohen analytischen Aussagekraft sind sie für den industriellen Einsatz meist ungeeignet, da sie große, kostenintensive Anlagen, stabile Magnetfelder und kontrollierte Messbedingungen erfordern.

Darüber hinaus existieren ultraschnelle und nichtlineare spektroskopische Ansätze, etwa zeitaufgelöste Laserspektroskopie, Pump-Probe-Verfahren oder Mehrphotonenspektroskopie. Diese Methoden erlauben die Untersuchung sehr schneller Prozesse auf femto- oder pikosekundärer Zeitskala und liefern Informationen zur Dynamik elektronischer und vibronischer Zustände (Hollas, 2004). Ihr Einsatz beschränkt sich jedoch weitgehend auf spezialisierte Forschungslabore, da sie hohe Anforderungen an Laserquellen, Synchronisation und Datenauswertung stellen.

Ergänzend dazu sind auch terahertz- und radiowellenbasierte spektroskopische Verfahren zu nennen, die beispielsweise zur Untersuchung dielektrischer Eigenschaften, von Feuchtegehalten oder von Ladungsträgerdynamiken eingesetzt werden (Hochrein, 2018). Obwohl diese Ansätze für spezielle industrielle Anwendungen zunehmend an Bedeutung gewinnen, befinden sie sich vielfach noch in einem frühen Entwicklungs- oder Nischenstadium und sind bislang nicht breit in industrielle Qualitäts- und Prozessanalytik integriert.

Zusammenfassung der Vor- und Nachteile

Da die Spektralanalytik einen direkten Zugang zu chemischen, strukturellen und teilweise auch physikalischen Eigenschaften von Werkstoffen ermöglicht, stellt sie ein wichtiges Instrument zur Materialcharakterisierung dar. Zu den zentralen Vorteilen zählen die hohe chemische Selektivität, die Möglichkeit zur zerstörungsfreien und berührungslosen Analyse sowie die Eignung für schnelle Messungen und prozessnahe Anwendungen. Viele spektroskopische Verfahren erlauben zudem eine quantitative Auswertung und sind über unterschiedliche Spektralbereiche hinweg flexibel an verschiedene Materialklassen anpassbar. Dadurch kann ein breites Anwendungsspektrum von der Wareneingangskontrolle über die Prozessüberwachung bis hin zur Endprüfung abgedeckt werden.

Den genannten Punkten stehen jedoch auch Einschränkungen gegenüber. Dazu zählen insbesondere der teilweise hohe apparative Aufwand, die begrenzte Mobilität klassischer Analysesysteme sowie Einschränkungen bei der Eindringtiefe oder der Ortsauflösung einzelner Verfahren. In komplexen Materialsystemen können zudem Überlagerungen spektraler Signaturen auftreten, die eine aufwendige Datenanalyse oder ergänzende Messmethoden erforderlich machen. Auch die Integration in bestehende

Produktionsumgebungen stellt insbesondere bei empfindlichen oder laborgebundenen Systemen eine Herausforderung dar.

Aktuelle technologische Entwicklungen zielen daher darauf ab, diese Nachteile zu reduzieren oder zu überwinden. Die zunehmende Verfügbarkeit von Handheld- und tragbaren Spektrometern erweitert den Einsatz der Spektralanalytik deutlich in Richtung mobiler, dezentraler Prüfungen direkt am Einsatzort, ermöglichen eine hochauflösende Analytik über große Spektralbereiche hinweg und verbessern damit Sensitivität und Flexibilität. Hybride Ansätze wie die hyperspektrale Bildverarbeitung verbinden spektrale Information mit räumlicher Auflösung und schließen damit die Lücke zwischen klassischer Spektroskopie und bildgebenden Verfahren. Ergänzend eröffnen Terahertz-Spektroskopie und Quantensensorik neue Möglichkeiten zur Erfassung von Suboberflächen- und Tiefeninformationen, niedrigerenergetischen Materialanregungen sowie hochpräzisen physikalischen Zustandsgrößen wie elektrischen und magnetischen Feldern, lokalen Temperatur- und Spannungszuständen, Ladungsträgerdichten oder Feuchteverteilungen, die mit klassischen spektralanalytischen Verfahren nur eingeschränkt zugänglich sind.

Technologische Entwicklungen und Trends

Dieses Kapitel beleuchtet ausgewählte technologische Entwicklungen in der Spektralanalytik, die für industrielle Anwendungen von besonderer Relevanz sind. Im Fokus stehen dabei sowohl Weiterentwicklungen der Sensorik als auch der Analytik, insbesondere im Hinblick auf Leistungsfähigkeit, Integration in industrielle Prozesse und praktische Anwendbarkeit.

Der Begriff „Trend“ wird dabei im Sinne beobachtbarer technologischer Entwicklungsrichtungen verwendet. Die dargestellten Entwicklungen zeigen aktuelle Innovationspfade auf, eine Prognose über deren zukünftige Durchsetzung oder Marktreife erfolgt jedoch nicht. Die zeitliche Einordnung, wie sie auf dem Radarchart abgebildet ist, erfolgte qualitativ aufgrund von Indizien und stellt keine evaluierte Bewertung dar (relative Entfernung bis zur Marktrelevanz).

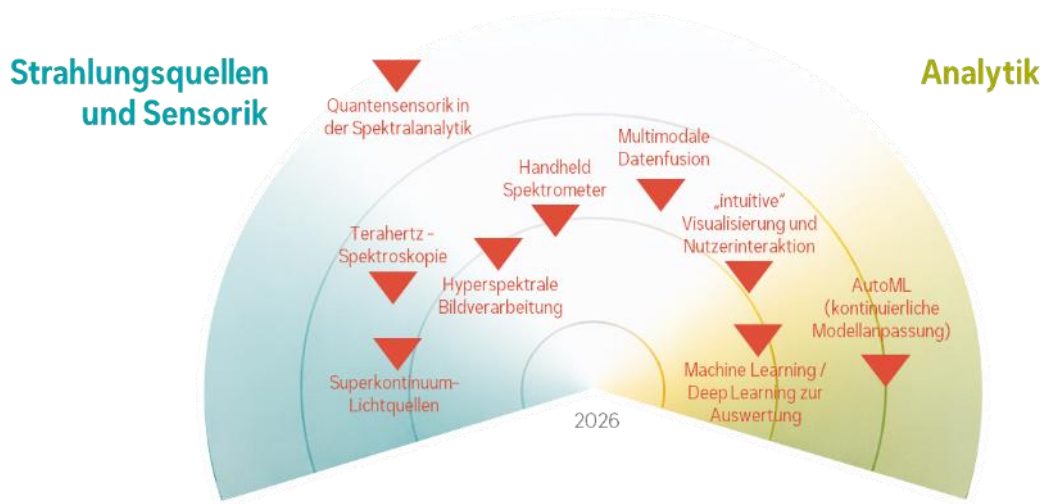


Abbildung 6: Technologische Trends in der Spektralanalytik (qualitative Einordnung) (Quelle: TECINTELLI)

Strahlungsquelle und Sensorik

Handheld- sowie tragbare und mobile Spektrometer

Spektrometer werden überwiegend als stationäre Messsysteme ausgeführt, die im Laborumfeld oder in separaten Messräumen eingesetzt werden. Solche Off-Line-Messungen bieten zwar hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, sind jedoch mit Zeitverzögerungen, logistischem Aufwand und eingeschränkter Prozessnähe verbunden. Vor diesem Hintergrund stellt die zunehmende Verfügbarkeit von Handheld- und tragbaren Spektrometern einen der wichtigsten aktuellen Trends in der Spektralanalytik dar (Research Nester, o.J.).

Verschiedene Hersteller bieten inzwischen kompakte, robuste und batteriebetriebene Geräte an, die eine direkte Messung vor Ort ermöglichen. Diese mobilen Systeme decken unterschiedliche Spektralbereiche ab, darunter UV/Vis NIR, Raman, LIBS oder Röntgenfluoreszenz, und werden insbesondere für Materialidentifikation, Wareneingangskontrollen oder mobile Qualitätsprüfungen eingesetzt (IPMS, 2022). Ein wesentlicher Treiber dieser Entwicklung ist der Fortschritt in der Miniaturisierung optischer Komponenten, Sensoren und Elektronik.

Ein Entwicklungszweig ist die Integration spektralanalytischer Sensorik in Smartphones oder ähnlich kompakte Geräte. Erste Ansätze zeigen, dass einfache spektroskopische Messungen direkt mit mobilen Endgeräten realisiert werden können, wodurch sich völlig neue Anwendungsszenarien ergeben. Parallel

dazu existieren bereits spezialisierte mobile Anwendungen, etwa zur Kohlenstoffbestimmung in Stahl oder zur schnellen Legierungsidentifikation direkt in der Produktion.

Breitbandige Quellen für Hochauflösungs-Analytik (Superkontinuum-Lichtquellen)

Ein weiterer Trend betrifft die Weiterentwicklung der Lichtquellen, insbesondere den Einsatz breitbandiger Superkontinuum-Lichtquellen. Diese Quellen erzeugen ein breites, kontinuierliches Spektrum, das sich häufig vom sichtbaren Bereich bis in das nahe oder mittlere Infrarot erstreckt (FAU, o.J.). Dadurch lassen sich mehrere spektrale Informationen gleichzeitig erfassen, ohne die Lichtquelle wechseln zu müssen.

Superkontinuum-Lichtquellen sind verfügbar und werden zunehmend stabiler, kompakter und leistungsfähiger. Sie ermöglichen eine hochauflösende Spektralanalytik mit hoher Intensität über einen großen Wellenlängenbereich hinweg (Petermann, 2012). Dies eröffnet neue Möglichkeiten für multivariate Analysen, empfindliche Detektionsaufgaben und die Kombination mehrerer spektroskopischer Verfahren in einem System.

Während entsprechende Lichtquellen bereits gut etabliert sind, existieren bislang nur vereinzelt vollständig integrierte Spektrometerlösungen. Der Trend geht jedoch in Richtung entsprechender Gesamtsysteme, insbesondere für anspruchsvolle Analytaufgaben, bei denen hohe spektrale Auflösung, Flexibilität und kurze Messzeiten erforderlich sind.

Hyperspektrale Bildverarbeitung (HSI) und hybride Systeme

Die hyperspektrale Bildverarbeitung stellt eine Weiterentwicklung klassischer Spektralanalytik dar, indem sie spektrale und räumliche Information miteinander kombiniert. Im Gegensatz zu herkömmlichen Bildgebungssystemen, die lediglich RGB-Informationen erfassen, liefert HSI für jedes Pixel ein vollständiges Spektrum über hunderte schmaler Wellenlängenbänder hinweg. Dadurch lassen sich chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften flächig und orts aufgelöst analysieren (Aderhold & Brüning, 2019).

Dieser Ansatz schließt eine Lücke zwischen bildgebenden Verfahren und punktueller Spektroskopie. Während klassische Spektralanalyse meist nur Einzelpunkte oder kleine Messbereiche erfasst, erlaubt HSI die gleichzeitige Analyse ganzer Oberflächen oder Materialströme. Besonders relevant kann dies für Anwendungen wie Sortierung, Defekterkennung oder Materialklassifikation sein.

In der industriellen Praxis wird hyperspektrale Bildverarbeitung derzeit vor allem als Ergänzung zu bestehenden bildgebenden Systemen eingesetzt, etwa in der Kunststoffsortierung oder in der Lebensmittel- und Recyclingindustrie. Der Trend geht zunehmend in Richtung hybrider Systeme, die HSI mit weiteren Sensortechnologien kombinieren, um sowohl geometrische als auch chemische Informationen in einem integrierten Ansatz zu erfassen (FRAMOS, o.J.). Herausforderungen bestehen aktuell noch in der Datenmenge, der Auswertungsgeschwindigkeit und der Systemintegration, diese werden jedoch durch Fortschritte in der Sensorik und Datenverarbeitung weiter verringert.

„Die Kombination optischer Erkennungsverfahren mit spektralanalytischer Materialanalyse verbessert die Qualität und Zuverlässigkeit der Ergebnisse deutlich. Ein wesentlicher Treiber dieser Entwicklung ist der Einsatz multipler Sensoren sowie die Fusion unterschiedlicher Sensordaten, wodurch Informationen umfassender und robuster ausgewertet werden können.“

Dr. Frank Duschek (Abteilungsleiter, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - DLR)

Terahertz -Spektroskopie

Die Terahertz -Spektroskopie nutzt elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich zwischen Mikrowellen und Infrarotlicht, typischerweise zwischen 0,1 und 10 Terahertz (THz). Dieser Spektralbereich weist besondere Eigenschaften auf, die ihn für bestimmte materialanalytische Fragestellungen attraktiv machen (das-Nano, o.J., VDI-Z, 2024). Viele nichtleitende Materialien wie Kunststoffe, Gummi, Papier oder Verbundwerkstoffe sind für THz-Strahlung weitgehend transparent, während strukturelle oder chemische Unterschiede detektierbar bleiben.

Dadurch ermöglicht die THz-Spektroskopie berührungs- und zerstörungsfreie Messungen mit vergleichsweise hoher Eindringtiefe. Schichtstrukturen, innere Defekte, Feuchteverteilungen oder Materialinhomogenitäten lassen sich analysieren, ohne das Bauteil zu öffnen oder zu beschädigen. Diese Eigenschaften prädestinieren die Technologie insbesondere für die Qualitätskontrolle von mehrschichtigen oder empfindlichen Materialien (Hochrein, 2018). Obwohl THz-Spektroskopiesysteme bislang kaum industriell etabliert sind, ist eine zunehmende Relevanz erkennbar. Vor allem die Fortschritte bei kompakten THz-Quellen und -Sensoren sowie bei der Systemintegration tragen dazu bei, bestehende technische Hürden zu reduzieren.

Quantensensorik in der Spektralanalytik

Ein besonders zukunftsweisender Trend – allerdings mit einem längeren Zeithorizont – ist der Einsatz quantenbasierter Sensorik in der Spektralanalytik. Quantensensoren nutzen gezielt Quanteneffekte wie Superposition oder Verschränkung von Atomen und Photonen, um Messungen mit außergewöhnlich hoher Präzision durchzuführen (Hollas, 2004, Chen & Dong, 2025, Kühnemann, o.J.). Dadurch lassen sich extrem kleine Signaländerungen detektieren, die mit klassischen Sensoren nur schwer oder gar nicht erfassbar wären.

Ein zentrales Merkmal quantensensorischer Ansätze ist, dass sie prinzipbedingt eine sehr hohe Stabilität und Genauigkeit aufweisen und in bestimmten Ausprägungen keine klassische Kalibrierung benötigen (IPM, o.J.). Dies eröffnet neue Möglichkeiten für absolute Messungen, langfristig stabile Sensorsysteme und hochpräzise Analytik, etwa bei schwachen Signalen oder in stark verrauschten Umgebungen.

Der industrielle Einsatz der Quantensensorik befindet sich derzeit noch in einem frühen Entwicklungsstadium und ist weiterhin stark forschungsgetrieben. Langfristig wird jedoch erwartet, dass quantenbasierte spektroskopische Sensoren insbesondere dort zum Einsatz kommen, wo konventionelle Technologien an ihre physikalischen Grenzen stoßen.

Datenanalyse

Im Bereich der Analytik stellt der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) einen der zentralen Treiber für die Weiterentwicklung der Spektralanalytik dar. Während klassische Auswerteverfahren häufig auf physikalischen Modellen, einfachen Kalibrationen oder linearen Regressionsansätzen beruhen, eröffnen moderne datengetriebene Methoden neue Möglichkeiten, um komplexe spektrale Zusammenhänge robuster, schneller und automatisierter zu erschließen (Blake & Kelly, 2025). Dadurch verschiebt sich der Fokus zunehmend von der reinen Datenerfassung hin zur intelligenten Interpretation und Nutzung der gewonnenen Informationen.

Prägend ist hierbei der Einsatz von Machine Learning (ML) und Deep Learning (DL) zur Spektrenauswertung. ML-Verfahren wie Support Vector Machines (SVM), Random Forests oder Partial Least Squares werden bereits seit Jahren erfolgreich zur Klassifikation, Quantifizierung und Mustererkennung in Spektraldaten eingesetzt (Algernon, Feistkorn & Lenz, 2019). Deep-Learning-Ansätze, insbesondere neuronale Netze und Convolutional Neural Networks (CNN), gehen darüber hinaus einen Schritt weiter, indem sie relevante Merkmale direkt aus Rohspektren oder hyperspektralen Daten lernen können, ohne dass diese zuvor manuell extrahiert werden müssen (Guo & Shen, 2025). Dies ist insbesondere bei stark überlagerten Spektren, nichtlinearen Effekten oder variablen Prozessbedingungen von Vorteil. KI-basierte Analytik ermöglicht so eine höhere Robustheit gegenüber Störeinflüssen wie Rauschen, Temperatur-

oder Oberflächenvariationen und erlaubt gleichzeitig die Auswertung sehr großer Datenmengen, wie sie etwa bei Inline-, Imaging- oder Hochdurchsatz-anwendungen anfallen. In der industriellen Praxis führt dies zu stabileren Modellen, einer verbesserten Übertragbarkeit zwischen Anlagen und zu kürzeren Einrichtungs- und Kalibrierungszeiten.

Eng damit verbunden ist der Ansatz des Edge Computing in Spektrometern. Anstatt Spektraldaten vollständig an zentrale Server oder Cloud-Plattformen zu übertragen, werden zunehmend Rechenkapazitäten direkt in das Messgerät integriert. Dadurch können Vorverarbeitungsschritte wie Rauschunterdrückung, Normalisierung, Merkmalsextraktion oder sogar vollständige KI-Modelle direkt am Sensor ausgeführt werden (Xia, J. & Xia, Y., 2024, Žilvinas, Tervydis & Svilainis, 2024). Edge Computing reduziert Latenzzeiten erheblich und ermöglicht Echtzeitentscheidungen, was insbesondere für Inline- und Regelungsanwendungen im Produktionsumfeld entscheidend ist. Gleichzeitig sinkt die Abhängigkeit von stabilen Netzwerkverbindungen und externen IT-Infrastrukturen, was die Datensicherheit erhöht und den Einsatz in sensiblen oder abgeschotteten Produktionsumgebungen erleichtert. Für mobile und Handheld-Spektrometer ist Edge Computing zudem eine zentrale Voraussetzung, um leistungsfähige Analytik bei begrenzter Energie- und Rechenleistung zu realisieren.

Ein weiterer wichtiger Entwicklungstrend betrifft die „intuitive“ Visualisierung und Benutzerinteraktion. Die Spektralanalytik galt bisher als Experten getriebene Technologie, bei der Interpretation und Bewertung der Messergebnisse spezielle Fachkenntnisse erfordern. Moderne Analytiklösungen zielen zunehmend darauf ab, diese Komplexität für Anwender zu reduzieren. Anstelle von Rohspektren oder komplexen Multivariaten-Modellen werden Ergebnisse in Form klarer Kennzahlen, Ampelsysteme, Wahrscheinlichkeiten oder verständlicher Material- und Qualitätsklassen dargestellt (IPM, 2019). Interaktive Dashboards, 2D-/ 3D-Visualisierungen und kontextbezogene Handlungsempfehlungen unterstützen Anwender dabei, Messergebnisse schnell und sicher zu interpretieren. Dies senkt die Einstiegshürde und fördert die Akzeptanz spektraler Messverfahren bei nicht spezialisierten Nutzern.

Ergänzend zu diesen Trends zeichnen sich weitere Entwicklungen in der Analytik ab, die den Einsatz der Spektralanalytik weiter verbreitern können. Dazu zählt unter anderem die zunehmende Automatisierung der Modellerstellung und -pflege, etwa durch Ansätze des automatisierten maschinellen Lernens (AutoML), die die Auswahl geeigneter Modelle, Parameter und Vorverarbeitungsschritte vereinfachen (Rombo.ai, o.J.). Ebenso gewinnt die kontinuierliche Modellanpassung an Bedeutung, um Drift-Effekte in Prozessen oder Materialien ohne aufwendige Neukalibration

„Die Integration von KI-basierter Mustererkennung verändert die Anwendung der Spektralanalytik grundlegend. Analytische Modelle lassen sich zunehmend einfacher mit bekannten Proben trainieren und anschließend auf unbekannte Proben übertragen, wodurch die Interpretation der Messergebnisse deutlich vereinfacht wird. Dadurch wird Spektralanalytik auch für Anwender ohne tiefgehende analytische Vorkenntnisse praktikabel.“

Sven Schönfelder (Geschäftsführer, INSION GmbH)

zu kompensieren. Darüber hinaus spielt die Kombination von Spektraldaten mit weiteren Sensor- und Prozessdaten eine wachsende Rolle (IOSB, o.J.). Durch multimodale Datenfusion lassen sich genauere und kontextreichere Analysen realisieren, die über reine Stoffidentifikation hinausgehen und beispielsweise Prozesszustände, Qualitätsprognosen oder Anomalien zuverlässig erfassen.

ANWENDUNGSFELDER UND MARKTTRENDS

Etablierte Anwendungen mit Branchenfokus

Die Spektralanalytik ist in der industriellen Praxis ein etabliertes Werkzeug zur schnellen, objektiven und häufig zerstörungsfreien Material- und Prozessbewertung. Ihr besonderer Mehrwert liegt in der Fähigkeit, chemische Zusammensetzung, strukturelle Eigenschaften und materialabhängige Zustände unmittelbar aus dem Messsignal abzuleiten (Gauglitz & Vo-Dinh, 2003). Entsprechend findet sie entlang der gesamten Unternehmenswertschöpfungskette Anwendung – vom Wareneingang über die laufende Prozessüberwachung bis hin zur Warenausgangskontrolle. In all diesen Einsatzfeldern dient sie dazu, Qualität zu sichern, Prozesse zu stabilisieren und Ausschuss sowie Nacharbeit zu reduzieren.

Ein klassisches Einsatzfeld stellt die Wareneingangsprüfung dar, insbesondere im Rahmen der Werkstoffprüfung. Hier wird Spektralanalytik eingesetzt, um angelieferte Rohstoffe, Halbzeuge oder Bauteile schnell und eindeutig zu identifizieren und mit den spezifizierten Materialanforderungen abzugleichen. Optische Emissionsspektroskopie (OES) oder LIBS kommen beispielsweise zur Elementanalyse metallischer Werkstoffe zum Einsatz, um Verwechslungen von Legierungen oder Abweichungen in der chemischen Zusammensetzung frühzeitig zu erkennen (IFAM, o.J.). Für nichtmetallische Materialien, Kunststoffe oder Beschichtungen werden häufig IR-, Raman- oder NIR-Verfahren genutzt, um Materialtypen, Additive oder Verunreinigungen zu bestimmen. Der Einsatz der Spektralanalytik im Wareneingang ermöglicht eine schnelle Freigabe oder Sperrung von Lieferungen und reduziert das Risiko, fehlerhafte Materialien im Produktionsprozess zu verwenden.

Ein dynamisches Anwendungsfeld ist die Prozessüberwachung. Hier wird die Spektralanalytik direkt in laufende Fertigungsprozesse integriert, um Materialzustände und Prozessparameter in Echtzeit zu erfassen. Ein Beispiel ist die Schweißprozessüberwachung mittels LIBS (Quackatz, Griesche & Kannengießer, o.J.). Während des Schweißens kann das durch den Laser oder Lichtbogen entstehende Plasma spektral analysiert werden, um Rückschlüsse auf die Elementzusammensetzung, Durchmischung oder das Vorhandensein von Verunreinigungen zu ziehen. Abweichungen vom Sollzustand lassen sich so unmittelbar erkennen, wodurch Prozessfehler frühzeitig detektiert und korrigiert werden können.

Auch in der automatischen Sortierung, z.B. im Recycling, spielt die Spektralanalytik eine zentrale Rolle. Hier werden Systeme eingesetzt, um Kunststoffe, Verbundmaterialien oder Metalle anhand ihrer spektralen Signaturen zu identifizieren und automatisiert zu trennen. Dadurch lassen sich Materialströme effizienter aufbereiten, die Recyclingquote erhöhen und die Qualität der Rezyklate verbessern. In der Wärmebehandlung wird Spektralanalytik genutzt, um materialabhängige Zustände wie Oxidationsgrade,

Phasenumwandlungen oder Oberflächenveränderungen zu überwachen. Spektrale Messungen können hier als indirekte Indikatoren für Temperaturführung, Atmosphärenzusammensetzung oder Bearbeitungsdauer dienen und so zur Prozessstabilisierung beitragen.

Ein weiteres wachsendes Einsatzfeld sind additive Fertigungsprozesse, insbesondere der metallische 3D-Druck. Hierfür wird Spektralanalytik zur Überwachung des Schmelzbades, der Pulverzusammensetzung oder der Prozessatmosphäre eingesetzt. Emissions- oder Reflexionsspektren liefern Informationen über Temperatur, chemische Zusammensetzung und Prozessstabilität. Auf diese Weise können Defekte wie Porosität, Materialentmischung oder unzureichende Verschmelzung frühzeitig erkannt werden, was die Bauteilqualität und Reproduzierbarkeit verbessert.

In der Wareenausgangskontrolle dient die Spektralanalytik der abschließenden Qualitätsbewertung fertiger Produkte. Ein Schwerpunkt liegt hier auf der Oberflächenanalyse. Mit Verfahren wie Raman-, IR- oder UV/Vis-Spektroskopie lassen sich Verunreinigungen, Rückstände oder unerwünschte chemische Veränderungen auf Oberflächen detektieren. Dies ist insbesondere in Branchen mit hohen Qualitäts- und Sauberkeitsanforderungen relevant, etwa im Automobil-, Maschinenbau- oder Elektronikbereich. Darüber hinaus spielt die Beschichtungskontrolle eine wichtige Rolle. Spektralanalytische Verfahren ermöglichen die Prüfung von Schichtzusammensetzung, Homogenität und teilweise auch Schichtdicke, ohne die Beschichtung zu beschädigen.

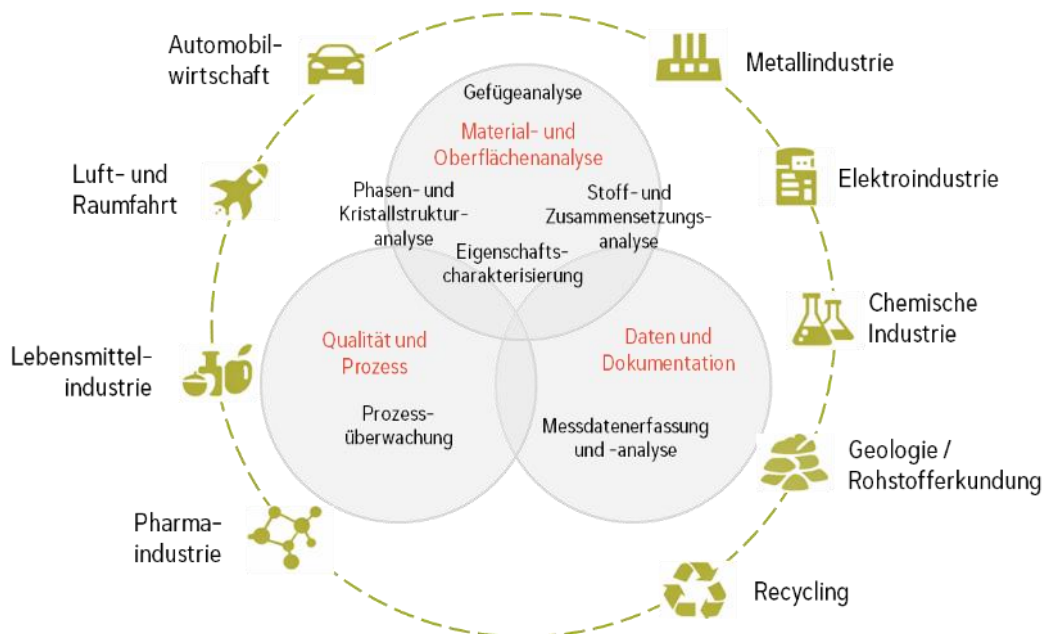


Abbildung 7: Anwendungsfunktionen der Spektralanalytik über Branchen hinweg (Quelle: TECINTELLI)

Anwendungen in weiteren Branchen

Pharmaindustrie

Ein zentrales Einsatzfeld in der Pharmaindustrie ist die Prozessanalytik im Rahmen von „Process Analytical Technology“ (PAT) (Helmdach, 2013). Spektralanalytische Verfahren werden zur Überwachung von Wirkstoffkonzentrationen, Mischhomogenität oder Trocknungsprozessen eingesetzt. IR-, Raman- oder NIR-Spektren liefern in Echtzeit Informationen über chemische Zusammensetzung, Polymorphie und Feuchtegehalt. Dadurch können Abweichungen frühzeitig erkannt, Chargenfreigaben beschleunigt und regulatorische Anforderungen an eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung erfüllt werden.

Chemische Industrie

In der chemischen Industrie dient Spektralanalytik insbesondere der Inline-Überwachung von Reaktionsprozessen. Veränderungen in Emissions-, IR- oder Raman-Spektren geben Aufschluss über Ausgangsstoff- und Produktkonzentrationen, Nebenreaktionen oder Verunreinigungen (Kraft, 2023). Auf diese Weise lassen sich Reaktionsverläufe in Echtzeit steuern und Sicherheitsrisiken durch unkontrollierte Prozessabweichungen reduzieren. Gleichzeitig unterstützt die kontinuierliche Datenerfassung eine ressourceneffiziente und energieoptimierte Produktion.

Lebensmittelindustrie

In der Lebensmittelindustrie wird Spektralanalytik zur schnellen und zerstörungsfreien Qualitätskontrolle eingesetzt. NIR- oder HSI-Systeme ermöglichen die Bestimmung von Inhaltsstoffen wie Fett-, Protein- oder Wassergehalt sowie die Detektion von Fremdkörpern oder Verfälschungen. Spektrale Informationen liefern zudem Hinweise auf Reifegrad, Frische oder Lagerstabilität. Dadurch können Produktionsprozesse automatisiert überwacht, Ausschuss reduziert und gleichbleibende Produktqualitäten sichergestellt werden.

Geologie / Rohstofferkundung

In der Geologie und Rohstofferkundung wird Spektralanalytik zur mineralogischen Charakterisierung von Gesteinen, Erzen und Sedimenten eingesetzt. Reflexions- oder Emissionsspektren erlauben Rückschlüsse auf Elementzusammensetzung und Mineralphasen. Mobile Systeme ermöglichen Analysen direkt im Feld oder im Bohrkernlager (Wiesheu, 2017). Auf diese Weise können Lagerstätten effizienter bewertet, Explorationskosten gesenkt und Entscheidungsprozesse in der Rohstoffgewinnung beschleunigt werden.

Aktuelle Markttrends und Potenziale

Die Marktentwicklung der kommenden Jahre ist in vielen Industriebereichen durch steigende technologische Komplexität, zunehmenden Wettbewerbsdruck und verschärfte regulatorische Anforderungen geprägt. In diesem Umfeld gewinnt die Spektralanalytik weiter an Bedeutung, da sie zentrale Anforderungen an Qualitätssicherung, Prozessstabilität und -automatisierung sowie Materialverständnis adressiert. Darauf aufbauend lassen sich verschiedene Markttrends identifizieren, die den Einsatz und die Weiterentwicklung spektralanalytischer Verfahren beeinflussen und darüber hinaus neue Anwendungspotenziale eröffnen.

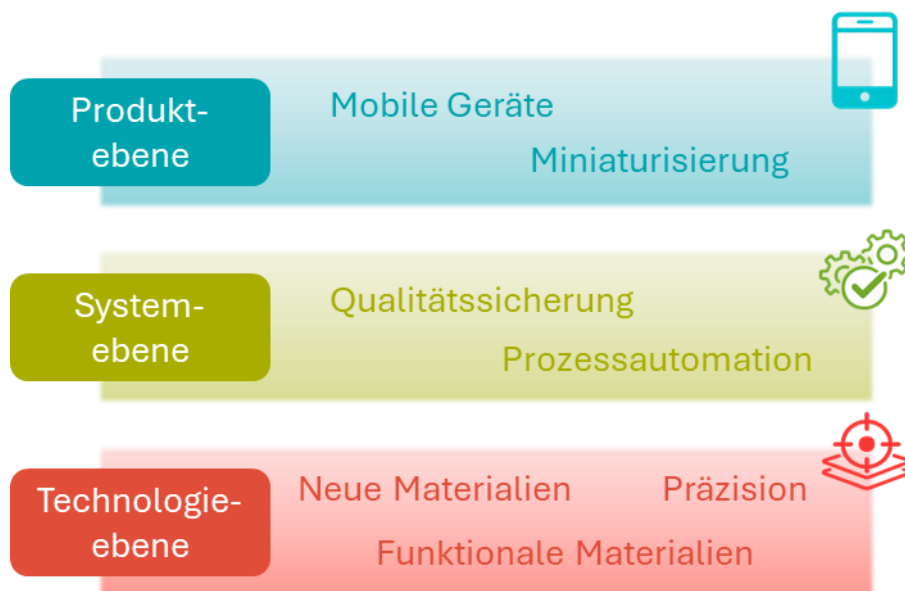


Abbildung 8: Die wichtigsten Trends für die Anwendung von Spektralanalytik (Quelle: TECINTELLI)

Ein zentraler Trend sind steigende Qualitätsanforderungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Kunden erwarten eine gleichbleibend hohe Produktqualität, während Normen, Zertifizierungen und Haftungsanforderungen kontinuierlich verschärft werden. Gleichzeitig nehmen die Toleranzgrenzen für Abweichungen bei Materialzusammensetzung, Oberflächenzustand oder Beschichtungseigenschaften ab. Die Spektralanalytik bietet hier den Vorteil, dass sie reproduzierbare und materialnahe Informationen liefert. Sie ermöglicht eine lückenlose Dokumentation von Materialeigenschaften und Prozesszuständen und unterstützt damit sowohl interne Qualitätssicherungsprozesse als auch externe Nachweispflichten. Insbesondere in sicherheitskritischen Branchen wie Automobilbau, Luft- und Raumfahrt oder Medizintechnik wird der Einsatz spektralanalytischer Methoden zunehmend eingesetzt, um Abweichungen frühzeitig zu erkennen und Ausschuss sowie Rückrufrisiken zu minimieren.

Eng damit verknüpft ist der Trend zur zunehmenden Automatisierung industrieller Prozesse. Produktionslinien werden stärker vernetzt, Durchlaufzeiten verkürzt und manuelle Prüfschritte zunehmend durch automatisierte Systeme ersetzt. Materialkontrollen müssen dabei in Echtzeit und direkt im Prozess erfolgen, ohne den Produktionsfluss zu unterbrechen. Spektralanalytische Verfahren eignen sich in besonderem Maße für diese Anforderungen, da viele Messungen berührungslos, schnell und inline durchgeführt werden können. Verfahren wie LIBS, NIR- oder UV/Vis-Spektroskopie lassen sich in automatisierte Anlagen integrieren und liefern kontinuierlich Messdaten zur Prozessüberwachung (Kern, 2019). In Kombination mit automatisierter Auswertung und Regelung ermöglichen sie eine adaptive Prozessführung, bei der Abweichungen sofort erkannt und korrigiert werden können. Damit wird die Spektralanalytik zu einem wichtigen Enabler für Industrie-4.0-Konzepte und datengetriebene Produktionssysteme.

Ein weiterer bedeutender Markttrend stellt der zunehmende Einsatz neuer Werkstoffe dar. Leichtbaukonzepte, funktionale Anforderungen und Nachhaltigkeitsaspekte führen zu einer verstärkten Nutzung von Faserverbundwerkstoffen sowie Hochleistungs- und Leichtmetallen. Diese Werkstoffe weisen oft komplexe, inhomogene oder anisotrope Strukturen auf, die mit klassischen Prüfverfahren nur eingeschränkt erfassbar sind. Spektralanalytische Methoden bieten hier die Möglichkeit, sowohl chemische Zusammensetzung als auch strukturelle Eigenschaften zu analysieren. Im Bereich der Faserverbundwerkstoffe können IR- oder Raman-Verfahren beispielsweise Harzsysteme, Aushärtungsgrade oder Verunreinigungen charakterisieren. Bei 3D-gedruckten Werkstoffen ermöglicht die Spektralanalytik die Überwachung von Pulverqualität, Schmelzprozessen und Materialhomogenität.

Darüber hinaus gewinnen funktionale Materialien zunehmend an Bedeutung. Materialien übernehmen nicht mehr nur eine tragende oder schützende Funktion, sondern besitzen zusätzliche elektrische, optische, thermische oder chemische Eigenschaften. Beispiele sind funktionale Beschichtungen, Multilayer-Systeme oder intelligente Materialien mit definierten Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften. Die Analyse solcher Materialien erfordert mehrdimensionale Ansätze, die über eine reine Element- oder Stoffidentifikation hinausgehen. Spektralanalytik ermöglicht hier die gleichzeitige Untersuchung von Schichtdicken, Zusammensetzung, Homogenität und Grenzflächenzuständen (Stolte, 2008). Durch die Kombination unterschiedlicher spektraler Verfahren oder durch hyperspektrale Ansätze lassen sich komplexe Materialsysteme umfassend charakterisieren. Dies ist insbesondere für Anwendungen in der Elektronik, Energietechnik oder Medizintechnik von hoher Relevanz, wo kleinste Abweichungen große Auswirkungen auf die Funktionalität haben können.

Ein weiterer prägender Trend ist der steigende Bedarf an Präzision bei gleichzeitig zerstörungsfreier Prüfung. Bauteile werden filigraner, Materialien teurer und Produktionslosgrößen kleiner, wodurch zerstörende Prüfmethoden zunehmend an ihre Grenzen stoßen. Gleichzeitig steigt der Anspruch an Messgenauigkeit und Nachweisgrenzen. Neue Entwicklungen wie Quantensensoren versprechen hier einen deutlichen Fortschritt. Durch die Nutzung quantenmechanischer Effekte können spektralanalytische Messungen mit sehr hoher Empfindlichkeit und Präzision durchgeführt werden, teilweise ohne aufwendige Kalibrierung. Perspektivisch eröffnen sich damit neue Einsatzmöglichkeiten für hochpräzise, zerstörungsfreie Materialanalysen, etwa in der Halbleiterfertigung, der Werkstoffentwicklung oder bei sicherheitskritischen Anwendungen.

Schließlich ist die Miniaturisierung und der Trend zu mobilen Geräten ein wichtiger Markttreiber. Spektrometer werden zunehmend kompakter, robuster und kostengünstiger, wodurch sie auch außerhalb des klassischen Labors einsetzbar sind. Handheld- und mobile Systeme ermöglichen Materialanalysen direkt vor Ort, etwa in der Instandhaltung (FSP, 2025), im Recycling oder bei der Wareneingangsprüfung. Dieser Trend senkt die Einstiegshürden für Unternehmen, insbesondere für kleine und mittlere Betriebe, und erweitert die Einsatzmöglichkeiten der Spektralanalytik erheblich. In Kombination mit drahtloser Datenübertragung und cloud- oder edgebasierter Auswertung entstehen flexible, dezentrale Analyselösungen, die schnelle Entscheidungen direkt am Einsatzort unterstützen.

Eine Übersicht über die Vielzahl an anwendungsnahen Forschungsprojekten würde den Rahmen dieser Studie an dieser Stelle sprengen, könnte aber in einer digitalen Informationssammlung mittels dynamischer Steckbriefe aufgebaut und automatisiert gemonitort werden.

„Der Markt zeigt ein deutliches Potenzial für mobile und kosteneffiziente spektralanalytische Systeme zur schnellen Stoffklassenerkennung. Dies unterstützt den Trend der Dokumentationspflichten zur Qualitätssicherung und Prozesskontrolle für zunehmend automatisierte Anwendungen.“

Prof. Dr. Andreas Reichert (DHBW Heilbronn)

Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken (SWOT)

Stärken

- Hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit: Spektrale Messungen ermöglichen präzise und objektive Ergebnisse mit hoher Vergleichbarkeit zwischen Messungen.
- Robuste und etablierte Messmethoden: Viele spektralanalytische Technologien sind seit Jahrzehnten erprobt und verfügen über ausgereifte Normen, Referenzdaten und Standards.
- Hohe Informationsdichte: Spektralanalytische Verfahren liefern in einer einzigen Messung detaillierte Informationen zur chemischen Zusammensetzung, Materialstruktur und zu funktionalen Eigenschaften eines Werkstoffs.

- Zerstörungsfreie Analyse: Viele Verfahren erlauben eine berührungslose und nicht-destruktive Untersuchung, wodurch auch hochwertige oder sicherheitskritische Bauteile geprüft werden können.
- Schnelle Analysezeiten: Abhängig vom Verfahren können Messungen innerhalb von Sekunden bis Millisekunden erfolgen und sind damit für Inline-Anwendungen geeignet.
- Breite Einsetzbarkeit: Die Spektralanalytik ist in zahlreichen Bereichen etabliert, darunter industrielle Qualitätskontrolle, Prozessüberwachung, Umweltanalytik, Medizin und Forschung.
- Reduzierter Laboraufwand: Inline- und Atline-Messungen ermöglichen Analysen ohne aufwändige externe Laboruntersuchungen und verkürzen Durchlaufzeiten.
- Langfristige Kostenvorteile: Schnellere Analysen, geringere Probenlogistik und weniger Laboraufwand senken mittel- bis langfristig die Betriebskosten.
- Hohe Individualisierbarkeit: Systeme und Auswertelgorithmen lassen sich flexibel an spezifische Materialien, Prozesse und Qualitätsanforderungen anpassen.

Schwächen

- Hohe Systemkosten: Die Anschaffung leistungsfähiger Spektrometer sowie Kosten für teilweise aufwändige Kalibrierung, Wartung und Peripherie stellen insbesondere für KMU eine Einstiegshürde dar.
- Komplexe Datenauswertung: Die Interpretation spektraler Daten erfordert häufig spezialisiertes Fachwissen, während entsprechend qualifiziertes Personal begrenzt verfügbar ist.
- Material- und Matrixabhängigkeit: Messergebnisse können stark von Oberflächenzustand, Probenmatrix oder Umgebungsbedingungen beeinflusst werden, was zusätzliche Korrektur- und Referenzmodelle erfordert.
- Begrenzte Eindringtiefe einzelner Verfahren: Je nach Wellenlängenbereich sind Aussagen oft auf Oberflächen oder oberflächennahe Zonen beschränkt.

Chancen

- Steigende Qualitätsanforderungen: Wachsende Anforderungen an Produktqualität, Rückverfolgbarkeit und Normenkonformität erhöhen den Bedarf an präziser Materialanalytik.
- Industrie 4.0 und Inline-Messtechnik: Der Trend zu automatisierten, datengetriebenen Produktionsprozessen schafft neue Einsatzfelder für spektralanalytische Echtzeit- und Inline-Systeme.
- KI-gestützte Auswertung: Machine-Learning-Ansätze verbessern Mustererkennung, Robustheit und Automatisierung der Auswertung und senken die Einstiegshürden für Anwender.

- Neue Materialklassen: Der zunehmende Einsatz von Batteriematerialien, Halbleitern, Verbundwerkstoffen und Recyclingmaterialien erfordert leistungsfähige und flexible Analytikverfahren.
- Miniaturisierung und mobile Systeme: Kompakte, kostengünstigere Geräte erschließen neue Anwendungen außerhalb des Labors und fördern eine breitere industrielle Nutzung.
- Enabling Technology für datengetriebene Produktion: Spektralanalytik schafft die Datengrundlage für automatisierte Qualitätssicherung und KI-gestützte Prozessoptimierung.
- Effizienzsteigerung und Kostensenkung: Echtzeitfähige Messdaten ermöglichen frühzeitige Fehlererkennung, reduzierte Ausschussquoten und eine optimierte Ressourcennutzung.

Risiken

- Substitution durch alternative Sensorik: In bestimmten Anwendungen können einfachere, günstigere oder spezialisierte Sensoren ausreichend sein und die Spektralanalytik verdrängen.
- Akzeptanzbarrieren in der Industrie: Hoher Integrationsaufwand, Schulungsbedarf und Unsicherheiten bei der Ergebnisinterpretation können die Einführung neuer Systeme verzögern.
- Wirtschaftlicher Druck: Kostensensibilität in der Industrie kann Investitionen in hochwertige Analytiksysteme bremsen, insbesondere bei unklarem Return on Investment.

Innovationspotenziale

Die aktuelle Entwicklungsrichtung der Spektralanalytik lässt sich als Übergang vom klassischen Messgerät hin zum „intelligenten“, integrierten Echtzeit-Sensor beschreiben. Während Spektrometer bisher überwiegend als isolierte Laborinstrumente eingesetzt wurden, entstehen zunehmend kompakte, robuste und vernetzte Sensorsysteme, die sich direkt in Produktionsumgebungen integrieren lassen (ITWM, o.J.). Diese Systeme kombinieren spektralanalytische Verfahren mit weiteren optischen Sensoren, Bildgebung und leistungsfähiger Datenanalyse. Durch die enge Kopplung von Sensorik und Analytik wird die Spektralanalytik zu einem aktiven Bestandteil der Prozessüberwachung und -regelung, bis hin zu Ansätzen wie der vorausschauenden Wartung (Predictive Maintenance, PdM).

Vorteile dieser Entwicklung sind deutlich verkürzte Messzeiten und eine vollständig zerstörungsfreie Analyse, die auch bei empfindlichen oder hochwertigen Materialien eingesetzt werden kann. Gleichzeitig steigt die räumliche Auflösung der Messungen, insbesondere durch bildgebende und hyperspektrale Verfahren, sodass Materialeigenschaften nicht nur punktuell, sondern flächig erfasst werden können. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Echtzeitfähigkeit der Systeme: Messung, Auswertung und Ergebnisbereitstellung erfolgen zunehmend ohne zeitliche Verzögerung. In Verbindung mit Miniaturisierung und energieeffizienter Elektronik ermöglicht dies auch den mobilen Einsatz, etwa in Form von Handgeräten oder direkt integrierten Sensorsystemen an Maschinen und Anlagen.

Damit ergibt sich ein breites Spektrum neuer Anwendungen in der Produktion. So kann beispielsweise die Materialreinheit unmittelbar vor einem kritischen Bearbeitungsschritt, etwa vor dem Kleben oder Beschichten, überprüft werden (Zajonz, 2022). Reinigungsschritte oder andere vorbereitende Prozesse müssen dann nur noch bedarfsorientiert durchgeführt werden, was Zeit, Energie und Ressourcen spart. Ebenso ermöglicht die schnelle, zerstörungsfreie Überprüfung der Oberflächensauberkeit eine kontinuierliche Qualitätsabsicherung, etwa bei Behältern in der chemischen Industrie oder bei Bauteilen mit hohen Sauberkeitsanforderungen. Insgesamt führt die Kombination aus intelligenter Sensorik, leistungsfähiger Analytik und klaren Markttreibern dazu, dass die Spektralanalytik zunehmend direkt in den industriellen Alltag integriert wird und dort einen deutlichen Beitrag zu Effizienz, Qualität und Prozesssicherheit leistet.

Schlussfolgerungen

Die in der vorliegenden Studie betrachteten Branchen und Anwendungsfelder sind in den kommenden Jahren maßgeblich durch einen steigenden Automatisierungsgrad, eine zunehmende Vernetzung von Produktionsprozessen sowie wachsende Anforderungen an Qualität, Rückverfolgbarkeit und Prozessstabilität geprägt. Klassische, stichprobenbasierte Prüfkonzeppte stoßen in diesem Umfeld zunehmend an ihre Grenzen. Stattdessen steigt der Bedarf an kontinuierlicher, prozessnaher Überwachung, die Abweichungen frühzeitig erkennt und eine unmittelbare Reaktion im laufenden Betrieb ermöglicht. Die Inline- und Echtzeitüberwachung entwickelt sich damit von einer ergänzenden Qualitätssicherungsmaßnahme zu einem wichtigen Bestandteil datengetriebener Produktionssysteme.

Gleichzeitig zeigt die Nutzung der Spektralanalytik entlang der Wertschöpfungskette – vom Wareneingang über die Prozessüberwachung bis zur Warenausgangskontrolle –, dass die Verfahren technologisch reif und in vielen Branchen bewährt sind. Der aktuelle Marktwandel vollzieht sich daher weniger auf Ebene der grundsätzlichen Einsatzfähigkeit, sondern vor allem hinsichtlich Integrationstiefe, Automatisierungsgrad und Nutzerzugänglichkeit. Sie liefert reproduzierbare und hochauflösende Informationen über Materialzusammensetzungen, Oberflächenzustände und funktionale Eigenschaften. Kurze Messzeiten und die Möglichkeit der direkten Integration in automatisierte Anlagen prädestinieren spektralanalytische Verfahren für die kontinuierliche Prozessüberwachung. Materialabweichungen, Verunreinigungen oder instabile Prozesszustände können frühzeitig erkannt und korrigiert werden, wodurch Ausschuss, Nacharbeit und Prozessrisiken reduziert werden. In Kombination mit automatisierter Auswertung und Regelung wird die Spektralanalytik zu einem wesentlichen Faktor für selbstüberwachende Produktionsprozesse.

Die Spektralanalytik selbst befindet in einem technologischen Wandel, somit können neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Miniaturisierung, robuste Sensorkonzepte und mobile Systeme senken die Einstiegshürden und ermöglichen den Einsatz außerhalb der üblichen Laborumgebungen. KI-gestützte

Auswerteverfahren automatisieren die Interpretation komplexer Messdaten und machen spektralanalytische Systeme zunehmend auch für Nicht-Spezialisten nutzbar. Dadurch verlagert sich der Einsatz von punktuellen Prüfungen hin zu durchgängigen Inline-Anwendungen entlang kompletter Prozessketten. Neue Potenziale entstehen insbesondere in der Materialreinheitskontrolle vor kritischen Bearbeitungsschritten, der bedarfsorientierten Prozessführung sowie der kontinuierlichen Überwachung von Oberflächen- und Materialzuständen. Insgesamt entwickelt sich die Spektralanalytik somit vom spezialisierten Analysewerkzeug hin zu einem integrierten, „intelligenten“ Sensorsystem.

REGIONALANALYSE HEILBRONN-FRANKEN

Akteure und Kompetenzen –
Entwicklungschancen und Handlungsoptionen

REGIONALANALYSE

Charakterisierung der Region

Die Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken zählt zu den industriell geprägten und zugleich innovationsstarken Regionen Baden-Württembergs. Sie ist durch eine hohe Dichte an mittelständischen Unternehmen, familiengeführten Betrieben sowie international erfolgreichen Weltmarktführern und Hidden Champions gekennzeichnet. Industrie und unternehmerische Wertschöpfung bilden seit Jahrzehnten das Rückgrat der regionalen Wirtschaft und prägen Struktur, Beschäftigung und Innovationsdynamik.

Mit rund 64.000 Unternehmen und mehr als 430.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten verfügt die Region über eine breite wirtschaftliche Basis. Ein vergleichsweise hoher Anteil der Bruttowertschöpfung entfällt auf das Produzierende Gewerbe, während zugleich auch der Dienstleistungssektor eine bedeutende Rolle spielt (Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken, o.J.). Diese Kombination aus industrieller Stärke und dienstleistungsnahen Aktivitäten bildet eine wichtige Grundlage für technologische Innovationen und die Weiterentwicklung bestehender Wertschöpfungsketten.

Das Verarbeitende Gewerbe ist dabei klarer Kern der regionalen Wirtschaftsstruktur. Besonders stark vertreten sind der Maschinenbau, die Automobil- und Zulieferindustrie, die Metall- und Elektroindustrie sowie angrenzende industrielle Branchen. Die Unternehmen sind häufig international ausgerichtet, was sich unter anderem in einer hohen Exportquote widerspiegelt. Gleichzeitig ist die Region durch eine ausgeprägte Zuliefer- und Systemkompetenz geprägt, die sich entlang komplexer industrieller Wertschöpfungsnetze erstreckt.

Charakteristisch für Heilbronn-Franken ist dabei nicht nur die Präsenz produzierender Unternehmen, sondern die Breite der Wertschöpfung: Von Forschung und Entwicklung über Komponenten- und Anlagenbau, Systemintegration und industrielle Dienstleistungen bis hin zu software- und datengetriebenen Angeboten sind zahlreiche Stufen der Wertschöpfung vertreten (IHK Heilbronn-Franken, o.J.). Ergänzt wird dieses Spektrum durch Aus- und Weiterbildungsangebote, die zur Sicherung von Fachkräften und Kompetenzen beitragen. Diese Vielfalt schafft günstige Voraussetzungen für Querschnittstechnologien, die mehrere Stufen der Wertschöpfung gleichzeitig adressieren.

Ein besonderer regionaler Differenzierungsfaktor liegt in der dynamischen Entwicklung des Innovations- und Forschungsökosystems. Mit dem Bildungscampus Heilbronn, der Präsenz international renommierter Einrichtungen wie der Technischen Universität München, der ETH Zürich sowie der Fraunhofer-

Gesellschaft haben sich in den vergangenen Jahren exzellente Forschungs- und Transferstrukturen etabliert. Hinzu kommt mit dem IPAI (Innovation Park Artificial Intelligence) ein Leuchtturmprojekt im Bereich Künstliche Intelligenz, das die Region als Standort für datengetriebene Innovationen positioniert.

Diese Kombination aus industrieller Substanz, daten- und softwareorientierten Kompetenzen sowie leistungsfähiger Forschung bildet ein Umfeld, in dem neue Technologien nicht nur entwickelt, sondern auch in die Anwendung überführt werden können. Insbesondere an den Schnittstellen zwischen Industrie, Digitalisierung, Qualitätssicherung und datenbasierter Analytik entsteht ein Ökosystem, das die Weiterentwicklung bestehender Geschäftsmodelle ebenso ermöglicht wie die Erschließung neuer Anwendungsfelder.

Gleichzeitig steht die Region – wie große Teile Baden-Württembergs – unter erheblichem Transformationsdruck. Strukturveränderungen in der Automobilindustrie, steigende Anforderungen an Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz sowie der zunehmende Wettbewerbsdruck durch internationale Märkte stellen viele Unternehmen vor neue Herausforderungen. Trotz dieser Entwicklungen bleibt die Beschäftigung in der Region auf hohem Niveau, was auf die weiterhin starke industrielle Basis und die Anpassungsfähigkeit vieler Unternehmen hinweist.

Ein prägendes Merkmal der regionalen Wirtschaftsstruktur ist zudem der hohe Anteil an Auftrags- und Lohnfertigung, insbesondere im industriellen Umfeld und in automobilnahen Wertschöpfungsketten. Viele Unternehmen sind stark auf einzelne Großkunden ausgerichtet und verfügen über geringe eigene Produkt- oder Systemverantwortung. Diese Abhängigkeit erhöht die Verwundbarkeit gegenüber konjunkturellen Schwankungen und strukturellen Veränderungen und verstärkt den Handlungsdruck, sich technologisch weiterzuentwickeln, neue Anwendungsfelder zu erschließen und zusätzliche Wertschöpfungsanteile zu übernehmen.

Vor diesem Hintergrund kommt der Fähigkeit, technologische Innovationen frühzeitig zu erkennen, zu bewerten und in bestehende Wertschöpfungsstrukturen zu integrieren, eine zentrale Bedeutung zu. Die Charakterisierung der Region zeigt, dass Heilbronn-Franken hierfür über günstige Voraussetzungen verfügt: eine breite industrielle Basis, vielfältige Akteursstrukturen entlang der Wertschöpfung, wachsende Kompetenzen in Digitalisierung und Künstlicher Intelligenz sowie eine enge Verzahnung von Wirtschaft und Forschung. Diese Ausgangslage bildet den Rahmen für die nachfolgende Regionalanalyse und die Betrachtung spezifischer Technologiepotenziale.

Zielsetzung und Vorgehen

Ziel der Regionalanalyse ist es, die Relevanz und die Einsatzmöglichkeiten der Spektralanalytik für Unternehmen in der Wirtschaftsregion Heilbronn–Franken systematisch zu erfassen und einzuordnen. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, welche Rolle spektralanalytische Verfahren entlang der regionalen industriellen Wertschöpfungsketten heute bereits spielen und in welchen Bereichen sich künftig zusätzliche Potenziale für Anwendungen, Produkte oder Dienstleistungen ergeben können. Die Analyse konzentriert sich insbesondere auf Unternehmen, die im Zuge der industriellen Transformation vor der Herausforderung stehen, z.B. Qualitätssicherung, Prozessautomatisierung und Materialanalytik weiterzuentwickeln.

Ein Schwerpunkt der Analyse liegt darin, relevante Akteursgruppen in der Region zu identifizieren und ihre jeweiligen Rollen im Kontext der Spektralanalytik sichtbar zu machen. Betrachtet werden dabei Technologieentwickler, Systemanbieter und -integratoren sowie industrielle Anwender. Darüber hinaus sollen Unternehmen identifiziert werden, bei denen Spektralanalytik bislang nicht eingesetzt wird, die jedoch aufgrund ihrer Produkte, Materialien oder Prozesse grundsätzlich von den Leistungsfähigkeiten spektralanalytischer Verfahren profitieren könnten. Ergänzend zur Identifikation von Potenzialen zielt die Regionalanalyse darauf ab, bestehende Herausforderungen bei der Technologieadaption sowie Unterstützungsbedarfe der Unternehmen zu erfassen, etwa im Hinblick auf Informationsstand, technische Integration, Automatisierung oder Qualifikation.

Experteninterviews

Den methodischen Ausgangspunkt bildeten ausgewählte Experteninterviews mit Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus der Region, die im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft Spektralanalytik eingebunden sind. Ziel dieser Gespräche war es, Informationsbedarfe zu konkretisieren, Einschätzungen zum Potenzial der Spektralanalytik aus regionaler Sicht zu erfassen und Hinweise auf relevante technologische Entwicklungen sowie mögliche Anwendungsschwerpunkte zu gewinnen. Die Interviews dienten zugleich dazu, erste Impulse für die regionale Einordnung der Technologie und für mögliche Unterstützungsansätze aufzunehmen.

Unternehmensanalyse

Ergänzend dazu wurde eine automatisierte, KI-gestützte Analyse von Unternehmenswebseiten durchgeführt. Grundlage hierfür bildete eine von der Wirtschaftsförderung benannte Unternehmensdatenbank mit 619 Unternehmen aus relevanten Branchen der Region. Für die Auswertung wurde ein domänenspezifisches Sprachmodell aufgebaut, das gezielt auf Technologien, Funktionsprinzipien und Anwendungsfelder der Spektralanalytik trainiert wurde. Ziel der Analyse war es, Hinweise auf den bestehenden Einsatz spektralanalytischer Verfahren sowie auf funktionsbasierte Anwendungspotenziale zu identifizieren,

etwa im Bereich der Qualitätskontrolle, der Material- und Oberflächenanalyse oder der Prozessüberwachung. Die Ergebnisse der Webseitenanalyse wurden aggregiert und interpretiert, um ein strukturiertes Bild potenzieller Einsatzfelder in der Region zu erhalten.

Online-Umfrage

Zur Ergänzung und Einordnung dieser Ergebnisse wurde eine Online-Umfrage unter Unternehmen der Region durchgeführt. Die Befragung zielte darauf ab, die Bedeutung von Qualitätsanalyse und -sicherung entlang der Wertschöpfungskette aus Unternehmenssicht zu erfassen und den aktuellen sowie zukünftigen Handlungsbedarf in typischen Anwendungsfeldern zu bewerten. Darüber hinaus wurden der Grad der Automatisierung in der Qualitätsanalyse, der bisherige Einsatz spektralanalytischer Verfahren sowie Gründe für deren Nicht-Einsatz erhoben. Ein weiterer Schwerpunkt der Umfrage lag auf der Identifikation von Unterstützungsbedarfen bei der Erschließung neuer Technologiefelder wie der Spektralanalytik.

Die Rücklaufquote der Online-Umfrage war jedoch zu gering, um tragfähige quantitative (statistische) Auswertungen vornehmen zu können. Dennoch flossen die Antworten auf qualitativer Ebene in die Ergebnisse der Studie ein (u.a. die hohe Relevanz von Qualitätssicherung in Unternehmen). Obgleich die Anwendungsfelder wie in der Qualitätssicherung als sehr hoch angesehen werden, scheint der Nutzen der Spektraltechnologien bei den potenziellen Anwendern noch nicht ausreichend bekannt zu sein, um ausreichend Interesse an der Online-Umfrage zu wecken.

Die Ergebnisse aus Experteninterviews, Webseitenanalyse und Online-Umfrage wurden abschließend zusammengeführt und für die Region Heilbronn-Franken aggregiert ausgewertet. Auf dieser Grundlage konnten bestehende Stärken, potenzielle Anwendungsschwerpunkte sowie zentrale Herausforderungen bei der Einführung und Nutzung spektralanalytischer Verfahren identifiziert werden. Die Regionalanalyse bildet damit die empirische Basis für die Ableitung gezielter Handlungsempfehlungen zur Unterstützung der Unternehmen und zur Stärkung der Spektralanalytik als Querschnittstechnologie in der Region.

Unternehmensstruktur in der Region

Für die Einordnung der Potenziale der Spektralanalytik ist eine strukturierte Betrachtung der regionalen Unternehmenslandschaft erforderlich. Die Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken weist eine vielfältige Akteursstruktur auf, in der unterschiedliche Rollen entlang industrieller Wertschöpfungsketten vertreten sind.

Im Rahmen der Regionalanalyse werden Unternehmen und Organisationen danach klassifiziert, ob sie spektralanalytische Technologien entwickeln, diese in Systeme und Anwendungen integrieren oder als industrielle Anwender einsetzen bzw. perspektivisch einsetzen könnten. Diese Einordnung bildet die Grundlage für die Bewertung vorhandener Kompetenzen, potenzieller Lücken sowie von Ansatzpunkten für Kooperationen und Technologietransfer in der Region.

Die Analyse zeigt, dass in der Region zwölf Organisationen dem Bereich der Technologieentwicklung und Wissenschaft zuzuordnen sind. Darüber hinaus konnten sechs Organisationen als Systemanbieter und Integratoren spektralanalytischer Technologien klassifiziert werden. Den größten Anteil bilden potenzielle Anwenderunternehmen: Über 300 Unternehmen in der Region weisen Strukturen, Produkte oder Prozesse auf, bei denen der Einsatz spektralanalytischer Verfahren grundsätzlich Anwendungspotenzial bietet.

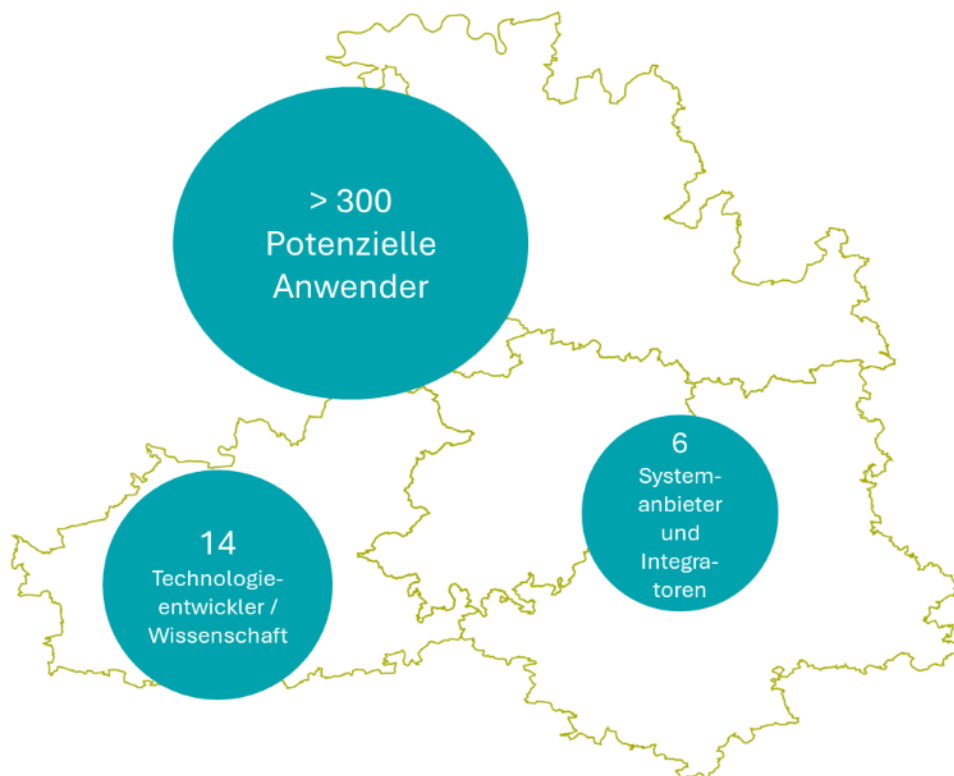


Abbildung 9: Akteurslandkarte entlang der Wertschöpfungskette in der Region Heilbronn-Franken
(Quelle: TECINTELLI)

Wissenschaftliche Institutionen als Technologieentwickler

Wesentliche Akteure in der Region Heilbronn-Franken, welche die technologische Entwicklung von Spektralanalytik vorantreiben und damit auch potenzielle Partner für Anwender darstellen, sind im Folgenden zusammengestellt.

Strahlungsquellen und Sensorik

- Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
- Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW)
- Hochschule Heilbronn (HHN)

Analytik

- Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW)
- IPAI Campus (Heilbronn)
- KI-Campus-Hub Baden-Württemberg
- Hochschule Heilbronn (HHN)
- Ferdinand-Steinbeis-Institut (Heilbronn)
- UniTyLab (Heilbronn)
- Urban Innovation Hub »uih!« (Heilbronn)
- 42 Heilbronn (Coding Academy)
- Fraunhofer IAO – Forschungs- und Innovationszentrum KODIS
- TUM Campus Heilbronn (Technische Universität München)
- connAlx – Research School for Applied AI (Landesgraduiertenzentrum angewandte KI, KIT)

Weitere Institutionen zur Förderung von Künstlicher Intelligenz (KI) nehmen in der Region kontinuierlich zu.

Unternehmen als Systemanbieter und Integratoren

Eine scharfe Trennung zwischen Technologieentwickler und Systemanbieter ist oftmals nicht möglich, da auch Unternehmen die technologische Entwicklung insbesondere für spezifische Anwendungen vorantreiben und in Form von eigenen innovativen Produkten in die Anwendung bringen.

Internationale Anbieter dominieren den Markt für Spektralanalytik, wobei einige mittelständische Anbieter auch aus dem süddeutschen Raum kommen. Wenige Anbieter sind aktuell in der Region Heilbronn-Franken zu finden. Darunter sind insbesondere zu nennen (alphabetisch sortiert):

- BARTEC Top Holding GmbH (FT-NIR Spektroskopie)

- Insion GmbH (von Sensorik bis Spektrometer)
- Magna Powertrain Testing Services (für Elektrofahrzeuge) (Mutterkonzern aus Kanada)
- Magna PT B.V. & Co. KG / FEMFAT Software (Leistungsdichtespektren, Schweißnahtanalyse)
- PAC LP (Öl-in-Wasser-Analysegeräte) (Mutterkonzern aus den USA)
- Promicron AG (Inspektion und Fehleranalyse in der Halbleiterindustrie)

Grundsätzlich sind (Sonder-)Maschinenbauer potenzielle Integratoren für Spektralanalytik, auch wenn dieser heute noch keine Maschinen mit Spektralanalytikkomponenten herstellen.

Potenzielle Anwender von Spektralanalytik

Auf Basis einer Webseitenanalyse der 619 betrachteten Unternehmen konnten folgende Anwendungsfelder abgeleitet werden, welche Potenzial für den Einsatz von Spektralanalytik in der Region bieten. Die KI unterstützte Analyse basierte auf einem zuvor aufgebauten Wissensmodell über die relevanten Technologien und funktionsbasierten Anwendungen für Spektralanalytik (vgl. Technologie-Überblick und Anwendungsfelder und Markttrends). Die auf den Webseiten identifizierten Indizien für potenzielle Anwendungsfelder konnten schließlich wie folgt aggregiert werden:

- Qualitätssicherung in der Wärmebehandlung (Schweißen, Härten)
- Oberflächenanalyse von Ventilen
- Aluminiumrecycling (LIBS)
- Serienbegleitende Prüfungen von Aluminiumteilen
- Materialanalyse von Stahl (Wärmebehandlung)
- Qualitätssicherung von Aluminiumformgussprodukten
- Recycling von Gewerbe- und Industriemüll
- Qualitätssicherung von Gussprodukten
- Qualitätssicherung für sterile Verfahrenstechnik (Pharma- und Lebensmittelbranche)

Abschließend lässt sich dabei erkennen, dass Qualitätssicherung eine wesentliche Rolle für die Unternehmen der Region spielen. Auch wenn dies nicht explizit auf den Webseiten bei der Außendarstellung der Unternehmen genannt wird, kann aufgrund des übergeordneten Trend einer zunehmenden Automatisierung in der Produktion davon ausgegangen werden, dass die Qualitätssicherung zunehmend inline, automatisiert ablaufen muss, um Prozess effizienter zu gestalten.

Des Weiteren hat die Analyse der Unternehmenswebseiten ergeben, dass die Verwendung von Spektroskopieverfahren heute noch wenig verbreitet ist, da nur bei 17 von 619 Unternehmen Aussagen dazu gefunden wurden. Gleichwohl zeigt die folgende Grafik auch, dass eine Vielzahl von Unternehmen aus der Region in Anwendungsfeldern der Spektralanalytik tätig sind (bspw. spezifische Materialien oder Fertigungsverfahren).

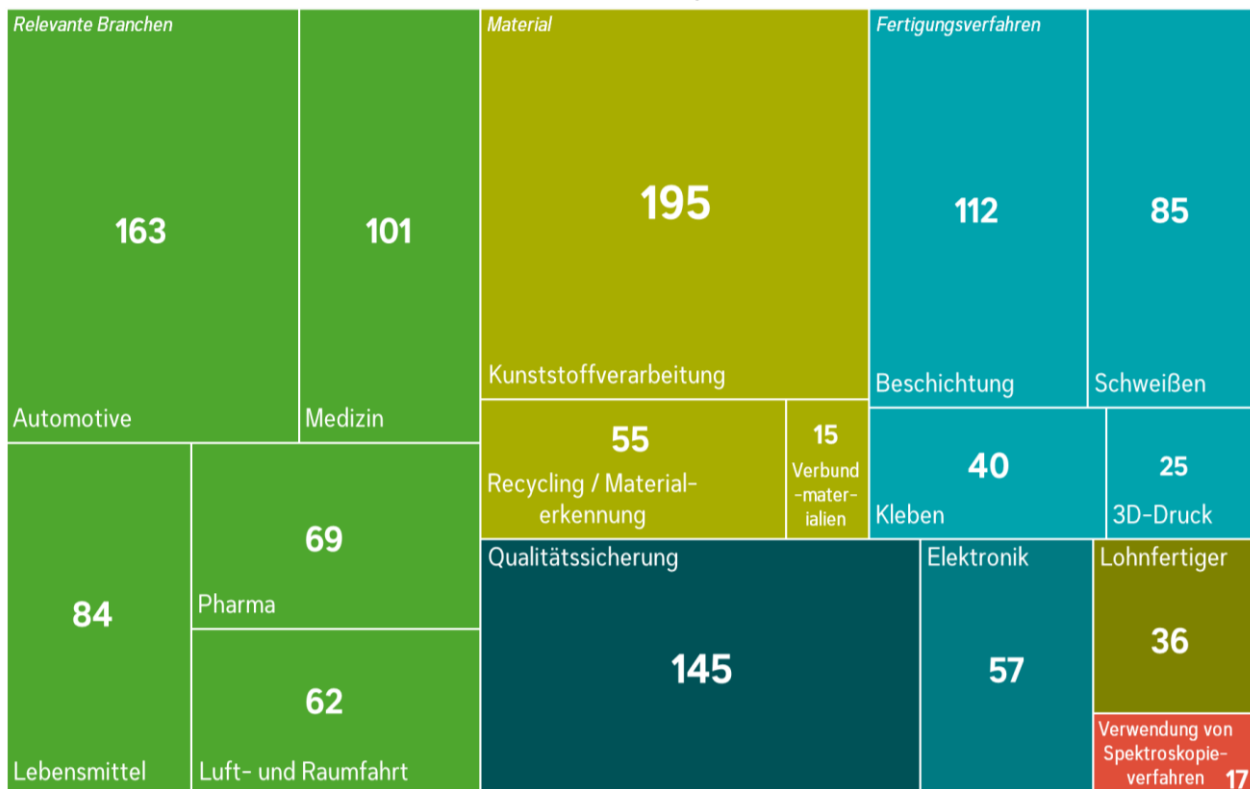


Abbildung 10: Anzahl von Unternehmen in der Region (auf Basis von 619 untersuchter Unternehmen) mit Anwendungspotenzial für Spektralanalytik (Quelle: TECINTELLI)

Herausforderungen und Entwicklungsperspektiven für die Region

Einordnung und zentrale Beobachtungen: Was zeigt die Regionalanalyse?

Die Regionalanalyse zeigt, dass die Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken grundsätzlich über sehr gute Voraussetzungen für die erfolgreiche Entwicklung und Anwendung innovativer Technologien wie die

Spektralanalyse verfügt. Eine starke industrielle Basis, eine breite Wertschöpfungsstruktur sowie ein leistungsfähiges Innovations- und Forschungsökosystem bilden ein stabiles Fundament. Mit etablierten Unternehmen, einer hohen Fertigungskompetenz, internationaler Ausrichtung sowie renommierten wissenschaftlichen Einrichtungen sind wesentliche Erfolgsfaktoren für technologischen Fortschritt in der Region vorhanden. Zudem wurden in den vergangenen Jahren durch verschiedene Projekte, Netzwerke und Initiativen bereits wichtige Grundlagen für die Begleitung von Transformationsprozessen geschaffen.

Gleichzeitig macht die Regionalanalyse deutlich, dass vorhandene Potenziale nicht automatisch wirksam werden. Neue Technologien und Innovationsansätze setzen sich nicht von selbst durch, sondern erfordern gezielte Impulse, Aufmerksamkeits- und Chancenmanagement und aktive Auseinandersetzung. In vielen Unternehmen, gerade in KMU, ist die Bekanntheit neuer technologischer Möglichkeiten noch gering, ebenso wie die systematische Beschäftigung mit deren Nutzen und Anwendungsperspektiven. Die Analyse zeigt, dass Innovationsimpulse bewusst gesetzt, sichtbar gemacht und in praxisnaher Form vermittelt werden müssen, um Wirkung zu entfalten.

Ein prägendes Merkmal der Region ist der hohe Anteil kleiner und mittlerer Unternehmen. Über 80% der analysierten Unternehmen verfügen über weniger als 120 Mitarbeitende und sind damit besonders stark durch begrenzte personelle und zeitliche Ressourcen geprägt. Gerade in diesen Unternehmen existieren häufig keine eigenen Stabsstellen für Forschung, Entwicklung oder Innovation. Die Auseinandersetzung mit neuen Technologien, strategischen Zukunftsthemen oder neuen Geschäftsmodellen liegt vielfach direkt bei der Geschäftsführung. Dies erschwert es, Innovationsprozesse systematisch voranzutreiben und neue Themen parallel zum operativen Tagesgeschäft zu entwickeln.

Die Regionalanalyse verdeutlicht zudem, dass sich viele Unternehmen aktuell in einem Spannungsfeld befinden: Auf der einen Seite stehen kurzfristige Herausforderungen wie Auftragsrückgänge, Kostendruck und strukturelle Veränderungen – insbesondere im Umfeld der Automobil- und Zulieferindustrie. Auf der anderen Seite wächst die Notwendigkeit, sich strategisch weiterzuentwickeln, neue Technologien zu erschließen und die eigene Wettbewerbsfähigkeit durch neue Produkte, Services und Geschäftsmodelle langfristig zu sichern. Dieses gleichzeitige Erfordernis, bestehende Geschäfte zu stabilisieren und neue Zukunftsperspektiven aufzubauen, stellt insbesondere für KMUs eine große Herausforderung dar.

Dieses Spannungsfeld lässt sich als ambidextre Anforderung beschreiben: Unternehmen müssen das operative Tagesgeschäft zuverlässig managen und zugleich Raum für Innovation, Lernen und Erneuerung schaffen. Die vorliegende Potenzialanalyse zeigt, dass genau hier ein zentraler Ansatzpunkt liegt, um Technologie- und Innovationspotenziale künftig besser nutzbar zu machen.

Stärken und Schwächen – Chancen und Risiken

Die zusammenfassende Betrachtung der Regionalanalyse lässt sich in Form einer SWOT-Analyse strukturieren, die zentrale Rahmenbedingungen und Entwicklungsperspektiven verdeutlicht.

Zu den wesentlichen **Stärken der Region** zählt die breite industrielle Basis mit hoher Fertigungs- und Prozesskompetenz. Entlang der gesamten Wertschöpfungskette sind relevante Akteursgruppen vertreten – von Anwendern über Komponenten- und Anlagenhersteller bis hin zu Systemintegratoren, Softwareanbietern, Forschungs- und Qualifizierungseinrichtungen. Ergänzt wird dies durch ein leistungsfähiges Innovations- und Forschungsökosystem mit Einrichtungen wie dem IPAI, dem Fraunhofer-Forschungs- und Innovationszentrum Heilbronn, der Technischen Universität München, der ETH Zürich sowie regionalen Hochschulen. Bestehende Netzwerke, Projekte und Transferformate wie die Initiative TRANSFORMATIVE zeigen, dass in der Region Erfahrung im Aufbau und in der Begleitung von Zukunftsthemen vorhanden ist. Zudem ist in vielen Unternehmen ein grundsätzliches Interesse an Qualität, Effizienz und Prozessoptimierung verankert – wichtige Ansatzpunkte für technologiegestützte Innovationen.

Stärken – im Kontext Spektralanalytik

- Breite industrielle Basis mit hohem Bedarf an Qualitäts-, Material- und Prozessanalytik.
- Alle relevanten Rollen der Wertschöpfungskette für Spektralanalytik sind regional vertreten, von Anwendern über Technologieanbieter bis zu Software- und Integrationskompetenzen.
- Leistungsfähiges Innovations- und Forschungsökosystem mit hoher Relevanz für Analytik, Sensorik, Datenanalyse und Künstliche Intelligenz.
- Bestehende Netzwerke, Projekte und Transferstrukturen ermöglichen den Aufbau und die Verbreitung neuer Anwendungsfälle.
- Hohe grundsätzliche Offenheit der Unternehmen für Technologien, die messbaren Nutzen für Qualität, Effizienz und Prozesssicherheit bieten.

Demgegenüber stehen **Schwächen**, die vor allem struktureller Natur sind. Die Sichtbarkeit und Bekanntheit neuer Technologien ist in vielen KMU eher gering, ebenso der konkrete Kenntnisstand zu möglichen Einsatz- und Nutzenpotenzialen. Technologische Lösungen werden häufig nur punktuell, isoliert oder im Rahmen von Labor- und Pilotanwendungen eingesetzt. Der hohe Anteil an Auftrags- und Lohnfertigung, insbesondere in industriellen Wertschöpfungsketten, geht vielfach mit einer begrenzten eigenen Produkt- und Systemverantwortung einher. Hinzu kommen begrenzte personelle und zeitliche Ressourcen für Innovationsaktivitäten, insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen.

Schwächen – im Kontext Spektralanalytik

- Spektralanalytik wird in den betrachteten Unternehmen bislang nur in geringem Umfang und überwiegend punktuell eingesetzt.
- Informations- und Kenntnisstand zu Anwendungsfeldern, Nutzenpotenzialen und Einsatzmöglichkeiten in vielen Unternehmen gering.
- Bisheriger Einsatz beschränkt sich häufig auf offline- und laborbasierte Anwendungen, etwa für Prüf- oder Einzelanalysen.
- Eine systematische, prozessnahe Integration der Spektralanalytik in Produktions-, Qualitäts- oder Automatisierungsprozesse ist bislang selten.
- Spektralanalytik wird vielfach als spezialisiertes Nischenthema wahrgenommen und noch nicht als breit einsetzbare Querschnittstechnologie verstanden.

Gleichzeitig eröffnen sich **Chancen** durch steigende Anforderungen an Qualität, Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Prozesssicherheit. Technologische Entwicklungen – etwa in der Sensorik, Datenanalyse und Künstlichen Intelligenz – senken Einstiegshürden und erweitern die Anwendungsfelder. Die Region bietet Potenzial für eine Erweiterung der Wertschöpfung durch neue Dienstleistungen, daten- und softwarebasierte Angebote sowie das Entstehen neuer Akteure, beispielsweise im Bereich Analytik oder KI-basierter Auswertung. Bestehende Innovations- und Transferstrukturen können dabei als Hebel genutzt werden. Spektralanalytik kann in diesem Kontext als Beispiel- und Blaupausentechnologie dienen, an der sich allgemeine Mechanismen der Technologieadaption und Innovationsförderung erproben lassen.

Chancen – im Kontext Spektralanalytik

- Steigende Anforderungen an Qualität, Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz erhöhen den Bedarf an analytischen Verfahren
- Technologische Fortschritte ermöglichen den Übergang von Laboranwendungen zu prozessnahen, automatisierten Lösungen
- Kombination von Spektralanalytik mit KI eröffnet neue Anwendungsfelder und Geschäftsmodelle
- Eine frühzeitige Integration neuer Technologien wie KI oder neue Sensortechnologie wie Quantensensorik in das System der Spektralanalytik eröffnet Wachstums- und Alleinstellungspotenzial als Region
- Aufbau neuer Akteure und Dienstleistungen im Bereich Analytik, Daten- und Softwarelösungen
- Nutzung der Spektralanalytik als Pilot- und Referenztechnologie für weitere datenbasierte Technologien

Als **Risiken** sind insbesondere zu nennen, dass Innovationsaktivitäten zugunsten kurzfristiger operativer Herausforderungen zurückgestellt werden. Ohne gezielte Impulse besteht die Gefahr, dass Potenziale

fragmentiert bleiben und nicht systematisch zusammengeführt werden. Eine fehlende Anschlussfähigkeit zwischen Forschung und betrieblicher Praxis, insbesondere in KMUs, kann die Umsetzung neuer Technologien zusätzlich erschweren. Zudem besteht das Risiko, dass andere Regionen Themen schneller besetzen und dadurch Wettbewerbsnachteile entstehen.

Risiken – im Kontext Spektralanalytik

- Geringe Priorisierung im Unternehmensalltag verzögert die systematische Erschließung vorhandener Potenziale.
- Fehlende Praxisbeispiele und Referenzen hemmen die Nachfrage und die Verbreitung der Technologie.
- Einzelanwendungen bleiben fragmentiert und werden nicht skaliert oder vernetzt.
- Begrenzte personelle und zeitliche Ressourcen, insbesondere in KMUs, erschweren nachhaltige Technologieintegration.
- Andere Regionen könnten das Themenfeld schneller besetzen und Wettbewerbsvorteile aufbauen – Abwanderung von Innovationsdynamik in Regionen mit aktiverer Technologiepositionierung.

Die Ergebnisse der Regionalanalyse verdeutlichen, dass gezielte Aktivierung, Wissensvermittlung und Kooperation zentrale Hebel sind, um vorhandene Potenziale besser zu erschließen. Die im Folgenden abgeleiteten Handlungsempfehlungen setzen daher nicht bei einzelnen Technologien an, sondern adressieren übergreifende Ansatzpunkte: **Informieren, Ausprobieren, Initiieren, Profilieren und Vernetzen**. Ziel ist es, Rahmenbedingungen zu schaffen, die es Unternehmen ermöglichen, operative Anforderungen und Zukunftsgestaltung besser miteinander zu verbinden und Innovationsprozesse nachhaltig zu unterstützen.

HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Handlungsempfehlungen zur Stärkung der Spektralanalytik in der Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken

Die folgenden Handlungsempfehlungen zielen darauf ab, Spektralanalytik als Querschnittstechnologie in der Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken systematisch zu verankern. Sie adressieren unterschiedliche Reifegrade der Unternehmen und Akteure – vom ersten Informationsbedarf über praktische Erprobung bis hin zur Umsetzung und regionalen Positionierung. Die Empfehlungen sind entlang fünf zentraler Handlungsfelder strukturiert und stellen dar, WAS gemacht werden sollte. WIE dies im Detail umgesetzt werden kann bzw. sollte kann hier nur angerissen werden, da es fast immer einer expliziten Konzeptentwicklung für die Umsetzung bedarf.



Abbildung 11: Übersicht der fünf Felder mit Handlungsempfehlungen

Informieren – Orientierung schaffen und Einstieg erleichtern

Von der Information hin zur Aktion – Transparenz schaffen, Grundlagen vermitteln und Unternehmen einen niederschweligen Einstieg in das Thema Spektralanalytik ermöglichen.

Wissen über Spektralanalytik bündeln und zugänglich machen

Aufbau eines zentralen Informationsangebots, welches die Grundlagen der Spektralanalytik bündelt, die verschiedenen Verfahren einordnet und praxisnahe Einsatzmöglichkeiten aufzeigt. Durch verständlich aufbereitete praxisnahe Inhalte wird die Technologie auch für Unternehmen ohne Vorerfahrung greifbar. Niederschwellige Einstiegsangebote ermöglichen erste Orientierung für potenzielle Anwender mit Praxisbezug.

Chancen und Potentiale sichtbar machen

Ergänzend zu einem technologischen Basiswissen werden praxisnahe Anwendungsbeispiele und Case Studies aus Industrie und Forschung dokumentiert. Diese erläutern konkrete Einsatzfelder, wirtschaftliche Mehrwerte und Nutzenpotenziale – etwa durch Qualitätsverbesserungen, Effizienzsteigerungen oder die Entwicklung neuer Produkte. So werden Chancen und konkrete Potenziale für Unternehmen greifbar.

Individuelle Bedarfe identifizieren

Bereitstellung von Instrumenten zur Selbsteinschätzung, die Unternehmen helfen, eigene Fragestellungen und Potenziale strukturiert zu erfassen. Ein digitaler Quick-Check ermöglicht es, innerhalb weniger Minuten den technologischen Reifegrad, konkrete Anwendungsfelder und bestehende Herausforderungen zu ermitteln. Auf Basis der Antworten erhalten Unternehmen Hinweise zu passenden Technologien, potenziellen Partnern und Angeboten zum Ausprobieren und Erfahrungen sammeln.

Ausprobieren – Technologie erlebbar machen

Spektralanalyse einfach ausprobieren – Praktische Erfahrungen ermöglichen und den Übergang von Interesse zu Anwendung fördern.

Test- und Lernräume bereitstellen

Aufbau und Verstetigung von Versuchs- und Lernräumen, Lernlabore, stationär oder mobil, die es Unternehmen, ermöglichen Spektralanalytik mit verschiedenen Gerätschaften und Lösungsansätzen unter realistischen Bedingungen zu erproben – ohne sofortige Investitionsentscheidungen treffen zu müssen.

„Labore bieten einen niedrighschwelligen Rahmen, um neue Technologien anwendungsnah zu erproben und praxisrelevante Fragestellungen im kleinen Maßstab zu testen. Sie fördern die Vernetzung zwischen Unternehmen, Forschung und Nachwuchskräften und senken zugleich die Hürden für den Zugang zu Förderangeboten.“

Sven Christian (DHBW Heilbronn)

Etablierung von regelmäßigen Laborrundgängen bei Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die einen strukturierten Einblick in verfügbare Technologien, Demonstratoren und konkrete Anwendungsbeispiele bieten. Im Rahmen von Open Lab Days können eigene Fragestellungen oder Musterproben eingebracht und gemeinsam mit Expertinnen und Experten erste Tests durchgeführt werden. Dadurch werden Hemmschwellen abgebaut, technologische Möglichkeiten greifbar gemacht und fundierte Entscheidungsgrundlagen für weitere Schritte geschaffen.

Praxisnahes Lernen fördern

Organisation und Förderung von Hands-on-Workshops mit realen Proben, eigenen Daten oder konkreten Prozessfragen, die Nutzen und Grenzen der Technologie direkt erfahrbar machen und fundierte Bewertungen unterstützen.

Mit einem Angebot an gezielt praxisorientierten Workshopformaten, in denen Teilnehmende mit eigenen Proben oder realen Daten schnell Erfahrungen mit spektralanalytischen Verfahren sammeln können, werden Potenziale, Anforderungen und Grenzen für alle Akteure transparent und nachvollziehbar. Dies stärkt die Bewertungskompetenz im Unternehmen und erleichtert strategische Investitions- und Implementierungsentscheidungen.

Experimentieren ermöglichen

Etablierung von offenen, explorativen Formaten zur Förderung von kreativem Ausprobieren und iterativem Lernen. Diese schaffen Raum für neue Ideen und senken die Hemmschwelle, sich aktiv mit der Technologie auseinanderzusetzen.

Es sollten gezielt niedrighschwellige Experimentierformate geschaffen werden, die Unternehmen zum eigenständigen Testen und Weiterdenken anregen. Durch iterative Erprobung können neue Anwendungsansätze identifiziert und bestehende Prozesse schrittweise weiterentwickelt werden. Ein solcher Freiraum stärkt Innovationsbereitschaft und beschleunigt den Transfer von der Idee zur praktischen Umsetzung.

Initiieren – Umsetzung ermöglichen und Risiken reduzieren

Spektralanalyse einfach machen, umsetzen – Konkrete Anwendungen entwickeln, Investitionsrisiken senken und erste Entwicklungsprojekte unterstützen.

Quick-Check, um Potenziale gezielt zu analysieren

Unterstützung bei strukturierten Potenzialanalysen, die Unternehmen helfen geeignete Einsatzfelder, technische Voraussetzungen und wirtschaftliche Effekte im jeweiligen Unternehmenskontext zu identifizieren.

Unternehmen sollten einen systematischen Quick-Check nutzen, um Anwendungsoptionen der Spektralanalytik entlang ihrer Wertschöpfungskette zu bewerten. In moderierten Kurzanalysen lassen sich technologische Machbarkeit, Integrationsaufwand und erwartete Wirtschaftlichkeit transparent gegenüberstellen. Dies schafft eine fundierte Entscheidungsgrundlage für Pilotprojekte und weiterführende Investitionen.

Pilotprojekte aufsetzen

Förderung kleiner, klar abgegrenzte Pilotprojekte, die es ermöglichen, Anwendungen unter realen Bedingungen zu testen und belastbare Entscheidungsgrundlagen für eine spätere Skalierung zu schaffen. Unterstützung bei der Identifikation und Nutzung öffentlicher Fördermittel für FuE-Projekte (bspw. Invest BW, Innovationsgutscheine BW, Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand des BMWK) von der Ideengenerierung und -bewertung bis zur Partnerfindung.

Kooperationen und Lerngruppen bilden

Förderung des Zusammenschlusses mehrerer Akteure mit ähnlichen Fragestellungen, um den Erfahrungsaustausch zu erleichtern, gemeinsam zu lernen und für eine effiziente Nutzung von Ressourcen.

Unternehmen sollten sich aktiv in themenspezifischen Lerngruppen oder Arbeitsgemeinschaften vernetzen, um Erfahrungen zu teilen und gemeinsame Fragestellungen zu bearbeiten. Beispielsweise könnte sich die Arbeitsgruppe Spektralanalyse zu einer strukturierten Plattform für Best-Practice-Austausch und gemeinsame Pilotprojekte weiterentwickeln. Somit lassen sich Entwicklungsrisiken reduzieren und Synergien gezielt nutzen.

Wirtschaftlichkeit systematisch bewerten

Unterstützung bei der Entwicklung von Geschäftsmodellen und Kosten-Nutzen-Analysen, um den Mehrwert der Spektralanalytik transparent zu machen und strategische Entscheidungen in Unternehmen zu unterstützen.

Unternehmen sollten Investitionen in spektralanalytische Lösungen frühzeitig durch strukturierte Wirtschaftlichkeitsanalysen flankieren. Dabei sind neben Anschaffungs- und Integrationskosten auch Einsparpotenziale durch reduzierte Ausschussquoten, geringeren Laboraufwand und Prozessoptimierungen zu berücksichtigen. Eine transparente Bewertung stärkt die interne Entscheidungsfindung und erhöht die Investitionssicherheit.

Profilieren – Sichtbarkeit erhöhen und regionale Stärken bündeln

Innovationsökosystem Heilbronn–Franken aktivieren – Die Wirtschafts- und Wissenschaftsregion Heilbronn–Franken als Kompetenzstandort für Spektralanalytik positionieren und erfolgreiche Anwendungen sichtbar machen.

Gemeinsame Positionierung entwickeln

Regionale Akteure sollten ihre Aktivitäten strategisch abstimmen und gemeinsame Sichtbarkeit schaffen, etwa durch Messeauftritte, Fachveranstaltungen oder gebündelte Kommunikationsformate. Eine koordinierte Außendarstellung erhöht die Reichweite, unterstreicht die technologische Kompetenz der Region und erleichtert den Zugang zu neuen Partnern und Märkten.

„Durch gemeinsames Auftreten wird die Sichtbarkeit insbesondere kleinerer regionaler Unternehmen erhöht. Gemeinschaftsmessestände bieten eine effiziente Möglichkeit, begrenzte Ressourcen zu bündeln und als attraktiver Akteurskreis wahrgenommen zu werden.“

Hartmut Feuerbacher (Geschäftsführer, Promicron AG)

Erfolgreiche Anwendungen und Akteure sichtbar machen

Initiierung von Leuchtturmprojekten und Best Practices als Referenz, die Signalwirkung haben und Vertrauen schaffen und damit auch weitere Unternehmen motivieren sich mit dem Technologiefeld auseinanderzusetzen.

Thematische Schwerpunkte setzen

Aufbau eines klaren regionalen Profils, durch die Fokussierung auf ausgewählte Branchen oder Anwendungsszenarien, was auch die überregionale Sichtbarkeit erhöht und eine externe Ansprache erleichtert.

Spektralanalytik als KI-Anwendungsfeld sichtbar positionieren

Die regionale KI-Strategie sollte Spektralanalytik gezielt als relevantes Anwendungsfeld für KI in den Bereichen Qualitätsoptimierung, Prozessautomatisierung und datenbasierte Analytik verankern und damit die Verbindung zwischen Sensordaten, KI-Kompetenz und regionaler Wertschöpfung klar sichtbar machen.

Vernetzen – Akteure zusammenbringen und Austausch fördern

Gemeinsam mehr erreichen – Kooperationen anstoßen, Wissenstransfer ermöglichen und regionale Kompetenzen sichtbar machen.

Kompetenzen transparent machen

Aufbau einer strukturierten Übersicht regionaler Akteure – von Technologieentwicklern über Integratoren bis hin zu Anwendern und Forschungseinrichtungen – zur Erleichterung der Identifikation geeigneter Partner entlang der Wertschöpfungskette.

Es sollte eine zentrale, regelmäßig aktualisierte Kompetenzübersicht aufgebaut werden, die Expertise, Anwendungsfelder und Kooperationsangebote sichtbar macht. Eine solche Transparenz erleichtert Matchmaking-Prozesse, beschleunigt Projektanbahnungen und stärkt die Vernetzung innerhalb des Innovationsökosystems.

Austauschformate etablieren

Etablierung regelmäßiger, niedrigschwelliger Vernetzungsformate wie Kamingespräche und Expertentalks, um Raum für persönlichen Austausch, Erfahrungsteilung und die Diskussion konkreter Anwendungsfragen zu schaffen. Informelle Formate senken dabei die Hemmschwelle zur Kontaktaufnahme.

Thematische Dialoge fördern

Verstetigung branchenspezifischer oder anwendungsorientierter Dialogformate zur Unterstützung des gezielten Austauschs zwischen Akteuren mit ähnlichen Fragestellungen und zur Beschleunigung der Entwicklung gemeinsamer Lösungsansätze.

Transfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft intensivieren

Der Austausch zwischen Forschungseinrichtungen (wie DLR und Fraunhofer) und Unternehmen sollte systematisch gestärkt werden, um Wissen und Technologien schneller in die Anwendung zu überführen. Gemeinsame Projektideen, Abschlussarbeiten und Transferprojekte ermöglichen eine frühe Ausrichtung der Forschung an konkreten regionalen Bedarfen. Der Zugang zu Laboren und wissenschaftlicher Expertise unterstützt Unternehmen dabei, neue Ansätze praxisnah zu erproben.



Zusammenfassend zeigen die Handlungsempfehlungen, wie Spektralanalytik schrittweise von einem eher spezialisierten Technologiethema zu einem breit wirksamen Innovationsbaustein in der Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken entwickelt werden kann. Durch Information, Vernetzung und praktische Erprobung wird der Zugang zur Technologie erleichtert und der Transfer in die Anwendung unterstützt. Die Initiierung konkreter Projekte und die gezielte Profilierung erfolgreicher Anwendungen tragen dazu bei, wirtschaftliche Potenziale sichtbar zu machen und

Vertrauen in neue Lösungsansätze aufzubauen. In dieser Kombination kann Spektralanalytik als Keimzelle für weiterführende technologische Entwicklungen wirken – etwa an der Schnittstelle zu Digitalisierung, KI und nachhaltiger Produktion – und langfristig zur Stärkung eines leistungsfähigen regionalen Innovationsökosystems beitragen.

Ein Instrument zur Umsetzung der aufgeführten Handlungsempfehlungen ist der Aufbau und die Etablierung des **Spektral-Hubs** als Grundstein für ein ganzes Innovationsökosystem für Spektralanalytik. Dieser Hub ist dabei nicht nur eine Wissensplattform für technologische Grundlagen, Use Cases, Kompetenzlandkarte und Trend-Radar. Als Innovationsplattform sollte dieser Hub vielmehr ein zentraler Nukleus zur Förderung der Spektralanalytik für alle Akteure in der Region darstellen, u.a. mit Quick-Checks, Labor- und Veranstaltungsangeboten, aber auch zum überregionalen Aushängeschild werden und damit auch die Attraktivität der Region im Transformationsprozess steigern.

FAZIT UND AUSBLICK

Zentrale Kernaussagen der Studie

Die vorliegende Potenzialanalyse zeigt, dass die Spektralanalytik eine etablierte und zugleich vielseitig einsetzbare Querschnittstechnologie ist, deren Bedeutung in den kommenden Jahren weiter zunehmen wird. Technologische Entwicklungen sowie Markttrends unterstreichen eine sehr gute Einsatzperspektive, insbesondere in industriell geprägten Regionen wie Heilbronn-Franken. Die Technologie adressiert zentrale Herausforderungen in Unternehmen, etwa in den Bereichen Qualitätssicherung, Prozessüberwachung und Automatisierung, und bietet damit konkrete Ansatzpunkte zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung.

Branchenübergreifend eröffnet Spektralanalytik jedoch auch weitergehende Innovationsimpulse. Durch neue Analyseverfahren, die zunehmende Verfügbarkeit von Daten sowie die Kombination mit datenbasierter Auswertung und Künstlicher Intelligenz entstehen Potenziale für neue Services, prädiktive Ansätze und innovative Geschäftsmodelle. Spektralanalytik kann damit nicht nur bestehende Prozesse verbessern, sondern auch als Enabler für neue Wertschöpfungsansätze dienen.

Die Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken verfügt grundsätzlich über sehr gute Voraussetzungen, um diese Potenziale zu nutzen. Eine starke industrielle Basis, eine breite Aufstellung entlang der Wertschöpfungskette sowie ein leistungsfähiges Innovations- und Forschungsökosystem – insbesondere im Bereich Digitalisierung und KI – bilden ein solides Fundament. Gleichzeitig zeigt die Studie deutlich, dass die Spektralanalytik bei kleinen und mittleren Unternehmen bislang nicht flächendeckend etabliert ist. Trotz steigender Anforderungen an Qualität, Effizienz und Nachhaltigkeit bestehen weiterhin Informations- und Wissensdefizite, insbesondere im Hinblick auf neue, prozessnahe Einsatzmöglichkeiten.

Insgesamt lässt sich festhalten: Das technologische und wirtschaftliche Potenzial der Spektralanalytik ist hoch. Ob und in welchem Umfang dieses Potenzial wirksam wird, hängt jedoch weniger von der Technologie selbst als von gezielten Impulsen, Sichtbarkeit und der Fähigkeit zur Umsetzung ab – insbesondere im KMU-geprägten Umfeld der Region.

Entwicklungsperspektiven für die Region Heilbronn–Franken

Aus den Ergebnissen der Studie ergeben sich klare Entwicklungsperspektiven für die Region Heilbronn–Franken. Ein zentraler Ansatzpunkt liegt in der Reduktion von Informations- und Wahrnehmungsdefiziten, insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen. Die Ansprache sollte dabei weniger technologiegetrieben erfolgen, sondern stärker an konkreten Nutzenpotenzialen ausgerichtet sein. Praxisnahe Beispiele, Anwendungsfälle und Erfahrungsberichte können dazu beitragen, Hemmschwellen abzubauen und den Mehrwert der Technologie greifbar zu machen.

Von besonderer Bedeutung sind niedrigschwellige Angebote, die Unternehmen einen unkomplizierten Einstieg ermöglichen. Formate zum gemeinsamen Lernen, Erproben und Austauschen können dazu beitragen, Erfahrungen aufzubauen und Vertrauen in neue Ansätze zu schaffen. Gerade für KMUs, die häufig unter hohem operativem Druck stehen, sind solche Zugänge entscheidend, um Innovation und Tagesgeschäft besser miteinander zu verbinden.

Perspektivisch eröffnet die Spektralanalytik zudem Chancen für eine Erweiterung und Veränderung bestehender Wertschöpfungsketten. Neben klassischen Anwendern können neue Akteursrollen entstehen, etwa Analytikdienstleister, Systemanbieter oder spezialisierte KI- und Datenanalyseunternehmen. Damit bietet die Technologie nicht nur Optimierungspotenziale für bestehende Geschäftsmodelle, sondern auch Ansatzpunkte für neue wirtschaftliche Aktivitäten in der Region.

Darüber hinaus kann die Spektralanalytik als Impuls- und Referenzthema für den Umgang mit weiteren Zukunftstechnologien dienen. Die im Rahmen dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf andere Technologiefelder übertragen und bieten damit eine Grundlage für eine systematische und strukturierte Weiterentwicklung des regionalen Innovationsökosystems.

Von der Analyse zur Umsetzung: Anschlussfähigkeit und erste Schritte

Die im Rahmen der Studie abgeleiteten Handlungsempfehlungen bilden einen strukturierten Orientierungsrahmen für die weitere Entwicklung. Sie setzen an fünf zentralen Hebeln an – informieren, ausprobieren, initiieren, profilieren und vernetzen – und verdeutlichen, dass erfolgreiche Technologieadaptation ein Zusammenspiel verschiedener Maßnahmen erfordert. Einzelne Aktivitäten entfalten ihre Wirkung erst im Verbund und durch eine kontinuierliche Aktivierung der relevanten Akteure.

Für die Umsetzung kommt es insbesondere darauf an, praxisnahe und niederschwellige Formate zu entwickeln, die sich an den Bedürfnissen von KMU orientieren. Pilotanwendungen, gemeinsame Projekte und der Austausch entlang der Wertschöpfungskette können dazu beitragen, erste Erfahrungen zu sammeln und den Nutzen der Technologie konkret erlebbar zu machen.

Mit dem startenden Projekt **SpektraCon** wird bereits ein erster wichtiger Schritt in Richtung Umsetzung unternommen. Aufbauend auf den Ergebnissen der vorliegenden Potenzialanalyse bietet SpektraCon die Möglichkeit, zentrale Erkenntnisse in die Praxis zu überführen, Unternehmen aktiv einzubinden und relevante Maßnahmen gemeinsam zu entwickeln und umzusetzen. Damit eröffnet sich die Chance, die identifizierten Potenziale der Spektralanalytik schrittweise zu erschließen und einer breiten Unternehmerschaft in der Region zugänglich zu machen.

Ergänzend zu projektbasierten Umsetzungsformaten kann der Aufbau eines zentralen Informations- und Vernetzungsangebots einen wichtigen Beitrag leisten, um die identifizierten Potenziale nachhaltig zu verankern. Eine regionale Plattform im Sinne eines „**Spektral-Hubs**“ könnte als erste Anlaufstelle dienen, um Anwendungsbeispiele, Use Cases und technologische Möglichkeiten der Spektralanalytik sichtbar zu machen. Darüber hinaus bietet ein solches Angebot die Möglichkeit, bestehende Akteure entlang der Wertschöpfungskette zu vernetzen, Kompetenzen transparent darzustellen und insbesondere KMUs einen niedrighschwelligen Zugang zu Informationen, Orientierung und Unterstützungsangeboten zu ermöglichen. Damit kann ein Spektral-Hub die Wirkung einzelner Maßnahmen bündeln und die Anschlussfähigkeit für weitere Aktivitäten gezielt stärken.

Insgesamt zeigt sich, dass die Region Heilbronn-Franken gute Voraussetzungen besitzt, um die Spektralanalytik als Zukunftstechnologie weiter zu stärken. Entscheidend wird sein, die vorhandenen Kompetenzen, Netzwerke und Initiativen gezielt zu bündeln und den Übergang von der Analyse zur Umsetzung aktiv zu gestalten.

VERANTWORTLICHE



Initiator



Wirtschaftsförderung Raum Heilbronn GmbH

Koeppfstraße 17, 74076 Heilbronn

☎ +49 7131 20996-0

info@wfgheilbronn.de

www.wfgheilbronn.de

Gefördert durch

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Umsetzung



TecIntelli GmbH

Curiestraße 2, 70563 Stuttgart

☎ +49 711 21959626

kontakt@tecintelli.de

www.tecintelli.de

ANHANG

Quellen:

Aderhold, J., Brüning, R. & Dittrich, P.G. (2019). Grundlagen und Methoden des HSI. In: Leitfaden zur hyperspektralen Bildverarbeitung, Fraunhofer-Verlag

Algernon, D., Feistkorn, S., Lenz, R., Scherrer, M. (2019). Machine-Learning-Basierte Datenauswertung und deren Mathematische Optimierung in der Anwendung der Verfahren Impact-Echo, Radar und Ultraschall. In: DGZfP Jahrestagung 2019, May, Friedrichshafen, Germany (DGZfP 2019).
<https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=24545>

Banwell, C. N. & McCash, E. M. (1994). Fundamentals of Molecular Spectroscopy, McGraw-Hill

Blake, N., Kelly, D. & Chanchal, A. (2025). SpecReX: Explainable AI for Raman Spectroscopy.
<https://arxiv.org/abs/2503.14567>

Chen, R.H., Dong, J. & Yang, W. (2025). Quantum Biology, Quantum Simulation and Quantum Coherent Devices. doi.org/10.48550/arXiv.2511.14363

das-Nano (o.J.). The new contactless standard for coating thickness measurement. <https://das-nano.com/products/irys> [6.11.2025]

e-mobil BW (2023), Strukturstudie BW 2023, Transformation der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie in Baden-Württemberg durch Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung.

FAU (o.J.). Superkontinuum-Absorptionsspektroskopie. <https://www.ltt.tf.fau.de/forschung/arbeitsgruppen/verbrennung-und-reaktive-stroemungen/forschungsschwerpunkte/superkontinuum-absorptionsspektroskopie> [21.10.2025]

FRAMOS (o.J.). Bildverarbeitung mit Hyperspektral-Sensoren: Das richtige Design für Ihre Anwendung. <https://framos.com/de/fachartikel/bildverarbeitung-mit-hyperspektral-sensoren-das-richtige-design-fuer-ihre-anwendung>. [25.09.2025]

FSP Functional Materials Science (2025). Design, Synthese und Analyse hochentwickelter Materialien. https://www.uibk.ac.at/media/filer_public/a5/b5/a5b59fad-418a-4912-a1ba-39d9b3d22e6e/a4_broschuere_fsp_funmat_advanced_materials_06.pdf

Gauglitz, G. & Vo-Dinh, T. (Hrsg.) (2003). Handbuch der Spektroskopie

Guo, K., Shen, Y. & Gonzalez-Montiel, G.A. (2025). Artificial Intelligence in Spectroscopy: Advancing Chemistry from Prediction to Generation and Beyond. doi.org/10.48550/arXiv.2502.09897

Heckner, M. (2017). Zerstörungsfreie Prüfmethode zur Oberflächencharakterisierung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1359980/1359980.pdf>

Helmdach, L. (2013). Application of process analytical technology (PAT) tools to develop and monitor scalable crystallization processes of pharmaceuticals. <https://repo.bibliothek.uni-halle.de/bitstream/1981185920/7911/1/Thesis.pdf>

Hochrein, T. (2018). Terahertz-Spektroskopie. Würzburg University Press

Hollas, J. M. (2004). Modern Spectroscopy. Wiley

IHK Heilbronn-Franken (o.J.). Statistischer Jahresüberblick der IHK Heilbronn-Franken. <https://www.ihk.de/heilbronn-franken/produktmarken/zahlen-daten-fakten/zahlen-zur-region-heilbronn-franken/die-region-heilbronn-franken-in-zahlen> [16.01.2026]

IFAM (o.J.). LIBS-System als zentrales Element der Oberflächenanalyse am Fraunhofer IFAM. <https://www.ifam.fraunhofer.de/de/technologien/oberflaechenanalyse-mit-laserinduzierter-plasmaspektroskopie.html>

IOSB (o.J.). SmartSpectrometer – Intelligente Prozess-Analytik für Industrie 4.0. <https://www.iosb.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/smartspectrometer---intelligente-prozess-analytik-fuer-industrie.html> [28.11.2025]

IPM (2019). Echtzeit-Visualisierung von Messdaten. https://www.ipm.fraunhofer.de/de/presse_publicationen/Presseinformationen/echtzeit-visualisierung-von-messdaten.html [4.10.2025]

IPM (o.J.). Optische Quantensensorik. <https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/photonische-systeme-quantentechnologie/komp/optische-quantensensorik.html> [15.10.2025]

IPMS. (2022). Nahinfrarot Spektralanalyse für mobile Anwendungen. <https://www.ipms.fraunhofer.de/de/press-media/press/2022/Near-infrared-spectral-analysis-for-mobile-applications.html> [15.12.2025]

ITWM (o.J.). Condition Monitoring und Predictive Maintenance. <https://www.itwm.fraunhofer.de/de/abteilungen/sys/maschinenmonitoring-und-regelung/predictive-maintenance-instandhaltung-maschinelearning.html>

Kaiser, H. & Brunner, R. (2015). Optische Spektroskopie – Grundlagen und Anwendungen. Springer Vieweg

Kern, S. (2019). Prozessüberwachung mittels Niederfeld-NMR-Spektroskopie als Online-Methode. DOI:10.14279/depositonce-9404

Kraft, M. (2023). Struktur und Spektroskopie Industrieller Produkte. De Gruyter

Kühnemann, F. (o.J.). Quantensensorik: Messen mit verschränkten Photonen. <https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/de/PDFs/Jahresberichte/Artikel-Jahresbericht-2018-19/JAB-2018-quantensensorik-messtechnik.pdf> [17.11.2025]

Lambrechts, A., Gonzalez, P. & Geelen, B. (2014). A CMOS-compatible, integrated approach to hyper- and multispectral imaging. IEEE International Electron Devices Meeting

Mackus, A.J.M., Heil, S.B.S. et al. (2009). Optical emission spectroscopy as a tool for studying, optimizing, and monitoring plasma-assisted atomic layer deposition processes. DOI: 10.1116/1.3256227

Merten, Ch. & Willmann, J. (2005). Physikalische Grundlagen der Spektroskopie. https://www.ia.uni-bremen.de/Lehre/Spektroskopie_1.pdf

Motz, D.A. (2021). Entwicklung von Referenzmaterialien für die Röntgen-Nahkanten-Absorptionsspektroskopie am Laboraufbau. <https://repo.uni-hannover.de/bitstreams/9186a5ac-9e35-48a0-a1d4-6cc8bd99d25f/download>

Nave, C. R. (2023). HyperPhysics – Electromagnetic Spectrum. Georgia State University. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>

Neumann, W. (2012). Optische Spektroskopie mit dispersiven Spektrometern Grundlagen - Bausteine - Systeme – Anwendungen. https://spektroskopie.vdsastro.de/files/pdfs/neumann_d.pdf

Notni, G., Illmann, R., Rosenberger, M. (2018). Education & Training in Multi- and Hyperspectral Measurement Engineering and Quality Assurance. Journal of Physics: Conference Series 1065

Otto, M. (2014). Analytische Chemie. Wiley-VCH

Petermann, Ch. (2012). Breitbandspektroskopie mit Superkontinuum-Quellen. Curvillier

Quackatz, L., Griesche, A., Kannengießer, T. et. al (o.J.). In situ Messung der chemischen Konzentration in der Schmelze während des WIG-Schweißens von Duplexstählen. <https://dokumente.ub.tu->

clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/clausthal_derivate_00002032/L.%20Quackatz%20-%20In%20situ%20Messung.pdf

Research Nester. (o.J.). Marktausblick für mobile und tragbare Spektrometer. <https://www.researchnester.com/de/reports/mobile-and-portable-spectrometers-market/4316> [3.12.2025]

Rombo.ai (o.J.). AI solutions for advanced material analysis. <https://rombo.ai/product/#automl-materials> [16.01.2026]

Skoog, D. A., Holler, F. J. & Crouch, S. R. (2018). Principles of Instrumental Analysis. Cengage Learning

Stolte, M. (2008). Dielektrische organische Moleküle, funktionelle supramolekulare Aggregate und ein neues Spektrometer zur elektrooptischen Absorptionsmessung. https://kluedo.ub.rptu.de/frontdoor/deliver/index/docId/2059/file/dissertation_stolte.pdf

VDI-Z (2024). Qualität in der Industrie sichern mittels Terahertz-Spektroskopie. <https://www.ingenieur.de/fachmedien/vdi-z/qualitaetssicherung/qualitaet-in-der-industrie-sichern-mittels-terahertz-spektroskopie> [5.11.2025]

Wiesheu, A. C. (2017). Raman-Mikrospektroskopie zur Analyse von organischen Bodensubstanzen und Mikroplastik. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1356861/1356861.pdf>

Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken (o.J.). Heilbronn-Franken – Im Zentrum Europas. <https://www.heilbronn-franken.com/de/region/heilbronn-franken-ueberblick/lage-der-region.html> [8.01.2026]

Xia, J., Xia, Y. & Xiao, D. (2024). LAS-on-edge: A real-time laser absorption spectroscopic water vapor sensor on edge computing platforms. doi.org/10.1016/j.snb.2024.136258

Zajonz, F. (2022). Fertigungsintegrierte spektroskopische Prozessanalytik zur technischen Qualitätssicherung struktureller Glasklebungen. https://kluedo.ub.rptu.de/frontdoor/deliver/index/docId/6856/file/Diss_Zajonz_Qualit%c3%a4tssicherung_Glaskleben.pdf

Žilvinas, N., Tervydis, P. & Svilainis, L. (2024). Battery Powered Edge Computing Acceleration for Smart Agriculture Applications: A Use Case for Resonant Ultrasound Spectroscopy. DOI: 10.1109/AC-CESS.2024.3509732

Ergänzende Literatur

Atkins, P., de Paula, J. & Keeler, James J. (2014). Physikalische Chemie, Wiley

Griffiths, P. R. & de Haseth, J. A. (2007). Fourier Transform Infrared Spectrometry. Wiley

Günzler, H. & Gremlich, H.-U. (2003). IR-Spektroskopie – Eine Einführung. Wiley-VCH

Hecht, E. (2017). Optics. Pearson