



Learner Centric Advanced Manufacturing Platform

D3.2 - M36 - Synthesis Bericht:

D3.2 – M36 Digital Technologies 4.0 and Green Transition Impacts on Predictive Maintenance, Supply Chain and Alignment of VET Offer and Industry Needs in Advanced Manufacturing in the Basque Country

WP3 – Observatory - D3.2 - M36 – Synthesis Report



**Co-funded by
the European Union**

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.



Co-funded by
the European Union

Dieses Projekt wurde durch die Europäische Union finanziert. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die der Autor:innen und spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Union oder der Exekutivagentur Bildung, Audiovisuelles und Kultur (EACEA) wider. Weder die Europäische Union noch die EACEA können dafür verantwortlich gemacht werden.



Dieses Werk ist von der LCAMP-Partnerschaft lizenziert. Die Lizenz ist eine Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

LCAMP Partner:

TKNIKA – Basque VET Applied Research Centre, CIFP Miguel Altuna LHII, DHBW Heilbronn – Duale Hochschule, Baden-Württemberg, Curt Nicolin High School, AFM – Spanish Association of Machine Tool Industries, EARLALL – European Association of Regional & Local Authorities for Lifelong Learning, FORCAM, CMQE: Association campus des métiers et des qualifications industrie du future, MV: Mecanic Vallée, KIC: Knowledge Innovation Centre, MADE Competence Centre Industria 4.0; AFIL: Associazione Fabbrica Intelligente Lombardia, SIMUMATIK AB; Association HVC Association of Slovene Higher Vocational Colleges; TSCMB: Tehniški šolski center Maribor, KPDoNE: Kocaeli Directorate Of National Education; GEBKİM OIZ and CAMOSUN college.



Zusammenfassung des Dokuments

Art des Dokuments	Öffentlicher Bericht
Titel	Synthesis Report of D3.2 – M36 PdM – SCM – BC reports
Autorenschaft	Pascal Pichoutou, Jesus Rebolledo
Co-Autorenschaft	Vesna Novak, Eda Ipek, Camille Leonard, Ralf Steck, Richard Gale, Pablo Marino
Rezensent	Hervé Danton
Datum	Juni, 2025
Status des Dokuments	1.0
Dokument Beschreibung	D3.2 – M36 – Synthesebericht der drei Berichte: D3.2 – M36 Digitale Technologien 4.0 und Auswirkungen des ökologischen Wandels auf die vorausschauende Instandhaltung, die Lieferkette und die Abstimmung des Berufsbildungsangebots auf die Anforderungen der Industrie im Bereich der fortschrittlichen Fertigung im Baskenland
Zitieren Sie dieses Dokument als:	Pichoutou et al., 2025. - D3.2 - M36 - Synthesis Report of the 3 reports: D3.2 – M36 Digital Technologies 4.0 and Green Transition Impacts on Predictive Maintenance, Supply Chain and Alignment of VET Offer and Industry Needs in Advanced Manufacturing in the Basque Country
Dokumentebene	Öffentlich



GLOSSAR UND/ODER AKRONYME

AFDET - French Association for the Development of Technical Education (Französischer Verband zur Förderung der technischen Ausbildung)

AFM - Asociación de Fabricantes de Máquina Herramienta- Machine Tool Manufacturers Association (Verband der Werkzeugmaschinenhersteller – Machine Tool Manufacturers Association)

AFNOR - French association for standardisation (Französischer Normungsverband)

AI - Artificial Intelligence

AR - Augmented Reality (Erweiterte Realität)

BC report - Basque Country report (Report des baskischen Partners)

CAGR - Compound Annual Growth Rate (Jährliche Wachstumsrate auf Zinseszinsbasis)

CAM - Computer-Aided Manufacturing (computergestützte Fertigung)

CMMS - Computerized Maintenance Management System (computergestütztes Instandhaltungsmanagementsystem)

CNC - Computer Numerical Control (computergesteuerte numerische Steuerung)

CoVE - Centres of Vocational Excellence (Berufsbildungszentren)

EaaS - Equipment-as-a-Service (ein nutzungsbasiertes Bereitstellungsmodell)

EQF - European Qualification Framework (Europäischer Qualifikationsrahmen)

ESCO - European Skills, Competences, Qualifications and Occupations (Europäische Fähigkeiten, Kompetenzen, Qualifikationen und Berufe)

FCS - Finite Capacity Scheduling (Kapazitätsorientierte Feinplanung)

GSCM - Green Supply Chain Management (Nachhaltiges Lieferkettenmanagement)

HVET - Higher Vocational Education and Training (Höhere berufliche Bildung und Ausbildung)

ICS - Infinite Capacity Scheduling (Feinplanung unter der Annahme unbegrenzter Ressourcenkapazitäten)

IoT - Internet of Things (internet der Dinge)

IT - Information Technology (Informationstechnologie)

IUT - Instituts Universitaires de Technologie (Technologische Hochschulinstitute an französischen Universitäten)

LCAMP - Learner-Centric Advanced Manufacturing Platform

LLM - Large Language Model (KI-gestütztes Sprachmodell)

MaaS - Maintenance as a Service (Dienstleistungsorientiertes Wartungsmodell)

MOOC - Massive Open Online Course (Offener Onlinekurs mit großer Teilnehmerzahl)

MPS - Master Production Schedule (Primärbedarfsplan der Fertigung)

MRP - Material Resource Planning (Materialbedarfsplanung)

MV - *Mecanic Vallée*

NLP - Natural Language Processing (Computerbasierte Verarbeitung menschlicher Sprache)

PdM - Predictive Maintenance (Prädiktive Instandhaltung)

PdMaaS - PdM-as-a-Service (Vorausschauende Wartung als Dienstleistung)

PLC - Programmable Logic Controller (Speicherprogrammierbare Steuerung)

ROI - Return On Investment (Kapitalrendite)

SCM - Supply Chain Management (Lieferkettenmanagement)

SCOR - Supply Chain Operations Reference (Referenzmodell für Lieferkettenprozesse)

S&OE - Sales and Operational & Execution (Operative Umsetzung von Vertriebs- und Betriebsplänen)

S&OP - Sales and Operations Planning (Vertriebs- und Operationsplanung)



SLMs - Task-Specific Language Models (Aufgabenspezifische Sprachmodelle)

SME - Small and Medium-sized Enterprises (KMU Kleinere und mittlere Unternehmen)

TKNIKA - Centre for Applied Research in Vocational Training in the Basque Country (Zentrum für angewandte Forschung in der beruflichen Bildung im Baskenland)

TPM - Total Productive Maintenance (ein systematischer Ansatz zur Maximierung der Anlagenverfügbarkeit)

VR - Virtual Reality (Computergenerierte, interaktive Scheinwirklichkeit)

XR - Extended Reality (Technologiegestützte Erweiterung der realen Wahrnehmung)



INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	6
ZUSAMMENFASSUNG	7
1. EINLEITUNG	9
1.1. Ziel des Berichts	9
1.2. Methoden	10
1.3. Kontexte & Marktdynamiken	11
2. AUFKOMMENDE TECHNOLOGIEN	13
3. AUSWIRKUNGEN DER DIGITALEN UND ÖKOLOGISCHEN TRANSFORMATION AUF KMU	17
3.1. Technologische Veränderungen in den beobachtungsfeldern	17
3.2. Beiträge zur grünen Transformation	24
3.3. Auswirkungen auf Betrieb, Organisation und Arbeitskräfte	25
3.4. Herausforderungen und Fortschritte bei der Technologieeinführung in KMU	29
3.5. Zukünftige Entwicklungen und strategische Empfehlungen	35
4. TRENDS UND AUSWIRKUNGEN DES DIGITALEN UND GRÜNEN WANDELS AUF BERUFSBILDUNGSZENTREN	38
4.1. Herausforderungen und Chancen für Berufsbildungszentren	38
4.2. Auswirkungen auf Ausbildung und vermittelte kompetenzen	42
4.3. Strategische Rolle der Berufsbildungseinrichtungen	49
4.4. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	50
5. FAZIT UND AUSBLICK	52
5.1. Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	52
5.2. Schlussfolgerungen für die Strategieentwicklung	56
5.3. Empfehlungen	57
5.4. Ausblick	58
6. REFERENZEN	60
7. INDEX DER TABELLEN	61
8. ANHANG	62
8.1. Anhang 1 – SKILL NEEDS	62



ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt „LCAMP“ (Learner-Centric Advanced Manufacturing Platform) ist Teil der CoVE-Initiative und zielt darauf ab, regionale Kompetenzökosysteme im Bereich der fortschrittlichen Fertigung durch Zusammenarbeit, Resilienz und Innovation zu stärken. Dieser Synthesebericht fasst die wichtigsten Ergebnisse und strategischen Erkenntnisse aus drei eingehenden Studien zu den Themen vorausschauende Instandhaltung (PdM), Lieferkettenmanagement (SCM) und Abstimmung des Berufsbildungsangebots auf die Bedürfnisse der Industrie (BC) zusammen, die im Rahmen des LCAMP-Projekts durchgeführt wurden. Er wurde vom LCAMP-Observatorium in Zusammenarbeit mit dem französischen Cluster Mecanic Vallée und dem Campus des Métiers et des Qualifications Industrie du Futur sowie Partnern aus Deutschland, Italien, Slowenien, dem Baskenland und Kanada entwickelt. Er soll KMU, Berufsbildungszentren und politischen Entscheidungsträgern strategische Erkenntnisse liefern, um die industrielle Transformation mit der Bildung und der Entwicklung von Kompetenzen in Einklang zu bringen.

Dieser Bericht stellt ein zentrales Element der strategischen Roadmap zur Förderung von Nachhaltigkeit und Wachstum in der fortgeschrittenen Fertigung innerhalb der Europäischen Union (EU) und darüber hinaus dar. Er fasst Erkenntnisse aus drei fokussierten Untersuchungen zusammen – zum Bereich Predictive Maintenance (PdM) und Instandhaltung, zur Lieferkettensteuerung mit Schwerpunkt auf Profitplanung, S&OP, MPS, MRP, FCS/ICS-Prozessen (in diesem Bericht als SCM 4.0 bezeichnet) sowie zur Abstimmung der beruflichen Bildung (VET) mit den industriellen Anforderungen (BC) – und bewertet, wie technologische und organisatorische Veränderungen das Ökosystem kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) sowie die sie unterstützenden Berufsbildungszentren transformieren.

Der Bericht zeigt auf, wie Digitalisierung und ökologische Transformation industrielle Prozesse neugestalten und dabei sowohl Chancen als auch Herausforderungen mit sich bringen. Während digitale und grüne Transformationen in der Industrie rasch voranschreiten – wobei Großunternehmen häufig eine Vorreiterrolle bei der Einführung von Technologien wie Künstlicher Intelligenz, digitalen Zwillingen und fortgeschrittener Analytik einnehmen – benötigen KMU aufgrund begrenzter finanzieller und personeller Ressourcen eher iterative und modulare Ansätze. Dies stellt eine Herausforderung für Berufsbildungseinrichtungen dar, die eine vielfältige Schülerschaft auf einen zunehmend komplexen Arbeitsmarkt vorbereiten müssen. Trotz dieser Dichotomie sind VET-Zentren in einer einzigartigen Position, um den sich wandelnden Anforderungen der Industrie durch verstärkte Zusammenarbeit, Innovation und systemische Integration gerecht zu werden.

Zentrale Erkenntnisse dieser Synthese umfassen:

- **Einführung digitaler Technologien:** KMU machen schrittweise Fortschritte bei der Einführung von Technologien wie cloudbasierten PdM-Systemen und KI-gestützten SCM-Plattformen. Die Umsetzung verläuft jedoch uneinheitlich, was auf fehlende interne Fachkompetenz, unzureichende Infrastruktur und finanzielle Hürden zurückzuführen ist.
- **Kompetenzlücken und Arbeitsmarktfähigkeit:** Es besteht ein dringender Bedarf an technischen Kompetenzen (z. B. Datenanalyse, Internet der Dinge (IoT), Künstliche Intelligenz (KI), Cybersicherheit) sowie an überfachlichen und sozialen Fähigkeiten (z. B. Anpassungsfähigkeit, Zusammenarbeit, systemisches Denken). Berufsbildungseinrichtungen müssen diese Lücken durch flexible und hybride Ausbildungsansätze schließen, was eine engere Zusammenarbeit zwischen Industrie und Berufsbildungszentren sowie eine stärkere Eigenverantwortung der VET-Zentren in Europa erfordert.



- **Betriebliche und organisatorische Transformation:** Die digitale und grüne Transformation verändert industrielle Abläufe grundlegend und fördert einen kulturellen Wandel hin zu mehr Agilität, bereichsübergreifender Zusammenarbeit und datenbasierten Entscheidungsprozessen. Diese Veränderungen erfordern entsprechende Reformen in der Aus- und Weiterbildung.
- **Beitrag zur Nachhaltigkeit:** PdM- und SCM-Technologien unterstützen die grüne Transformation direkt, indem sie die Energieeffizienz verbessern, Ressourcenverschwendung minimieren und Praktiken der Kreislaufwirtschaft ermöglichen. Gleichzeitig stärken sie die industrielle Resilienz und langfristige Wettbewerbsfähigkeit.
- **Hemmnisse bei der Umsetzung:** Zu den häufigsten Hindernissen zählen hohe Implementierungskosten, Widerstand gegenüber Veränderungen, fragmentierte Datensysteme und Bedenken hinsichtlich der Cybersicherheit. Maßgeschneiderte Strategien und Unterstützungsmechanismen sind erforderlich, um KMU den Übergang von der Erprobung zur breiten Anwendung zu erleichtern.
- **Strategische Empfehlungen:** Der Bericht spricht sich für eine bessere Abstimmung zwischen Industrie und Wissenschaft, eine verstärkte Investition in Berufsbildungszentren sowie koordinierte Initiativen aus, die Digitalisierung und Nachhaltigkeit gemeinsam adressieren. Die Integration zentraler Technologien in die VET-Curricula und die gemeinsame Entwicklung mit KMU sind entscheidende Erfolgsfaktoren für die Zukunftsfähigkeit.

Die Realisierung eines nachhaltigen, robusten und zukunftsorientierten Fertigungssektors hängt maßgeblich von der Fähigkeit ab, digitale und grüne Technologien nahtlos in industrielle Prozesse zu integrieren und gleichzeitig die Bildungspraktiken so zu transformieren, dass sie den sich wandelnden Anforderungen der Wirtschaft gerecht werden. Durch die Ausrichtung auf neue industrielle Bedürfnisse und die Entwicklung innovativer, lernzentrierter Strategien in der beruflichen Bildung (VET) legt dieser Bericht konkrete Handlungsempfehlungen vor, um die Arbeitsmarktfähigkeit zu verbessern, nachhaltige Praktiken zu fördern und ein widerstandsfähiges industrielles Ökosystem für Europa und darüber hinaus aufzubauen.



1. EINLEITUNG

1.1. ZIEL DES BERICHTS

Ziel dieses Dokuments ist es, zur übergeordneten Zielsetzung beizutragen, eine Struktur und Methodik für die Beobachtung und Analyse technologischer Trends, Kompetenzanforderungen und Beschäftigungsentwicklungen im Bereich der fortgeschrittenen Fertigung (Advanced Manufacturing) zu definieren – mit dem Ziel, den zukünftigen Erfolg von Lernenden in Berufsbildungszentren (VET) in der gesamten Europäischen Union zu unterstützen.

Die Ausarbeitung stützt sich auf die Ergebnisse von drei Beobachtungsfeldern im Rahmen des LCAMP-Projekts, dem Bereich Predictive Maintenance (PdM) und Instandhaltung (Pichoutou Pascal et al., 2025a), der Lieferkettensteuerung mit Fokus auf Profitplanung, S&OP, MPS, MRP, FCS/ICS-Prozesse (in dieser Analyse als SCM 4.0 bezeichnet) (Pichoutou Pascal et al., 2025b) sowie der Abstimmung der beruflichen Bildung (VET) mit industriellen Anforderungen (BC) (Pablo Marino, 2025), und fasst diese zusammen, um eine einheitliche Vision der zentralen technologischen, betrieblichen und arbeitsmarktbezogenen Entwicklungen zu vermitteln, die industrielle Ökosysteme neu gestalten.

Besonderes Augenmerk legt dieser Bericht auf zwei zentrale Transformationsdynamiken der fortgeschrittenen Fertigung:

- Die **digitale Transformation**, die die Integration von Künstlicher Intelligenz (KI), Internet der Dinge (IoT), Datenanalytik und Automatisierung in Produktions- und Planungsprozesse umfasst, und
- die **grüne Transformation**, die nachhaltige Praktiken, Ressourceneffizienz und klimabewusste Innovationen in betrieblichen Strategien vorantreibt.

Vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen wird in dieser Analyse untersucht, wie kleine und mittlere Unternehmen (KMU) auf die beobachteten Veränderungen in den jeweiligen Beobachtungsfeldern reagieren. Dabei stehen ihre Praktiken, Herausforderungen und Bereitschaftsgrade im Fokus, die anhand von Beobachtungen, Umfrageauswertungen und der Dokumentation realer Geschäftsfälle betrachtet werden. Ziel der gewonnenen Erkenntnisse ist es, umsetzbare Benchmarks und strategische Einsichten für zwei zentrale Zielgruppen bereitzustellen:

Für KMU:

- Der Bericht bietet einen Überblick über neue Technologien, Konzepte und Werkzeuge, die in den Beobachtungsfeldern – insbesondere in den Bereichen PdM und SCM – Anwendung finden und zur Effizienzsteigerung von Geschäftsprozessen beitragen können.

Für Berufsbildungseinrichtungen (VET):

- Bereitstellung strategischer Empfehlungen zur Anpassung von Lehrplänen und institutionellen Strategien, und
- Orientierungshilfe für politische und investitionsbezogene Entscheidungen, die die Fähigkeit von Ausbildungszentren stärken, zukünftige Anforderungen des Arbeitsmarktes frühzeitig zu erkennen und darauf zu reagieren.

Im Zentrum dieser Analyse steht das Bekenntnis zu lernzentrierter Innovation: Berufsbildungszentren sollen mit dem nötigen Wissen und den geeigneten Werkzeugen ausgestattet werden, um Lernende nicht nur auf die aktuellen Anforderungen des Arbeitsmarktes vorzubereiten, sondern



auch auf die Zukunft der Arbeit in widerstandsfähigen, nachhaltigen und digital integrierten industriellen Umgebungen.

1.2. METHODEN

Die Methodik, auf der dieser Synthesebericht basiert, folgt dem strukturierten Rahmen des LCAMP-Observatoriums, wie im „Observatory Process Cycle“ (D3.1) definiert. Ziel ist es, neue Berufsfelder im Kontext der fortgeschrittenen Fertigung zu identifizieren, zu analysieren und zu validieren. Die diesjährige Auswahl der Beobachtungsfelder „Predictive Maintenance (PdM)“ und „Supply Chain Management (SCM)“ wurde sowohl durch ihre sektorübergreifende technologische Relevanz als auch durch ihre enge Verbindung zu den digitalen und grünen Transformationen geleitet, wie sie im Arbeitspaket 7 (WP7) von LCAMP beschrieben sind.

Der übergeordnete methodische Ansatz folgt einem mehrstufigen und multimethodischen Design, das die Kombination aus quantitativer Industrieanalyse, qualitativer Einbindung von Berufsbildungseinrichtungen und vertiefenden regionalen Untersuchungen ermöglicht hat.

Methodik der PdM- und SCM-Berichte

Die Forschungsstränge zu Predictive Maintenance (PdM) und Supply Chain Management (SCM) verfolgten einen technologieorientierten Ansatz, der folgende Elemente kombinierte:

- **Länderübergreifende Expertendiskussionen** mit Partnern aus Frankreich, Deutschland, Schweden, Italien, der Türkei und Slowenien zur Festlegung von Prioritäten;
- **Eine umfassende Literaturrecherche** zu wissenschaftlichen Publikationen, Branchenprognosen und internationalen Fallstudien;
- **Triangulierte Datenerhebung**, einschließlich:
 - **Befragungen von KMU und Berufsbildungszentren**, um Erkenntnisse zur Technologieeinführung, Reifegrad, Qualifikationslücken, Weiterbildungsbedarf und Investitionshemmnissen zu gewinnen;
 - **Halbstrukturierte Interviews** mit Unternehmensleitungen und technischen Fachkräften;
- Beide **Forschungsstränge** wurden durch **Fachexperten geprüft und validiert**.

Diese Schritte ermöglichten die fundierte Generierung von Erkenntnissen zu den betrieblichen, organisatorischen und arbeitsmarktbezogenen Auswirkungen der Technologieeinführung. Die Validierung durch alle LCAMP-Partner gewährleistete dabei die methodische Konsistenz.

Methodik des baskischen Berichts (Business Change & Education)

Parallel dazu verfolgte der BC-Bericht (Business Change & Education) eine feldbasierte, bildungszentrierte Methodik mit dem Ziel, zu verstehen, wie Berufsbildungseinrichtungen (VET) auf die Transformationen in der Industrie reagieren. Dies umfasste:

- **Eine vertiefte Regionalstudie im Baskenland**, basierend auf der LCAMP-Analyse 2024 zur Entwicklung von Berufsbildern in der fortgeschrittenen Fertigung;
- **Interviews mit 21 Berufsschullehrern**, von Dozierenden einjähriger Spezialisierungskurse bis hin zu Mentoren in dualen Ausbildungs- und Innovationsprojekten, zur Erfassung pädagogischer Anpassungs- und Innovationspraktiken;
- **Einbindung von 12 Industrieakteuren**, darunter KMU und Technologie-Start-ups, zur Erhebung ihres Fachkräftebedarfs und ihrer Kooperationsmodelle mit Bildungseinrichtungen;
- **Befragungsbeiträge des spanischen Verbands der Werkzeugmaschinenhersteller (AFM)** sowie ergänzende Sekundärrecherchen zu vier ausgewählten Berufsbildern;



- **Abstimmung mit ESCO und anderen europäischen Kompetenzrahmen**, um Konsistenz in der Qualifikations- und Kompetenzanalyse sicherzustellen.

Diese zweistufige Methodik – auf europäischer und regionaler Ebene – ermöglichte ein umfassendes, vertikal integriertes Verständnis darüber, wie digitale und grüne Transformationen das Angebot und die Nachfrage nach Kompetenzen beeinflussen, insbesondere in den Ökosystemen der beruflichen Bildung (VET).

Durch die Integration dieser komplementären methodischen Ansätze bietet der Bericht sowohl eine strategische, gesamteuropäische Perspektive als auch eine praxisorientierte, anwendungsnahe Sichtweise auf die sich wandelnde Dynamik der fortgeschrittenen Fertigung – und stellt damit sicher, dass die Ergebnisse sowohl für politische Entscheidungsträger als auch für Bildungseinrichtungen von hoher Relevanz sind.

1.3. KONTEXTE & MARKTDYNAMIKEN

Im Verlauf des letzten Jahrzehnts hat die beschleunigte Einführung von Technologien der Industrie 4.0 die industriellen Abläufe grundlegend verändert, insbesondere in den beobachteten Bereichen wie Instandhaltung und Predictive Maintenance, Supply Chain Management (SCM), CNC-Bearbeitung und Qualitätskontrolle. Diese Transformationen sind nicht nur technologischer Natur, sondern auch organisatorisch und strategisch, da sie Geschäftsmodelle, Marktdynamiken und Anforderungen an die Arbeitskräfte im europäischen Ökosystem der fortgeschrittenen Fertigung neu definieren.

Laut dem PdM-Bericht wird der globale Markt für Predictive Maintenance mit einem geschätzten Volumen von 10,93 Milliarden USD im Jahr 2024 voraussichtlich bis 2032 auf über 70 Milliarden USD anwachsen und bis 2033 sogar die Marke von 100 Milliarden USD überschreiten. Zu den wichtigsten Treibern zählen der Einsatz von KI, IoT, Cloud-Computing und sensorbasierter Analytik, die eine Echtzeitüberwachung des Maschinenzustands, proaktive Wartungsstrategien und eine Optimierung der Lebenszykluskosten ermöglichen. PdM hat sich zu einem strategischen Enabler in Branchen wie der Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt sowie der industriellen Fertigung entwickelt, mit schneller Verbreitung in Nordamerika, Europa und zunehmender Dynamik im asiatisch-pazifischen Raum.

Gleichzeitig zeigt der PdM-Bericht auch zentrale Lücken auf: Während große Unternehmen häufig Vorreiter bei der Einführung prädiktiver Technologien sind, stehen KMU vor strukturellen Herausforderungen, begrenzte Investitionsmittel, unzureichende digitale Reife und fehlende technische Fachkenntnisse, die ihre Umsetzung verlangsamen. Der Übergang von reaktiver zu prädiktiver Instandhaltung erfordert nicht nur technologische Fähigkeiten, sondern auch neue Organisationsmodelle und Rollenprofile im Unternehmen.

Der SCM-Bericht wiederum verdeutlicht, wie globale Schocks, wie COVID-19, geopolitische Spannungen, Inflation und klimabedingte Störungen, die Verwundbarkeit globaler Lieferketten offengelegt haben. Als Reaktion darauf investieren Unternehmen in digitale Liefernetzwerke (DSNs), lokale Beschaffungsstrategien sowie Technologien wie Blockchain, KI, digitale Zwillinge und fortschrittliche Planungssysteme, um Transparenz, Agilität und Resilienz zu erreichen. SCM entwickelt sich von einer kostenoptimierenden Funktion zu einer strategischen Säule für Innovation und Nachhaltigkeit, mit besonderem Fokus auf Scope-3-Emissionen, Kreislaufwirtschaft und Risikoprävention.

Dennoch fällt es europäischen KMU schwer, mit dem Tempo der Entwicklungen Schritt zu halten. Der SCM-Bericht identifiziert anhaltende Hürden wie:

- Fragmentierte Altsysteme und begrenzte technologische Interoperabilität,
- Finanzielle Einschränkungen und hohe Einstiegskosten für neue Werkzeuge,
- Bedenken hinsichtlich Cybersicherheit und Herausforderungen im Datenmanagement,



- Interner Widerstand gegenüber organisatorischem und prozessuellem Wandel.

Diese Herausforderungen wirken sich direkt auf die Entwicklung der Arbeitskräfte aus. Da Rollen zunehmend datenorientiert und interdisziplinär werden, wird von Beschäftigten erwartet, dass sie traditionelles Fachwissen mit digitalen Kompetenzen, systemischem Denken und der Fähigkeit zu Echtzeitentscheidungen kombinieren.

Diese europäischen Trends spiegeln sich in der regionalen Fallstudie im Baskenland wider und werden durch die Ergebnisse des BC-Berichts zusätzlich untermauert. Das industrielle Ökosystem des Baskenlands, geprägt durch eine starke Mischung aus KMU und innovationsorientierten Unternehmen, durchläuft ähnliche strukturelle Veränderungen. Laut den Erkenntnissen des BC-Berichts werden allein im Jahr 2024 über 44.000 Neueinstellungen im industriellen Sektor der Region erwartet, wobei über 70 % auf die Bereiche Produktion, Instandhaltung, Qualitätssicherung und Engineering entfallen. Der AFM-Cluster hebt den dringenden Bedarf an CNC-Bediener, Instandhaltungstechniker und Qualitätssicherungsfachkräften hervor, die zugleich in der Lage sind, sich in datengetriebenen und vernetzten Systemen zurechtzufinden.

Interviews in der Region Baskenland verdeutlichen den wachsenden Druck auf Ausbildungszentren, auf hybride Kompetenzanforderungen zu reagieren. Unternehmen berichten, dass Rollen zunehmend fluide werden, vormals getrennte Funktionen verschmelzen und Fachkräfte sich flexibel über verschiedene Prozesse hinweg anpassen müssen. Dies unterstreicht die Bedeutung transversaler Kompetenzen, wie Problemlösung, Zusammenarbeit, Anpassungsfähigkeit, ebenso wie technischer Digitalkompetenzen.

Diese Veränderungen sind keine Einzelfälle. Sie spiegeln einen gesamteuropäischen Trend wider:

- Die Konvergenz von digitaler und grüner Transformation, die neue Leistungsstandards, Organisationsmodelle und Qualifikationsanforderungen hervorbringt. Wie der BC-Bericht zeigt, müssen Berufsbildungszentren diese Entwicklungen nicht nur nachvollziehen, sondern ihnen vorausgehen, durch die Erneuerung von Curricula, Partnerschaften mit der Industrie und flexible Lernpfade.

In diesem Kontext übernimmt das LCAMP-Observatorium eine strategische Rolle:

- Es konsolidiert Erkenntnisse aus verschiedenen Regionen, validiert technologische Signale und unterstützt die Ausrichtung der Berufsbildungssysteme an den sich wandelnden Anforderungen des Marktes. Durch die Verbindung makroökonomischer Zukunftsanalysen mit praxisnahen Daten aus Regionen wie dem Baskenland liefert dieser Bericht ein umfassendes Bild davon, wie sich die fortgeschrittene Fertigung entwickelt und wie sich Bildung und Ausbildung parallel dazu weiterentwickeln müssen.



2. AUFKOMMENDE TECHNOLOGIEN

Die digitale Transformation der Industrie wird durch eine Reihe fortschrittlicher Technologien vorangetrieben, die die fortgeschrittene Fertigung durch ein Zusammenspiel zentraler Schlüsseltechnologien grundlegend verändern. Diese Innovationen verbessern nicht nur die Leistungsfähigkeit, sondern tragen auch dazu bei, industrielle Prozesse mit Nachhaltigkeitszielen in Einklang zu bringen. Basierend auf den Berichten zu PdM, SCM und BC gibt dieses Kapitel einen Überblick über die wichtigsten Technologien in den jeweiligen Beobachtungsfeldern.

- **Internet of Things (IoT, Internet der Dinge):**
Das IoT spielt eine grundlegende Rolle in zahlreichen Anwendungsbereichen. Es verbindet physische Anlagen über Sensoren und Geräte mit digitalen Systemen und bildet damit die Basis für die Datenerfassung in vielen Feldern.
Der Mehrwert des IoT liegt in seiner Fähigkeit, kostengünstig Echtzeitdaten mit hoher Granularität zu erzeugen. Herausforderungen bestehen jedoch in der Kalibrierung von Sensoren, der Integration in bestehende Netzwerke, Risiken im Bereich Cybersicherheit sowie der Gefahr einer Datenüberflutung ohne geeignete Filter- oder Analysemechanismen.
- **Cloud- und Edge-Computing:**
Diese Technologien unterstützen die Datenspeicherung, -verarbeitung und -analyse in verteilten Umgebungen:
 - **Cloud-Computing** ermöglicht es KMU, auf fortschrittliche Werkzeuge wie prädiktive Analyseplattformen, Dashboards zur Echtzeitüberwachung, kollaborative Planungssysteme und skalierbare Datenspeicherlösungen zuzugreifen – ohne umfangreiche lokale IT-Infrastruktur. Cloud-Plattformen aggregieren Daten, bieten KI-Funktionalitäten und unterstützen durch Dashboards eine dezentrale Entscheidungsfindung.
 - **Edge-Computing** ermöglicht die Datenverarbeitung in unmittelbarer Nähe zur Datenquelle, wodurch Latenzzeiten und Netzabhängigkeiten reduziert werden – entscheidend für Anwendungen mit Echtzeitanforderungen. Es unterstützt zudem lokale Abläufe in Lagerhäusern oder Fertigungslinien.
- **Cloud-Plattformen** bieten Skalierbarkeit und Interoperabilität, während Edge-Computing Autonomie und Geschwindigkeit gewährleistet. Haupthemmnisse sind Datensicherheit, Systemintegration und Dienstzuverlässigkeit – insbesondere in Regionen mit schwacher Infrastruktur.
- **Digitale Zwillinge (Digital Twins):**
 - Ein digitaler Zwilling bildet einen physischen Prozess oder ein System virtuell ab. Er kombiniert Sensordaten, historische Aufzeichnungen und KI-basierte Prognosen, um das Verhalten realer Systeme zu simulieren.
 - Digitale Zwillinge schaffen erheblichen Mehrwert, indem sie reale und virtuelle Abläufe miteinander verknüpfen. Herausforderungen bestehen in der Modellierungskomplexität, dem Bedarf an hochwertigen Daten und der Integration in bestehende Altsysteme.



- **Künstliche Intelligenz (KI):**

- KI entwickelt sich rasch zum Rückgrat prädiktiver Systeme in zahlreichen Anwendungsfeldern. Sie ermöglicht es Systemen, aus Daten zu lernen, komplexe Muster zu erkennen, Vorhersagen zu treffen und Entscheidungsprozesse zu unterstützen.
- KI fördert den Übergang von regelbasierten Automatisierungen hin zu lernfähigen, adaptiven und optimierenden Systemen. Sie befähigt Unternehmen, Wartungszyklen zu optimieren, Produktionsprozesse zu verschlanken und die Reaktionsfähigkeit von Lieferketten zu verbessern.

Das breite Feld der Künstlichen Intelligenz (KI) umfasst eine Vielzahl fortschrittlicher Methoden und Architekturen. Die folgende Übersicht hebt zentrale Kategorien hervor – Machine Learning und Deep Learning, Neuronale Netze und Transformer, Generative KI und Datenaugmentation, NLP und Konversations-KI, Erklärbare KI (XAI) und Interpretierbares Maschinelles Lernen (iML), Clustering-Algorithmen zur Optimierung sowie Optimierungsalgorithmen – die jeweils eine spezifische Rolle bei der Ermöglichung prädiktiver, adaptiver und transparenter Entscheidungsfindung in industriellen Kontexten spielen.

Machine Learning (ML) and Deep Learning (DL)

ML-Modelle – wie Entscheidungsbäume, Random Forests und Support Vector Machines (SVMs) – finden breite Anwendung in zahlreichen Bereichen. Sie unterstützen die Prognose von Anlagenverschleiß, die Klassifikation von Komponentengefehlern, die Vorhersage von Nachfrageschwankungen sowie die Optimierung von Lagerbeständen und Produktionsplanung.

- **Entscheidungsbäume** ermöglichen interpretierbare, regelbasierte Entscheidungsfindung.
- **Random Forests**, als Ensembles von Entscheidungsbäumen, verbessern die Vorhersagegenauigkeit durch die Aggregation mehrerer Bäume.
- **SVMs** werden in Klassifikationsaufgaben (z. B. Segmentierung von Lagerbeständen) und Regressionsmodellen (z. B. Nachfrageprognosen) eingesetzt und sind besonders effektiv bei hochdimensionalen Datensätzen.
- **Mehrwert:** Hohe Genauigkeit und Flexibilität in strukturierten Umgebungen.
- **Einschränkungen:** Erfordern große, qualitativ hochwertige Datensätze sowie eine sorgfältige Parametereinstellung.

Neural Networks and Transformers

Neuronale Architekturen – darunter Recurrent Neural Networks (RNNs) und Long Short-Term Memory (LSTM)-Netzwerke – eignen sich besonders für Zeitreihenprognosen und prädiktive Planung. Sie sind essenziell für die Modellierung von Produktionsbedarfen, Wartungszyklen oder Beschaffungstrends.

- Transformer-Modelle (z. B. BERT, GPT) werden zunehmend für komplexe textbasierte Analysen eingesetzt, etwa zur Interpretation von Berichten oder zur Analyse von Vertragsinhalten.
- **Mehrwert:** Sie ermöglichen die Verarbeitung sequenzieller Abhängigkeiten und unstrukturierter Daten mit hoher Prognosekraft.
- **Einschränkungen:** Sie sind ressourcenintensiv und ohne spezialisierte Werkzeuge schwer interpretierbar.



Generative AI and Data Augmentation

LLMs (Large Language Models), wie BERT und GPT, verarbeiten große Datensätze und erkennen Anomalien in Echtzeit bei der Planung. Sie sind besonders effektiv im Umgang mit langfristigen Abhängigkeiten in Daten und eignen sich unter anderem für:

- Dynamische Anpassungen von Zeitplänen
- Generierung synthetischer Ausfalldaten zur Überwindung des Mangels an historischen Störungsdaten – dies ermöglicht robuste Modelle auch bei begrenzten historischen Datenbeständen
- Verbesserte Schulung von KI-Modellen durch die Simulation seltener, aber kritischer Ereignisse
- Generierung natürlicher Sprache, z. B. zur Zusammenfassung von Wartungsprotokollen, Erstellung von Arbeitsaufträgen oder zur Unterstützung von Techniker:innen
- **Mehrwert:** Ermöglicht KI-Anwendungen auch in datenarmen Kontexten und verbessert die Generalisierungsfähigkeit von Modellen
- **Einschränkungen:** Erfordert robuste Trainingsframeworks und zuverlässige Validierungsmechanismen

NLP and Conversational AI

Natural Language Processing (NLP) ermöglicht es KI-Systemen, unstrukturierte Daten wie E-Mails, Chatprotokolle oder Technikerberichte zu analysieren:

- Chatbots optimieren die Kommunikation mit Lieferanten.
- Named Entity Recognition (NER) extrahiert strukturierte Informationen aus Texten.
- Topic Modeling (z. B. LDA) und Sentiment-Analyse unterstützen bei der Risikofrüherkennung und im Personalmanagement.
- **Mehrwert:** Automatisiert die Wissensextraktion und Kommunikation.
- **Einschränkungen:** Sensibel gegenüber sprachlichen Nuancen und datenschutzrechtlichen Anforderungen.

Explainable AI (XAI) and Interpretable Machine Learning (iML)

Die Integration von Künstlicher Intelligenz (KI), dem Internet der Dinge (IoT) und Mensch-Maschine-Schnittstellen verbindet Hard- und Softwaresysteme, um Geschäftsprozesse der Automatisierung zu optimieren. Mit dem Übergang zur Industrie 5.0 verlagert sich der Fokus von maschinenzentrierten hin zu menschenzentrierten KI-Anwendungen, bei denen KI-Technologien die menschliche Entscheidungsfindung unterstützen und so die Produktivität steigern.

Die effektive Umsetzung hängt jedoch stark von der Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Daten, qualifizierter Fachkräfte zur Entwicklung und Wartung von Modellen sowie vom Vertrauen der Anwendenden in die Systemausgaben ab. Für viele KMU stellen diese Voraussetzungen nach wie vor eine Hürde dar – insbesondere in Abwesenheit externer Unterstützungsstrukturen oder modularer, leicht integrierbarer Lösungen.

Um Bedenken hinsichtlich Vertrauens und Nutzbarkeit zu begegnen, entstehen neue Ansätze, die KI durch Erklärbarkeit und Interpretierbarkeit transparenter und zugänglicher machen:

- XAI (z. B. SHAP, LIME) stärkt das Vertrauen der Endnutzenden, indem es nachvollziehbar macht, wie KI-Systeme zu ihren Entscheidungen gelangen. Dies hilft Fachkräften, die Logik hinter KI-generierten Ergebnissen zu verstehen, fördert das Vertrauen und erleichtert die Akzeptanz.



- iML (Interpretable Machine Learning) nutzt von Natur aus interpretierbare Modelle wie Entscheidungsbäume, Generalisierte Additive Modelle (GAMs) und Explainable Boosting Machines (EBMs). iML stellt sicher, dass eingesetzte Entscheidungsmodelle transparent und nachvollziehbar sind. Durch die Möglichkeit, die Entscheidungslogik nachzuvollziehen, trägt iML zu einer verantwortungsvollen und kontrollierbaren Integration von KI in operative Kontexte bei.
- **Mehrwert:** Erhöht die Transparenz und unterstützt die Einhaltung regulatorischer Anforderungen.
- **Einschränkungen:** Erfordert eine Anpassung an spezifische Modellarchitekturen.

Clustering-Algorithmen für die Optimierung

KI nutzt Clustering-Techniken zur Verbesserung von Planung, Klassifikation und Terminierung:

- K-Means, DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) und Gaussian Mixture Models (GMM) sind weit verbreitete unüberwachte Lernalgorithmen zur Gruppierung ähnlicher Datenpunkte.
- **Mehrwert:** Automatisiert Klassifikationen und steigert die Prozesseffizienz.
- **Einschränkungen:** Empfindlich gegenüber Ausreißern, erfordert Feinabstimmung der Parameter.

Optimierungsalgorithmen

KI-gestützte Optimierungsverfahren werden eingesetzt, um komplexe Probleme der Ressourcenallokation auszubalancieren:

- Genetische Algorithmen (GA): Multi-Objective Scheduling und Ressourcenabgleich
- Ant Colony Optimization (ACO): Dynamische Routenplanung und Ablaufsteuerung
- Particle Swarm Optimization (PSO): Adaptive Lastverteilung und Beschaffungsplanung

Zusammenfassend sind diese Methoden entscheidend für Produktionsplanung, Beschaffungsabstimmung und Logistik.

- **Mehrwert:** Lösen großskalige Allokationsprobleme in Echtzeit
- **Einschränkungen:** Hoher Rechenaufwand und empfindlich gegenüber Parametereinstellungen

- **Cybersecurity:** Cybersicherheit ist nicht nur ein technisches Thema, sondern ein grundlegendes Element des Vertrauens in digitale Systeme. Mit der zunehmenden Abhängigkeit von KI, Cloud-Technologien und dem Internet der Dinge (IoT) wird eine robuste Cyber-Resilienz unerlässlich – insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU), denen häufig die notwendige Infrastruktur oder Expertise fehlt. Diese technologischen Fortschritte bringen neue Verwundbarkeiten mit sich und machen industrielle Steuerungssysteme (ICS) sowie Infrastrukturen der Betriebstechnologie (OT) anfälliger für Cyberangriffe.

Der Bericht hebt drei zentrale Risiken hervor:

- **Advanced Persistent Threats (APTs):** Zielgerichtete Angriffe auf sensible Daten von Lieferanten oder aus der Logistik
- **Supply Chain Poisoning:** Einschleusung schadhafter Komponenten in vorgelagerte Prozesse
- **Datenpannen:** Verursachen Betriebsunterbrechungen und Reputationsschäden

Zur Risikominderung konzentrieren sich Initiativen wie DETECTA 2.0 auf die Integration von Cybersicherheitsmaßnahmen in Predictive Maintenance (PdM), um die Resilienz von KMU gezielt zu stärken.



- **Blockchain:** Obwohl die Einführung von Blockchain unter KMU noch in den Anfängen steckt, wird sie als vielversprechende Lösung für Rückverfolgbarkeit, Transparenz, Datenintegrität in dezentralen Systemen sowie für das Vertragsmanagement identifiziert – und als strategischer Enabler für Cybersicherheit, da sie unveränderliche und dezentrale Transaktionsaufzeichnungen ermöglicht.
Der Mehrwert von Blockchain liegt in der Schaffung von Transparenz und Vertrauen. Ihre Umsetzung ist jedoch komplex und in KMU-Umgebungen bislang wenig verbreitet, vor allem aufgrund technischer Hürden und hoher Implementierungskosten.

3. AUSWIRKUNGEN DER DIGITALEN UND ÖKOLOGISCHEN TRANSFORMATION AUF KMU

3.1. TECHNOLOGISCHE VERÄNDERUNGEN IN DEN BEOBACHTUNGSFELDERN

Aufbauend auf den zuvor erläuterten fortschrittlichen Technologien richten wir den Blick nun auf deren konkrete Einsatzmöglichkeiten in den im Rahmen der Berichte zu Predictive Maintenance (PdM), Supply Chain Management (SCM) und BC analysierten Anwendungsfeldern.

Diese Gruppe fortschrittlicher Technologien verändert grundlegend die Bereiche Predictive Maintenance (PdM) und Supply Chain Management (SCM). Obwohl sich diese beiden Anwendungsfelder in Umfang und operativer Logik unterscheiden, wirken die digitalen Technologien nicht nur als Werkzeuge, sondern als Katalysatoren neuer industrieller Praktiken. Die Einführung dieser Technologien in PdM und SCM zeigt, dass beide Bereiche zunehmend auf ähnliche technologische Grundlagen und Innovationsmodelle zurückgreifen: Künstliche Intelligenz (KI), das Internet der Dinge (IoT), Cloud Computing und digitale Zwillinge gewinnen stetig an Bedeutung. Diese Technologien ermöglichen nicht nur Automatisierung, sie verändern grundlegend, wie Entscheidungen getroffen, Ressourcen verteilt und Leistungen optimiert werden.

PdM-Technologien dienen in erster Linie der Vorhersage von Geräteausfällen, der Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit und der Reduktion ungeplanter Eingriffe. Sie verändern die Art und Weise, wie Unternehmen Anlagen überwachen, warten und instandhalten. IoT-Sensoren ermöglichen eine Echtzeitüberwachung des Anlagenzustands. KI unterstützt die frühzeitige Erkennung von Verschleiß und Ausfallrisiken. Digitale Zwillinge simulieren das Betriebsverhalten, während Cloud-Plattformen Daten in großem Umfang aggregieren und analysieren.

SCM-Technologien hingegen kommen bei Prognose, Planung, Terminierung und Netzwerkkoordination zum Einsatz. Der Wandel zeigt sich in der zunehmenden Nutzung von KI zur Bedarfsprognose und Risikoanalyse, von IoT zur Verfolgung von Anlagen und Lieferungen sowie von Cloud-Systemen zur Synchronisation von Abläufen zwischen Lieferanten und Kunden. SCM-Prozesse, insbesondere in den Bereichen Planung, Ausführung und Überwachung, werden neugestaltet, um digitale Fähigkeiten für mehr Agilität und Resilienz zu nutzen.



3.1.1. TECHNOLOGISCHE LEITBILDER UND STRATEGISCHE AUSRICHTUNG

Während sich Anwendungen der Predictive Maintenance (PdM) auf interne Leistungsfähigkeit, Systemzuverlässigkeit und Kostenoptimierung konzentrieren, stehen bei Anwendungen im Supply Chain Management (SCM) Netzwerkkoordination, Flexibilität und Nachhaltigkeit im Vordergrund. Dies spiegelt unterschiedliche technologische Leitbilder wider:

- PdM priorisiert Anlagenverfügbarkeit und Prozessexzellenz mit dem Ziel, ungeplante Stillstände zu vermeiden und Wartungskosten effizient zu gestalten.
- SCM legt den Fokus auf Agilität, durchgängige Koordination und Resilienz – insbesondere in volatilen Märkten oder regulativen Kontexten.

Beide Bereiche entwickeln sich in Richtung autonomer, erklärbarer und dienstleistungsorientierter Systeme. Ihre Implementierungspfade unterscheiden sich jedoch:

- Große Unternehmen treiben die Entwicklung mit integrierten KI- und Digital-Twin-Plattformen voran.
- Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) zeigen zwar eine langsamere Adaption, verfügen jedoch über Potenzial durch modulare Lösungen, cloudbasierte Dienste und kollaborative Ökosysteme.



3.1.2. TECHNOLOGIEN IN DER PRÄDIKTIVEN INSTANDHALTUNG

Predictive Maintenance (PdM) entwickelt sich rasant weiter – weg von traditionellen, zeitbasierten und reaktiven Wartungsansätzen hin zu datengetriebenen, zustandsorientierten Modellen. Dieser Wandel wird maßgeblich durch den Einsatz der oben beschriebenen digitalen Technologien ermöglicht, wie im Folgenden dargestellt.

Internet of Things (IoT)

IoT-Geräte erfassen Echtzeitdaten von Maschinen und ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung durch das Tracking zentraler Parameter wie Vibration, Temperatur, Druck, Energieverbrauch und Schmiermittelzustand. Diese Daten fließen in prädiktive Modelle ein, um Anomalien zu erkennen und Wartungsmaßnahmen proaktiv zu planen.

Die erfassten Daten sind entscheidend für die Zustandsüberwachung und werden direkt in KI-Modelle und Diagnostikplattformen eingespeist.

IoT-Technologien helfen dabei, Ausfälle vorherzusehen, bevor sie die Produktion beeinträchtigen, und ermöglichen eine Fernüberwachung von Anlagen.

Cloud and Edge Computing

Cloud-Plattformen ermöglichen skalierbare Datenspeicherung, Analytik und Wartungs-Dashboards – und versetzen insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in die Lage, Predictive Maintenance (PdM) umzusetzen, ohne eine eigene IT-Infrastruktur aufbauen zu müssen. Sie unterstützen die Entwicklung von „Predictive Maintenance as a Service“ (PdMaaS).

Edge Computing verarbeitet Daten direkt auf der Anlagenebene, was Echtzeitentscheidungen ermöglicht und Latenzzeiten reduziert, ein entscheidender Vorteil in schnell getakteten Produktionsumgebungen.

Digital Twins

Digitale Zwillinge simulieren das dynamische Verhalten von Anlagen und unterstützen dabei „What-if“-Analysen sowie Lebenszyklusprognosen.

In Kombination mit PdM-Software liefern sie Erkenntnisse über Belastungsfaktoren, Energieverbrauch und die voraussichtliche Restlebensdauer von Komponenten.

Diese Simulationen tragen zur Optimierung präventiver Eingriffe und der Ersatzteilplanung bei.

Artificial Intelligence (AI)

Im Wartungsbereich wird Künstliche Intelligenz (KI) eingesetzt, um prädiktive Modelle zu entwickeln, die Geräteausfälle vorhersagen, Anomalien erkennen und optimierte Wartungsmaßnahmen empfehlen.

Je nach Anwendungskontext kommen unterschiedliche KI-Ansätze zum Einsatz:

- **Machine Learning (ML):** ML-Algorithmen werden im Bereich PdM häufig zur Ausfallprognose, Anomalieerkennung und Trendanalyse eingesetzt. Diese Systeme verbessern sich kontinuierlich durch das Lernen aus historischen Daten.
- **Deep Learning (DL):** Als Teilbereich des ML wird DL genutzt, um Sensordaten zu verarbeiten und feine Muster zu erkennen – etwa bei Vibrationen, Temperaturveränderungen oder Druckwerten.



- **Large Machine Learning Models (LMMs):** Diese Modelle integrieren umfangreiche Datensätze und liefern skalierbare Erkenntnisse. In der PdM unterstützen LMMs die Interpretation komplexer Multi-Sensor-Daten.
- **Generative KI / Large Language Models (LLMs):** In der PdM bieten LLMs eine neue Schnittstelle für Techniker, indem sie die Interaktion mit Diagnosetools oder Wartungsanleitungen in natürlicher Sprache ermöglichen. Sie können Wartungsprotokolle zusammenfassen oder prozedurale Anfragen beantworten.

Vertrauen und Benutzerfreundlichkeit:

- **Erklärbare Künstliche Intelligenz (XAI):** In der PdM kommen XAI-Techniken wie GradCAM, DIFFI und ARCANA zum Einsatz, um Bedienern verständlich zu machen, warum ein KI-Modell eine Komponente als fehlerhaft eingestuft hat. Diese Methoden zeigen auf, welche Variablen (z. B. Vibration, Temperatur) maßgeblich zur Anomalieerkennung oder Ausfallprognose beigetragen haben. Beispielsweise bewertet DIFFI die Merkmale, die zur Anomalieerkennung in Zeitreihendaten führen, während ARCANA durch die Analyse von Rekonstruktionsfehlern in Autoencoder-basierten Modellen Ursachen identifiziert. Solche Werkzeuge stärken das Vertrauen in KI-Systeme und ermöglichen fundiertere Entscheidungen.
- **Interpretierbares Machine Learning (IML):** In der PdM konzentriert sich IML auf transparente Modelle wie Entscheidungsbäume, LionForests und Explainable Boosting Machines (EBMs), die nachvollziehbare Logik und regelbasierte Vorhersagen bieten. So generieren LionForests aus Random-Forest-Modellen menschenlesbare WENN-DANN-Regeln zur Erklärung von Fehlerklassifikationen, während EBMs aufzeigen, wie einzelne Eingangsmerkmale die Wartungsergebnisse beeinflussen. Diese Methoden helfen Bedienern und Ingenieuren, die Entscheidungslogik nachzuvollziehen und unterstützen eine verantwortungsvolle Integration von KI in industrielle Anwendungen.

Blockchain:

In der prädiktiven Instandhaltung (PdM) wird Blockchain bislang selten eingesetzt, könnte jedoch zur sicheren Protokollierung von Wartungsvorgängen oder dem Austausch von Bauteilen im Hinblick auf Garantieansprüche und Rückverfolgbarkeit beitragen.

Cybersecurity

Die prädiktive Instandhaltung (PdM) legt besonderen Wert auf den Schutz von Maschinendaten sowie die Sicherstellung eines kontinuierlichen Betriebs.

Case Study Insights

Zwei im PdM-Bericht beschriebene Fallstudien zeigen die Entwicklung der vorausschauenden Instandhaltung (PdM) von reaktiven, zeitbasierten Modellen hin zu fortschrittlichen, datengetriebenen Systemen. Dabei wird hervorgehoben, wie Künstliche Intelligenz, Qualitätsintegration und modulare Automatisierung die PdM-Strategien grundlegend verändern. Die beiden Fallbeispiele veranschaulichen den Einsatz modernster Modelle und deren praktischen Nutzen in verschiedenen Industriezweigen.

- **Fallstudie 1 – Verbesserte prädiktive Instandhaltung durch Integration der Produktqualität**
 - o Eingesetzte Methoden:
 - Integration von maschinellem Lernen (ML) und Produktqualitätsdaten in die prädiktive Instandhaltung
 - Entwicklung eines dreistufigen Frameworks mit einer Genauigkeit von 91 %



- o Ergebnisse:
 - Die Vakuummischmaschine wurde als das kritischste Element identifiziert, das die Produktqualität beeinflusst (verantwortlich für 85 % des Ausschusses)
 - Das Framework zeigte, dass die Vorhersage von Wartungsbedarf auf Basis von Produktqualitätsabweichungen zu erheblichen Kosteneinsparungen und Effizienzsteigerungen führt
- o Finanzieller Nutzen:
 - 50 % Reduktion der Stillstandskosten
 - 64 % Reduktion der ausschussbedingten Kosten
- **Fallstudie 2 – Anomalie Erkennung in Induktionsmotoren mittels Echtzeit-IoT-Daten**
 - o Eingesetzte Methoden:
 - Vergleich von drei ML-Algorithmen hinsichtlich Sensitivität, Spezifität und Inferenzzeit (durchschnittliche Leistung über Validierungs- und Testdatensätze)
 - o Ergebnisse:
 - Erfolgreiche Entwicklung eines kostengünstigen, echtzeitfähigen prädiktiven Instandhaltungssystems zur Anomalie Erkennung in Induktionsmotoren unter Verwendung von IoT-Sensoren und ML-Algorithmen.

3.1.3. TECHNOLOGIEN IM SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

Im Supply Chain Management (SCM) konzentriert sich die digitale Transformation auf die Verbesserung von Agilität, Transparenz und Reaktionsfähigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Wie nachfolgend beschrieben, kommen Technologien auf allen im Beobachtungsfeld analysierten Ebenen der SCM-Planung und -Ausführung zum Einsatz.

Internet of Things (IoT)

IoT-Sensoren unterstützen die operative Ausführung durch:

- Echtzeitverfolgung von Sendungen und Containern,
- Überwachung von Lagerbedingungen (z. B. bei temperatursensiblen Gütern),
- Automatisierung von Bestandszählungen und Auslösung von Nachschubprozessen.

Sie ermöglichen Echtzeit-Transparenz, Alarmierung und Rückverfolgbarkeit.

Das Internet der Dinge (IoT) gilt als Schlüsseltechnologie und ist in vielen Großunternehmen bereits Standard. Pilotprojekte zeigen beispielsweise, dass IoT-basierte Überwachung in Produktionsnetzwerken Materialverluste um 12–20 % reduzieren kann.

Cloud Computing

Cloud-Plattformen bilden das Rückgrat für die Integration von Planungssystemen und Tools zur Transparenz in der Lieferkette:

- Cloud-Systeme hosten Dashboards, Echtzeit-Kennzahlen (KPIs) und kollaborative Planungsoberflächen.
- Sie dienen der Synchronisation von Datenflüssen zwischen Abteilungen und externen Partnern (Lieferanten, Transportdienstleistern, Kunden), ermöglichen den Datenaustausch über Netzwerke hinweg und unterstützen dezentrale Entscheidungsprozesse.

Edge-Computing-Systeme können lokale Abläufe in Lagerhäusern oder Fertigungslinien unterstützen.



Digital Twins

Obwohl Digital Twins im Supply Chain Management (SCM) noch als aufkommende Technologie gelten, werden sie bereits eingesetzt, um:

- Lieferkettennetzwerke und Produktionsflüsse zu simulieren,
- Kapazitätsänderungen oder Lieferunterbrechungen zu bewerten,
- die Auswirkungen von Nachhaltigkeitsmaßnahmen oder Schwankungen bei Lieferzeiten zu testen.

Häufig werden sie mit sogenannten Control Towers kombiniert, die eine „Cockpit-Ansicht“ der SCM-Abläufe ermöglichen.

Blockchain:

Im Supply Chain Management (SCM) unterstützt Blockchain die Rückverfolgung der Herkunft und Bewegung von Waren, die Verifizierung von Compliance-Anforderungen sowie die Automatisierung von Transaktionen mittels „Smart Contracts“.

Sie ist insbesondere in regulierten Branchen oder in nachhaltig zertifizierten Lieferketten von großem Nutzen.

Blockchain ermöglicht einen sicheren und transparenten Datenaustausch zur Sicherstellung der Vertragserfüllung.

Cybersecurity

Als zentrales Element digitaler Strategien und zugleich eines der Hauptanliegen von Unternehmen wurde Cybersicherheit im Rahmen der SCM-Umfrage identifiziert: 100 % der mittelständischen und 60 % der kleinen Unternehmen stuften sie als „kritisch“ ein.

Im Kontext komplexer Lieferantennetzwerke wird Cybersicherheit als ein erhebliches Risiko betrachtet. Blockchain wird hierbei als vielversprechende Lösung hervorgehoben.

Artificial Intelligence (AI)

Künstliche Intelligenz (KI) ermöglicht intelligente Prognosen, Risikomanagement und die Synchronisation von Planungsprozessen:

- Im Supply Chain Management (SCM) unterstützt KI-Prognosen, Bestandsoptimierung, dynamische Bestandskontrolle sowie Planung und Terminierung.
- Laut dem SCM-Bericht wurde KI in 9 von 31 Anwendungsfällen genannt und führte zu einer Reduktion der Logistikkosten um bis zu 15 % sowie zu einer Verbesserung der Bestandsgenauigkeit um 35 %.
- Trotzdem bleibt die Verbreitung von KI unter kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) begrenzt – ihr strategisches Potenzial wird jedoch allgemein anerkannt.

Je nach Anwendungskontext kommen unterschiedliche KI-Ansätze zum Einsatz:

- **Maschinelles Lernen (ML):** Im SCM wird ML für Prognosen, Risikobewertungen und adaptive Planung eingesetzt. Die Systeme verbessern sich kontinuierlich durch das Lernen aus historischen Daten.
- **Deep Learning (DL):** Als Teilbereich des ML unterstützt DL im SCM z. B. die Bilderkennung (z. B. zur Qualitätskontrolle) und die Mustererkennung in großen Datenmengen.
- **Große ML-Modelle (LMMs):** Diese unterstützen globale Bedarfsprognosen und die Optimierung von Liefernetzwerken.
- **Generative KI / Große Sprachmodelle (LLMs):** In der Lieferkette können sie zur Automatisierung von Dokumentenprozessen oder im Kundenservice (z.B. Chatbots) eingesetzt werden.



Zur Verbesserung von Vertrauen und Nutzbarkeit entstehen neue Ansätze, um KI transparenter und zugänglicher zu machen:

- **Erklärbare KI (XAI):** Im Risikomanagement werden zunehmend XAI-Methoden wie SHAP, LIME und GradCAM eingesetzt, um nachvollziehbar zu machen, wie KI-Modelle Entscheidungen treffen – z. B. bei der Bewertung von Lieferanten nach Lieferzeiten, ESG-Kriterien oder Kosten. Diese Werkzeuge fördern das Verständnis und Vertrauen in automatisierte Prognosen und machen KI-gestützte Empfehlungen für Entscheidungsträger transparenter.
- **Interpretierbares Maschinelles Lernen (IML):** In Prognose- und Logistikanwendungen werden Modelle wie Entscheidungsbäume, Explainable Boosting Machines (EBMs) und Generalisierte Additive Modelle (GAMs) eingesetzt, um nachvollziehbare und prüfbare Planungslogiken bereitzustellen. Werkzeuge wie DIFFI und LionForests helfen dabei, Ursachen für Anomalien oder Störungen in der Lieferkette zu identifizieren – besonders relevant für regulierte Branchen oder kollaborative Planungsprozesse.

Angewendet auf die im Beobachtungsfeld definierten SCM-Ebenen lässt sich der KI-Einsatz wie folgt zusammenfassen:

- **Profit Planning (PP):** KI simuliert finanzielle Auswirkungen und unterstützt Szenarioplanung.
- **Sales & Operations Planning (S&OP):** KI optimiert Bedarfsprognosen und verbessert die Abstimmung zwischen Vertriebs- und Produktionsplanung.
- **Master Production Scheduling (MPS) & MRP:** KI berechnet optimale Produktions- und Beschaffungsmengen unter Unsicherheit.
- **Finite/Infinite Capacity Scheduling (FCS/ICS):** KI-gestützte Algorithmen verbessern Ressourcenzuteilung und Reihenfolgenplanung.

Leistungsverbesserungen:

- Einige SCM-Anwendungsfälle mit KI-Integration zeigen eine Reduktion der Logistikkosten um bis zu 15 % sowie eine Verbesserung der Bestandsgenauigkeit um 35 %.

3.1.4. NEUE BETRIEBLICHE UND INNOVATIONSMODELLE

Über technologische Aspekte hinaus gewinnen neue betriebliche Modelle zunehmend an Bedeutung:

- **Plattformbasierte Zusammenarbeit** zwischen KMU und Dienstleistern (z. B. PdM-Plattformen oder integrierte Logistik-Control-Towers im SCM).
- **Serviceorientierte Architekturen**, die den Bedarf an interner Infrastruktur reduzieren. Ein Beispiel ist **PdMaaS (Predictive Maintenance as a Service)**, das es Unternehmen – insbesondere KMU – ermöglicht, prädiktive Funktionen auszulagern, ohne eigene Infrastruktur betreiben zu müssen. Diese Lösung ist kosteneffizient und wird typischerweise über Cloud-Plattformen oder OEMs (Originalgerätehersteller) bereitgestellt, die Diagnosedienste mit der Ausrüstung bündeln (**Equipment-as-a-Service**).
- **Testumgebungen und öffentlich-private Partnerschaften**, die KMU dabei unterstützen, Risiken bei der Erprobung neuer Technologien zu minimieren.

Der BC-Bericht liefert zudem konkrete Beispiele dafür, wie KMU über regionale Ökosysteme Zugang zu gemeinsamer digitaler Infrastruktur, integrierten Services oder Schulungsmodulen erhalten.

Diese Modelle und Ökosysteme ermöglichen den gemeinsamen Zugang zu Infrastruktur, Weiterbildung und Unterstützungsleistungen, insbesondere in Regionen mit aktiven industriellen



Clustern, und spielen eine entscheidende Rolle dabei, hochentwickelte Technologien auch für kleinere Akteure zugänglich zu machen.

3.2. BEITRÄGE ZUR GRÜNEN TRANSFORMATION

Die digitale Transformation in Advanced Manufacturing sowie in den drei Berichten betrachteten Bereichen ist eng mit der grünen Transformation verknüpft. Die beschriebenen Technologien sind nicht nur Treiber für operative Effizienz, sondern auch wirkungsvolle Hebel zur Verbesserung der Umweltleistung. In diesem Kapitel wird zusammengefasst, wie die in den beobachteten Aktivitäten implementierten fortschrittlichen Technologien zu Nachhaltigkeitszielen beitragen, beispielsweise durch die Reduktion von Emissionen, die Optimierung des Ressourceneinsatzes und die Unterstützung zirkulärer Wirtschaftsmodelle, und wie sie mit übergeordneten politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen in Einklang stehen.

3.2.1. NACHHALTIGKEIT: CHANCE UND VERPFLICHTUNG

Sowohl der PdM- als auch der SCM-Bericht betonen eine doppelte Perspektive im Hinblick auf Nachhaltigkeit:

- **Im Kontext der prädiktiven Instandhaltung (PdM)** wird Nachhaltigkeit als Treiber für Innovation und Effizienz verstanden. Sie verbessert die Leistungsfähigkeit, senkt Kosten und steigert die Wettbewerbsfähigkeit und stellt somit eine „selbstfinanzierende“ Verbesserung dar.
- **Im Kontext des Supply Chain Managements (SCM)** ist Nachhaltigkeit zudem eine regulatorische Notwendigkeit. Unternehmen müssen ESG-Kriterien (Environmental, Social, Governance), die Ziele des EU Green Deal sowie neue gesetzliche Rahmenbedingungen (z. B. Sorgfaltspflichten in Lieferketten, Überwachung von Scope-3-Emissionen) erfüllen.
- **Im typischen KMU-Kontext** ist die Integration von digitaler Transformation und Umweltzielen bislang unterentwickelt. Viele kleine und mittlere Unternehmen (KMU) verfügen nicht über das notwendige Fachwissen im Nachhaltigkeitsmanagement, insbesondere im Hinblick auf die Anwendung systemischer Ansätze innerhalb der Kreislaufwirtschaft. Obwohl Umweltziele zunehmend kommuniziert werden, besteht weiterhin ein erheblicher Mangel an praxisnahen Schulungskonzepten, die ökologische Aspekte in Geschäftsprozesse und Mitarbeiterentwicklung integrieren.

Dies schafft sowohl eine strategische Chance als auch eine regulatorische Verpflichtung:

Digitale Technologien helfen Unternehmen dabei, sich frühzeitig auf immer strengere Umweltauforderungen einzustellen. Gleichzeitig können sie sich so als Vorreiter in der grünen Innovation positionieren.

.

3.2.2. PDM ALS KATALYSATOR FÜR ÖKOLOGISCHE EFFIZIENZ

Der PdM-Bericht stellt die prädiktive Instandhaltung als Win-win-Strategie dar: Sie verbessert die operative Leistung und fördert gleichzeitig Nachhaltigkeitsziele. Die ökologischen Beiträge sind konkret und messbar:

- **Reduzierter Energieverbrauch:** Durch frühzeitige Erkennung von Ineffizienzen und die Wartung von Maschinen unter optimalen Betriebsbedingungen wird Energieverschwendung vermieden.



- **Geringerer Materialausschuss:** Bedarfsorientierte Wartung reduziert Notfallreparaturen und den vorzeitigen Austausch von Komponenten, wodurch der Einsatz von Ersatzteilen und Rohstoffen minimiert wird.
- **Verlängerte Lebensdauer von Anlagen:** Die frühzeitige Erkennung und Behebung von Fehlern trägt zur längeren Nutzungsdauer von Maschinen bei und unterstützt Ziele der Kreislaufwirtschaft.
- **Optimierte Logistik und geringere Transportemissionen:** Die Vermeidung von Ausfällen führt zu weniger ungeplanten Eingriffen und eiligen Ersatzteillieferungen, was die logistikbedingten Emissionen senkt.
- **Unterstützung der Kreislaufwirtschaft:** PdM erleichtert Wiederverwendung und Aufarbeitung, reduziert den Bedarf an Neuausrüstung und trägt zu einem nachhaltigen Anlagenmanagement bei.

Insgesamt unterstützt PdM sowohl CO₂-Reduktionsziele als auch die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit und hilft insbesondere KMU, ökologische Zielsetzungen mit Rentabilität in Einklang zu bringen.

Die Berichte präsentieren PdM als strategischen Hebel, der Klimaschutz und industrielle Effizienz miteinander verbindet.

3.2.3. SCM 4.0 UND GRÜNES LIEFERKETTENMANAGEMENT

Der SCM-Bericht geht noch einen Schritt weiter und positioniert SCM 4.0 als zentralen Enabler für das Green Supply Chain Management (GSCM).

Durch die Digitalisierung gewinnen Unternehmen Transparenz und Kontrolle über Umweltwirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der Beschaffung über Produktion und Transport bis hin zum Lebenszyklusende.

Wesentliche Beiträge umfassen:

- 12–20 % **weniger Materialverschwendung** durch IoT-gestützte Überwachung von Ressourcenflüssen
- 5–10 % **CO₂-Reduktion in der Logistik** durch KI-basierte Routenoptimierung und Lastverteilung
- Blockchain-basierte **Rückverfolgbarkeit erhöht den Anteil recycelter Materialien** in der Produktion um bis zu 15 % – dank verbesserter Transparenz und Lieferantenverantwortung
- Integration der **Kreislaufwirtschaft**, unterstützt durch digitale Werkzeuge für geschlossene Logistikprozesse, Wiederaufbereitung und Lebenszyklusverfolgung
- Unterstützung von **Eco-Design**, durch digitale Zusammenarbeit entlang der Lieferkette bereits in der Produktentwicklungsphase

Trotz dieser Fortschritte haben bislang nur 27 % der befragten Unternehmen ihre Digitalisierungs- und Nachhaltigkeitsstrategien formell miteinander verknüpft, was auf ein erhebliches Synergiepotenzial hinweist.

3.3. AUSWIRKUNGEN AUF BETRIEB, ORGANISATION UND ARBEITSKRÄFTE

Aufbauend auf den vorherigen Kapiteln, die gezeigt haben, wie neue Technologien Geschäftsaktivitäten verbessern und zur Nachhaltigkeit beitragen, konzentriert sich dieser Abschnitt auf deren weiterreichende Auswirkungen.



Neue Technologien bieten nicht nur digitale Lösungen für konkrete Herausforderungen, sondern verändern grundlegend, wie Unternehmen arbeiten, sich organisieren und ihre Belegschaften weiterentwickeln.

Im Folgenden werden die wichtigsten Veränderungen zusammengefasst, die in den drei Berichten identifiziert wurden – insbesondere in den Bereichen Instandhaltung und prädiktive Instandhaltung (PdM), Supply Chain Management (SCM), Automatisierung, Qualitätskontrolle und CNC-Bedienung.

- PdM und SCM wirken beide als Katalysatoren für tiefgreifende Veränderungen in Arbeitsabläufen und Organisationsstrukturen und erfordern erhebliche Anpassungen in Unternehmen und Rollenprofilen.

In beiden Bereichen entstehen neue Berufsbilder, die technisches Fachwissen mit digitaler Kompetenz verbinden.

- Fachkräfte in Instandhaltung und Logistik müssen zunehmend Dashboards interpretieren, mit KI-gestützten Systemen interagieren und bereichsübergreifend zusammenarbeiten.
- Im Bereich PdM verlagern neue Modelle wie PdMaaS Aufgaben von Technikern hin zu Datenanalysten und Remote-Service-Anbietern.
- Im Bereich SCM vollzieht sich ein ähnlicher Wandel: Entscheidungen werden datengetriebener und erfordern Koordination zwischen IT, Logistik, Einkauf und Planung.
- Mitarbeitende müssen integrierte Plattformen bedienen, algorithmische Empfehlungen validieren und mit externen Partnern zusammenarbeiten.

Diese Entwicklungen unterstreichen die wachsende Bedeutung von transversalen Kompetenzen und digitaler Bildung.

3.3.1. OPERATIVE AUSWIRKUNGEN

Auf operativer Ebene haben PdM und SCM 4.0 grundlegende Veränderungen in der Entscheidungsfindung, der Strukturierung von Arbeitsabläufen und dem Echtzeit-Ressourcenmanagement bewirkt.

In der prädiktiven Instandhaltung (PdM) vollzieht sich der Wandel von traditionellen, präventiven Wartungsroutinen hin zu einem dynamischen, datenbasierten Ansatz. Eingriffe erfolgen auf Grundlage tatsächlicher Verschleißmuster oder durch Sensoren erkannter Anomalien. Dies führt zu geringeren Stillstandzeiten und einer effizienteren Ressourcennutzung.

Diese Umstellung bringt mehrere konkrete operative Verbesserungen mit sich:

- Reduzierung ungeplanter Ausfallzeiten durch kontinuierliche Zustandsüberwachung und Echtzeitwarnungen
- Strategische Planung von Wartungsmaßnahmen während geplanter Stillstände oder in Phasen geringer Auslastung
- Datenbasierte Entscheidungsfindung, bei der sensorbasierte Diagnosen und Prognosedashboards die Intuition ersetzen
- Automatisierung routinemäßiger Entscheidungen, z. B. das automatische Auslösen von Wartungsaufträgen bei Grenzwertüberschreitungen
- Auch im Supply Chain Management (SCM) steigern digitale Werkzeuge wie KI, IoT und Cloud-Plattformen die Agilität und Reaktionsfähigkeit entlang der gesamten Lieferkette. Die Planung wird durch Echtzeitdaten und automatisierte Szenarien Modelle vorausschauender und weniger reaktiv.

Operative Veränderungen umfassen:

- **Echtzeit-Transparenz** über Logistik- und Warenflüsse zur besseren Reaktion auf Störungen



- **Dynamische (Neu-)Planung** auf Basis von Live-Daten aus IoT-Geräten und digitalen Zwillingen
- **KI-gestützte Entscheidungsfindung**, z. B. bei der automatisierten Beschaffung oder Routenoptimierung
- **End-to-End-Integration von Arbeitsabläufen**, wodurch Silos zwischen Vertrieb, Produktion und Logistik aufgebrochen werden

Diese Veränderungen werden durch Erkenntnisse aus dem Regionalbericht des Baskenlandes weiter untermauert.

- Die digitale Transformation verändert grundlegend, wie Fachkräfte ihre täglichen Aufgaben ausführen und mit technischen Systemen interagieren. Es zeigt sich ein klarer Trend hin zu prädiktiven Ansätzen, weg von reaktiver hin zu zustandsbasierter Instandhaltung und Qualitätskontrolle, unterstützt durch Sensornetzwerke, Echtzeitwarnungen und fortschrittliche Überwachungssysteme.

Die Umverteilung von Aufgaben ist deutlich sichtbar:

- So übernehmen Maschinen- oder Linienbediener zunehmend Aufgaben der Qualitätskontrolle, wodurch Qualität zur gemeinsamen Verantwortung der Produktionsteams wird.
- Wartungstechniker erhalten erweiterte Aufgabenbereiche, die über klassische Reparaturtätigkeiten hinausgehen und auch die Prozessoptimierung sowie die technologische Integration von Automatisierungssystemen umfassen.

3.3.2. AUSWIRKUNGEN IN DER ORGANISATION

Operative Verbesserungen sind nur dann möglich, wenn sie durch geeignete organisatorische Strukturen und kulturelle Veränderungen unterstützt werden. Die Einführung von PdM- und SCM-4.0-Werkzeugen stellt traditionelle Hierarchien infrage und fördert kollaborativer, agilere Organisationsmodelle.

In beiden Bereichen setzen Unternehmen zunehmend auf interdisziplinäre Teams und agile Arbeitsmethoden. Anstelle langer, linearer Projekte werden heute kurze Pilotzyklen mit iterativen Feedbackschleifen bevorzugt. Dies ermöglicht schnellere Innovationen und eine bessere Anpassung an sich rasch verändernde technologische Rahmenbedingungen.

Zentrale organisatorische Entwicklungen umfassen:

- Übergang von isolierten Abteilungen hin zu funktionsübergreifender Zusammenarbeit zwischen IT, Betrieb, Instandhaltung und Datenteams
- Entwicklung agiler Projektmodelle, die auf schneller Erprobung und Skalierung basieren
- Zunehmender Einsatz digitaler Plattformen zur Förderung von Transparenz und Koordination über Teamgrenzen hinweg
- Stärkere Führungsrollen im Change-Management, wobei Führungskräfte als Ermöglicher der digitalen Transformation agieren

Die Fallstudie aus dem Baskenland zeigt, dass sich auf organisatorischer Ebene hybride Rollen herausbilden, die bisher getrennte Funktionen wie Instandhaltung, Automatisierung und Qualität miteinander verbinden. Automatisierung ist nicht mehr isoliert, sondern in umfassendere Produktions- und Datenplattformen eingebettet. Dies erfordert von Mitarbeitenden die Fähigkeit, mit Mensch-Maschine-Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen umzugehen.

Diese Konvergenz von Rollen führt zu neuen Formen der Zusammenarbeit, bei denen Fachkräfte über traditionelle Grenzen hinweg arbeiten und aktiv mit integrierten Systemen interagieren müssen. Zudem hat die Einführung datenbasierter Entscheidungsprozesse dazu geführt, dass Echtzeitanalysen zunehmend zum festen Bestandteil des operativen Tagesgeschäfts werden.



Unternehmen vergeben vermehrt Dienstleistungen im Bereich KI, Cybersicherheit und prädiktive Instandhaltung an externe Anbieter, was den wachsenden Bedarf an internem, digital kompetentem Personal unterstreicht.

Diese Fachkräfte müssen keine tiefgehenden technischen Experten sein, verfügen jedoch über ausreichendes Grundlagenwissen, um eine reibungslose Kommunikation mit Technologiepartnern sicherzustellen. Ihre Aufgabe besteht darin, technologische Innovationen in operative Praktiken zu übersetzen, die mit den internen Anforderungen und strategischen Zielen des Unternehmens übereinstimmen.

Ein besonders bemerkenswerter Wandel ist das Aufkommen neuer Geschäftsmodelle wie „Maintenance-as-a-Service“ (MaaS). Ermöglicht durch PdM, erlaubt dieses Modell Anbietern, Verfügbarkeitsgarantien oder leistungsorientierte Verträge anzubieten, was die Kunden-Lieferanten-Beziehung neu definiert:

- Instandhaltung wird zu einer wertschöpfenden Dienstleistung und nicht mehr nur als Kostenfaktor betrachtet
- Hersteller entwickeln sich zu serviceorientierten Anbietern mit integrierter Ferndiagnose
- Dieses Modell unterstützt wiederkehrende Einnahmen und engere Kundenbeziehungen

Diese Veränderungen bringen jedoch auch Herausforderungen mit sich. Der SCM-Bericht identifiziert mehrere organisatorische Hürden für die Transformation:

- Schwierigkeiten bei der technologischen Integration, insbesondere bei KMU mit veralteten Systemen
- Zunehmende Cybersicherheitsbedenken durch höhere digitale Angriffsflächen
- Widerstand gegen Veränderungen, insbesondere bei älteren oder erfahreneren Mitarbeitenden
- Finanzielle Einschränkungen, die die Investitionsfähigkeit von KMU in Infrastruktur oder Fachkräfte begrenzen

Trotz dieser Hindernisse sind erfolgreiche Unternehmen jene, die den Wandel aktiv gestalten, durch den Aufbau interner Kompetenzen und die Förderung einer Kultur des Lernens, des Vertrauens in Daten und der Experimentierfreude.

3.3.3. AUSWIRKUNG AUF DIE ARBEITSKRÄFTE

Die Einführung neuer Technologien geht stets mit einem Wandel der Arbeitswelt einher. PdM und SCM 4.0 erfordern neue Rollen, neue Kompetenzen und neue Denkweisen. In der prädiktiven Instandhaltung (PdM) verlagert sich der Schwerpunkt von rein mechanischen Tätigkeiten hin zu Überwachung, Analyse und strategischer Planung. Traditionelle Techniker müssen zunehmend Sensordaten interpretieren, statistische Muster erkennen und mit IT-Systemen zusammenarbeiten.

Dieser Wandel umfasst:

- Transformation von Rollen, z. B. durch neue Berufsprofile wie PdM-Analysten oder digitale Instandhaltungsstrategen
- Integration von IT- und OT-Kompetenzen, da Techniker mit Zustandsüberwachungssoftware und KI-Werkzeugen arbeiten müssen
- Bereichsübergreifende Schulungen, um die Zusammenarbeit zwischen Instandhaltung, Datenanalyse und Engineering zu fördern

Die **Fallstudie aus dem Baskenland** zeigt eine wachsende Nachfrage nach hybriden Berufsprofilen, die technisches Fachwissen mit digitalen Kompetenzen verbinden. Beispiele:

- Qualitätstechniker kombinieren heute Inspektionsfähigkeiten mit Daten- und Digital-Know-how, z. B. im Umgang mit Bildverarbeitungssystemen, 3D-Scannern und digitalen Prüfwerkzeugen



- CNC-Bediener interagieren zunehmend mit MES- und ERP-Systemen, nehmen Programmänderungen vor und wenden Datenanalysetechniken an, einschließlich prädiktiver Instandhaltung

Auch im Supply Chain Management (SCM) spiegeln sich diese Entwicklungen wider:

Manuelle Dateneingabe und regelbasierte Planung werden zunehmend automatisiert. Mitarbeitende überwachen heute die Ergebnisse von Algorithmen, bearbeiten komplexe Ausnahmen und bringen strategische Beiträge in Planungsentscheidungen ein.

Der SCM-Bericht identifiziert mehrere zentrale Auswirkungen auf die Arbeitswelt:

- Entstehung hybrider Rollen, z. B. Supply-Chain-Analysten mit digitalem und operativem Know-how
- Wachsende Bedeutung von Daten- und Systemkompetenz, auch in traditionell nicht-technischen Rollen
- Zunehmender Bedarf an Sensibilisierung für Cybersicherheit, angesichts vernetzter Systeme
- Höhere Anforderungen an Lernbereitschaft und kontinuierliche Weiterbildung, da sich Technologien schneller entwickeln als bestehende Lehrpläne

Viele Unternehmen, insbesondere KMU, stehen jedoch vor erheblichen Herausforderungen:

- Digitale Kompetenzlücken und Fachkräftemangel erschweren die Einführung von SCM-4.0-Werkzeugen
- Diskrepanz zwischen Schulungsangeboten und realen Systemanforderungen mindert den ROI
- Widerstand gegen Automatisierung, häufig aus Angst vor Arbeitsplatzverlust oder zunehmender Komplexität

Um in diesem neuen Umfeld erfolgreich zu sein, müssen Mitarbeitende sowohl technische als auch soziale Kompetenzen entwickeln.

Wichtige technische und analytische Fähigkeiten:

- Datenanalyse und Visualisierung (z. B. mit Dashboards)
- Verständnis prädiktiver Algorithmen und Fehlermodelle
- Vertrautheit mit Cloud-Plattformen und Diagnosetools

Zentrale Soft Skills:

- Anpassungsfähigkeit und lebenslanges Lernen
- Teamarbeit über Abteilungsgrenzen hinweg
- Effektive Kommunikation technischer Erkenntnisse

Diese Erkenntnisse unterstreichen die Dringlichkeit, Personalentwicklung und Change-Management fest in digitale Strategien zu integrieren.

3.4. HERAUSFORDERUNGEN UND FORTSCHRITTE BEI DER TECHNOLOGIEEINFÜHRUNG IN KMU

Die Einführung fortschrittlicher Technologien und die Beiträge zur grünen Transformation, wie zuvor beschrieben, schreiten in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) zunehmend voran. Dennoch verläuft dieser Prozess weiterhin uneinheitlich und sieht sich einer Vielzahl betrieblicher, kultureller und strategischer Hürden gegenüber. Dieser Abschnitt bietet eine Zusammenfassung der Umsetzungsgrade, zentralen Hemmnisse sowie der damit verbundenen Auswirkungen auf die Kompetenzentwicklung.



3.4.1. AKTUELLER STAND DER EINFÜHRUNG UND ZENTRALE KENNZAHLEN

Insgesamt erkennen kleine und mittlere Unternehmen (KMU) zunehmend den strategischen Wert von Technologien im Bereich Predictive Maintenance (PdM) und Supply Chain Management 4.0 (SCM 4.0). Ihre Motivation ergibt sich sowohl aus internen Antriebskräften (wie Effizienzsteigerung und Kostenreduktion) als auch aus externem Druck (z. B. regulatorische Anforderungen, Kundenerwartungen und die Integration in Lieferketten).

3.4.1.1. WICHTIGE ERKENNTNISSE ZUR EINFÜHRUNG VON PREDICTIVE MAINTENANCE (PDM):

- Der weltweite Markt für Predictive Maintenance (PdM) verzeichnet ein starkes Wachstum, wobei der Fertigungssektor eine führende Rolle einnimmt.
 - Laut dem PdM-Bericht investierten im Jahr 2018 rund 81 % der Unternehmen in prädiktive Ansätze, wobei 40 % diese als strategische Priorität einstufen. Dennoch dominieren weiterhin zeitbasierte oder reaktive Instandhaltungsstrategien.
 - Das Suchinteresse an PdM hat sich seit 2017 verdreifacht und übertrifft inzwischen andere suchbezogene Begriffe im Bereich Instandhaltung, ein Hinweis auf die zunehmende Bedeutung dieser Technologie als unverzichtbare industrielle Lösung.
 - Die am häufigsten eingesetzte PdM-Methode ist die Schwingungsüberwachung, die bei 28 % der Implementierungen zum Einsatz kommt.
- Die Umfrageergebnisse zeigen, dass KMU die Bedeutung von Predictive Maintenance (PdM) zur Effizienzsteigerung und Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit zwar anerkennen, sich die Einführung jedoch bei vielen Unternehmen noch in einem frühen Erkundungsstadium befindet.
- Einige Vorreiter haben Pilotprojekte zur PdM insbesondere an kritischen Anlagen umgesetzt.

3.4.1.2. WICHTIGE ERKENNTNISSE ZUR EINFÜHRUNG VON SCM:

- Die Umfrageergebnisse zeigen eine große Bandbreite im digitalen Reifegrad – von hochvernetzten Logistiknetzwerken bis hin zu manuellen, Excel-basierten Arbeitsabläufen.
- Nur ein geringer Anteil der KMU hat integrierte digitale und nachhaltige Strategien im Supply Chain Management (SCM) umgesetzt: Lediglich 3 % der KMU in der EU weisen eine hohe digitale Intensität auf, im Vergleich zu 98 % der Großunternehmen.
- 64 % der KMU berichten über Schwierigkeiten bei der Analyse ihrer eigenen Betriebsdaten, und 74 % geben an, dass sie aus ihren bisherigen digitalen Investitionen keinen ausreichenden Mehrwert generieren.
- Die Ergebnisse der KMU-Umfrage zeigen, dass Funktionen wie Ausführung und Terminierung am häufigsten digitalisiert wurden. Prognose, Sales & Operations Planning (S&OP) sowie Master Production Scheduling (MPS) weisen hingegen eine geringere Integration auf, insbesondere bei kleineren Unternehmen.
- Die Einführung SCM-spezifischer Technologien konzentriert sich auf Ausführung und Terminierung unter Einsatz von KI, IoT und cloudbasierten Lösungen.
- Prognose- und S&OP-Funktionen sind insbesondere bei kleinen Unternehmen unterentwickelt.

3.4.2. HEMMNISSE UND EINSCHRÄNKUNGEN

Obwohl der Nutzen von Predictive Maintenance (PdM) und SCM 4.0-Technologien von KMU weitgehend anerkannt wird, unterscheiden sich Art und Intensität der Einführungshindernisse in diesen beiden Bereichen leicht voneinander.



3.4.2.1. FINANZIELLE EINSCHRÄNKUNGEN

Für Predictive Maintenance (PdM) sind finanzielle Hürden häufig mit folgenden Aspekten verbunden:

- **Hohe Anfangsinvestitionen** für Sensoren, Überwachungsgeräte, Analyseplattformen und die Integration in bestehende Instandhaltungsinfrastrukturen.
- **Notwendigkeit externer Fachleistungen oder Berater**, was zusätzliche Betriebskosten verursacht, insbesondere wenn interne Kompetenzen fehlen. Selbst bei Cloud- oder „as-a-Service“-Modellen bleiben laufende Betriebskosten ein zentrales Thema.
- **Begrenzte Bekanntheit oder eingeschränkter Zugang** zu gezielter Förderfinanzierung für PdM-Innovationen – viele KMU sind sich vorhandener Förderprogramme nicht bewusst oder empfinden den Zugang als zu komplex.

Im Bereich Supply Chain Management (SCM) ergeben sich finanzielle Einschränkungen aus:

- Kumulierten **Kosten** der Digitalisierung mehrerer Funktionen (z. B. Beschaffung, Lagerhaltung, Logistik), die häufig umfassende Systemumstellungen oder Cloud-Migrationen erfordern.
- **Geringer Transparenz hinsichtlich des Returns on Investment**, da digitale Werkzeuge oft nicht vollständig genutzt werden – viele KMU investieren in ERP-Erweiterungen oder Dashboards, setzen diese jedoch nicht konsequent ein.
- **Schwierigkeiten bei der Rechtfertigung von Investitionen in Komponenten** der grünen Transformation, wie CO₂-Tracking oder zirkuläre Logistik, insbesondere wenn kurzfristige wirtschaftliche Vorteile fehlen.

In beiden Bereichen gilt:

- Die begrenzte Investitionsfähigkeit von KMU, die häufig unter engen Liquiditätsbedingungen agieren, stellt ein wesentliches Hindernis dar. Selbst nutzungsabhängige oder „as-a-Service“-Modelle werden mitunter als risikobehaftete, wiederkehrende Ausgaben wahrgenommen.
- Viele KMU haben keinen Zugang zu öffentlichen Fördermitteln oder privatem Kapital, was die Einführung neuer Technologien verlangsamt.

3.4.2.2. TECHNISCHE HEMNISSE

Im Bereich Predictive Maintenance (PdM) sind technische Herausforderungen häufig auf folgende Faktoren zurückzuführen:

- **Integrationsprobleme:** Die Anbindung moderner Sensoren und Datensysteme an ältere Maschinen oder heterogene CMMS-Werkzeuge gestaltet sich schwierig.
- **Interoperabilitätsprobleme:** Nicht kompatible Datenformate oder Maschinen-Schnittstellen behindern eine nahtlose Überwachung.
- **Cybersecurity-Risiken:** Die zunehmende Vernetzung erhöht die Verwundbarkeit, insbesondere bei unbeaufsichtigten Edge-Geräten.

Im Bereich Supply Chain Management (SCM) zeigen sich technische Barrieren insbesondere durch:

- Altsysteme, die keine Echtzeit-Kollaboration oder Automatisierung unterstützen.
- Schwierigkeiten bei der Verknüpfung von Planungs- und operativen Systemen, etwa bei der Integration von Bestands-Dashboards mit Echtzeitdaten aus Lager oder Transport.
- Fehlende Datenqualität und mangelnde Governance-Strukturen, was zu verzögerten oder fehlerhaften Entscheidungen führt.

In beiden Bereichen gilt:



- Das Fehlen robuster interner IT-Strukturen verschärft technische Barrieren. KMU sind häufig auf Generalisten oder externe Dienstleister angewiesen, was die Problemlösung und Innovationsfähigkeit verzögert.
- Cybersecurity ist ein bereichsübergreifendes Thema: 100 % der mittleren Unternehmen und 60 % der kleinen Unternehmen bewerten sie als „kritisch“, wobei die begrenzte interne Expertise die Risiken zusätzlich erhöht.
- Komplexe und fragmentierte Legacy-IT-Infrastrukturen behindern die Integration von PdM- und SCM-Lösungen erheblich

3.4.2.3. ORGANISATORISCHE UND STRATEGISCHE EINSCHRÄNKUNGEN

Im Bereich Predictive Maintenance (PdM) umfassen organisatorische Barrieren:

- **Fehlende digitale Instandhaltungsstrategie**, was zu fragmentierten oder isolierten Pilotprojekten führt.
- **Geringe Sichtbarkeit des PdM-Nutzens auf Managementebene**, wodurch das Thema niedrig priorisiert wird.
- **Widerstand gegen Veränderungen** traditioneller präventiver oder reaktiver Ansätze, insbesondere bei erfahrenem technischem Personal.

Im Bereich Supply Chain Management (SCM) sind strategische Barrieren stärker funktionsübergreifend ausgeprägt:

- **Keine einheitliche digitale Roadmap** über Abteilungsgrenzen hinweg, was zu einer fragmentierten und unkoordinierten Umsetzung führt.
- **Widerstand von Mitarbeitenden**, die an Excel- oder papierbasierte Systeme gewöhnt sind – insbesondere in Logistik und Beschaffung.
- **Diskrepanz zwischen grünen SCM-Zielen und operativen Alltagsentscheidungen**, häufig bedingt durch fehlende strategische Ausrichtung.
- **Fehlende Schlüsselrollen in vielen KMU**, wie Chief Data Officer, SCM Process Owner oder IT-Sicherheitsbeauftragter, was die interne Innovationsfähigkeit einschränkt.

In beiden Bereichen gilt:

- Kultureller Widerstand gegen Veränderungen und fehlende Führungsstärke bei der digitalen Transformation sind wiederkehrende Herausforderungen. Digitale Initiativen werden häufig von einzelnen „Champions“ vorangetrieben, ohne breite organisatorische Unterstützung.

3.4.2.4. QUALIFIKATIONSBEDARF

Jede der oben genannten Einschränkungen unterstreicht den wachsenden Bedarf an neuen Kompetenzen und Fähigkeiten. Diese Qualifikationslücken sind vielschichtig und betreffen sowohl Mitarbeitende an der operativen Basis als auch das Management.

Basierend auf den drei Berichten zu Predictive Maintenance (PdM), Supply Chain Management (SCM) und BC konsolidieren wir die Ergebnisse, um sie mit dem Arbeitspaket 5 zu teilen, das im Rahmen von LCAMP für die Aus- und Weiterbildung zuständig ist. Durch die Identifikation der jeweils relevanten Schlüsselkompetenzen kann dieses Arbeitspaket die Daten gezielt zur Unterstützung seiner Aktivitäten nutzen. Die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Arbeitspaketen ist ein zentrales Element des LCAMP-Projekts.

In der vollständigen Tabelle in Anhang 1 finden sich:

- 44 Einträge zu Kompetenzen, Fähigkeiten und Haltung,



- verteilt auf 9 verschiedene Berufsprofile,
- wobei die häufigste Kategorisierung „Kompetenz“ (= Competence) ist, gefolgt von „Fähigkeit“ (= Skill) und „Haltung“ (= Attitude),
- mit vier identifizierten Kompetenztypen, die die Vielfalt der benötigten Fähigkeiten widerspiegeln: AI Literacy, Digital, Professional und Transversal Skills,
- wobei die Analyse einen starken Fokus auf KI-bezogene und Cybersicherheitskompetenzen in allen Bereichen hervorhebt.

Nachfolgend ein Auszug, der die Art der in Anhang 1 enthaltenen Informationen veranschaulicht:

Table 1. Qualifikationsbedarf (Auszug)

LCAMP Competence Area (Kompetenzbereich)	Categorisation (Kategorie)	Recommended subcategories in the LCAMP framework (Unter-kategorie)	Occupation/Origin of the report (Beruf/Herkunft)	Skill / Competence / Attitude (Beschreibung der Kompetenz/ der Fähigkeit/ der Haltung)
AI Literacy	Competence (Kompetenz)	Critical Digital Competence (Kritische digitale Kompetenz)	Predictive Maintenance (PdM)	Grundlagen der KI oder des maschinellen Lernens – Grundkenntnisse über KI-/ML-Modelle
	Skill (Fähigkeit)	Computer vision (Computer Vision)	Quality control Technician (BC)	Computer Vision und CNNs zur Fehlererkennung – Anwendung neuronaler Netze zur automatisierten Qualitätskontrolle
Digital	Attitude (Haltung)	Cybersecurity (Cybersecurity)	Supply Chain Management (SCM)	Bewusstsein für Cybersicherheit – Sensibilisierung für IT-Sicherheit
	Competence	Problem solving (Lösung von Problemen)	Predictive Maintenance (PdM)	Problemlösung (Instandhaltung) – Analytisches Denken zur datenbasierten Entscheidungsfindung
		System Design (System Design)	Automation-robotics technician (BC)	Integration industrieller Robotik – Anbindung von Robotern an Systeme der Fertigungslinie
	Skill	Data literacy (Datenkompetenz)	Predictive Maintenance (PdM)	Interpretation von Sensordaten – Fähigkeit, IoT-Sensordaten zu lesen und zu nutzen
		ICT (Information & Computer Technologies)	Automation-robotics technician (BC)	Kommunikationsprotokolle (OPC-UA, Ethernet) – Umsetzung industrieller Kommunikationsstandards
			CNC operator (BC)	Digitale Schnittstellen und HMIs – Bedienung von Touchscreen-Steuerungen an CNC-Maschinen
			Maintenance technician (BC)	Installation und Konfiguration industrieller IoT-Sensoren – Einrichtung vernetzter Sensoren zur Datenerfassung
		Problem solving	Maintenance technician (BC)	Fehlerbehebung bei Datenverbindungen in IoT-Netzwerken – Lösung von Kommunikationsproblemen in vernetzten Systemen



		Data literacy	Quality control Technician (BC)	Bedienung digitaler Inspektionssysteme – Nutzung automatisierter Mess- und Prüftechnik
			CNC operator (BC)	MES/ERP system integration - connect machining operations with enterprise systems
			Maintenance technician (BC)	Nutzung cloudbasierter Plattformen zur Überwachung der Maschinenleistung – Zugriff auf Fernüberwachungssysteme
		Digital Manufacturing (Digitale Fertigung)	CNC operator (BC)	Bedienung von CAD/CAM-Software – Einsatz rechnergestützter Konstruktions- und Fertigungsprogramme
Transversal	Attitude	Communication (Kommunikation)	Supply Chain Management (SCM)	Kommunikation und Koordination – Offenheit und Bereitschaft zur digitalen Transformation
		Flexibility/Agility (Flexibilität und Agilität)	Predictive Maintenance (PdM)	Anpassungsfähigkeit – Bereitschaft zur Anpassung an sich verändernde Rollen und Technologien
	Competence	Collaboration/Teamwork (Kollaboration/Teamarbeit)	Predictive Maintenance (PdM)	Zusammenarbeit – Abteilungsübergreifende Kooperation (z. B. Instandhaltung, IT-Betrieb)
		Critical thinking (Kritisches Denken)	Supply Chain Management (SCM)	Strategisches Denken – Ganzheitliches Verständnis komplexer Lieferketten
	Skill	Collaboration/Teamwork	Transversal skills (BC)	Interdisziplinäre Zusammenarbeit – Effektives Arbeiten in multidisziplinären Teams in digitalen Umgebungen
		Communication	Transversal skills (BC)	Kommunikation und Koordination – Klare Informationsweitergabe zwischen Abteilungen und Schichten
		Flexibility/Agility	Transversal skills (BC)	Anpassung an neue Technologien – Bereitschaft, neue technologische Werkzeuge zu erlernen und anzuwenden
		Problem solving	Transversal skills (BC)	Problemlösung und Entscheidungsfindung – Analyse von Situationen und Treffen fundierter technischer Entscheidungen
		Continuous improvement (Kontinuierliche Verbesserung)	Transversal skills (BC)	Denken in kontinuierlicher Verbesserung – Erkennen von Optimierungspotenzialen in digitalen Fertigungsprozessen
Professional	Competence - Skill	System Design (System Design)	Automation-robotics technician (BC)	Integration industrieller Robotik – Anbindung von Robotern an Systeme der Fertigungslinie
		System Design	Automation-robotics technician (BC)	Konfiguration von Bildverarbeitungssystemen – Einrichtung von Kameras und Bildverarbeitung zur Roboterführung und Automatisierung



Entscheidend ist die Förderung einer Lernkultur. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sollten nicht nur Schulungen zu Arbeitstools anbieten, sondern auch ein Umfeld schaffen, in dem Neugier, Feedback und digitale Experimente zur Normalität gehören.

3.4.3. REALE ABWEICHUNGEN: PRAXISBEISPIELE AUS DEM BASKENLAND

Der Bericht aus dem Baskenland bestätigt erhebliche Unterschiede bei der Einführung digitaler Technologien zwischen Regionen und Sektoren:

- In digital fortgeschrittenen Ökosystemen arbeiten KMU mit gemeinsamen Plattformen, regionalen Innovationszentren und Dienstleistern zusammen, um Fähigkeiten im Bereich der prädiktiven Instandhaltung (PdM) und des Supply Chain Managements (SCM) zu entwickeln.
- In anderen Regionen erfolgt die Einführung fragmentiert oder oberflächlich, eher getrieben durch externe Anforderungen als durch eine interne Digitalstrategie.

Diese Unterschiede unterstreichen die Bedeutung territorialer Innovationssysteme, die KMU durch kollaboratives Experimentieren und Lernen dabei unterstützen, strukturelle Einschränkungen zu überwinden.

3.5. ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN UND STRATEGISCHE EMPFEHLUNGEN

Der digitale und grüne Wandel verändert die industrielle Landschaft für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) weiterhin. Die zukünftigen Entwicklungen und Empfehlungen der drei Berichte verweisen auf technologische Fortschritte, neue Organisationsmodelle und strategische Ausrichtungen. Diese sollten von KMU aufgegriffen werden. Obwohl die betrachteten Bereiche gemeinsame Entwicklungstendenzen aufweisen, unterscheiden sich ihre konkreten Entwicklungspfade je nach betrieblicher Logik und technologischer Anwendung.

3.5.1. ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN IN DER PRÄDIKTIVEN INSTANDHALTUNG (PDM)

Der Bericht zur prädiktiven Instandhaltung (PdM) betont die Bedeutung skalierbarer, mitarbeiterzentrierter und leistungsorientierter Strategien, um PdM für KMU zugänglicher und wirkungsvoller zu machen.

- **Ausbau des Zugangs zu finanzieller Unterstützung und Technologieeinführung:**
Viele KMU zögern bei der Einführung von PdM aufgrund von Kosten, Risiken oder Komplexität. Der Bericht empfiehlt konkrete Maßnahmen zur Senkung finanzieller und technischer Hürden:
 - Förderung finanzieller Anreize und Zugang zu erschwinglichen PdM-Technologien, insbesondere durch öffentlich-private Partnerschaften oder EU-weite Programme.
 - Unterstützung skalierbarer, cloudbasierter „PdM-as-a-Service“-Modelle zur Reduzierung von Investitionskosten und zur Senkung der Einstiegshürden.
 - Förderung kollaborativer Demonstrationsplattformen, auf denen KMU reale Anwendungsbeispiele von PdM-Lösungen beobachten und testen können.
- **Investitionen in Weiterbildung und digitale Kompetenzen:**
Humankapital bleibt ein entscheidender Erfolgsfaktor für PdM. Der Bericht hebt hervor, dass Schulungen mit der Weiterentwicklung der Instandhaltungspraxis abgestimmt werden müssen:



- Ausbau digitaler Kompetenzen und Schulungen in Instandhaltungsanalytik, insbesondere für Techniker und Bedienpersonal.
- Zusammenarbeit mit Berufsbildungszentren (VET), um PdM-spezifische Module in Lehrpläne zu integrieren.
- Förderung lebenslangen Lernens und interdisziplinärer Qualifikationen, um Instandhaltungsteams an neue Werkzeuge (z. B. KI-gestützte Diagnostik, Fernüberwachung) heranzuführen.
- Optimierung von PdM-Strategien zur langfristigen Wettbewerbsfähigkeit:
Um langfristigen Mehrwert zu schaffen, muss PdM über isolierte Anwendungsfälle hinausgehen und zu einem strategischen Bestandteil des Asset Managements werden:
 - Übergang von isolierten PdM-Anwendungen zu unternehmensweiten Transformationsplänen im Bereich Instandhaltung.
 - Integration von Datenmanagement und Cybersicherheitsprotokollen in das Design von PdM-Systemen.
 - Überwachung und Optimierung von PdM-Kennzahlen (KPIs), um den geschäftlichen Nutzen und die Auswirkungen auf Nachhaltigkeit langfristig nachzuweisen.

3.5.2. ZUKÜNFTIGE PERSPEKTIVEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR DAS SUPPLY CHAIN MANAGEMENT 4.0 (SCM 4.0)

Der Bericht zum Supply Chain Management (SCM) präsentiert eine ganzheitliche Vision der Digitalisierung von Lieferketten, die Transparenz, Partnerschaft und strategische Ausrichtung an Kunden- und Umweltanforderungen in den Mittelpunkt stellt.

- Vertrauen, Transparenz und Informationsaustausch aufbauen:
Mit zunehmender Digitalisierung und Dezentralisierung von Lieferketten betont der Bericht die zentrale Rolle von Vertrauen:
 - Die Digitalisierung (z. B. durch Plattformen für das Lieferantenbeziehungsmanagement) sollte nicht nur zur Automatisierung dienen, sondern auch eine offene, nachvollziehbare Kommunikation zwischen Partnern ermöglichen.
 - Vertrauensbildende Maßnahmen wie kollaborative Werkzeuge, gemeinsame Dashboards und Co-Innovationsplattformen sollten gefördert werden.
 - KMU sollten dabei unterstützt werden, technologische Effizienz mit persönlicher Interaktion in Einklang zu bringen, um langfristige Loyalität und Zusammenarbeit zu sichern.
- Strategische Empfehlungen (10 zentrale Handlungsfelder):
Zur erfolgreichen Bewältigung der digitalen Transformation und globalen Komplexität schlägt der Bericht einen strukturierten Rahmen mit zehn konkreten Hebeln vor:
 - Digitalisierung von Beschaffung und Lieferantenmanagement: Einführung kollaborativer Plattformen und modularer Werkzeuge wie EaaS zur Steigerung von Transparenz und Reaktionsfähigkeit.
 - Einsatz digitaler Werkzeuge zur Förderung von Transparenz: Aufbau regionaler SCM-4.0-Demonstratoren und Nutzung von Blockchain oder KI für offene Informationsflüsse.
 - Stärkung von Datenmanagement und Informationssicherheit: Sicherstellung eines sicheren und regelkonformen Datenaustauschs entlang der Lieferkette.
 - Ausrichtung der Lieferantenservices an Kundenerwartungen: Nutzung digitaler Feedbackschleifen zur Anpassung an sich wandelnde Kundenbedürfnisse.
 - Balance zwischen digitaler Effizienz und menschlicher Interaktion: Förderung emotionaler Intelligenz, Verhandlungskompetenz und Vertrauen in digital vermittelten Beziehungen.



- Förderung einer kooperativen Partnerschaftskultur: Übergang von transaktionalen zu partnerschaftlichen Modellen mit Fokus auf gemeinsamen Mehrwert und Co-Innovation.
- Investitionen in Qualifizierung und Beziehungsfähigkeiten: Schulungen zu digitaler Logistik, Planung und Beziehungskompetenz über Berufsbildungspartner und hybride Lernformate.
- Stärkung des Change-Managements: Bereitstellung von Diagnosen, Beratungsleistungen und Transformationsbegleitung für KMU.
- Verankerung digitaler Lösungen in grünen Strategien: Integration von Nachhaltigkeitskennzahlen in digitale Projekte (z. B. Scope-3-Emissionen, zirkuläre Logistik).
- Regelmäßige Vertrauens- und Beziehungsanalysen: Bewertung der Reife von Kooperationen und frühzeitige Identifikation von Risiken in Lieferantenbeziehungen.

3.5.3. STRATEGIEN DER DIGITALEN TRANSFORMATION FÜR DIE FORTGESCHRITTENE FERTIGUNG: ERKENNTNISSE AUS DEM BASKENLAND

Der Bericht aus dem Baskenland liefert wertvolle Einblicke in die praktischen Realitäten der digitalen Transformation in der fortgeschrittenen Fertigung und zeigt sowohl Herausforderungen als auch Chancen für die Entwicklung von KMU auf.

Die Analyse zeigt, dass der menschliche Widerstand gegenüber Veränderungen die größte Hürde für die digitale Transformation darstellt, noch vor technologischer Komplexität und finanziellen Einschränkungen.

Unternehmen entwickeln sich zunehmend hin zu hybriden Kompetenzprofilen, die sowohl traditionelle technische Fachkenntnisse als auch digitale Kompetenzen erfordern. Dieser Wandel zeigt sich besonders deutlich in Berufen wie Instandhaltungstechniker, Automatisierungstechniker, CNC-Maschinenbediener und Qualitätstechniker, bei denen digitale Fähigkeiten zunehmend entscheidend für die Arbeitsleistung und berufliche Entwicklung sind.

Aus diesen Erkenntnissen ergeben sich mehrere zentrale Strategien für Unternehmen auf ihrem Weg der digitalen Transformation:

- **Einführung mitarbeiterzentrierter Change-Management-Strategien**, die kulturelle Anpassung ebenso berücksichtigen wie technische Schulungen.
- **Entwicklung interner Rollen für digital kompetente Mitarbeitende**, insbesondere aus Berufsbildungsprogrammen (VET), die traditionellen Abläufe mit neuen Technologien verbinden und als effektive Schnittstelle zu externen Technologieanbietern wie KI-Spezialisten und PdM-Experten fungieren.
- **Schrittweise Einführung neuer Technologien**, unterstützt durch öffentliche Fördermittel und kollaborative Projekte, um neue Technologien in risikoarmen Umgebungen zu erproben.
- **Anerkennung des strategischen Werts der Berufsbildungszentren im Baskenland**, die durch ihre aktive Beteiligung an praxisnahen Innovationsprojekten und ihre zentrale Rolle bei der Qualifizierung und Umschulung der Belegschaft die digitale Transformation maßgeblich vorantreiben.

3.5.4. PRIORITÄTEN FÜR DIE LANGFRISTIGE TRANSFORMATION VON KMU

Trotz bereichsspezifischer Ansätze lassen sich aus den drei Berichten mehrere übergreifende Prioritäten ableiten.



- **Finanzielle Zugänglichkeit ist entscheidend:** Ob für Sensoren, Software oder Beratungsleistungen – KMU benötigen niedrighschwellige Einstiegsmöglichkeiten, etwa durch Förderprogramme, Leasingmodelle oder gemeinsame Serviceangebote.
- **Die Transformation der Belegschaft ist von zentraler Bedeutung:** Digitale und soziale Kompetenzen müssen parallel entwickelt werden. Im Supply-Chain-Management (SCM) umfasst dies Systemdenken, Vertrauensmanagement und KI-Kompetenz. In der prädiktiven Instandhaltung (PdM) sind Zustandsüberwachung, Diagnostik und prädiktive Analytik entscheidend.
- **Integration digitaler und ökologischer Ziele:** Zukünftige Strategien müssen Umweltaspekte wie Energieeffizienz, Abfallvermeidung oder CO₂-Tracking systematisch berücksichtigen.
- **Der Mensch bleibt im Mittelpunkt:** Ob in der Instandhaltung oder in Lieferkettenbeziehungen, der Erfolg der Transformation hängt maßgeblich von Führung, Zusammenarbeit und der Akzeptanz der Mitarbeitenden ab.

4. TRENDS UND AUSWIRKUNGEN DES DIGITALEN UND GRÜNEN WANDELS AUF BERUFSBILDUNGSZENTREN

Dieses Kapitel fasst die wichtigsten Erkenntnisse über die Auswirkungen des digitalen und grünen Wandels auf Berufsbildungszentren (VET-Zentren) zusammen, wie sie in den drei erstellten Berichten (PdM, SCM und BC) dargestellt sind.

4.1. HERAUSFORDERUNGEN UND CHANCEN FÜR BERUFSBILDUNGSZENTREN

4.1.1. EINFÜHRUNG

Der digitale und grüne Wandel führt zu tiefgreifenden Veränderungen in der Industrie und erfordert eine Anpassung der Programme und Strategien von Berufsbildungszentren.

Ansichts der hohen Dynamik dieses Wandels ist es für diese Einrichtungen unerlässlich, stets auf dem neuesten Stand zu bleiben, um Lernenden die Kompetenzen zu vermitteln, die auf dem Arbeitsmarkt gefragt sind. Der folgende Abschnitt beschreibt die wichtigsten Chancen und Herausforderungen, die sich aus diesem Wandel ergeben.

4.1.2. STÄRKUNG DER ZUSAMMENARBEIT MIT INDUSTRIEPARTNERN

Als Reaktion auf die Notwendigkeit, mit den Anforderungen des produktiven Sektors Schritt zu halten, suchen Berufsbildungszentren zunehmend die direkte Zusammenarbeit mit der Industrie.



Viele Einrichtungen verfügen bereits über Netzwerke von Unternehmenspartnern, die die Integration praktischer Erfahrungen in ihre Programme unterstützen, etwa durch duale Ausbildung, Praktika oder gemeinsame Projekte.

Diese Tendenz wurde durch die durchgeführten Umfragen bestätigt: In den Bereichen prädiktive Instandhaltung (PdM) und Supply Chain Management (SCM) priorisieren die meisten befragten Berufsbildungszentren Partnerschaften mit Unternehmen gegenüber Kooperationen mit anderen Bildungseinrichtungen, um ihre Programme stärker an den realen und aktuellen Bedürfnissen der Industrie auszurichten.

Die enge Abstimmung von Berufsbildungszentren mit Industriepartnern bleibt entscheidend, um Ausbildungsprogramme praxisgerecht zu gestalten. Durch die gemeinsame Entwicklung von Lernpfaden, die Integration neuer Technologien in die Lehrpläne und eine bessere Reaktion auf sich wandelnde Kompetenzanforderungen wird diese Zusammenarbeit zum Schlüssel für zukunftsfähige Qualifizierung.

Die direkte Verbindung zwischen Lernenden und Industriepartnern fördert das gegenseitige Verständnis, stärkt die Innovationsfähigkeit und bereitet die Auszubildenden darauf vor, aktiv an der digitalen und industriellen Transformation von Unternehmen mitzuwirken.

4.1.3. SCHULUNGEN FÜR AUSBILDERINNEN UND AUSBILDER

Eine der wichtigsten Erkenntnisse aus der SCM-Umfrage war die Identifizierung der zentralen Hürden bei der Integration neuer digitaler Technologien 4.0 in Berufsbildungszentren. Die Mehrheit der Befragten nannte fehlende Schulungen für Ausbilderinnen und Ausbilder als Hauptbarriere – gefolgt von den hohen Kosten, die mit dem Übergang verbunden sind. Dieses Problem betrifft nicht nur ein einzelnes Land, sondern zieht sich durch industrielle Sektoren in ganz Europa. Der Bericht *„Tensions on Workforce and Skills in Industry and Associated Training Schemes“* (Spannungen hinsichtlich Arbeitskräfte und Qualifikationen in der Industrie sowie damit verbundene Ausbildungsprogramme) hebt diese Lücke bereits für Frankreich hervor, wo ein anerkannter und dringender Bedarf besteht, die Lehrkräfteausbildung zu stärken. Ähnlich äußerte sich ein Berufsbildungszentrum in der Türkei, das im Rahmen der SCM-Studie befragt wurde: *„The Ministry should mandate teacher training in digital and green transition across all vocational education institutions.“* (Das Ministerium sollte eine Lehrerfortbildung zum digitalen und ökologischen Wandel in allen berufsbildenden Bildungseinrichtungen vorschreiben) Im Baskenland wurden bereits Schulungsprogramme für Ausbilderinnen und Ausbilder in Berufsbildungszentren eingeführt, um deren Wissen über moderne industrielle Entwicklungen, pädagogische Methoden und technologische Fortschritte aktuell zu halten. Die Programme konzentrieren sich sowohl auf technische Kompetenzen als auch auf moderne didaktische Ansätze, darunter projektbasiertes und hybrides Lernen. Die bestehenden Initiativen müssen jedoch weiter ausgebaut, systematisiert und besser zugänglich gemacht werden, um die vollständige Vorbereitung der Lehrkräfte auf intelligente und vernetzte industrielle Umgebungen sicherzustellen.

4.1.4. AUTONOMIE VON BERUFSBILDUNGSZENTREN

Eine weitere große Herausforderung für Berufsbildungszentren besteht darin, sich an neue Entwicklungen anzupassen, trotz begrenzter Autonomie. In vielen europäischen Ländern müssen diese Zentren Vorgaben übergeordneter Behörden, etwa Bildungsministerien, folgen, was ihre Entscheidungsfreiheit in Bezug auf Programme und Lehrmethoden stark einschränkt.

Laut der Umfrage zur prädiktiven Instandhaltung (PdM) gaben 44 % der Berufsbildungszentren an, nur über eingeschränkte Autonomie zu verfügen, während 36 % ihre Autonomie als kontrolliert beschrieben. Ähnlich zeigt die SCM-Umfrage, dass lediglich 29 % der Zentren volle Autonomie besitzen.



4.1.5. HYBRIDE SCHULUNGSFORMATE

Die digitale Transformation hat zu mehr Flexibilität und Zugänglichkeit in Bildungswegen geführt, insbesondere durch den Aufstieg hybrider Modelle, die Online- und Präsenzlernen kombinieren. Dieses Modell erleichtert nicht nur die Vermittlung technischer Kompetenzen, sondern fördert auch den Aufbau von Netzwerken und die berufliche Integration.

Darüber hinaus ist hybrides Lernen besonders vorteilhaft für Berufstätige, da es ihnen ermöglicht, ihre Ausbildung fortzusetzen und formale Qualifikationen zu erwerben, ohne ihre Beschäftigung aufgeben zu müssen. Diese Flexibilität macht hybride Modelle zu einer Schlüsselstrategie zur Förderung des lebenslangen Lernens, der Höherqualifizierung und der kontinuierlichen Anpassung der Arbeitskräfte an die sich wandelnden Anforderungen intelligenter und vernetzter Industrieumgebungen.

4.1.6. WACHSENDE NACHFRAGE

Bildungseinrichtungen sehen sich einer wachsenden Nachfrage nach spezialisierten Lernangeboten und steigenden Einschreibezahlen gegenüber, was eine Chance zur Modernisierung und Diversifizierung ihrer Programme bietet. In Spanien stellt die Einführung eines Masterstudiengangs im Bereich Supply Chain Management im Jahr 2024 – obwohl Qualifikationsstufe 7 des EQR nicht im Fokus dieses Berichts steht – ein deutliches Beispiel für diesen Trend dar.

Berufsbildungseinrichtungen (VET-Zentren) müssen daher überfachliche Kompetenzen stärken und die Anpassungsfähigkeit der Lernenden fördern. Während VET-Zentren im Baskenland bereits kollaborative, projektbasierte Lernmethoden anwenden, die sowohl technische als auch überfachliche Kompetenzen entwickeln sollen, ist die Bedeutung dieser überfachlichen Fähigkeiten im heutigen industriellen Wandel besonders hervorzuheben. Kompetenzen wie Problemlösungsfähigkeit, Kommunikation, Teamarbeit, selbstständiges Lernen und Kreativität gewinnen im Zuge der digitalen Transformation und des kontinuierlichen Wandels zunehmend an Bedeutung für Unternehmen. Diese Fähigkeiten fördern nicht nur die berufliche Vielseitigkeit, sondern ermöglichen es Absolventinnen und Absolventen auch, sich schnell an neue Technologien, Arbeitsabläufe und Organisationsmodelle anzupassen.

4.1.7. FINANZIELLE HERAUSFORDERUNGEN UND LÖSUNGEN

Eine zentrale Herausforderung für Bildungszentren besteht in der Investition in neue Technologien, die häufig durch finanzielle Einschränkungen begrenzt wird. Um dem entgegenzuwirken, greifen viele Einrichtungen auf alternative Finanzierungsquellen zurück. Laut der PdM-Umfrage profitieren die Zentren hauptsächlich von öffentlichen Fördermitteln, Partnerschaften mit der Industrie und – in geringerem Maße – von der Zusammenarbeit mit anderen Berufsbildungszentren (VET-Zentren). In der SCM-Umfrage bleiben öffentliche und industrielle Finanzierungen die wichtigsten Quellen, während interne Mittel begrenzt sind. Bemerkenswert ist, dass in der SCM-Umfrage keine Zusammenarbeit mit anderen VET-Zentren gemeldet wurde. Einige Einrichtungen nannten zudem Sponsorings und EU-Projekte wie LCAMP als wertvolle Unterstützungsmechanismen.

4.1.8. NEUE TECHNOLOGIEN UND IHRE AUSWIRKUNGEN AUF PÄDAGOGISCHE STRATEGIEN

Die in diesem Bericht genannten aufkommenden Technologien beeinflussen nicht nur die Inhalte von Ausbildungsprogrammen, sondern beginnen auch, pädagogische Strategien und Ressourcen zu verändern. Nachfolgend ein kurzer Überblick über einige mögliche Anwendungen dieser Technologien im pädagogischen Bereich:



- **Künstliche Intelligenz – Personalisiertes Lernen:** KI kann die Ausbildung an das individuelle Lerntempo und die Bedürfnisse der Lernenden anpassen, indem sie auf deren Leistung basierende, gezielte Lernressourcen bereitstellt.
- **Virtuelle und Erweiterte Realität – Sicheres Eintauchen:** VR und AR ermöglichen simulierte Umgebungen für praxisnahes Lernen – ideal für technische Ausbildungsbereiche, in denen reale Risiken vermieden werden sollen.
- **Online-Plattformen und MOOCs – Flexibilität und Zugang:** Diese Werkzeuge erleichtern das orts- und zeitunabhängige Lernen im eigenen Tempo und erweitern so den Zugang zu Bildung.
- **Big Data und Leistungsanalyse – Kontinuierliche Verbesserung:** Big Data kann zur Analyse von Lerndaten genutzt werden, um Lehrmethoden zu optimieren und die Ausbildungsergebnisse kontinuierlich zu verbessern.
- Im spezifischen Fall des PdM-Sektors:
 - **MAAS in der Ausbildung – Zugang zu PdM-Technologien über kollaborative Cloud-Plattformen:** Cloudbasierte Lösungen ermöglichen es Lernenden, mit realen Daten und Werkzeugen der prädiktiven Instandhaltung zu arbeiten und so praktische Kompetenzen im Umgang mit diesen Technologien zu entwickeln.
 - **MAAS in der Ausbildung – Einsatz von Simulationen und realen Fallstudien:** Simulationen und digitale Zwillinge erlauben es den Lernenden, prädiktive Instandhaltungstechniken sicher zu üben und ihre Fähigkeiten zu stärken, bevor sie mit realen Maschinen arbeiten.

4.1.9. EUROPÄISCHE INITIATIVEN

Die Desk-Research-Phase hat eine Vielzahl von EU-finanzierten Initiativen aufgezeigt, die sich auf technologische Trends und Kompetenzentwicklung in der fortgeschrittenen Fertigung konzentrieren. Diese Projekte haben bedeutende Schulungsmaterialien hervorgebracht, die verschiedene Fachgebiete abdecken. Die folgende Tabelle zeigt eine Auswahl an Ressourcen, die auf europäischer Ebene Bildungsinhalte und bewährte Praktiken bereitstellen und von Berufsbildungszentren (VET-Zentren) sowie anderen relevanten Akteuren als Inspirations- und Unterstützungsquelle genutzt werden können.

Table 2. Beispiele europäischer Projekte zu technologischen Trends und Kompetenzentwicklung in der fortgeschrittenen Fertigung

PROJEKT	BESCHREIBUNG
OPTIMAI	Verbessert die industrielle Qualität und Effizienz durch KI-gestützte Fehlererkennung, digitale Zwillinge und AR. Zudem werden Schulungen zu Industrie 4.0/5.0 angeboten.
I4MS	Europäische Initiative zur Unterstützung von KMU im verarbeitenden Gewerbe bei der Einführung digitaler Technologien.
DATA.ZERO	EU-Projekt zur Förderung der Null-Fehler-Produktion durch datengestützte Lösungen und Schulungen in den Bereichen KI, IoT und maschinelles Lernen.
PreMETS	Erasmus+-Projekt zur Verbesserung der Ausbildung in prädiktiver Instandhaltung durch Toolkits, Mikro-Zertifikate und kostenlose Moodle-Kurse.
DRIVES	Erasmus+-Projekt zur Förderung von Kompetenzen im Automobilbereich durch einen MOOC zu Wartung, Cybersicherheit, KI und Robotik.
4CHANGE	Schließt Qualifikationslücken im Metallbereich durch digitale und unternehmerische Schulungen sowie arbeitsplatzbasiertes Lernen.



4.2. AUSWIRKUNGEN AUF AUSBILDUNG UND VERMITTELTE KOMPETENZEN

4.2.1. VERMITTELTE KOMPETENZEN IM BEREICH DER PRÄDIKTIVEN INSTANDHALTUNG (PDM)

Neue Technologien erfahren eine zunehmende Integration in Ausbildungsprogramme, wenn auch in unterschiedlichem Umfang. Die folgende Tabelle zeigt Beispiele für Programme im Bereich der prädiktiven Instandhaltung (PdM), in die neuen Technologien und Fachgebiete eingebunden wurden.

Table 3. Neue Technologien und Fachgebiete in Schulungen im Bereich der prädiktiven Instandhaltung (PdM)

TECHNOLOGIE	TRAINING / KURSE
Sustainability (Nachhaltigkeit)	- Abitur in Wissenschaft und Technologien für Industrie und nachhaltige Entwicklung (EQR 4) (Frankreich) - Staatlich geprüfter Techniker in Wissenschaft und Technologien für Industrie und nachhaltige Entwicklung (EQR 5) (Frankreich)
Cybersecurity (Cybersicherheit)	Berufliches Abitur und staatlich geprüfter Techniker in Cybersicherheit, Informatik und elektronischen Netzwerken (EQR 4 / EQR 5) (Frankreich)
IoT (Internet der Dinge)	Technologischer Universitätsabschluss in Maschinenbau und Produktionstechnik mit Schwerpunkt Innovation für die Industrie (EQR 6) (Frankreich)
IoT and AI (Künstliche Intelligenz)	Staatlich geprüfter Techniker für industrielle Instandhaltung (Frankreich)
IoT, IA, Cybersecurity	- Berufsbegleitender Studiengang in Wartung biomedizinischer Geräte (EQR 6) (Frankreich) - Berufsbegleitender Studiengang in Instandhaltung für Industrie 4.0 (EQR 6) (Frankreich)
IoT, AI, Cybersecurity, Sustainability, Cloud	- Berufliches Abitur als Fachkraft für mechanische Produktfertigung mit Schwerpunkt Produktionsausführung und -überwachung (EQR 4) (Frankreich) - Staatlich geprüfter Techniker für die Entwicklung von Produktentwicklungsprozessen (EQR 5) (Frankreich) - Staatlich geprüfter Techniker für Konstruktion und Produktion automatisierter Systeme (EQR 5) (Frankreich) - Berufsbegleitender Studiengang in Entwicklung und Produktion elektronischer Systeme (EQR 6) (Frankreich) - Berufsbegleitender Studiengang in Gestaltung und Optimierung industrieller Prozesse und Verfahren (EQR 6) (Frankreich) - Staatlich geprüfter Techniker für die Gestaltung industrieller Produkte (EQR 5) (Frankreich)
Beispiele für Schulungen in den jeweiligen Fachgebieten: IoT, AI, Cybersecurity, Sustainability, Cloud	Für Frankreich: Robotik-Modul Für Slowenien: Digitales Lehren; Nachhaltigkeit; Benutzeroberflächen; Effiziente Nutzung von Werkzeugen; Ethical Hacking – Praktische Ausbildung; Cybersicherheit; Künstliche Intelligenz in der Informationstechnologie – Praktische Ausbildung; Künstliche Intelligenz; Serversysteme; Fortgeschrittene Computernetzwerke; IoT-basierte intelligente Elektroinstallationen; Nachhaltigkeit; Effiziente Nutzung und erneuerbare Energiequellen; Cybersicherheit, Sicherheit und Schutz; Cybersicherheit, Schutz von Informationssystemen Für Italien: Systeme und Netzwerke; Technologien und Design von Informations- und Telekommunikationssystemen; Informatik; Telekommunikation; Projektmanagement, Unternehmensorganisation



4.2.2. VERMITTELTE KOMPETENZEN IM BEREICH SUPPLY CHAIN MANAGEMENT (SCM)

Im Bereich des Supply Chain Managements (SCM) wird die Integration neuer Technologien ebenfalls zunehmend sichtbar. Die nachfolgende Tabelle bietet einen detaillierten Überblick über Ausbildungsprogramme und die damit verbundenen Kompetenzen in diesem Bereich.

Table 4. Neue Technologien und Fachgebiete in Schulungen im Bereich Supply Chain Management (SCM)

TECHNOLOGIEN	BILDUNGSWEG	FÄHIGKEITEN
Sustainability	- Bachelor in Technologiemanagement mit Schwerpunkt Logistik und Transport: Mobilität und nachhaltige Lieferkette - Nachhaltigkeit im Supply Chain Management	- Die Logistik- und Transportkette mit Fokus auf Nachhaltigkeit managen - Ressourcennutzung optimieren - Strategien für nachhaltige Entwicklung umsetzen - Verantwortungsvolle Praktiken in Logistik und Mobilität integrieren - Nachhaltigkeitsaudits in der Logistik durchführen - Innovative Lösungen unter Berücksichtigung ökologischer Kriterien entwickeln - Strategien der Corporate Social Responsibility (CSR) im Logistikbereich anwenden - Sozial, ökologisch und ökonomisch nachhaltige Liefer- und Produktionsketten realisieren - Vorschriften wie das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz und kommende EU-Richtlinien interpretieren und anwenden sowie Instrumente zur Bewertung und Optimierung der Nachhaltigkeitsleistung nutzen - Nachhaltigkeit in die strategische Planung und das operative Management integrieren, unter Berücksichtigung des Gleichgewichts zwischen Wirtschaftlichkeit, Ökologie und sozialen Aspekten - Rechtliche Rahmenbedingungen und Strategien verstehen, um langfristige Nachhaltigkeit in der Lieferkette zu erreichen
Cybersecurity	- Qualitätsmanagement, industrielle Logistik und Organisation mit Schwerpunkt Organisation und Lieferkette - Management von Logistik und Transport mit Schwerpunkt Mobilität und nachhaltige Lieferketten - Berufsbachelor in Logistik und Flussmanagement - Fachkraft für IT-Infrastruktur und -Sicherheit	- IT-Sicherheit und Schutz von Systemen gewährleisten - Digitale Werkzeuge nutzen und Cybersicherheitsregeln anwenden, um Informationen zu erfassen, zu verarbeiten, zu erstellen und zu verbreiten - Sicherheitsrichtlinien zum Schutz von in Cloud-Infrastrukturen gespeicherten Daten umsetzen - Vorbeugende Maßnahmen gegen Eindringversuche, Betrug, Datenpannen oder -lecks durch Konfiguration des Informationssystems anwenden - Den ordnungsgemäßen Betrieb der IT- und Telekommunikationsnetze des Unternehmens sicherstellen - Logistikbezogene Daten schützen - Cloud-Infrastrukturen absichern - Cybersicherheitsstrategien anwenden - Cyber Risiken minimieren
AI	- Bachelorabschluss in Natur- und Ingenieurwissenschaften mit Schwerpunkt Instandhaltung intelligenter und vernetzter Systeme - Bachelorabschluss in Natur- und Ingenieurwissenschaften	- Prädiktive Instandhaltung, Robotik, Mechatronik und computergestütztes Instandhaltungsmanagement optimieren - Daten verarbeiten und analysieren, um strategische Informationen zu gewinnen und diese zur Entscheidungsunterstützung an Kolleginnen und Kollegen weiterzugeben - Datenverarbeitung und -synthese - Datenbanken entwickeln und verwalten



	– Informationssysteme (EQR 6) • Bachelorabschluss in Natur- und Ingenieurwissenschaften – Informatik und digitale Systeme (EQR 6) • IT-Projektkoordinator (Cloud-Infrastrukturen, Anwendungen oder Daten) (EQR 6) • Logistik und Künstliche Intelligenz (KI)	• Künstliche Intelligenz in die Anwendungsentwicklung integrieren • KI-Lösungen für die Industrie entwerfen und optimieren • KI-Projekte organisieren und managen • Werkzeuge der künstlichen Intelligenz entwickeln • Prädiktive Datenanalysen mithilfe künstlicher Intelligenz durchführen • Logistikprozesse mit Robotik und RPA automatisieren • Daten mit Big Data-Technologien verwalten • Prädiktive Analytik zur Bedarfsprognose anwenden • Lieferwege mithilfe fortgeschrittener Algorithmen optimieren und Cybersicherheitsstrategien in automatisierten Systemen implementieren • Ethische Grundsätze beim Einsatz von KI berücksichtigen • Betriebliche Effizienz maximieren und Investitionsrendite sicherstellen – mit Blick auf Logistik 4.0 und die Zukunft der Automatisierung im Sektor
Cloud Computing	• IT-Projektkoordinator (Cloud-Infrastrukturen, Anwendungen oder Daten)	• Cloud-Infrastrukturen orchestrieren • Informationssicherheit managen • Cloud-Computing-Dienste bereitstellen und warten • Sicherheitsrichtlinien zum Schutz von in Cloud-Infrastrukturen gespeicherten Daten umsetzen
Blockchain	• Projektmanager für Blockchain-Lösungen (EQR 6)	• Blockchain-spezifische Systeme mit geeigneten Programmiersprachen wie Solidity, C++ oder JavaScript entwerfen, programmieren und weiterentwickeln • Webanwendungen und -frameworks entwickeln • Kundenbedarfe analysieren und robuste, sichere Blockchain-Architekturen implementieren • Fortgeschrittene Kenntnisse in Blockchain und Kryptografie anwenden • Innovative Lösungen für verschiedene Sektoren wie Finanzen, Logistik und Gesundheitswesen entwickeln • Blockchain-Projekte managen und eine effektive Koordination zur Zielerreichung und Kundenzufriedenheit sicherstellen • Technisch zuverlässige und skalierbare Lösungen bereitstellen
IoT	• Entwickler und Integrator von IoT-Lösungen	• Architekturen für vernetzte Geräte implementieren, die Signale, Informationen oder Anweisungen senden, empfangen und verarbeiten können • Spezifische Herausforderungen von Unternehmen auf Basis ihrer geschäftlichen, organisatorischen oder betrieblichen Anforderungen adressieren • Automatisierung von Abläufen ermöglichen, Geschäftsprozesse optimieren und Management-entscheidungen unterstützen

Die folgende Tabelle bietet einen detaillierteren Überblick über Ausbildungsprogramme im Bereich Supply Chain Management (SCM) und verwandten Fachgebieten sowie die jeweils vermittelten Hauptkompetenzen.

Table 5. Schulungen im Zusammenhang mit SCM und den wichtigsten geschulten Fähigkeiten

LAND	BILDUNGSWEG	FÄHIGKEIT
Frankreich	Universitätsdiplom in Logistik- und Transportmanagement (EQR 6)	Logistik, Transport, ökologische Verantwortung, Nachhaltigkeit, digitale Transformation, Flussmanagement



Berufsqualifikationszertifikat: Technicien Logistique Industrielle (EQR 6)	Management von Informationsflüssen, industrielle Konsistenz, Überwachung von Versorgung und Distribution, computergestützte Systeme
Bachelorabschluss in Technologie: Management der Logistik und des Transports, Spezialisierung auf Mobilität und nachhaltige Lieferketten (EQR 6)	IT-Sicherheit, Nachhaltigkeit, innovative Strategien in Logistik und Transport
Bachelorabschluss in Technologie: Logistik- und Transportmanagement, Spezialisierung auf nachhaltige Mobilität und Lieferketten (EQR 6)	Innovative Technologien, digitale Lösungen in Logistik und Transport
Bachelorabschluss in Natur- und Ingenieurwissenschaften, Spezialisierung auf Instandhaltung intelligenter und vernetzter Systeme (EQR 6)	Digitale und energetische Transformation, Künstliche Intelligenz (KI), Mechatronik, vorausschauende Instandhaltung, computergestützte Instandhaltungsmanagementsysteme (CMMS)
Berufsbachelor in Logistik- und Flussmanagement (EQR 6)	Lagerautomatisierung, nachhaltige Logistik, Cybersicherheit, gesellschaftliche Unternehmensverantwortung (CSR), Flussmanagement
Bachelorabschluss in Technologie: Qualität, industrielle Logistik und Organisation, Spezialisierung auf Lieferkette und Organisation (EQR 6)	Digitale Werkzeuge, IT-Sicherheit, Informationsflussmanagement, Lieferkette, Prozessoptimierung
Bachelorabschluss in Natur- und Ingenieurwissenschaften – Informationssysteme (EQR 6)	Ökologische Verantwortung, Kreislaufwirtschaft, Datenmanagement und -analyse, KI, Digitalisierung
Bachelorabschluss in Natur- und Ingenieurwissenschaften – Informatik und digitale Systeme (EQR 6)	KI, Deep Learning, Computer Vision, natürliche Sprachverarbeitung (NLP), Datenbanken, digitale Transformation
Entwickler für KI und Data Science (EQR 6)	KI-Entwicklung, Data Science, Prozessoptimierung, vorausschauende Instandhaltung, digitales Marketing
IT-Projektkoordinator (Cloud-Infrastrukturen, Anwendungen oder Daten) (EQR 6)	Informationssicherheit, Cloud Computing, Automatisierung, KI, Cybersicherheit, Datenschutz
Entwickler und Designer für Data Science (EQR 6)	Vorausschauende Analyse, KI, Big Data, maschinelles Lernen, Datenverarbeitung
Projektmanager für Blockchain-Lösungen (EQR 6)	Blockchain, Kryptografie, Solidity, Entwicklung von Blockchain-Anwendungen, Smart Contracts



	Entwickler und Integrator von Internet-of-Things (IoT)-Lösungen (EQR 6)	IoT, Automatisierung, Netzwerke vernetzter Geräte, Datenverarbeitung, Prozessoptimierung
	Fachkraft für IT-Infrastruktur und -Sicherheit (EQR 5)	Netzwerke, Cybersicherheit, Cloud-Technologien, Infrastrukturüberwachung, IT-Störungsmanagement
	Diplom für wissenschaftlich-technische Hochschulstudien: Webmaster und internetbezogene Berufe (EQR 5)	Webentwicklung, vernetzte Objekte, virtuelle Realität, erweiterte Realität, Erstellung digitaler Inhalte
	Berufsfachhochschulabschluss in der Gestaltung und Optimierung industrieller Prozesse (EQR 6)	Digitale Transformation, Produktionslinie, Instandhaltung, Robotik, digitale Werkzeuge, Cybersicherheit, Ethik, ökologische Verantwortung
	Berufliches Abitur im Bereich Logistik (EQR 4)	Warenannahme, Lagerung, Kommissionierung, Versand, Gabelstaplerbetrieb, Straßentransport, Arbeitssicherheit, Qualitätsmanagement, Umweltvorschriften, Logistikunternehmen, Distributionsplattformen, unternehmensinterne Logistikdienste
	Zertifizierung als Operativer Manager der Lieferkette (EQR 6)	Logistikmanagement, Verhandlung, Lieferkette, Transport, Lagerung, Beschaffung, Planung, Disposition, Versandabwicklung
Slowenien	Mechatroniktechniker/in (EQR 4)	Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik, Automatisierung und Robotik
	Logistiktechniker/in (EQR 4)	Logistik, Lagerwirtschaft und Supply Chain Management
	Logistikingenieur/in (EQR 5)	Logistik, Supply Chain Management und Prozessoptimierung
	Mechatronikingenieur/in (EQR 5)	Automatisierung, Robotik und Integration fortschrittlicher Technologien in Produktionsprozesse
Türkei	Bachelorabschluss in Logistik (EQR 6)	Supply Chain Management, Bestandskontrolle, Distribution, logistische Informationssysteme
	Fachhochschulabschluss in Logistik (EQR 5)	Lagerung, Transport, Zollabwicklung, Bestandsmanagement
	Berufsbildendes Gymnasialprogramm im Bereich Logistik	Versand, Lagerhaltung, Einlagerung, Logistiksoftware, Praktika, Lagerleitung, Versandpersonal
Deutschland	Supply Chain Management	Supply Chain Management, Kostenoptimierung, Kundenzufriedenheit, SCOR-Modellierung
	Nachhaltigkeit im Supply Chain Management	Vorschriften, soziale und ökologische Nachhaltigkeit, nachhaltige Optimierungsstrategien
	Strategisches Supply Chain Management	Planung und Steuerung logistischer Netzwerke, Kostenreduktion, Simulation und strategische Planung



	Zertifizierter Supply Chain Manager	Optimierung der Wertschöpfungskette, Kostenreduktion, Projektmanagement in der Logistik
	Lehrgang zum Zertifizierten Supply Chain Manager	Optimierung von Wertschöpfungsketten, Kostenreduktion, kundenorientierte Prozesse, Grundlagen des Supply Chain Managements, Projektmanagement, praxisorientierte Werkzeuge
	Zertifizierter SAP-Anwender in der Produktionsplanung	Navigation im SAP-System, Stammdatenverwaltung, Produktionsaufträge, Materialbewegungen, Bestandsmanagement, Integration mit SAP-Modulen (Materialwirtschaft, Vertrieb), Reporting-Tools, Kapazitäts- und Ressourcenmanagement
	Effiziente Arbeitsvorbereitung – Planung und Steuerung des Produktionsprozesses	Optimierung der Auftragsplanung, Produktionssteuerung, Materialwirtschaft, ERP-/MES-Systeme, Kapazitätsplanung, Losgrößenplanung, IT-Planungswerkzeuge, Verbesserung des Lieferservices
Italien	Supply Chain, Logistik und operative Prozesse (EQR 6)	Supply-Chain-Kompetenzen, Optimierung logistischer Abläufe, Bestandsmanagement, ERP, Blockchain, RFID, IoT, Automatisierung, Robotik, Künstliche Intelligenz (KI), Maschinelles Lernen, Datenanalyse, strategische Entscheidungsfindung, Risikomanagement
	Supply Chain Management (EQR 5)	Beschaffungsmanagement, kollaborative Praktiken, Prozesse von der Bestellung bis zur Lieferung und von der Nachfrage bis zur Versorgung, Integration von Geschäftspartnern, Effizienz, Effektivität und Reaktionsfähigkeit
	Supply Chain Management	Materialbeschaffung, Produktionsmanagement, Produktdistribution, End-to-End-Supply-Chain-Management, Modelle der Unternehmensführung

4.2.3. SPEZIALISIERUNGSPROGRAMME IM BASKENLAND

Das Baskenland hat ein umfassendes Angebot einjähriger Spezialisierungsprogramme (EQR 5) entwickelt, die im dualen Format durchgeführt werden und theoretischen Unterricht mit praxisorientierter Ausbildung in Unternehmen kombinieren. Diese Programme richten sich an Absolventinnen und Absolventen zweijähriger höherer Berufsbildungsabschlüsse, die fortgeschrittene Kompetenzen erwerben möchten, die auf die Anforderungen der fortgeschrittenen Fertigung und digitalen Transformation abgestimmt sind. Diese Programme spiegeln eine zukunftsorientierte Strategie innerhalb des Berufsbildungssystems des Baskenlands wider, um die Ausbildung an den aktuellen und zukünftigen Bedarf der Industrie anzupassen. Weitere Informationen sind auf der offiziellen Website des Baskischen Instituts für Berufsbildungswissen verfügbar. Derzeit werden folgende Spezialisierungskurse angeboten, darunter auch solche mit Bezug zur intelligenten und digitalen Industrie:



Table 6. Spezialisierungsprogramme im Baskenland

PROJEKT	ALLGEMEINE FÄHIGKEIT
Intelligent Manufacturing (Intelligente Fertigung)	Entwicklung und Management von Projekten zur Anpassung von Produktionsprozessen durch Identifikation von Produktionszielen, Anwendung von Key Performance Indicators (KPIs) und Nutzung fortschrittlicher Technologien zur Produktionssteuerung unter Einhaltung von Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen.
Digitalisation of Industrial Maintenance (Digitalisierung der industriellen Instandhaltung)	Umsetzung und Steuerung von Digitalisierungsprojekten im Bereich der industriellen Instandhaltung, unter Anwendung modernster Technologien und unter Beachtung von Qualitäts-, Sicherheits- und Umweltstandards.
Collaborative Robotics (Kollaborative Robotik)	Entwicklung von Projekten im Bereich kollaborativer Robotik, einschließlich Roboterarmen und autonomer mobiler Roboter, sowie deren Montage, Inbetriebnahme und Wartung.
Cybersecurity in Information Technology (IT) (Cybersicherheit in der Informationstechnologie)	Definition und Umsetzung von Sicherheitsstrategien für Informationssysteme durch Durchführung von Cybersicherheitsdiagnosen, Identifikation von Schwachstellen und Anwendung von Gegenmaßnahmen gemäß geltenden Vorschriften und branchenspezifischen Standards unter Einhaltung von Qualitäts-, Arbeitsschutz- und Umweltschutzprotokollen.
Cybersecurity in Operational Technology (OT) (Cybersicherheit in der Betriebstechnologie)	Definition und Umsetzung von Cybersicherheitsstrategien in industriellen Organisationen und Infrastrukturen, durch Diagnostik, Schwachstellenanalyse und Anwendung von Gegenmaßnahmen im Einklang mit bestehenden Vorschriften und Industriestandards sowie unter Berücksichtigung von Qualitäts-, Arbeitsschutz- und Umweltaanforderungen.
Metrological Quality Control (Messtechnische Qualitätskontrolle)	Durchführung der Qualitätskontrolle von Produkten, Produktionssystemen und Messsystemen, Sicherstellung der Gültigkeit von Messungen bei Prüfungen und Verifizierungen gemäß geltenden Qualitätsnormen sowie Erstellung der entsprechenden Dokumentation unter Einhaltung von Sicherheits- und Umweltvorschriften.
Artificial Intelligence and Big Data (Künstliche Intelligenz und Big Data)	Entwurf und Anwendung intelligenter Systeme zur Optimierung des Informationsmanagements und der Nutzung von Big Data, unter Gewährleistung eines sicheren Datenzugriffs und Einhaltung festgelegter Standards hinsichtlich Zugänglichkeit, Benutzerfreundlichkeit und Qualität sowie ethischer und rechtlicher Grundsätze.

4.2.4. PRIORITÄTEN UND KOMPETENZDEFIZITE

Laut dem PdM-Bericht identifizierten Ausbildungszentren Künstliche Intelligenz (KI) und Nachhaltigkeit als die wichtigsten Prioritätsbereiche unter den aufkommenden Technologien. Im Bereich des Supply Chain Managements (SCM) liegt der Fokus verstärkt auf IoT, Nachhaltigkeit und Cybersicherheit.



Nahezu 70 % der Ausbildungszentren hoben wesentliche Kompetenzlücken in den Bereichen IoT-Systeme, KI-Werkzeuge und Datenanalyse hervor. Cloud Computing wurde von 40 % genannt, während nur 14 % kollaboratives Arbeiten erwähnten – was darauf hindeutet, dass diese Soft Skill bereits gut abgedeckt ist.

Länderspezifische Ergebnisse zeigen folgende Kompetenzdefizite:

- Frankreich: Künstliche Intelligenz und Datenanalyse
- Italien: IoT-Systeme
- Türkei: Cloud Computing und Datenanalyse
- Slowenien: IoT und KI-Werkzeuge

Ein Vertreter eines französischen Ausbildungszentrums betonte die Bedeutung der Kompetenzentwicklung gegenüber rein theoretischem Wissen. Zudem wurde der Mehrwert der Integration von Erstausbildung und beruflicher Weiterbildung hervorgehoben sowie das Potenzial von KI und XR – nicht nur als Trainingsinstrumente, sondern auch als Unterstützung für den gesamten Lernprozess.

4.3. STRATEGISCHE ROLLE DER BERUFSBILDUNGSEINRICHTUNGEN

Berufsbildungseinrichtungen (VET-Zentren) entwickeln sich zunehmend zu dynamischen und strategischen Akteuren, die als Katalysatoren für die digitale und grüne Transformation fungieren können. Angesichts sich rasant entwickelnder Technologien und sich wandelnder Anforderungen des Arbeitsmarktes spielen diese Zentren eine Schlüsselrolle bei der Anpassung von Qualifikationen und der Unterstützung transformierender Industriesektoren.

Wie in diesem Kapitel hervorgehoben wurde, werden neue Technologien, trotz bestehender Herausforderungen, bereits schrittweise in Ausbildungsprogramme integriert und entsprechende Kompetenzen vermittelt.

Im Bewusstsein dieser Herausforderungen haben die Ausbildungszentren ihre strategischen Partnerschaften mit der Industrie, und in geringerem Maße auch mit anderen Berufsbildungseinrichtungen, gestärkt. Diese Kooperationen fördern nicht nur den Wissensaustausch, sondern ermöglichen auch den Zugang zu zusätzlichen Finanzierungsquellen, die entscheidend sind, um eine der größten Hürden der Transformation zu überwinden: die finanziellen Kosten.

In diesem Zusammenhang setzen die Zentren verstärkt auf Sponsoring und die Teilnahme an EU-finanzierten Projekten, insbesondere im Rahmen des Erasmus+-Programms.

Darüber hinaus nutzen die Zentren die Gelegenheit, ihr Ausbildungsangebot zu erweitern, es zunehmend spezifisch und spezialisiert zu gestalten und neue Technologien aktiv in ihre Lehrstrategien zu integrieren. Dies ermöglicht modernere, interaktive und praxisnahe Lernansätze, die besser auf die Anforderungen der heutigen Arbeitswelt abgestimmt sind.

Berufsbildungseinrichtungen fungieren als zentrale Treiber des industriellen Wandels, da sie Innovation und Talententwicklung fördern und gleichzeitig die regionale Wettbewerbsfähigkeit stärken. Sie gehen heute über ihre traditionelle Rolle hinaus, indem sie aktiv an der gemeinsamen Entwicklung von Lösungen mit Unternehmen mitwirken, spezialisierte Programme entwickeln sowie angewandte Forschungs- und Innovationsprojekte im Umfeld der fortgeschrittenen Fertigung und Digitalisierung durchführen.



4.4. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

4.4.1. SCHLUSSFOLGERUNG

Die strategische Rolle der Berufsbildungseinrichtungen (VET-Zentren) als dynamische Akteure im Rahmen der digitalen und grünen Transformation wird eindeutig bekräftigt. Diese Institutionen schreiten kontinuierlich bei der Integration neuer Technologien und Fachgebiete voran – darunter Künstliche Intelligenz (KI), Nachhaltigkeit, Internet der Dinge (IoT), Cybersicherheit, Blockchain, Cloud Computing, virtuelle und erweiterte Realität, Deep Learning und Robotik.

Laut Umfragen unter Ausbildungszentren wurden KI und Nachhaltigkeit als wichtigste Prioritäten im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung (Predictive Maintenance, PdM) identifiziert. Im Bereich des Supply Chain Managements (SCM) liegt der Fokus verstärkt auf IoT, Nachhaltigkeit und Cybersicherheit.

Der Kontext der digitalen und grünen Transformation hat den Berufsbildungseinrichtungen zahlreiche Chancen eröffnet, darunter:

- Steigende Nachfrage nach Aus- und Weiterbildung, die eine Erweiterung des Bildungsangebots ermöglicht hat.
- Größere Diversifizierung und Spezialisierung der Ausbildungsprogramme, die nun nicht nur technische, sondern auch interdisziplinäre Kompetenzen vermitteln. Ein Beispiel ist die Initiative im Baskenland, wo einjährige Spezialisierungsprogramme im dualen Format entwickelt wurden – mit Fokus auf fortgeschrittene Kompetenzen in Smart Manufacturing, Digitalisierung, kollaborativer Robotik, Cybersicherheit und Qualitätskontrolle.
- Engere Zusammenarbeit mit der Industrie.
- Zunehmender Einsatz neuer Technologien als didaktische Werkzeuge.
- Verbesserte Zugänglichkeit und Flexibilität der Ausbildung durch hybride Lernmodelle, die Online- und Präsenzunterricht kombinieren, besonders vorteilhaft für Berufstätige.
- Impulse durch europäische Initiativen, die die Modernisierung der Berufsbildung fördern.
- Zugang zu Fördermitteln durch EU-Programme.
- Diversifizierung der Finanzierungsquellen durch Kooperationen mit anderen Bildungseinrichtungen und der Industrie.
- Im Baskenland bestehen zwar weiterhin Hürden wie das fehlende digitale Mindset in Unternehmen, dennoch können VET-Zentren eine Schlüsselrolle als Transformationsakteure einnehmen, indem sie Fachkräfte ausbilden, die den Herausforderungen der industriellen Digitalisierung gewachsen sind.

Die Integration neuer Technologien bringt jedoch auch erhebliche Herausforderungen mit sich:

- Begrenzte institutionelle Autonomie, die eine flexible Reaktion auf den ständigen Wandel erschwert.
- Steigende Kosten im Zusammenhang mit der Einführung neuer Technologien.
- Mangel an spezialisierter Weiterbildung für Lehrkräfte, was die effektive Umsetzung behindert.
- Bestehende Kompetenzlücken in zentralen Bereichen des Supply Chain Managements (SCM).

Länderspezifische Ergebnisse zeigen:

- Frankreich: Defizite in KI und Datenanalyse
- Italien: Defizite bei der Integration von IoT-Systemen
- Türkei: Defizite in Cloud Computing und Datenanalyse
- Slowenien: Defizite in IoT- und KI-Werkzeugen



- In baskischen VET-Zentren werden Absolventinnen und Absolventen der Berufsbildung noch nicht umfassend als treibende Kräfte der digitalen Transformation wahrgenommen. Obwohl viele Zentren fortgeschrittene Programme in Automatisierung und Digitalisierung (EQR 5) anbieten, werden diese Qualifikationen von der Industrie nicht flächendeckend anerkannt oder nachgefragt. Infolgedessen finden Absolventen oft nur begrenzte Möglichkeiten in Hightech-Berufen, und das Potenzial der Berufsbildung zur Förderung industrieller Innovation bleibt unterausgeschöpft.

4.4.2. EMPFEHLUNGEN

- Hybride Lernmodelle fördern: Flexible Lernwege ausbauen, die Online- und Präsenzformate kombinieren, um unterschiedliche Lernprofile, insbesondere Berufstätige, zu unterstützen und lebenslanges Lernen zu ermöglichen.
- Ausbildungsangebot diversifizieren und die Anzahl spezialisierter Programme erhöhen.
- Kritische Kompetenzlücken schließen.
- Ausbildung von Lehrkräften stärken.
- Zusammenarbeit mit Unternehmen und anderen Bildungseinrichtungen intensivieren.
- Finanzierungsquellen diversifizieren: Berufsbildungseinrichtungen dazu ermutigen, öffentliche Fördermittel, Unternehmenssponsoring, europäische Projekte und kooperative Finanzierungsmechanismen zu nutzen, um finanzielle Einschränkungen zu überwinden.
- Europäische Initiativen nutzen: Die von der Europäischen Union bereitgestellten Instrumente und Ressourcen zur Unterstützung der grünen und digitalen Transformation sowie der allgemeinen Bildungsentwicklung bestmöglich einsetzen.
- Länderspezifische Ausbildungsinitiativen entwickeln, um zentrale Kompetenzlücken im Bereich Supply Chain Management zu schließen:
 - KI und Datenanalyse in Frankreich,
 - IoT-Systeme in Italien,
 - Cloud Computing und Datenanalyse in der Türkei,
 - IoT- und KI-Werkzeuge in Slowenien.
- Kompetenzentwicklung gegenüber theoretischem Wissen priorisieren, durch die Integration von Erstausbildung und beruflicher Weiterbildung sowie durch den Einsatz von KI und XR nicht nur als Lehrmittel, sondern als unterstützende Elemente im gesamten Lernprozess.



5. FAZIT UND AUSBLICK

Um das nachhaltige Wachstum, die Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit des Sektors der fortgeschrittenen Fertigung in der Europäischen Union und darüber hinaus zu sichern, ist es entscheidend, den Wandel der Qualifikationsanforderungen frühzeitig zu erkennen, Bildungs- und Ausbildungssysteme weiterzuentwickeln und die Abstimmung zwischen Industrie und Berufsbildungseinrichtungen (VET) zu stärken. Dieser Bericht, eine Zusammenführung dreier komplementärer Untersuchungen zu vorausschauender Instandhaltung (Predictive Maintenance, PdM), Supply Chain Management (SCM) und regionalen Erkenntnissen aus dem Baskenland (BC), bietet eine integrierte Perspektive darauf, wie die digitale und grüne Transformation sowohl die industrielle Landschaft als auch die Bildungsökosysteme, die sie unterstützen, verändert.

Basierend auf umfangreicher Feldforschung, länderübergreifenden Umfragen, institutionellen Fallstudien sowie dem direkten Austausch mit KMU, Großunternehmen, Berufsbildungseinrichtungen und Lehrkräften, entsteht ein dynamisches und differenziertes Bild eines laufenden Transformationsprozesses. Mit dem Fokus auf zwei besonders wirkungsstarke Bereiche der fortgeschrittenen Fertigung – PdM und SCM – analysiert der Bericht nicht nur die Technologien, die den Wandel vorantreiben, sondern auch die betriebsorganisatorischen, strukturellen und personellen Veränderungen, die für eine erfolgreiche Anpassung erforderlich sind.

Anhand von sechs zentralen Themenfeldern – technologische und betriebliche Veränderungen, Integration von grüner und digitaler Transformation, spezifische Herausforderungen für KMU, sich wandelnde Kompetenzanforderungen, strategische Innovationsmodelle sowie die Transformation der Berufsbildungssysteme – laufen die Ergebnisse auf ein gemeinsames Ziel hinaus: den Aufbau eines zukunftsfähigen Fertigungsökosystems, das auf agiler Bildung, inklusiver Qualifizierung und starker sektorübergreifender Zusammenarbeit basiert. Dieser abschließende Abschnitt fasst daher strategische Erkenntnisse zusammen, formuliert übergreifende Empfehlungen und entwirft eine zukunftsorientierte Vision, wie Europa eine führende Rolle bei der Verknüpfung industrieller Innovation mit menschenzentrierter Entwicklung einnehmen kann.

5.1. ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERKENNTNISSE

Die fortgeschrittene Fertigung befindet sich in einem rasanten Wandel, geprägt durch Digitalisierung, Nachhaltigkeitsanforderungen und veränderte Dynamiken auf dem Arbeitsmarkt. Die Erkenntnisse aus den Bereichen vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance, PdM), Supply Chain Management (SCM) sowie der regionalen Feldforschung im Baskenland (BC) verdeutlichen gemeinsame Trends, strukturelle Herausforderungen und konkrete Handlungsoptionen, sowohl für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) als auch für das Berufsbildungssystem (VET). Diese Ergebnisse sind in sechs zentrale Themenbereiche gegliedert:

5.1.1. TECHNOLOGISCHE UND BETRIEBLICHE VERÄNDERUNGEN

Das Aufkommen von Künstlicher Intelligenz (KI), Internet der Dinge (IoT), Digitalen Zwillingen, Edge Computing und Cloud-basierten Lösungen revolutioniert die operativen Prozesse in der vorausschauenden Instandhaltung (PdM) und im Supply Chain Management (SCM). PdM verbessert die Zuverlässigkeit von Anlagen, reduziert Stillstandzeiten und optimiert Lebenszykluskosten, während sich das SCM durch digitale Liefernetzwerke (Digital Supply Networks, DSNs) zunehmend in Richtung Resilienz und Agilität entwickelt. Trotz unterschiedlicher



Anwendungsumgebungen nähern sich beide Bereiche einem gemeinsamen Ziel: autonome, dienstleistungsorientierte und erklärbare Systeme, die umstrukturierte Arbeitsabläufe, interdisziplinäre Zusammenarbeit und datenbasierte Entscheidungsfindung erfordern. Neue Modelle wie plattformbasierte Ökosysteme, serviceorientierte Architekturen und Testumgebungen (Testbeds) unterstützen Experimentierfreude, Risikominimierung und skalierbare Innovation über verschiedene Interessengruppen hinweg.

5.1.2. AUSWIRKUNGEN DES DIGITALEN UND GRÜNEN WANDELS

Technologien im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung (PdM) und des Lieferkettenmanagements (SCM) steigern nicht nur die Leistung, sondern ebnen auch den Weg für mehr Nachhaltigkeit. PdM leistet einen Beitrag zur Erreichung ökologischer Ziele, indem es die Lebensdauer von Anlagen verlängert, den Energieverbrauch senkt, transportbedingte Emissionen reduziert und zur Kreislaufwirtschaft beiträgt. SCM fördert umweltfreundliche Praktiken durch Emissionsverfolgung, Verringerung von Materialverschwendung, zirkuläre Lieferstrategien und kollaborative Produktgestaltung. Digitale Werkzeuge bilden zunehmend die Grundlage dafür, dass Unternehmen Umweltauflagen vorhersehen und erfüllen können. Dabei verbinden sie operative Optimierung mit ökologischen Zielsetzungen.

5.1.3. HÜRDEN UND SPEZIFISCHE HERAUSFORDERUNGEN FÜR KMU

Sowohl die vorausschauende Instandhaltung (PdM) als auch das Lieferkettenmanagement (SCM) sind strukturell mit ähnlichen Herausforderungen konfrontiert. Finanzielle Einschränkungen stellen dabei ein zentrales Hemmnis dar, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Diese haben Schwierigkeiten, Investitionen in technologische Modernisierungen zu tätigen, vor allem in modulare oder interoperable Systeme. Zu den technischen Herausforderungen zählen veraltete Infrastrukturen, mangelnde Interoperabilität sowie Risiken im Bereich der Cybersicherheit. Auf organisatorischer Ebene weisen KMU häufig eine geringe digitale Reife, begrenzte interne IT-Ressourcen, Widerstände gegenüber Veränderungen und ein fehlendes klares strategisches Zukunftsbild auf. Die Umsetzung von PdM wird zusätzlich durch den eingeschränkten Zugang zu externen Beratern und eine unklare Rentabilität (ROI) erschwert. Die Transformation im SCM-Bereich wird durch folgende Faktoren erschwert:

- fragmentierte Planungssysteme,
- unzureichend genutzte digitale Werkzeuge und
- Lücken in der Datenverwaltung.

5.1.4. ENTWICKLUNG VON KOMPETENZEN UND PERSONALBEDARF

Der Übergang zu digitalen und nachhaltigen Betriebsformen verändert das industrielle Qualifikationsprofil grundlegend. Berufsbilder entwickeln sich zunehmend zu hybriden Rollen, die eine Kombination aus traditionellem Fachwissen, systemischem Denken und sicherem Umgang mit digitalen Plattformen erfordern. Kompetenzen in den Bereichen Künstliche Intelligenz, Diagnostik, Cybersicherheit, Cloud-Schnittstellen und Dateninterpretation gewinnen stark an Bedeutung. Von Beschäftigten wird erwartet, dass sie sich kontinuierlich weiterbilden, sich rasch an neue Gegebenheiten anpassen und bereichsübergreifend zusammenarbeiten. Auch transversale und soziale Kompetenzen, wie Kommunikationsfähigkeit, Problemlösungskompetenz und Anpassungsfähigkeit, sind zunehmend gefragt, insbesondere im Zuge sich wandelnder Arbeitsabläufe und wachsender Automatisierung.

Dennoch bestehen weiterhin erhebliche Hindernisse wie digitale Kompetenzlücken, Widerstände seitens der Mitarbeitenden und eine mangelnde Abstimmung zwischen Qualifizierungsprogrammen und industriellen Systemen. Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert die Umsetzung von mitarbeiterzentrierten Change-Management-Strategien, die neben der



technischen Schulung auch die kulturelle Anpassung berücksichtigen. Ein solcher Ansatz verbessert nicht nur die Einsatzbereitschaft der Belegschaft, sondern stellt auch die nachhaltige Integration neuer Technologien in betriebliche Prozesse sicher.

5.1.5. ZUKUNFTSSTRATEGIEN UND INNOVATIONSMODELLE

Mit Blick auf die Zukunft erfordert die Weiterentwicklung der digitalen und grünen Transformation im europäischen Fertigungsökosystem integrierte, vorausschauende Strategien, die technologische Entwicklungen mit der Weiterentwicklung der Arbeitskräfte und der organisatorischen Anpassungsfähigkeit in Einklang bringen. Dieser Bericht stützt sich auf europaweite Analysen (PdM- und SCM-Berichte) sowie auf die vertiefte regionale Untersuchung im Bericht des Baskenlandes (BC), um strategische Innovationsmodelle, aufkommende Best Practices und umsetzbare Erkenntnisse zu identifizieren. Insbesondere hebt der BC-Bericht die Rolle regionaler Berufsbildungszentren (VET-Zentren) als zentrale Treiber industrieller Innovation hervor. Er liefert praxisnahe Beispiele für gemeinschaftliche Qualifizierungsinitiativen und risikominimierte Experimentierumgebungen.

Im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung (PdM) wird die langfristige Wettbewerbsfähigkeit davon abhängen, den Zugang zu Finanzierungsmöglichkeiten zu erweitern, in die Qualifizierung der Arbeitskräfte und digitale Kompetenzen zu investieren sowie datenzentrierte Strategien zu optimieren. Im Lieferkettenmanagement (SCM) wird der zukünftige Erfolg davon abhängen, Transparenz zu fördern, Vertrauen zwischen Partnern aufzubauen, digitale und ökologische Ziele aufeinander abzustimmen und die Datenverwaltung zu stärken.

Zur Unterstützung dieser Entwicklungen zeichnen sich bereits verschiedene Innovationsmodelle und Ermöglichungsfaktoren ab:

- Modulare und kollaborative Transformationsstrategien: KMU verfolgen zunehmend schrittweise Ansätze, die Innovation mit Wirtschaftlichkeit verbinden. Diese basieren häufig auf gemeinsam genutzten Infrastrukturen, konsortialgeführten Entwicklungsprojekten und plattformbasierten Kooperationen, die eine verteilte Risikobereitschaft und gegenseitigen Nutzen ermöglichen.
- Serviceorientierte Architekturen – wie PdMaaS (Predictive Maintenance as a Service): Diese bieten KMU einen praktikablen Zugang zu prädiktiven Instandhaltungsfunktionen, ohne in kostenintensive Infrastrukturen investieren zu müssen. Solche Lösungen – häufig bereitgestellt durch OEMs oder Cloud-Plattformen – verlagern Verantwortlichkeiten von internen Technikern hin zu Datenanalysten und externen Dienstleistern, was die Flexibilität erhöht und gleichzeitig die Betriebssicherheit gewährleistet.
- Testumgebungen und öffentlich-private Partnerschaften: Diese gewinnen zunehmend an Bedeutung als Instrumente zur Risikominimierung bei der Erprobung neuer Technologien, zur Förderung anwendungsorientierter Forschung und Entwicklung sowie zur Stärkung der Zusammenarbeit zwischen Berufsbildung und Industrie. Der BC-Bericht belegt dies mit Beispielen, in denen lokale VET-Zentren gemeinsam mit KMU und Industrieclustern Innovationsprojekte leiten.
- Schrittweise Einführung mit öffentlicher Förderung und EU-Kooperationsprojekten (z. B. LCAMP): Diese ermöglichen es KMU, neue Technologien in kontrollierten, risikoarmen Umgebungen zu erproben – ein besonders wertvoller Ansatz für Unternehmen mit begrenzten internen Ressourcen.
- VET-Zentren als Katalysatoren: Der BC-Bericht und weitere EU-Studien betonen die strategische Rolle von Berufsbildungszentren. Diese fungieren als Brücke zwischen industriellen Anforderungen und Bildungsangeboten und unterstützen gleichzeitig anwendungsorientierte Innovationen. Ihre Fähigkeit, Curricula anzupassen, hybride Lernformate zu fördern und Lehrkräfte in moderner Didaktik zu schulen, macht sie zu zentralen Akteuren im sektoralen Wandel.



- Digital kompetente Vermittlerrollen: In den Bereichen PdM und SCM werden neue Berufsprofile zunehmend wichtig, die häufig durch VET-Ausbildung geprägt traditionelles Werkstattwissen mit digitalen Werkzeugen verbinden. Sie fungieren zudem als Schnittstelle zu externen KI-Anbietern, PdM-Spezialisten oder Softwareintegratoren.

Abschließend betonen Innovationsmodelle im SCM die zentrale Bedeutung vertrauensbasierter Zusammenarbeit. Digitale Werkzeuge ermöglichen zwar Transparenz, Echtzeitkommunikation und Rückverfolgbarkeit, doch die menschliche Dimension des Vertrauens bleibt entscheidend für langfristige Partnerschaften in der Lieferkette. Der Aufbau von Vertrauen, durch kulturelle Übereinstimmung, kontinuierliche Beziehungen und gemeinsame Zielsetzungen, wird zunehmend als Schlüssel zur industriellen Resilienz und Innovationsfähigkeit anerkannt.

5.1.6. STRUKTURWANDEL IN DER BERUFLICHEN AUS- UND WEITERBILDUNG

Berufsbildungszentren (VET-Zentren) werden zunehmend als strategische Wegbereiter der digitalen und grünen Transformation in der fortgeschrittenen Fertigung anerkannt. In ganz Europa, besonders hervorgehoben im Bericht des Baskenlandes, entwickeln sich diese Einrichtungen von reinen Bildungsträgern zu dynamischen Knotenpunkten für anwendungsorientierte Innovation, Kompetenzentwicklung und industrielle Partnerschaften.

Erkenntnisse zeigen, dass Bildungseinrichtungen ihre Zusammenarbeit mit der Industrie vertiefen, indem sie gemeinsam Curricula entwickeln, die Schlüsseltechnologien wie Künstliche Intelligenz, Internet der Dinge (IoT), Cloud Computing und Cybersicherheit integrieren. Zudem erproben sie hybride didaktische Modelle, die Präsenz- und Online-Lernen kombinieren, um Flexibilität und Zugänglichkeit zu erhöhen. Diese Innovationen sind entscheidend, um dem raschen Wandel der Kompetenzanforderungen gerecht zu werden und Lernende, sowohl Berufseinsteiger als auch Beschäftigte in der Weiterbildung, auf die Komplexität moderner Industrieumgebungen vorzubereiten.

Dennoch bestehen weiterhin Herausforderungen. VET-Zentren sehen sich häufig strukturellen Hürden gegenüber, darunter eingeschränkte Autonomie bei der Gestaltung von Programmen, unzureichende Weiterbildungsmöglichkeiten für Lehrkräfte (insbesondere im Umgang mit digitalen Werkzeugen und neuen Lehrmethoden), veraltete Curriculums Strukturen sowie begrenzte Mittel zur Modernisierung von Ausstattung und Infrastruktur. Infolgedessen fällt es vielen Einrichtungen schwer, mit dem Tempo des industriellen Wandels Schritt zu halten. Um diese Lücken zu schließen, beginnen VET-Institutionen, neue Formate zu erproben, etwa Mikro-Zertifikate, modulare Lernpfade und die Zusammenarbeit zwischen weiteren Berufsbildungszentren, um besser aufsteigende Teilnehmerzahlen und die Nachfrage der Wirtschaft nach hochspezialisierten Qualifikationen zu reagieren.

Der Bericht aus dem Baskenland liefert konkrete Beispiele dafür, wie diesen Herausforderungen durch schrittweise Technologieeinführung begegnet wird, unterstützt durch öffentliche Fördermittel und Kooperationsprojekte. Diese Initiativen schaffen sichere, risikoarme Umgebungen für die Erprobung neuer Technologien und die Förderung von Innovation. Darüber hinaus beteiligen sich baskische VET-Zentren aktiv an anwendungsorientierten Innovationsprojekten und positionieren sich als zentrale Akteure regionaler Industrieentwicklungsstrategien.

Ihr Beitrag zur Qualifizierung und Umschulung von Arbeitskräften unterstreicht die Schlüsselrolle, die VET-Zentren bei der Unterstützung lokaler Ökosysteme und der Umsetzung des Wandels vor Ort spielen können. Schließlich bieten EU-weite Initiativen wie LCAMP eine wichtige Koordinations- und Unterstützungsstruktur, die lokale Experimentierräume mit kontinentalen strategischen Zielen verknüpft.



Durch die Verbindung von Industrie, Politik und Bildung stärken diese Programme die Fähigkeit der VET-Zentren, als Katalysatoren für Innovation, Nachhaltigkeit und Inklusion in der Zukunft der fortgeschrittenen Fertigung zu wirken.

5.2. SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE STRATEGIEENTWICKLUNG

Die Transformation der fortgeschrittenen Fertigung durch digitale und nachhaltige Technologien offenbart sechs strategische Erkenntnisse, die entscheidend dafür sind, industrielle Entwicklung mit Kompetenzaufbau und Bildungsinnovation in Einklang zu bringen:

- Technologie ist nicht neutral – ihre Einführung ist kontextabhängig und ungleich verteilt: Große Unternehmen treiben Innovationen in der Regel voran, gestützt durch robuste interne Infrastrukturen und hohe Investitionskapazitäten. KMU hingegen führen Technologien schrittweise ein und sind durch finanzielle, organisatorische und technische Einschränkungen limitiert. Erfolgreiche Transformationsstrategien müssen daher diese unterschiedlichen Ausgangslagen berücksichtigen und modulare, skalierbare sowie serviceorientierte Lösungen priorisieren.
- Die digitale und die grüne Transformation konvergieren und verstärken sich gegenseitig: Nachhaltigkeitsziele sind nicht länger von technologischen Agenden getrennt. PdM reduziert durch vorausschauende Wartung Energieverbrauch, Materialverschwendung und Emissionen. Die Digitalisierung im SCM ermöglicht Modelle der Kreislaufwirtschaft und die Rückverfolgbarkeit von Emissionen. Grüne Ziele werden zunehmend durch digitale Werkzeuge verfolgt – Synergien, die gemeinsam genutzt werden müssen.
- In PdM und SCM steigen die Anforderungen an technische Expertise, digitale Kompetenz, Dateninterpretation und den Umgang mit KI, ebenso wie die Fähigkeit zur interdisziplinären Zusammenarbeit: Diese neuen Anforderungen verdeutlichen den wachsenden Bedarf an hybriden Berufsprofilen, die tiefes Fachwissen mit funktionsübergreifenden, digitalen und sozialen Kompetenzen verbinden.
- Berufsbildungssysteme entwickeln sich zu strategischen Akteuren in Innovationsökosystemen: Die Rolle von VET-Zentren geht weit über die reine Ausbildung hinaus. Wie insbesondere im Baskenland gezeigt, werden sie zu Förderern industrieller Innovation, zu Testfeldern für angewandte Technologien und zu Trägern regionaler wirtschaftlicher Resilienz. Die Stärkung ihrer Autonomie, technischen Ausstattung und Industrieanbindung ist entscheidend für inklusive Transformationspfade.
- Kompetenzen sind die Währung der Transformation und sie befinden sich im Wandel: Technisches Know-how in KI, Cloud Computing und IoT wird zunehmend unverzichtbar. Ebenso wichtig sind jedoch transversale Kompetenzen wie Anpassungsfähigkeit, kritisches Denken, Zusammenarbeit und selbstgesteuertes Lernen. Mit dem Aufkommen hybrider Rollen und datenintensiver Arbeitsumgebungen müssen Beschäftigte operative Sicherheit mit analytischer Fähigkeit und sozialer Resilienz verbinden.
- Change-Management ist der Dreh- und Angelpunkt der Transformation: Technologieeinführung ist ebenso kulturell wie technisch geprägt. Erfolgreiche industrielle und bildungsbezogene Übergänge hängen von Führung, Kommunikation und Vertrauen ab. Vom Widerstand gegen Automatisierung bis hin zu veralteten Lehrmodellen – Fortschritt erfordert die Vorbereitung von Menschen und Institutionen auf kontinuierliche Neuerfindung.



5.3. EMPFEHLUNGEN

Als Reaktion auf diese strategischen Erkenntnisse werden den Akteuren im gesamten Ökosystem der fortgeschrittenen Fertigung folgende bereichsübergreifende Empfehlungen vorgeschlagen:

Für politische Entscheidungsträger und Finanzierungsbehörden

- Sicherstellung nachhaltiger Investitionen in die digitale und grüne Transformation, insbesondere durch die Unterstützung von KMU bei der Technologieeinführung, etwa mittels öffentlich-privater Partnerschaften, Innovationsgutscheinen und risikominimierten Experimentierplattformen.
- Anerkennung von Berufsbildungszentren (VET-Zentren) als strategische Akteure der Transformation und gezielte Förderung ihrer Autonomie, Modernisierung der Infrastruktur sowie ihrer Fähigkeit, sich aktiv in Innovationsökosysteme einzubringen.
- Förderung der Abstimmung zwischen nationalen Qualifikationsrahmen und neuen Berufsprofilen, um sicherzustellen, dass sich wandelnde Tätigkeitsfelder und hybride Kompetenzanforderungen europaweit anerkannt und übertragbar sind.

Für KMU und industrielle Interessengruppen

- Einführung modularer, skalierbarer Technologien, wie „Predictive Maintenance as a Service“ (PdMaaS) und cloudbasierte SCM-Plattformen, um Investitionsrisiken zu senken und die Agilität zu erhöhen.
- Investitionen in die Qualifizierung der Arbeitskräfte durch Mikro-Zertifikate und lebenslanges Lernen, beispielsweise in den Bereichen Künstliche Intelligenz, Dateninterpretation und nachhaltige Betriebsführung.
- Förderung einer Kultur der Zusammenarbeit durch die Teilnahme an Plattformökosystemen, die Mitwirkung in regionalen Innovationsnetzwerken und den Aufbau von Vertrauen entlang der Lieferketten.

Für Berufsbildungszentren und Ausbildungsanbieter

- Entwicklung und Integration hybrider Lernmodelle, die Online- und Präsenzunterricht kombinieren und so mehr Flexibilität für Lernende und Berufstätige ermöglichen.
- Zusammenarbeit mit Unternehmen bei der gemeinsamen Gestaltung von Curricula und der praxisnahen Anwendung von Kompetenzen, insbesondere durch Testumgebungen, Fallstudien und Innovationsprojekte.
- Stärkung der Qualifizierung von Lehrkräften, indem sie sowohl mit digitalem Fachwissen als auch mit modernen didaktischen Ansätzen ausgestattet werden.

Für die Koordinierung auf EU-Ebene

- Die Fortführung von Initiativen wie LCAMP ist von entscheidender Bedeutung. LCAMP entwickelt strukturierte Methoden zur Beobachtung technologischer Trends, Kompetenzbedarfe und Bildungsinnovationen.
- Förderung der Harmonisierung digitaler und grüner Transformationsstrategien zwischen den Mitgliedstaaten, um VET-Zentren und KMU ein kohärentes Ziel- und Unterstützungsumfeld zu bieten.

Durch die Umsetzung dieser Empfehlungen kann Europa sicherstellen, dass sein Sektor der fortgeschrittenen Fertigung global wettbewerbsfähig, ökologisch nachhaltig und sozial inklusiv bleibt, getragen von einem Berufsbildungssystem, das bereit ist, die Herausforderungen von morgen zu meistern.



5.4. AUSBLICK

Die digitale und grüne Transformation, die derzeit den Sektor der fortgeschrittenen Fertigung verändert, stellt nicht nur technologische Herausforderungen dar, sie bietet auch menschliche und systemische Chancen. Mit Blick auf die Zukunft wird deutlich, dass erfolgreiche Transformation mehr erfordert als den Zugang zu neuen Werkzeugen; sie verlangt die Fähigkeit, diese Innovationen in den Arbeitsalltag, die Erwartungen an die Belegschaft und die Bildungssysteme zu integrieren. In den Bereichen der vorausschauenden Instandhaltung (PdM) und des Lieferkettenmanagements (SCM) ist die Perspektive durch Konvergenz geprägt. Grüne und digitale Ziele sind zunehmend miteinander verknüpft, nicht nur im Hinblick auf Nachhaltigkeitskennzahlen, sondern auch durch gemeinsame Strategien für Effizienz, Kreislaufwirtschaft, Transparenz und Resilienz.

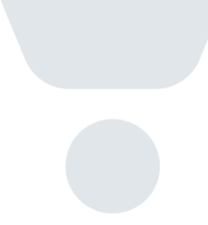
In beiden Bereichen experimentieren KMU und Großunternehmen mit hybriden Lösungen: Sie kombinieren lokale Expertise mit cloudbasierter Infrastruktur, traditionelle Rollen mit KI-gestützten Systemen und modulare Einführungsstrategien mit einer übergreifenden Ausrichtung entlang der Wertschöpfungskette. Berufsbildungszentren (VET-Zentren) sind zentrale Ermöglicher dieser Transformation. Die Perspektive der beruflichen Bildung beschränkt sich nicht mehr auf technische Unterweisung oder branchenspezifische Zertifizierung; sie entwickelt sich hin zu einer integrierten Kompetenzentwicklung. Zentren müssen Lernende darauf vorbereiten, systemübergreifend zu denken, bereichsübergreifend zusammenzuarbeiten und sich kontinuierlich an die sich wandelnden Anforderungen digitaler und nachhaltigkeitsorientierter Industrien anzupassen. Dies bedeutet, flexible Lernpfade zu fördern, Partnerschaften mit der Industrie zu stärken und sicherzustellen, dass Lehrkräfte über die nötigen Kompetenzen und die institutionelle Freiheit verfügen, um zu experimentieren, sich weiterzuentwickeln und Führungsrollen zu übernehmen.

Gleichzeitig werden neue Formen der Zusammenarbeit und des Experimentierens die nächste Phase der Transformation prägen. Ob durch Testumgebungen, öffentlich-private Partnerschaften, zentrumsübergreifende Initiativen oder experimentelle Finanzierungsmodelle, VET-Zentren und Industrie müssen gemeinsam sowohl Lernformate als auch technologische Fahrpläne gestalten. Die Zusammenarbeit mit mehreren VET-Zentren und Dutzenden von Industriepartnern hat diesem Arbeitspaket wertvolle Einblicke in die Schnittmengen zwischen akademischer Lehre, praktischer Vorbereitung, beruflicher Ausbildung und Arbeitsmarktfähigkeit geliefert.

Der direkte Zugang zu Lern- und Lehraktivitäten sowie zu den Erwartungen von Lernenden, KMU und Großunternehmen hat zu einer sorgfältigen Analyse zweier Schlüsselbereiche der industriellen Landschaft geführt. Deutlich geworden ist der etablierte Wert der Ausbildung in VET-Zentren, die Notwendigkeit der Zusammenarbeit zwischen Bildung und Industrie sowie das gemeinsame Engagement für den Erfolg der Lernenden und die Zufriedenheit der Beschäftigten. Aus der Perspektive von PdM und SCM zeigt sich, dass digitale und grüne Transformation eine gemeinsame Zukunft teilen, getragen von einem gemeinsamen Engagement. In diesem Sinne ist die Aussicht auf eine kollaborative Integration dieser beiden Entwicklungen und der Institutionen, die sie unterstützen sowohl positiv als auch realistisch.

Wir haben es in der Hand, als einzelne Institutionen und als kollektiver Bildungssektor, mit Fertigungsunternehmen jeder Größe zusammenzuarbeiten, um Lernen, Lehren, Ausbildung und Beschäftigung zu transformieren. Durch Empfehlungen, die sowohl praxisnah als auch visionär sind, lernzentriert und industrieweit, lokal, regional und transnational, ergibt sich die Chance, die Zukunft der beruflichen Bildung im Bereich der fortgeschrittenen Fertigung in der Europäischen Union und darüber hinaus neu zu gestalten.





Die darin enthaltenen Erkenntnisse wären ohne die kollektive Intelligenz, Energie und das Engagement aller beteiligten Partner nicht möglich gewesen. Über Grenzen, Zeitzonen und Institutionen hinweg hat jeder Beitragende seine Expertise und sein gemeinsames Streben nach Exzellenz eingebracht. Dieser Geist der Zusammenarbeit, der vom Herzen der Europäischen Union bis in ihre Nachbarregionen reicht, spiegelt das Beste der Erasmus+-Mission wider. Er ist auf Zusammenarbeit, Menschlichkeit und Zukunftsorientierung ausgerichtet. Es ist eine besondere Ehre, Zeuge und Teil eines so lebendigen Beispiels des europäischen Geistes in Aktion zu sein.



6. REFERENZEN

- Pablo Marino. (2025, June). Alignment of VET Offer and Industry Needs in Advanced Manufacturing in the Basque Country. LCAMP Project – WP3 Observatory – D3.2 – M36. <https://lcamp.eu>
- Pichoutou Pascal, Ralf Steck, Camille Leonard, & Jésus Rebolledo. (2025a, June). Digital technologies 4.0 and green transition impacts on predictive maintenance. LCAMP Project – WP3 Observatory – D3.2 – M36. <https://lcamp.eu>
- Pichoutou Pascal, Ralf Steck, Camille Leonard, & Jésus Rebolledo. (2025b, June). Digital technologies 4.0 and green transition impacts on supply chain management. LCAMP Project – WP3 Observatory – D3.2 – M36. <https://lcamp.eu>



7. INDEX DER TABELLEN

<i>Table 1. Qualifikationsbedarf (Auszug)</i>	33
<i>Table 2. Beispiele europäischer Projekte zu technologischen Trends und Kompetenzentwicklung in der fortgeschrittenen Fertigung</i>	41
<i>Table 3. Neue Technologien und Fachgebiete in Schulungen im Bereich der prädiktiven Instandhaltung (PdM)</i>	42
<i>Table 4. Neue Technologien und Fachgebiete in Schulungen im Bereich Supply Chain Management (SCM)</i>	43
<i>Table 5. Schulungen im Zusammenhang mit SCM und den wichtigsten geschulten Fähigkeiten</i>	44
<i>Table 6. Spezialisierungsprogramme im Baskenland</i>	48
<i>Table 7. Qualifikationsbedarf (aus PdM-, SCM- und Baskenland-Berichten)</i>	62



8. ANHANG

8.1. ANHANG 1 – SKILL NEEDS

Table 7. Qualifikationsbedarf (aus PdM-, SCM- und Baskenland-Berichten)

LCAMP Competence Area	Categorisation	Recommended subcategories in the LCAMP framework	Occupation/Origin of the report	Skills needs
AI Literacy	Competence	Critical Digital Competence	Predictive Maintenance (PdM)	Basic AI or Machine Learning - Basic knowledge of AI/ML models
	Skill	Computer vision	Quality control technician (BC)	Computer vision and CNNs for defect detection - apply neural networks for automated quality control
		Machine Learning	Quality control technician (BC)	AI-based inspection tools - use artificial intelligence for defect detection
Digital	Attitude	Cybersecurity	Predictive Maintenance (PdM)	Cyber security awareness - IT security awareness
			Supply Chain Management (SCM)	Cyber security awareness - IT security awareness
		ICT	CNC operator /Quality control Technician/Automation-robotics technician (BC)	Cybersecurity in OT environments - understand security risks in production systems
	Competence	ICT	Supply Chain Management (SCM)	Cloud platform - ability to use cloud tools Problem solving skills - ability to use cloud tools
		Problem solving	Predictive Maintenance (PdM)	Problem solving (maintenance) - analytical thinking for data-driven decision making
		System Design	Predictive Maintenance (PdM)	Predictive model management (failure pattern analysis, risk thresholds)
			Automation-robotics technician (BC)	Industrial robotics integration - connect robots with production line systems



	Skill	Data literacy	Predictive Maintenance (PdM)	Interpretation of sensor data - ability to read and use IoT sensor data
				Data diagnostic skills (maintenance) - data analysis for fault diagnosis
			Supply Chain Management (SCM)	Data literacy - General data literacy in SCM
		ICT	Supply Chain Management (SCM)	Hybrid profiles (supply chain + digital skills) - e.g. supply chain analysts with digital skills
				ERP and SCM system literacy - Routine use of ERP/SCM software
			Automation-robotics technician (BC)	Communication protocols (OPC-UA, Ethernet) - implement industrial communication standards
			CNC operator (BC)	Digital interfaces and HMI - operate touchscreen controls on CNC machines.
			Automation-robotics technician/Maintenance technician (BC)	Apply basic cybersecurity protocols in OT environments - implement security procedures and access controls in production systems
			Maintenance technician (BC)	Install and configure industrial IoT sensors - set up connected sensors for data collection
				Use Computerised Maintenance Management Systems (CMMS) - manage maintenance workflows digitally
		ICT	Predictive Maintenance (PdM)	Use of PdM platforms - use of PdM dashboards, CMMS tools, etc.
		Problem solving	Predictive Maintenance (PdM)	Data interpretation (maintenance) - data analysis for fault diagnosis



			Maintenance technician (BC)	Troubleshoot data connectivity in IoT networks - solve communication problems in connected systems
		Data literacy	Quality control technician (BC)	Digital inspection systems operation - use automated measurement and testing equipment
				Digital documentation and traceability - maintain electronic records of quality data
				Vision systems configuration - set up cameras and image processing for quality control
			CNC operator (BC)	MES/ERP system integration - connect machining operations with enterprise systems
				Data acquisition and interpretation - collect and analyze production data for optimization
			Maintenance technician (BC)	Monitor sensor data (IoT) - analyze real-time data from connected industrial sensors
				Use cloud-based platforms to monitor machine performance - access remote monitoring systems
		Computer vision	Quality control technician (BC)	Machine vision systems - operate camera-based quality inspection systems
		Digital Manufacturing	CNC operator (BC)	CAD/CAM software operation - use computer-aided design and manufacturing programs
Transversal	Attitude	Communication	Supply Chain Management (SCM)	Communication and coordination - openness and willingness to embrace digital transformation



		Flexibility/Agility	Predictive Maintenance (PdM)	Adaptability - willingness to adapt to changing roles/technologies
	Competence	Collaboration/Teamwork	Predictive Maintenance (PdM)	Collaboration - cross-departmental collaboration (maintenance, IT operations)
		Critical thinking	Supply Chain Management (SCM)	Strategic thinking - holistic understanding of complex supply chains
	Skill	Collaboration/Teamwork	Transversal skills (BC)	Work effectively in teams - collaborate successfully in multidisciplinary work groups Cross-functional collaboration - work effectively with multidisciplinary teams in digital environments
		Communication	Transversal skills (BC)	Communication and coordination - share information clearly across departments and shifts
		Flexibility/Agility	Transversal skills (BC)	Adapt to emerging technologies - willingness to learn and use new technological tools
		Problem solving	Transversal skills (BC)	Problem-solving and decision-making - analyze situations and make effective technical decisions
		Continuous improvement	Transversal skills (BC)	Continuous improvement mindset - identify optimization opportunities in digital manufacturing processes
Professional	Competence	System Design	Automation-robotics technician (BC)	Industrial robotics integration - connect robots with production line systems
	Skill	System Design	Automation-robotics technician (BC)	Vision systems configuration - set up cameras and image processing for robot guidance and automation





Learner Centric Advanced Manufacturing Platform



**Co-funded by
the European Union**

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.