

Plattform FOREL

Reifegradanalyse und Potentialbewertung

Online-Content zum interaktiven Whitepaper KORESIL

Autoren: Zäh, M. F.¹, Rammo, J.-P.¹, Dillinger, F.¹, Hofer A.¹

¹Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München



DOI: 10.25368/2024.51

Dieses Whitepaper ist ein Ergebnis des Verbundvorhabens KORESIL. Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (Förderkennzeichen 02P20Z000 – 02P20Z004) und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Reifegradanalyse und Potentialbewertung

Produzierende Unternehmen sehen sich heute mit einem zunehmend volatilen Umfeld konfrontiert [1]. Die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens wird dabei maßgeblich von der Fähigkeit bestimmt, mit den internen und externen Einflüssen dieses turbulenten Umfelds umzugehen. Gerade in den letzten Jahren haben Großereignisse, wie die Corona-Pandemie oder wiederkehrende Lieferengpässe das Geschäft von Unternehmen weltweit entscheidend beeinflusst. Solche externen Einflüsse sind vielfältig und oft einzigartig und daher schwer vergleichbar. In der Literatur werden sechs Klassen der Umwelt entsprechend ihrer Einflussfaktoren unterschieden [2]: politische, wirtschaftliche, soziale, technologische, ökologische und rechtliche Einflussfaktoren (siehe Abbildung 1).

Status Quo

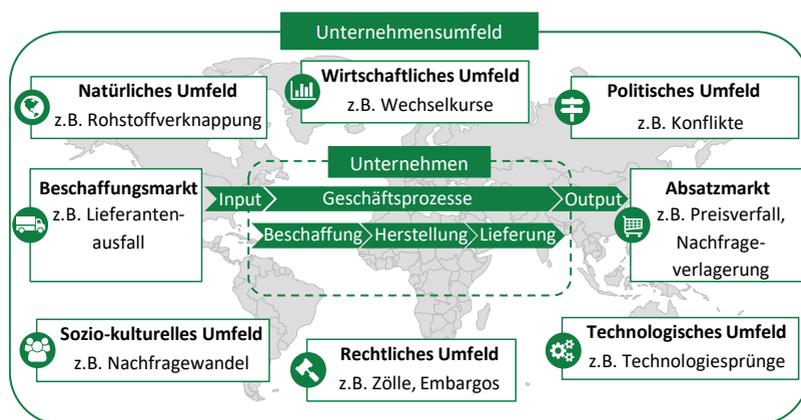


Abbildung 1: Einflussfaktoren des volatilen Umfelds [3]

Neben den externen Einflüssen sind auch Entwicklungsprozesse innerhalb des Unternehmens entscheidend. Diese Entwicklungsprozesse sind von externen Veränderungsimpulsen entkoppelt und können sowohl vom Management als auch von den Beschäftigten oder anderen Stakeholdern ausgehen [4].

Sowohl die internen als auch die externen Einflussfaktoren beeinflussen sich gegenseitig und stehen in einem komplexen Wechselverhältnis zueinander. Dieses Zusammenspiel der verschiedenen Kategorien kann das Unternehmensumfeld auf vielfältige Weise prägen. So können sich beispielsweise politische Entscheidungen direkt auf die wirtschaftliche Lage auswirken, soziale Veränderungen das Konsumverhalten beeinflussen und technologische Entwicklungen neue Chancen eröffnen.

Für produzierende Unternehmen erweist sich in diesem Zusammenhang insbesondere das technologische Umfeld als entscheidender Hebel, um mit der komplexen Umwelt umzugehen. So können beispielsweise Entwicklungen in den Bereichen Leichtbau und Ressourceneffizienz angesichts der globalen Herausforderungen des Klimawandels und der begrenzten Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen Einfluss auf die ökologische Umwelt nehmen.

Technologie ist zu einem der bedeutendsten Wettbewerbsfaktoren geworden.

D. SPATH & K.C. RENZ [5]

Für produzierende Unternehmen sind vor allem Produktionstechnologien ein entscheidender Wettbewerbsfaktor und damit die Basis für nachhaltiges Unternehmenswachstum [6]. Produktionstechnologien spielen in der deutschen Wirtschaft eine zentrale Rolle und sind als Innovationstreiber für die wirtschaftliche Entwicklung des Landes von großer Bedeutung. Deutschland ist einer der weltweit führenden Produktionsstandorte und zeichnet sich durch eine vielfältige und hochentwickelte Industriestruktur aus. Darüber hinaus ist das Technologiefeld der Produktionstechnologien durch eine besonders hohe Innovationskraft gekennzeichnet. Das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz verzeichnet sowohl die meisten Innovationsprojekte als auch das größte Fördervolumen (565 Millionen Euro seit 2020) für Innovationsprojekte in Deutschland im Technologiefeld Produktionstechnologien.

[...] das Tempo und der Umfang der Innovation haben so stark zugenommen, dass es nicht übertrieben ist, heute von einer Revolution der Innovationen zu sprechen.

A. BREM AND E. VIARDOT [7]

Die von dieser Innovationskraft getriebene rasante Entwicklung der Produktionstechnologien ist einerseits ein wesentlicher Treiber des turbulenten Umfelds, wird andererseits aber auch selbst davon beeinflusst. Von außen haben geopolitische Verschiebungen, konjunkturelle Schwankungen und regulatorische Rahmenbedingungen erheblichen Einfluss auf die Technologieentwicklung. Unterschiedliche politische Ausrichtungen, Handelsbeschränkungen und Sicherheitsbedenken können die Einführung und Akzeptanz neuer Technologien behindern oder fördern. Ebenso haben sich die Anforderungen der Verbraucher:innen und die Dynamik des globalen Marktes als wichtige externe Faktoren erwiesen, die Innovationen im Bereich der Produktionstechnologien beeinflussen.

Intern spielen Organisationsstrukturen, Innovationskultur, Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sowie Investitionen in Produktionstechnologien eine entscheidende Rolle. Unternehmen, die in der Lage sind, effiziente Innovationsprozesse zu implementieren, Talente anzuziehen und zu halten und einen agilen und flexiblen Umgang mit dem technologischen Wandel zu entwickeln, sind klar im Vorteil.

Die Bedeutung neuartiger Technologien erstreckt sich jedoch weit über den unternehmerischen Kontext hinaus und wirkt sich umfassend auf die gesamte Gesellschaft aus. Neuartige Technologien haben das Potenzial, gesellschaftliche Strukturen tiefgreifend zu verändern, indem sie neue Kommunikationsmöglichkeiten schaffen, Arbeitsprozesse revolutionieren und den Zugang zu Informationen und Dienstleistungen erleichtern. So haben beispielsweise digitale Technologien wie das Internet der Dinge oder Künstliche Intelligenz bereits begonnen, traditionelle Ge-

schäftsmodelle zu transformieren und neue Formen der Zusammenarbeit und Vernetzung zu ermöglichen. Diese Technologien fördern nicht nur Effizienz und Produktivität, sondern eröffnen auch neue Wege für nachhaltiges Wirtschaften und gesellschaftliche Teilhabe.

Angesichts dieses volatilen Umfelds und des komplexen Zusammenspiels externer und interner Einflüsse sowie der hohen Relevanz der Produktionstechnologien ist es für produzierende Unternehmen von entscheidender Bedeutung, den Reifegrad und das Potential von Produktionstechnologien sorgfältig zu analysieren und zu bewerten. Die Technologie-Reifegradanalyse und -Potentialbewertung ist dabei ein unverzichtbares Werkzeug, um den aktuellen Stand und die zukünftige Entwicklung von Technologien zu bewerten und unter bestmöglicher Einschätzung der externen und internen Einflussfaktoren zu prognostizieren. Eine präzise Prognose kann dabei einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil für produzierende Unternehmen darstellen.

Zunehmender Wettbewerbsdruck, wachsende technologische Dynamik, ein Zusammenwachsen verschiedener Technikfelder und der hohe finanzielle Aufwand für die Innovationstätigkeit machen die [...] Bewertung von Zukunftstechnologien künftig für Unternehmen immer wichtiger.

G. REGER [8]

In den letzten Jahren haben sich bereits einige Arbeiten mit der Bewertung von Produktionstechnologien beschäftigt.

[9] entwickelt eine Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten für die Produktion. Die Methodik umfasst fünf Schritte: die Definition der Technologiestrategie und Ableitung der Produktionsaufgabe, die Identifikation relevanter Technologien, die Zuordnung der Technologien zu den Produktionsaufgaben und die Bildung alternativer Technologieketten, die Technologiefinebewertung nach Reife, Potential und

Wirtschaftlichkeit, die Sensitivitätsanalyse und die Interpretation der Planungsergebnisse. Die Methodik beinhaltet die Dokumentation von Technologiesteckbriefen, eine qualitative Technologiegrobbeurteilung mit Hilfe eines Technologieradars sowie die Abbildung von Wechselwirkungen mit Hilfe von Relationsmatrizen.

[10] stellt in seiner Dissertation einen ganzheitlichen Ansatz zur Identifikation von Produktionstechnologien vor, der sowohl interne als auch externe Anforderungen berücksichtigt. Dieser Ansatz setzt am Anfang des Technologieplanungsprozesses an und ergänzt beispielsweise den Ansatz von [9]. Die entwickelte Methodik besteht aus sechs Schritten, in denen die für ein Unternehmen relevanten Technologieoptionen identifiziert und bewertet werden. Die Schritte der Methodik sind die Suchfelddeduktion, die Suchfeldauswahl, die Suchfeldbeschreibung, die Informationsquellenauswahl, die Informationssuche und die Informationsbewertung.

Die vorgestellten Arbeiten von [9] und [10] zeigen beispielhafte Ansätze auf, die die strategische Planung von Produktionstechnologien generell unterstützen. Um die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen langfristig zu sichern, ist jedoch eine prognostische Perspektive erforderlich, die über die konventionellen Ansätze der strategischen Technologieplanung hinausgeht. Solche potentialbasierten Ansätze haben in der Forschung stark an Bedeutung gewonnen [11]. Zwei beispielhafte potentialbasierte Ansätze werden im Folgenden vorgestellt.

Die Methode von [12] bewertet das Potential von Technologien für eine marktorientierte Verwertung. Sie identifiziert Verwertungsoptionen und definiert wirtschaftliche und strategische Ziele im Zielsystem. Das Technologiemodell analysiert die wettbewerbliche und funktionale Relevanz, die technologische Komplexität und die Schutzmöglichkeiten. Das Marktmodell nutzt Szenariotechniken und Lebenszyklusmodelle, um Absatzpotentiale zu ermitteln. Die Ergebnisse werden durch eine dreidimensionale (Wettbewerbsintensität, Entwicklungsintensität, Marktattraktivität) Portfoliomethode bewertet und visualisiert.

[13] entwickelt eine Methodik zur potential- und risikobasierten Technologiebewertung, die das Technologiepotential als Beitrag zur strategischen Erfolgsposition des Unternehmens betrachtet. Die Methodik besteht aus fünf Teilmodellen, die die Charakterisierung der Technologie, den Anwendungskontext, das Technologiepotential, das Risiko und die Gestaltung der Bewertung umfassen. Bei der Charakterisierung werden die technologischen Eigenschaften beschrieben und in den Unternehmensprozess eingeordnet. Der Anwendungskontext umfasst die Beschreibung der aktuellen und zukünftigen Anwendungsfelder und deren Relevanz für das Unternehmen. Das Technologiepotential wird anhand strategischer Ziele bewertet, während das Risiko anhand von Risikofaktoren ermittelt wird. Die Ergebnisse werden zusammengeführt, um das Management bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen.

Das Themenfeld der Potentialbewertung von Produktionstechnologien wird darüber hinaus in verschiedenen laufenden oder kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekten adressiert. In dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekt „Bewertung des Wettbewerbspotentials von Produktionstechnologien“, das von 2019 bis 2023 am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München durchgeführt wurde, wurde ein Vorgehensmodell zur integrativen Potentialbewertung von Produktionstechnologien entwickelt. Dieses Vorgehensmodell ermöglicht eine quantitative Datenverarbeitung sowie die Berücksichtigung von Unsicherheiten in den Einflussgrößen.

Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) in Aachen erarbeitete im Projekt „Entwicklung eines Softwaretools zur Technologiebewertung“ ein systematisches Bewertungskonzept für Technologieinnovationen in frühen Entwicklungsphasen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Erstellung eines umfassenden Kennzahlensystems, das neben quantitativen Kriterien auch die Berücksichtigung und Quantifizierung ursprünglich qualitativer Bewertungskriterien beinhaltet.

Wie die vorgestellten Publikationen und Forschungsprojekte zeigen, existieren in der Forschung bereits einige abstrakte Modelle zur Bewer-

von Technologiepotentialen. Für konkrete Strategie- und Investitionsentscheidungen werden jedoch detailliertere Ansätze zur Bewertung von Technologien benötigt. Die Technologiebewertung muss dabei verschiedene Perspektiven wie technische, ökonomische, strategische, soziale und ökologische Faktoren berücksichtigen, um das vielfältige und turbulente Umfeld abbilden zu können. Ein ganzheitlicher und systematischer Ansatz ist notwendig, um fundierte Entscheidungen über die zukünftige Ausrichtung der technologischen Basis eines Unternehmens treffen zu können.

Im Forschungsprojekt KORESIL wurde diese Forschungslücke mit dem Ziel adressiert, eine Vorgehensweise zur ganzheitlichen Reifegrad- und Potentialbewertung von Produktionstechnologien zu entwickeln. Aufgrund der hohen Relevanz des Leichtbaus und der ressourceneffizienten Produktion sollte diese Vorgehensweise an innovativen Produktionstechnologien im Kontext des Leichtbaus validiert werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden zunächst verschiedene Methoden zur Ableitung einer Bewertungsmethodik des Technologiepotentials und des Reifegrades untersucht. Basierend auf einer systematischen Literaturanalyse konnten sechs relevante Vorgehensweisen identifiziert und daraus ein fünfstufiges Vorgehen in Anlehnung an [14] abgeleitet werden (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Methode zur Ableitung einer Bewertungsmethodik [14]

Zunächst wurde der Entwicklungsbedarf (Phase 1) mit Hilfe einer systematischen Literaturrecherche unter Berücksichtigung der Datenbanken SCOPUS, Web of Science und EBSCO ermittelt. Es konnten 20 Methoden zur Bewertung des Reifegrades und des Technologiepotentials identifiziert und analysiert werden. Die Recherche ergab, dass keine Methode zur Bewertung des Technologiepotentials und des Reifegrades existiert, die sowohl technische, ökonomische, strategische, soziologische als

Beitrag von
KORESIL

auch ökologische Bewertungskriterien berücksichtigt. Die Berücksichtigung dieser Kriterien (siehe Abbildung 3) für das Technologiepotential in der strategischen Technologieplanung wurde daher als Projektrahmen definiert.

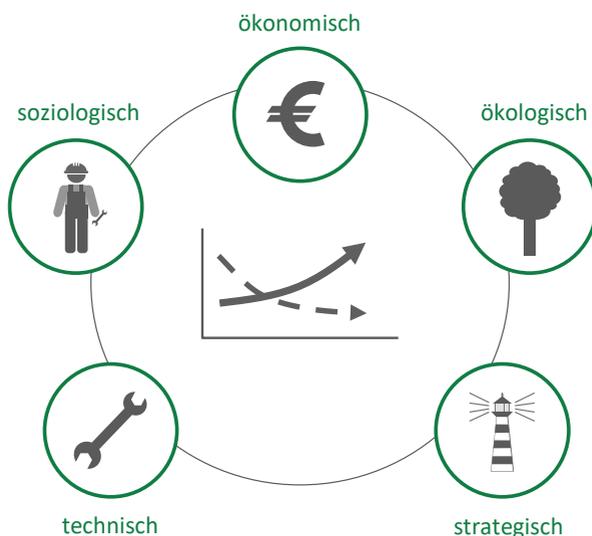


Abbildung 3: Ganzheitliche Kriterien zur Bewertung von Produktionstechnologien

Die Entwicklung des Modells umfasste die Identifikation von Bewertungskriterien sowie die Entwicklung eines Bewertungsverfahrens. Die Bewertungskriterien wurden mit Hilfe einer Literaturanalyse sowie mehrerer Workshops mit Expertinnen und Experten erarbeitet und in die Oberkategorien technisch, ökonomisch, strategisch, soziologisch und ökologisch unterteilt, die sich jeweils in mehrere Unterkategorien gliedern. Um die Anwendbarkeit des Modells zu verbessern, wurden aus den Bewertungskriterien Leitfragen abgeleitet, anhand derer die Technologie bewertet wird.

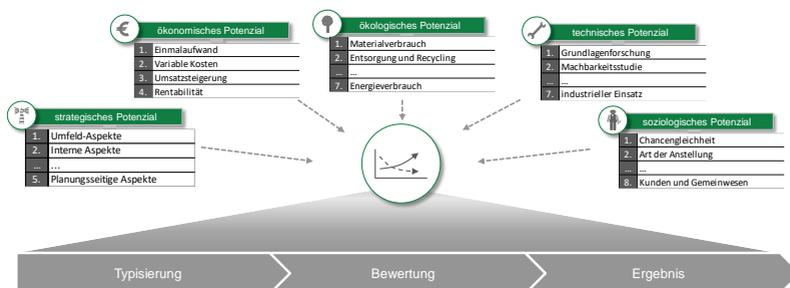


Abbildung 4: Konsolidierung der Teilmodelle zu einem Gesamtmodell

Die übergeordneten Kategorien wurden zunächst als eigenständige Teilmodelle entwickelt und anschließend zu einem Gesamtmodell konsolidiert (siehe Abbildung 4). Die Technologiebewertung durchläuft drei übergeordnete Phasen und mündet in einem Technologiebewertungsradar. In der ersten Phase, der Typisierung, wird die zu bewertende Technologie sowie das Unternehmen, für das die Bewertung durchgeführt wird, beschrieben. Darüber hinaus können individuelle Schwerpunkte zwischen technischen, ökonomischen, strategischen, soziologischen und ökologischen Bewertungskriterien gesetzt werden. In der nächsten Phase, der Bewertung, wird die betrachtete Technologie anhand von Leitfragen bewertet. Dabei wird sowohl für die Technologiereife als auch für das Technologiepotential die jeweilige Leitfrage auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet. In der Ergebnisphase werden die Antworten ausgewertet und in einem Technologiebewertungsradar zusammengefasst. Dieses Radar visualisiert sowohl die Technologiereife als auch das Technologiepotential (siehe Abbildung 5).

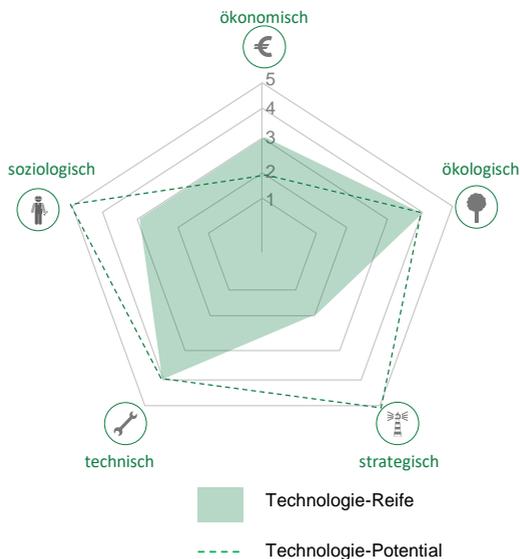


Abbildung 5: Technologiebewertungsradar mit Technologie-Reife und Technologie-Potential

Um die Anwendbarkeit des entwickelten Bewertungsmodells zu überprüfen, wurde in Phase 4 eine Validierung des Modells durchgeführt. Dafür wurde das Modell anhand von Anwendungsfällen bei vier Instituten des Konsortiums sowie einem Industrieunternehmen getestet (siehe Abbildung 6). Die untersuchten Technologien waren das Laserauftragsschweißen an der TU München, das rezyklatbasierte Strangpressen an der TU Dortmund, der robotergestützte Spritzguss an der TU Dresden, das Debonding on demand an der Universität Paderborn [15] und das Heißpressen bei den Ford-Werken GmbH. Im Rahmen der Validierung wurden bereits erste iterative Verbesserungen am Modell vorgenommen. Weitere Erkenntnisse wurden am Ende der Evaluation (Phase 5) zusammengefasst, woraus weitere Verbesserungspotentiale abgeleitet und anschließend umgesetzt werden konnten.

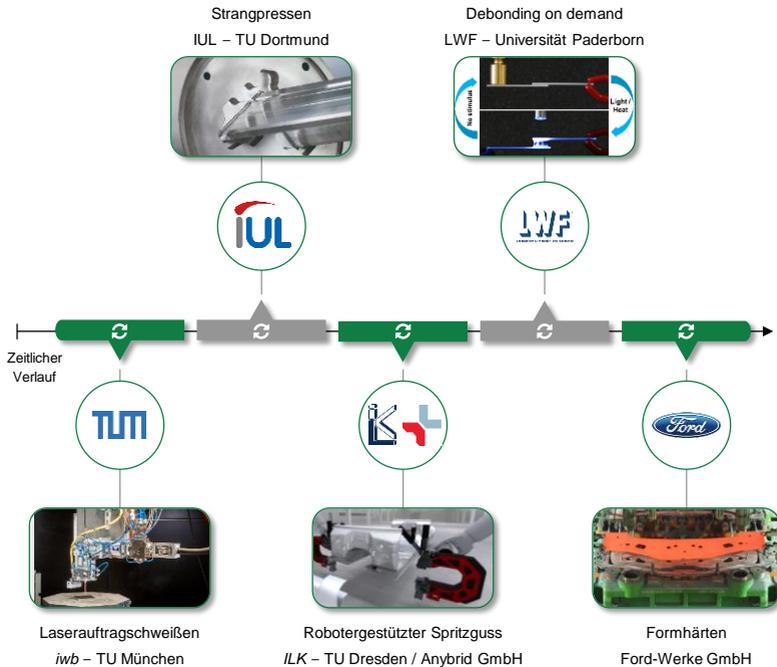


Abbildung 6: Validierung des Bewertungsmodells

Das Ziel, eine Methode zur Bewertung des Reifegrades und des Potentials von Technologien zu entwickeln, die diese nach technischen, ökologischen, ökonomischen, strategischen und sozialen Kriterien bewertet, konnte mit der beschriebenen Vorgehensweise erreicht werden. Die Validierung konnte die Anwendbarkeit auf Produktionstechnologien im Kontext des Leichtbaus bestätigen. Das entwickelte Modell ist somit in der Lage, den Reifegrad und das Potential von Produktionstechnologien unter Berücksichtigung soziotechnischer Systeme und ihrer komplexen Wechselwirkungen zu bewerten und damit produzierende Unternehmen bei der strategischen Technologieplanung zu unterstützen.

Mit den Ergebnissen des Projektes KORESIL konnten wichtige Schritte in Richtung einer ganzheitlichen Bewertung von Produktionstechnologien gemacht werden. Strategische Entscheidungen, in welche Produktionstechnologien zukünftig investiert werden soll, können damit nicht nur

Handlungsfelder

auf Basis technischer Kriterien, sondern unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussfaktoren in soziotechnischen Systemen getroffen werden.

Im Projektverlauf wurde durch den projektinternen und -übergreifenden Austausch sowie durch die Fachgespräche im Rahmen der Validierung und die arbeitspsychologischen Studien insbesondere die zentrale Rolle des Menschen in soziotechnischen Systemen der modernen Produktion deutlich [16]. Angesichts der wirtschaftlichen Herausforderungen durch steigende Varianz, Kosten, Zeit- und Qualitätsdruck [17] sowie der gesellschaftlichen Auswirkungen des demografischen Wandels [18] stehen viele Unternehmen vor einer großen Herausforderung im Umgang mit dem Menschen in der Produktion.

[...] digitale Technologien können es produzierenden Unternehmen ermöglichen, die Herausforderungen der Wettbewerbsfähigkeit und des demografischen Wandels zu bewältigen.

S. NADEAU UND K. LANDAU [19]

Wie die Ergebnisse des Projekts KORESIL bereits gezeigt haben, sind insbesondere digitale Technologien ein wirksames Mittel, um den demografischen Herausforderungen zu begegnen und damit die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen langfristig zu sichern [20]. Digitale Technologien können dabei sowohl bei der Ausführung der immer komplexer werdenden Tätigkeiten in der Produktion als auch bei der Analyse und Entscheidungsfindung unterstützen. Darüber hinaus ermöglichen digitale Technologien neue Ansätze im Bereich des industriellen Lernens, um die Kompetenzen der Mitarbeitenden im Einklang mit den sich wandelnden Anforderungen der modernen Produktion zu stärken.

Die erfolgreiche Integration und Anwendung digitaler Technologien in der Produktion hängt jedoch in hohem Maße von der gezielten Auswahl

der richtigen Technologien für die jeweiligen Aufgaben und Anwendungsfälle ab. Die bloße Implementierung von Technologien garantiert keinen automatischen Erfolg und kann im Zweifelsfall sogar zu einer Verschlechterung bestehender Prozesse führen. Um eine nahtlose Integration in bestehende Arbeitsabläufe zu gewährleisten, ist neben der richtigen Auswahl der Technologie und des Anwendungsfalls auch eine frühzeitige und gezielte Einbindung der Mitarbeitenden notwendig, um Widerstände zu minimieren. Die Akzeptanz und die aktive Beteiligung der Mitarbeitenden sind grundlegend, um den vollen Nutzen digitaler Innovationen zu realisieren.

Es ist inzwischen allgemein anerkannt, dass der erfolgreiche Einsatz digitaler Technologien in der Produktion wesentlich von der Kompatibilität der technologischen Unterstützung mit den menschlichen Faktoren abhängt.

OLIVEIRA ET AL. [21]

Analog zu der im Projekt KORESIL entwickelten Bewertungsmethode für Produktionstechnologien erfordert die Integration digitaler Technologien in die Produktionsumgebung daher eine ebenso strukturierte Vorgehensweise zur gezielten Auswahl geeigneter digitaler Lösungen, die den jeweiligen Anforderungen des Arbeitsplatzes bzw. der Arbeitsaufgabe gerecht werden. Ein systematisches Vorgehen bei der Evaluierung und Implementierung digitaler Technologien in der Produktion ermöglicht es Unternehmen, nicht nur die Effizienz und Produktivität zu steigern, sondern auch den Herausforderungen des demografischen Wandels und der zunehmenden Komplexität der Aufgaben in der Produktion erfolgreich zu begegnen.

LITERATUR

- [1] Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. München, Germany: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011
- [2] Lauer, T.: Change Management. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019
- [3] Böhnke, N.-C.; Pointner, A.; Ramsauer, C.: Supply-Chain-Strategien im Zeitalter von VUCA. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) Nr. 9, S. 555–558
- [4] Helmold, M.: Successful Management Strategies and Tools. Industry Insights, Case Studies and Best Practices. Cham: Springer International Publishing, 2021
- [5] Spath, D.; Renz, K.-C.; Seidenstricker, S.: Technologiemanagement. In: Albers, S.; Gassmann, O. (Hrsg.): Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement. Wiesbaden: Gabler, 2011, S. 219–233
- [6] Schuh, G.; Klappert, S.: Technologiemanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011
- [7] Brem, A.; Viardot, E.: Revolution of Innovation Management. London: Palgrave Macmillan UK, 2017
- [8] Reger, G.: Technologie-Früherkennung: Organisation und Prozess. In: Gassmann, O. (Hrsg.): Management von Innovation und Risiko. Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen ; mit 13 Tabellen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006
- [9] Schindler, S.: Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion. Dissertation, Technische Universität München, München, 2014
- [10] Greitemann, J.: Methodik für die systematische Identifikation von Produktionstechnologien. Dissertation, Technische Universität München, München, 2016
- [11] Hofer, A.; Schnell, J.; Beck, B. et al.: Potential-based Technology Planning for Production Companies. Procedia CIRP 81 (2019), S. 1400–1405

- [12] Schuh, G.; Vogt, F.; Drescher, T.: Technology capability: Identification and assessment of technology and market specific exploitation options. *IOSR Journal of Business and Management (IOSR-JBM)* 18 (2016) Nr. 11
- [13] Scholz, P.: Methodik zur potenzial- und risikobasierten Technologiebewertung. Dissertation, Apprimus Verlag
- [14] Mettler, T.: Maturity assessment models: a design science research approach. *International Journal of Society Systems Science* 3 (2011) 1/2, S. 81
- [15] Meschut, G.; Gilich, J.; Chudalla, N.: Ressourceneffiziente Füge- und Entfügetechnologien. In: Gude, M.; Tekkaya, A.E.; Zäh, M.F. et al. (Hrsg.): *Komplexität beherrschen, Kreisläufe schließen. Soziotechnische Systeme für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen: Das interaktive Whitepaper*. Dresden, 2024
- [16] Tekkaya, A.E.; Grodotzki, J.; Gude, M. et al.: Soziotechnische Systeme - Symbiose von Mensch & Maschine. In: Gude, M.; Tekkaya, A.E.; Zäh, M.F. et al. (Hrsg.): *Komplexität beherrschen, Kreisläufe schließen. Soziotechnische Systeme für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen: Das interaktive Whitepaper*. Dresden, 2024
- [17] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [18] Wittemann, P.: *Konzeption eines Verfahrens zur Ableitung ergonomischer Gestaltungslösungen für fähigkeitsgerechte Arbeitsplätze*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2017
- [19] Nadeau, S.: Utility, Advantages and Challenges of Digital Technologies in the Manufacturing Sector. *Ergonomics International Journal* 2 (2018) Nr. 6
- [20] Gude, M.; Weck, D.; Müller-Pabel, M.: Digitalisierung von Entwicklungs- und Fertigungsprozessen. In: Gude, M.; Tekkaya, A.E.; Zäh, M.F. et al. (Hrsg.): *Komplexität beherrschen, Kreisläufe schließen. Soziotechnische Systeme für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen: Das interaktive Whitepaper*. Dresden, 2024

- [21] Oliveira, M.; Arica, E.; Pinzone, M. et al.: Human-Centered Manufacturing Challenges Affecting European Industry 4.0 Enabling Technologies. In: Stephanidis, C. (Hrsg.): HCI International 2019 – Late Breaking Papers. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 507–517