



Datenerfassung in der Produktion

Tabelle 1

Reifegrad ▶

▼ Kriterien

	Manuelle Erfassung von Basisdaten	Systematisierte manuelle Datenerfassung	Teilautomatisierte Datenerfassung	Durchgängig automatisierte Datenerfassung	Digitaler Schatten (digitales Abbild)
Energie, Roh- und Hilfsstoffe	Erfassung nur aus buchhalterischer Sicht	Manuelle Mitschrift von Verbräuchen und Zugabemengen gemäß Arbeitsanweisung	EDV-gestützte manuelle bzw. automatische Erfassung von Daten	EDV-gestützte vollautomatische Erfassung der wichtigsten Daten durch mobile und stationäre Eingabegeräte und Sensorik	Vollautomatische Erfassung aller Daten ohne manuelle Eingabeerfordernisse
Fertigungslogistik	Keine besonderen Anforderungen, rudimentäre Erfassung von Eingangs- und Ausgangsdaten, adhoc-Personalzuweisung	Manuelle Erfassung von Daten in Teilbereichen wie z.B. Mengen und Gewichte, ggf. Papier-Kanban-System	Bedarfsgerechte, EDV-gestützte Information interner Logistik über anstehende Aufgaben, Erfassung von Transportlosen z.B. mit Handscanner	EDV-gestützte Navigation interner und externer Logistik, durch das Personal organisierter, ggf. assistierter Teilefluss	Softwaregestützte bedarfsgerechte Navigation interner und externer Logistik, durch das Produkt selbst organisierter (autonomer) Teilefluss
Fertigungsprozesse	Rudimentäre Erfassung von Stückzahlen, Zeiten und Störungen	Stückzahlerfassung, Störungserfassung, manuelle Personaleinsatzplanung, manuelle Mitschrift zusätzlich ausgewählter Informationen insbesondere bei Prozessentwicklung und -optimierung	Teilweise EDV-/systemgestützte Erfassung relevanter, durch Personal beeinflusster Prozessdaten	EDV-gestützte Erfassung wesentlicher kontinuierlich und diskontinuierlich anfallender Fertigungsparameter zur digitalen Nachahmung des Fertigungsablaufs	Erfassung aller kontinuierlich und diskontinuierlich anfallenden Fertigungsparameter zur digitalen Nachbildung des Fertigungsablaufs
Qualitäts- und Produktdaten	Manuelle Fehlererfassung; Führen von Strichlisten, Ausfüllen von Produktsteckbriefen, ggf. Erfüllung spezifischer Kundenvorgaben	Manuelle Fehlererfassung, Führen von Strichlisten, Ausfüllen von Produktsteckbriefen	Teilweise EDV-/systemgestützte Datenerfassung von Qualitäts- und Produktdaten	Vollautomatische EDV-gestützte Datenerfassung durch mobile und stationäre Eingabegeräte und Sensorik	Vollautomatische Erfassung aller Daten ohne manuelle Eingabeerfordernisse
Track and Trace (Rückverfolgbarkeit)	Rudimentäre Erfassung von Losen und Chargen zur Verfolgung von Produkten	Ausfüllen manuell beschrifteter Begleitkarten und vorgefertigter Listen, EDV-gestützte Verwaltung mit manueller Eingabe, Erfüllung kundenspezifischer Anforderungen, manuelle Los-/Chargenverfolgung	Manuell beschriftete Begleitkarten, EDV-gestützte Verwaltung mit manueller Eingabe	EDV-gestützte Erfassung von Bauteilen (z.B. DMC-Markierung) und Transportlosen (z.B. Einsatz von RFID-Technologie), Einsatz von Assistenz- und Visualisierungssystemen	EDV-gestützte Erfassung aller bauteil- und prozessspezifischen Daten in Echtzeit, Daten liegen prozessübergreifend ohne Systembrüche vor (Big Data), konsequenter Einsatz bedienergonomischer Assistenz- und Visualisierungssysteme
Datenqualität und Datenvalidierung	Unberücksichtigt bzw. gemäß Kundenvorgabe	Ableich mit Vorgaben, Schulung von Mitarbeitern, manuelle Sensor- bzw. Messmittelüberwachung	Partiell softwaregestützter DataQualityCheck, manuelle oder automatisierte Sensor- bzw. Messmittelüberwachung/-prüfung	Einsatz von Data-Governance-Methoden, Datensteckbriefen und kontinuierlichen DataQuality-Checks, kontinuierliche Messmittelfähigkeitsüberprüfung (MSA), automatisierte Sensorüberwachung und -prüfung	Einsatz von Data-Governance-Methoden, Datensteckbriefen und kontinuierlichen DataQuality-Checks, kontinuierliche und durchgängig automatisierte Messmittelfähigkeitsüberprüfung (MSA), automatisierte Sensorüberwachung und -prüfung
Datenauswahl	Abhängig vom buchhalterischen Bedarf	Beschränkt auf relevante Daten, die mit ableistbarem Aufwand aufgeschrieben werden können	Bereichsbezogener Einsatz von Technologie ermöglicht Reduzierung des Erfassungsaufwandes sowie Erfassung zusätzlicher Daten und somit eine verbesserte Informationsverfügbarkeit	Durchgängiger Technologieeinsatz ermöglicht Erfassung der erforderlichen prozess- und bauteilbezogenen Daten, für den jeweiligen Anwendungsfall bzw. das Informationsziel	Durchgängiger Technologieeinsatz ermöglicht Erfassung aller prozess- und bauteilbezogenen sowie damit im Kontext stehenden Daten, Auswahl genutzter Daten hängt vom Anwendungsfall bzw. dem Informationsziel ab
Anwendungsbeispiele	Teilweise Erfassung von Daten mittels anlagenbezogenem Rechner, Klemmbrett	Teilweise Erfassung von Daten mittels anlagenbezogenem Rechner, Klemmbrett	Einsatz von Scada, PPS-Systemen	Durchgängiger Einsatz von SCADA und PPS-Systemen, anwenderfreundliche Gestaltung der Systeme ermöglicht kurze Qualifizierungsdauer und ein breites Anwenderspektrum	Vollvernetzung von Scada, PPS/MES-Systemen sowie Data Governance- Systemen und Datenanalysesoftware

DMC: DataMatrix-Code / RFID: Radio-Frequency Identification: / MSA: Measurement-System-Analysis, dt. Messmittelfähigkeitsüberprüfung, Messsystemanalyse / SCADA: Supervisory Control and Data Aquisition, dt. Überwachungssteuerung und Datenerfassung / PPS: Produktionsplanungs- und Steuerungssystem / MES: Manufacturing Executing System, dt. Fertigungssteuerungssystem

Datenverarbeitung in der Produktion

Tabelle 2

Reifegrad

Kriterien

Kriterien	Manuelle Auswertung und Dokumentation	Digitale Auswertung und Speicherung zur Dokumentation	Digitale Auswertung und Speicherung zur Prozessüberwachung	Digitale Auswertung und Speicherung zur Prozesssteuerung	Digitale Auswertung und Speicherung zur Prozessregelung
Energie, Roh- und Hilfsstoffe	Auswertungen aus buchhalterischen Gründen, manuelle Erstellung von Berechnungen und Diagrammen, Dokumentation und Ablage in Papierform	Manuell initiierte, statistische oder grafische Auswertung durch Software (z. B. Excel, MatLab, Python)	Zugaben und Verbräuche einzelner Teilprozesse können in Echtzeit grafisch dargestellt und anhand festgelegter Prozessgrenzen/Parameter Grenzen überwacht werden (statistische Prozesskontrolle/Monitoring)	Material- und Energieeffizienz: beliebige Kombinationen von Prozessdaten, ERP-Daten etc. erlauben zielgenaue, gussteil- oder prozessbezogene Verbrauchsanalysen und die Steuerung optimaler Prozesseinstellungen	Bauteil-/prozessindividuelle Material- und Energieeffizienz durch echtzeitfähige digitale Planung, Dokumentation und Auswertung der Energie- und Materialeinsätze/-verbräuche, zielgenaue, gussteil- oder prozessbezogene Regelung optimaler Prozesseinstellungen
Fertigungslogistik	Manuelle Erstellung von Berechnungen und Diagrammen zur groben Prozessüberwachung und -planung, Laufzettel zur Produktionssteuerung, Dokumentation und Ablage in Papierform	Manuell/digital erstellte und erfasste Fertigungsablaufdaten (Rückmeldeverfahren) werden in Datenbanken oder als Tabellenkalkulationsdatei gespeichert, manuell initiierte, statistische oder grafische Analyse durch Software	Echtzeitfähige digitale Planung, Dokumentation und Auswertung der Fertigungsabläufe durch Sensoren, Messsysteme oder Anlagensteuerungen, Überwachung des zeitlichen Ablaufverhaltens einzelner Teilprozesse in Echtzeit (statistische Prozesskontrolle/Monitoring)	Echtzeitfähige digitale Planung, Dokumentation und Auswertung der Fertigungsabläufe, datenbasierte Echtzeitanalyse und Steuerung des Verhaltens einzelner Teilprozesse sowie von Teilprozesskombinationen	Echtzeitfähige digitale Planung, Dokumentation und Echtzeitanalyse der Fertigungsabläufe, datenbasierte virtuelle Prozessplanung mit den Zielgrößen Qualität, Durchlaufzeiten, Kosten, Verbräuche
Fertigungsprozesse	Manuelle Erstellung der Unterlagen zur (groben) Produktions-, Prozess- und Qualitätsplanung, Laufzettel zur Produktionssteuerung, Dokumentation und Ablage in Papierform, Steuern von Prozessen durch empirisches Wissen, Prozesswissen ist personalisiert	Manuell/digital erstellte und erfasste Fertigungsplanungs- und -ablaufdaten (Rückmeldeverfahren) werden in Datenbanken oder als Tabellenkalkulationsdatei gespeichert, manuell initiierte, statistische oder grafische Analyse durch Software	Echtzeitfähige digitale Auswertung der Prozessdaten durch Sensoren, Messsysteme oder Anlagensteuerungen, grafische Darstellung des Prozessverhaltens in Echtzeit und vor Ort erlaubt zielgenaue Überwachung anhand festgelegter Prozessgrenzen/Parameter Grenzen (statistische Prozesskontrolle/Monitoring)	Echtzeitfähige digitale Datenanalysen und Prognosen mit maschinellen Lernverfahren, zielgenaue prognosebasierte Prozesssteuerung in festgelegten Prozessgrenzen/Parameter Grenzen, Existenz von Fertigungsregeln, die auf Basis der Prognosen Handlungsanweisungen für die optimale Parametrisierung der Zielgrößen geben	Adaptive prognosebasierte Prozessregelung, Ermittlung der Einflussgrößen, die innerhalb bestimmter Parametergrenzen gelten und eingeregelt müssen, um z. B. ein anforderungsgerechtes Bauteil zu erhalten, autonome Echtzeit-Parametrisierung mit Prognose zur adaptiven Regelung des Fertigungsprozesses, i. e. Fertigung eines anforderungsgerechten Bauteils, vollständig transparenter Produktionsprozess
Qualitäts- und Produktdaten	Manuelle Erstellung der Unterlagen für die Qualitätsprüfung, Prüfpläne und Prüfungsdokumentation, Dokumentation und Ablage in Papierform	Manuell/digital erstellte Prüfpläne, Prüfergebnisse aus Labor und Werkhalle sowie aus Rückmeldeverfahren werden manuell initiiert statistisch oder grafisch ausgewertet, Erfassung beliebiger digitaler als auch händisch verfügbarer Daten, Auswertung mehrdimensionaler Datensätze einschließlich vereinfachter Langzeitauswertung möglich	Echtzeitfähige digitale Dokumentation und Auswertung der Qualitätsdaten durch Sensoren, Messsysteme oder Anlagen- steuerungen, mit der unmittelbaren Rückkopplung der Prüfergebnisse wird der Einfluss einzelner Teilprozesse auf spezifische Qualitätsdaten in Echtzeit grafisch dargestellt und beurteilt, statistische Prozesskontrolle/Monitoring	Unmittelbare Zuordnung von Prüfergebnissen zu Prozessen und Bauteilen erlaubt Berechnung der Wirkmuster zwischen Prozessführung und Qualität, zu erwartende Qualitäts- und Produktdaten werden mit einer datenbasierten virtuellen DoE (stat. Versuchsplanung) oder im laufenden Prozess vorhergesagt	Kontinuierliche (Selbst-)Optimierung des Prozesses mit Hilfe von Echtzeitinformationen und datengetriebenen Prozessmodellen
Track and Trace (Rückverfolgbarkeit)	Rückverfolgbarkeit der Bauteilherstellung händisch anhand der dokumentierten Unterlagen, i.d.R. durch Auftragsnummer, Kunde, Datumsangaben aus den Fertigungsdokumenten	Rückverfolgbarkeit der Bauteilherstellung in groben Zeitschritten manuell oder digital anhand der dokumentierten Unterlagen und Maschinendaten	Erfassung beliebiger digitaler als auch händisch verfügbarer Planungs-, Prozess- und Qualitätsdaten, Rückverfolgbarkeit der Bauteilherstellung in groben Zeitschritten manuell oder digital anhand der dokumentierten Unterlagen und Maschinendaten	Verknüpfung eines Bauteils mit seinen individuellen Fertigungsparametern aller Teilprozesse (teilgenaue Rückverfolgbarkeit)	Verknüpfung eines Bauteils mit seinen individuellen Fertigungsparametern aller Teilprozesse (teilgenaue Rückverfolgbarkeit)
Ergebnisvalidierung	Manuelle Berechnung und Auswertung mit Kennzahlen, komplexere Zusammenhänge schwer zu erkennen (maximal zweidimensionale Korrelationen), keine oder aufwändige Auswertung von Datensätzen, die große Zeiträume abdecken (Langzeitauswertung), keine Prognosen möglich, Datenkorrektheit nicht vollständig gegeben	EDV-gestützte Langzeitauswertungen, Auswertung nur auf Vergangenheit bezogen, keine Prognosen möglich, Anwendungsspektrum der Auswertungen beschränkt sich auf Experten, bei händischen Eingaben ist Datenkorrektheit nicht vollständig gegeben	Auswertung mehrdimensionaler Datensätze einschließlich vereinfachter Langzeitauswertung möglich, Anwendungsspektrum der Auswertungen beschränkt sich auf Experten, Analyse erfolgt lediglich anhand vorhandener Daten ohne Prognosen, Über- und Unterschreiten der Parametergrenzen führt zu unmittelbaren Warnanzeigen	Analyse der komplexen, mehrdimensionalen Zusammenhänge zwischen wirksamen Prozessparametern mittels maschinellen Lernverfahren, Abgleich von errechneten Prognosen und gemessenen Zuständen, Erstellung datengetriebener, hinreichend genauer Prozessmodelle zur Prozesssteuerung, Einflussgrößenanalyse	Datengetriebene Prozessregelkreismodelle, selbstlernende Systeme verwenden Prozessregelkreismodelle zur Regelung optimaler Prozesseinstellungen, Wissensdatenbank für Prognosebewertung zur Handlungsanweisung bzw. Steuerung eines Prozesses, kontinuierliche Optimierung mithilfe von Echtzeitinformationen
Anwendungsbeispiele	Bauteildokumentation basierend auf Zeichnungen, Prozessplanung und -steuerung durch Laufzettel, Kostenrechnung (z. B. Nachkalkulation) auf Basis der Laufzettel, manuelle Ausschussanalyse, Dokumentation des Schmelzbetriebes durch auszufüllende Tabellen, manuelle Gattierungsrechnung	Regressionsmodelle zur Qualitäts- und Ausschussanalyse, Nachkalkulation	Überwachung aller Teilprozesse: Schmelzbetrieb, Qualitätskontrolle und Formstoffsystem, Überwachung mechanischer Eigenschaften, Qualitäts-Indizes, Kennzahlen, Prozessfähigkeit	Ressourcenschonende Steuerung des Schmelzbetriebes, regressive Vorkalkulation von Produktkosten, prognosebasierte Formstoffsteuerung in Echtzeit, optimale Einstellung mechanischer Eigenschaften über anforderungsgerechte Gattierung und Schmelzkontrolle	Adaptive Formstoffsteuerung an automatischen Formanlagen, kosten- und materialeffiziente Einstellung der mechanischen Eigenschaften von Gussteilen, energieeffiziente adaptive Steuerung von Elektroschmelzöfen

Teilprozesse: Einzelprozesse wie Formen, Kernherstellen, Schmelzen etc. / Datenkonsistenz: Die Korrektheit der in einer Datenbank oder einem verteilten System gespeicherten Daten / Messung: Tätigkeiten der Erfassung von quantifizierbaren Ausprägungen von Größenwerten zu einem definierten Zeitpunkt, um festzustellen, ob spezifizierte Vorgaben erfüllt werden / Überwachung: Kontinuierliche Ermittlung/Sammlung von Ist-Zuständen eines Objekts über einen längeren Zeitraum, mit dem Ziel der Feststellung/Beurteilung, ob vorgegebene Soll-Zustände eingehalten werden / Prozesskontrolle bzw. Prozess Monitoring: Mit Prozess-Kennzahlen (z.B. Daten) mit geeigneten Bewertungs- und Analysemethoden sicherstellen, dass geplant Ergebnisse anforderungsgerecht erreicht werden / Adaptivität: Fertigungsprozesse und Prozessketten, die sich selbstständig vorgegebenen Anforderungen anpassen und optimieren / Selbstoptimierung: Ein zentrales Steuerungsprinzip adaptiver Systeme: Die klassische Prozessregelung wird um autonome Systeme ergänzt, die sich und ihre Zielgrößen selbstständig immer wieder an die aktuellen Gegebenheiten anpassen / Maschinelles Lernen: „Künstliche“ Generierung von Wissen aus Daten: Ein künstliches System lernt aus Beispielen und kann diese nach Beendigung der Lernphase verallgemeinern. Das heißt, es „erkennt“ Muster und Gesetzmäßigkeiten in den Lerndaten. So kann das System auch unbekannte Daten beurteilen / Predictive Analytics, Predictive Computing und Predictive Modeling: Mit neuronalen Netzen, Entscheidungsbäumen, Korrelationsanalysen und anderen Analyseverfahren lassen sich optimale Parameter, Prozessbedingungen und Prozessstrategien zur Steigerung der Effizienz der Fertigung und der Produktqualität ableiten und wieder in das System zurückspielen



Maschine zu Maschine Kommunikation (M2M)

Tabelle 3

Reifegrad ▶

▼ Kriterien

Standardisierte Schnittstellen und Informationsmodelle	Autarke Maschinen ohne Nutzung von Kommunikationsschnittstellen	Vernetzung von Maschinen zu einem Anlagenverbund bzw. Teilprozess	Durchgängige Vernetzung einer Prozesskette bzw. verschiedener Teilprozesse	Standortbezogene Vernetzung verschiedener Prozessketten	Standortübergreifende bzw. unternehmensübergreifende Vernetzung von Prozessketten
Automatisierung und Logistik	Nicht benötigt, da keine Kommunikation zwischen verschiedenen Maschinen stattfindet	Herstellerspezifische Schnittstellen, ein Informationsmodell wird nicht benötigt	Herstellerspezifische und zum Teil standardisierte Schnittstellen (z.B. Ethernet, Profinet oder Profibus), Sonderlösungen zur Kommunikation mit Fremdmaschinen	Standardisierte, netzwerkfähige Kommunikationsarchitektur (z.B. Ethernet, funkbasierte Lösungen wie Bluetooth, WLAN, SIM-Karten), standardisierte Schnittstellen zur Kommunikation (z.B. OPC UA) unter Einbeziehung eines standardisierten Informationsmodells (Companion Specification), Plug-and-Play	Standardisierte, netzwerkfähige Kommunikationsarchitektur (z.B. Ethernet, funkbasierte Lösungen wie Bluetooth, WLAN, SIM-Karten), standardisierte Schnittstellen zur Kommunikation (z.B. OPC UA) unter Einbeziehung standardisierter Informationsmodelle (Companion Specification), Plug-and-Play, Nutzung cloudbasierter Dienste
Prozessdatenverknüpfung und -visualisierung	Manuelle bzw. handlingsunterstützte Zu- und Abführung ohne Automatisierung, Logistik manuell bzw. mittels Flurförderfahrzeugen	Einfache Verkettung mittels Transportbändern und/oder Roboter-Logistik typischerweise mittels Flurförderfahrzeugen	Komplexe Verkettung mittels Transportbändern und Robotern, Logistik mittels Flurförderfahrzeugen, teilweise mit FTS (Fahrerlose Transportsysteme), Teilautomatisierung	Komplexe Verkettung mittels Transportbändern und Robotern, Einsatz digitaler Assistenzsysteme, Logistik mittels Flurförderfahrzeugen und/oder mittels FTS (Fahrerlose Transportsysteme), teilautomatisierte und teilautonome Logistikabläufe	Automatisierte Produktion, Einsatz digitaler Assistenzsysteme, vernetzte automatisierte und teilautonome Logistikabläufe, IT-assistierte Supply-Chain-Management
Sicherheit	Nicht benötigt, da keine Kommunikation zwischen verschiedenen Maschinen stattfindet, Datenvisualisierung direkt am Bedienpanel der Maschine	Datenvisualisierung direkt am Bedienpanel der Maschine und/oder Andon-Tafel	Datenvisualisierung an zentralem Bedienpanel der Maschine, zusätzliche Andon-Tafel, ggf. Anbindung an Intranet zur Bereitstellung von Betriebs- und Prozessdaten	Datenvisualisierung an (de-)zentralem Leitstand, zusätzliche Andon-Tafel, Anbindung an Intranet zur Bereitstellung von Betriebs-, Prozess- und Logistikdaten, Visualisierung auch in der Office-Ebene erreichbar	Standortübergreifende Datenvisualisierung an (de-)zentralen Leitständen, Anbindung an Intranet, Internet und Cloud-Dienste zur Bereitstellung von Betriebs-, Prozess- und Logistikdaten, Visualisierung auch in der Office-Ebene (z.B. webbasiert) erreichbar
Anwendungsbeispiele	Schutz gegenüber Zugriff durch Dritte direkt an der Maschine, Schutz von Einstellparametern durch EKS-/Passwortschutz	Schutz gegenüber Zugriff durch Dritte direkt an der Maschine, Schutz von Einstellparametern durch EKS-/Passwortschutz, Datensicherung	Schutz ggü. Zugriff durch Dritte direkt an der Maschine sowie über das Intranet, Schutz von Einstellparametern durch EKS-/Passwortschutz, Datensicherung/Firewall	Umfangreiche Absicherung erforderlich, besondere Absicherung von Fertigungs- und Officenetzwerken, Trennung von Fertigungsbereichen sowie Intra- und Internet durch Firewalls und demilitarisierte Zonen (DMZ), hierarchisch abhängiger Schutz ggü. Zugriff von Unbefugten mittels EKS-/Passwortschutz für den Zugriff auf den Prozess/Anlagenbestandteile	Umfangreiche Absicherung erforderlich, besondere Absicherung von Fertigungs- und Officenetzwerken, Trennung von Fertigungsbereichen sowie Intra- und Internet durch Firewalls und demilitarisierte Zonen (DMZ), hierarchisch abhängiger Schutz ggü. Zugriff von Unbefugten mittels EKS-/Passwortschutz für den Zugriff auf den Prozess/Anlagenbestandteile, Absicherung der standort-/unternehmensübergreifenden Kommunikation, Sicherheitsüberprüfung von Cloud-Dienstleistern
	Einzelmaschine z.B. für Einzelfertigung, Kleinstserien, Prototypenfertigung/Ausbildung	Kleinstserien-Fertigung, Einzelfertigung	Gießlinie incl. Schmelzerei, Kernfertigung und Gussnachbehandlung	Gesamte Fertigungshalle bzw. kompletter Betrieb	Unterschiedliche Fertigungsstandorte bzw. Unternehmen, die in einer Lieferantenbeziehung zueinander stehen

IEC: International Electrotechnical Commission / SOA: Serviceorientierte Architektur (englisch service-oriented architecture) / Andon: Visuelle Methode zur Anzeige des aktuellen Betriebszustands einer Anlage bzw. Produktionslinie / FTS: Fahrerloses Transportsystem / EKS: Electronic-Key-System / OPC UA: Open Platform Communications Unified Architecture, ein industrielles M2M-Kommunikationsprotokoll mit der Fähigkeit, Maschinendaten zu transportieren und maschinenlesbar semantisch zu beschreiben



Prozessautomatisierung durch Robotereinsatz



Tabelle 4

Reifegrad ▶

▼ Kriterien

Programmierung und Validierung	Robotereinzelanwendung	Zusammenarbeit mehrerer Robotereinzelanwendungen	Integrierte Roboteranwendung	Kooperative Interaktion Mensch-Roboter	Kollaborative Interaktion Mensch-Roboter
Kommunikation Input-Output	Keine Kommunikation – starres System	Bauteilabfragen (Bauteil vorhanden Y/N)	Bauteilabfragen und Übergeben der Bauteil-ID	Bauteilabfragen mit integrierter Bauteilprüfung	Permanenter Abgleich des digitalen Bauteilzwillings – auf Basis von Echtzeitmessungen
Sensorik/technische Intelligenz	Keine Berücksichtigung von Prozessereignissen	Zeitliche ausprogrammierte Kooperation mittels Signalaustausch	Ereignisbasierte Kooperation, Roboter reagieren auf Ereignisse	Ergebnisbasierte Kooperation, Roboter reagieren auf Ereignisse und auf menschliche Interaktion	Selbstregulierendes System bezüglich Aufgabenverteilung und Auslastung
Sicherheit	Schutz ggü. Zugriff durch Dritte direkt an der Maschine, Schutz von Einstellparametern durch EKS-/Passwortschutz	Schutz ggü. Zugriff durch Dritte direkt an der Maschine, Schutz von Einstellparametern durch EKS-/Passwortschutz	Schutz ggü. Zugriff durch Dritte direkt an der Maschine sowie über das Intranet, Schutz von Einstellparametern durch EKS-/Passwortschutz	Umfangreiche Absicherung von Fertigungs- und Officenetzwerken, Trennung von Fertigungsbereichen sowie Intra- und Internet durch Firewalls und demilitarisierte Zonen (DMZ), hierarchisch abhängiger Schutz ggü. Zugriff von Unbefugten mittels EKS-/Passwortschutz	Umfangreiche Absicherung von Fertigungs- und Officenetzwerken, Trennung von Fertigungsbereichen sowie Intra- und Internet durch Firewalls und demilitarisierte Zonen (DMZ), hierarchisch abhängiger Schutz ggü. Zugriff von Unbefugten mittels EKS-/Passwortschutz
Standardisierte Schnittstellen und Interfaces	OPC UA-Schnittstelle Roboter und SPS, Standard-Roboter-Dashboard	OPC UA-Schnittstelle Roboter und SPS, bedarfsgerechte Dashboards abhängig von der Anzahl und Komplexität der Anwendung	OPC UA-Schnittstelle Roboter und SPS, individualisierbare Roboter-Dashboards	OPC UA-Schnittstelle Roboter und SPS, spezifische Dashboards zur Unterstützung der Mensch-Roboter-Interaktion; Interaktion von Interfaces in Drittanwendungen	OPC UA-Schnittstelle Roboter und SPS, spezifische Dashboards zur Bewertung der Mensch-Roboter-Interaktion
Wartung	Mechanik-, Software-, Prozess-Experten vor Ort, in festgelegten Wartungsintervallen	Fernwartung/-diagnose durch Experten	Verschleißabhängige Wartung durch Messung der tatsächlichen Nutzung	Prädiktive Wartung, (z.B. Verschleißerkennung anhand der Messung der Motorströme), Selbstdiagnose	Prädiktive Wartung, (z.B. Verschleißerkennung anhand der Messung der Motorströme), Selbstdiagnose, automatisierter Prozess zur Disposition von Ersatzteilen und zur Bestellung von Wartungspersonal
Mitarbeiter zur Instandhaltung und Anlagenbetreuung	Roboter-Experte, SPS-Experte	Roboter- oder Prozess-Experte	Prozess-Experte	Systemführer	Anlagenbediener
Anwendungsbeispiele	Bauteile liegen statisch exakt bereit, komplett vorgebene Abläufe; Roboter führt einfache Bewegungsabläufe durch (z. B. Entnahme und Ablage)	Bauteile können auch aus ungeordneter Lage gegriffen werden; direkte Bauteilübergabe zwischen Robotern; Roboter führen gemeinsam Bearbeitungsvorgänge aus. (z.B. Rohteilbearbeitung)	Unterschiedliche Bauteile können auch aus ungeordneter Lage gegriffen werden; Anpassung der Bewegung auf Basis von Inline-Qualitätsprüfungen und externen Sensor-/Prozessdaten innerhalb gegebener Vorgaben (z.B. Schichten von Kokillen)	Kontrollieren des kompletten Produktionsschrittes mit Ergebnisaus-/bewertung und Ableitung von Maßnahmen; teilautonome Anpassung der Bewegung auf Basis von Inline-Qualitätsprüfungen und externen Sensor-/Prozessdaten (z.B. Entgraten von Sandkernen)	Automatische Adaption des Gesamtsystems bei Änderung der Produktcharge/-typ, mit Ziel Losgröße 1; Assistenz für den Menschen durch Übernahme stark belastender Tätigkeiten ohne Schutzzaun (z.B. Heben schwerer Lasten); orts- und aufgabenflexibler Einsatz des Roboters

EKS: Electronic-Key-System / OPC UA: Open Platform Communications Unified Architecture, ein industrielles M2M-Kommunikationsprotokoll mit der Fähigkeit, Maschinendaten zu transportieren und maschinenlesbar semantisch zu beschreiben / DMZ: demilitarisierte Zone, Abtrennung von Anlagennetz und Drittnetzen / SPS: speicherprogrammierbare Steuerung, dient der Steuerung und Regelung von Anlagen und Maschinen

Flexible Produktion, flexible Produktionsmittel

Tabelle 5

Reifegrad ▶

▼ Kriterien

	Kostenoptimierte Großserienfertigung	Kostenoptimierte Fertigung von Produktvarianten in großen Losgrößen	Abruforientierte Fertigung in mittleren Losgrößen mit optimierten Rüstoperationen	Kostenoptimierte Fertigung von kleinsten Losgrößen (< 50)	Kostenoptimierte Fertigung von einzelnen, individuellen Produkten (Losgröße 1)
Produktidentifikation und Rückverfolgung	Produktidentifikation über Gießdatum mit	Traceability (Rückverfolgbarkeit): Verknüpfung von Produktlosen Prozessdaten	Traceability auf Einzelproduktebene über Data Matrix Code, Logistikinformation auf Ladungsträgerebene, Scannen von Ladungsträgern	Logistikinformation auf Produktebene, Verknüpfung von Einzelprodukt mit Ladungsträger	Produkt ist selbst Datenträger und kann individuell mit anderen Teilnehmern kommunizieren, RFID-Chip
Gießprozesse	Prozessfokus auf hohem Durchsatz pro Zeiteinheit, kein/wenig Rüsten der Einzelanlagen	Prozessfokus auf hohem Durchsatz pro Zeiteinheit, kein/wenig Rüsten der Einzelanlagen	Prozessfokus auf Flexibilität und robuste (schwankungstolerante) Prozesse, systematische Optimierung, Rüstorganisation von Gießanlagen/Werkzeugen/Peripherie entlang der Wertschöpfungskette	Rüsten inkl. Legierungswechsel im einstelligen Minutenbereich, Beispiel: Basiseisen mit Pfannenlegierung	Next Generation, individuelle Einzelfertigung in Serienfertigungsgeschwindigkeit
Produktionsanlagen	Mechanisierung bekannter Fertigungsverfahren (z.B. Formmaschine), Verkettung: mechanische Verbindung von Anlagenbereichen zu einer Formanlage	Automatisierung: Schaffung lokaler Regelkreise, z.B. vorbeugende Sandsteuerung, sehr effiziente Fertigungslinien für ähnliche Produkte und deren Handling	Sehr effiziente Fertigungslinien für unterschiedliche Produkte mit ähnlichen Prozessen, Produktionsleitstände zur zentralen Überwachung aller lokalen Fertigungsanlagen	Vernetzung: Verbindung von Fertigungsanlagen im Wertstrom durch automatisierte, flexible Transportsysteme, M2M-Fähigkeit (Maschine-to-Maschine), Fabrik-Leitstände für Anlagen- und Logistiksteuerung	Sehr effiziente Kombination spezialisierter Einzelanlagen zu virtuellen Großanlagen für breitestes Produktspektrum
Produktionssystem	Werkstattfertigung: Planungsfokus auf optimaler Formmaschinennutzung, zusätzlicher Planungsfokus auf Bestandsminimierung	BDE + MDE komplett umgesetzt	Integration von Kunden- und Lieferanten-Planungstools, wertstromorientierte Produktionsorganisation, Fokus auf Fluss- und Bedarfskonformität	MES: Vollintegriertes Planungssystem für Produkte/Anlagen/Lager/Werkzeuge/Mensch mit Rückmeldefähigkeit	Big-Data-Analytikkompetenz (Mustererkennung, Prognosefähigkeit), Steuerung der Werkstoffeigenschaften
Mitarbeiter	Entlastung von körperlicher Arbeit, Handlingsaufgaben, Prozessüberwachung statt Qualitätsüberwachung	Automation in der Produktion durch Roboter, Automationsüberwachung statt Prozessüberwachung	Hohe Kompetenz zur Lösung komplexer IT-/technischer Abläufe, Informationsarbeit	Vernetzungsarbeit, Algorithmenarbeit	Algorithmenüberwachung statt Automationsüberwachung
Führung	Geringe Reaktionsgeschwindigkeit notwendig	Change Management: Implikationen für Gesellschaft und Unternehmen vermitteln	Industrie 4.0-Bewusstsein, Wandel Kundenbedürfnisse, technologische Chancen, Industrie 4.0-Strategie „Digitalisierung als Enabler“	System zur konsequenten Überwachung des Nutzens	Industrie 4.0-Nutzen klar definieren: Wachstum, Kundennähe, Durchlaufzeit, Auslastung, Verfügbarkeit, Qualität und Zuverlässigkeit, Verbesserungsfähigkeit
Qualität	Ausschussaufnahme vor Ort	Ausschussaufnahme zentral mit Fehleranalyse	Ausschussaufnahme zentral mit Fehleranalyse und PDCA-Maßnahmen	Ausschussaufnahme zentral (Big Data), robuste Prozesse in der Fertigung und teilweise selbstregelnde Qualitätskreise	Selbstregelnde Qualitätskreise, reaktiv-präskriptiv-prädiktiv, prozesssichere Qualität, nur noch Stichprobenprüfung der Prozesse
Anwendungsbeispiele	Genormte Gussprodukte, die keinem großen Wandel unterliegen	Genormte Gussprodukte, mit wenig Wandel und hohen Stückzahlen	Großserien mit hohem Wandel und hohen Anforderungen	Mittlere Serien mit permanenten Änderungen und sehr hohen Anforderungen	Permanente Neuentwicklungen mit Anforderung Stückzahl 1



CAX-Technologien (computer-aided)



Tabelle 6

Reifegrad ▶

▼ Kriterien

	Kein Einsatz von CAX-Methoden	CAX-Basismethoden	Vernetzte CAX-Anwendungen	Integrierte CAX-Anwendungen	Durchgehende Wertschöpfungskette mit Datenkompatibilität über Organisationsgrenzen mit Einbindung von Kunden und Lieferanten – SE Digitaler Zwilling.
Systemmerkmale	Bauteildokumentation meist zeichnungsbasiert; hoher Dokumentationsaufwand bei Bauteiländerungen	Die CAX-Nutzung beschränkt sich auf Einzelanwendungen ohne Datenaustausch zwischen den Einzelsystemen (Inselanwendungen) z. B. CAD und CAM	Verknüpfung von CAX-Methoden für Auslegung von Produkten, Werkstoffen, Prozessen	Simultane Zusammenarbeit auf virtueller Plattform schafft Transparenz über Designstatus und Parallelaktivitäten; durchgängiges PLM (Product-Lifecycle-Management)	Komplette CAX-Prozesskette über Schnittstellen hinweg, Cross-funktionale Vernetzung von der Konstruktion bis zum fertigen Produkt über Organisationsgrenzen
Prozessentwicklung mit numerischen Methoden	Erfahrungsbasierte Prozessentwicklung ohne Nutzung von CAX-Methoden	Nutzung der Simulation von Teilprozessen (z. B. Gießsimulation, Kernschießsimulation) zur Optimierung	Ganzheitliche Anwendung von Simulationswerkzeugen zur Prozessentwicklung (z. B. integrierte Simulation von Gießprozessen mit Wärmebehandlung)	Nutzung von Onlinedaten für Prozesssimulation; durchgängige Verwendung digitaler Versuchsmodelle für eine simulationsbasierte Entwicklung des Fertigungsprozesses; systematische Validierung von Berechnungsmodellen	Realisierung der CAX-Prozesskette ohne Medienbrüche unter Einbindung von Daten aus dem gesamten Lebenszyklus der Produkte
Produktentwicklung mit numerischen Methoden	Erfahrungsbasierte Produktentwicklung oftmals angelehnt an Referenzteile	Nutzung von CAD-Tools zur grafischen/interaktiven Erzeugung von 3-D-Modellen	Nutzung der Ergebnisse aus der Simulation zur Produktentwicklung, z.B. Festigkeitsauslegung, Topologieoptimierung, Lebensdauerabschätzung	Nutzung von Betriebsdaten in der Prozesssimulation; Integration von Produktentwicklung und Prozessentwicklung	Realisierung der CAX-Prozesskette ohne Medienbrüche unter Einbringung von Daten aus dem gesamten Lebenszyklus der Produkte
Werkstofftechnologie (beinhaltet Werkstoffauswahl, Werkstoffdaten für Konstruktion und Simulation, Anpassung von Analysengrenzen, Beschaffung, Compliance, QS, Optimierung von Eigenschaften)	Erfahrungsbasierte Werkstofftechnologie unter Nutzung von Normwerten	Nutzung von Werkstoffdatenbanken mit Schnittstellen zu CAD-Systemen	Nutzung von spezifischen Materialkarten in der FEM Simulation, Berücksichtigung von lokalen Bauteilfestigkeiten und Gefügeinhomogenitäten wie Seigerungen	Systematische Anpassung/Optimierung von Legierungen unter Berücksichtigung von lokalen Anforderungen sowie Prozessen innerhalb der möglichen Analysenspannen (ICME: Integrated Computational Materials Engineering) und Integration digitaler	Konsequente Integration von Werkstoffmodellen in den Digitalen Zwilling.
Mitarbeiter	Keine CAX-Kompetenzen vorhanden	Anwenderspektrum beschränkt sich auf Experten	Entsprechend ausgebildete Mitarbeiter können sich im CAX-Umfeld sicher bewegen	Assistenz- und Visualisierungssysteme ermöglichen die Einbeziehung breiter Anwendergruppen ohne spezifische Ausbildung	Digitale, interaktive Lernformate ermöglichen eine individuelle und effiziente Gestaltung von Lernprozessen
Anwendungsbeispiele	Keine Nutzung von CAX-Methoden	+ Nutzung von CAD-Tools zur Erzeugung von 3-D-Modellen + 3-D-Daten-basierte Herstellung von Gießwerkzeugen (CAM) auf CNC-Maschinen + optische 3-D-Messtechnik für vollflächige Bauteilmessungen und Vergleich mit 3-D-Daten + Werkstoffauswahl auf Basis von Referenzdatenbanken und Richtlinien + Nutzung einfacher Erstarrungssimulationen	+ Optische 3-D-Messtechnik zur Erstellung von Datenmodellen (Reverse Engineering) + Berücksichtigung der Bauteilprüfbarkeit mit Festlegung von Prüfmethode bereits in der Konstruktionsphase + integrierte Simulation von Gießprozessen mit Wärmebehandlung + Nutzung von Werkstoffdatenbanken zur Bauteilauslegung und Prozesssimulation	+ Integration von DFMA, Topologieoptimierung, Prozess- und Werkstoffoptimierung + Nutzung von ZfP-Ergebnissen zur Ableitung lokaler Bauteilfestigkeiten und darauf basierender Bauteilauslegung und Lebensdauerabschätzung	+ Virtuelle Produkt- und Prozessentwicklung auf Basis Digitaler Zwillinge + Vernetzte Zusammenarbeit mit Kunden und Lieferanten + ganzheitliches digitales Life-cycle Management bis zum Ende des Lebenszyklus

2. Auflage, Stand 11/2018

DFMA = Design For Manufacturing + Assembly, dt. Kombination von zwei Methoden: Design for Manufacture, d. h. das Design für die einfache Herstellung der Teile, die ein Produkt bilden, und Design for Assembly, d. h. das Design des Produkts für die einfache Montage / ZfP = Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung / CAX = Computer-aided x = computergestützt / DMU = Digital Mock-Up = digitales Versuchsmodell / CAD: Computer-aided Design / CAQ: Computer-aided Quality / CAM: Computer-aided Manufacturing / PPS: Produktionsplanung und -steuerung / BDE: Betriebsdatenerfassung / CAE: Computer-aided Engineering / FEM: Finite-Elemente-Methoden / CNC: Computerized Numerical Control



Tabelle 7

Reifegrad ▶

▼ Kriterien

	Empirische Produktentwicklung	Systematische Produktentwicklung	Vernetzte Produktentwicklung	Integrierte Produktentwicklung	Virtuelle Produktentwicklung
Prozessbeschreibung	Kein dokumentierter eigenständiger Entwicklungsprozess, Produkte werden vom Kunden vordefiniert, Entwicklungstätigkeiten sind beispielsweise als Inseln in Arbeitsvorbereitung und Qualitätstelle angesiedelt. Berücksichtigung vorgegebener Lastenhefte.	3-D-CAD-Konstruktion, Einbauuntersuchung, Kollisionsprüfung, Toleranzanalyse, einfache Funktionssimulation (FE-Analyse), methodische rechnergestützte Produktgestaltung auf Basis von Normen/Richtlinien	Digital Mock-up (Digitale Attrappe), 3-D-CAD + Verhaltens-/ Funktionssimulation, Lebensdauerabschätzung, systematische rechnergestützte Analyse von Anforderungsprofilen (Lastfälle), Risiken (FMEA) und Gestalvarianten zur Optimierung der Funktion und Lebensdauer des Produkts	Virtuelle Prototypen, DMU + Ergonomiesimulation, HW-/SW-Simulation, Prozesssimulation, methodische Einbindung von Ergebnissen der Prozesssimulation in die Funktions- und Lebensanalyse des Produkts (bspw. Übertragung lokaler mechanischer Eigenschaften aus dem virtuellen Gießprozess in FE-Analyse), Berücksichtigung der ZfP- Prüfbarkeit in der Konstruktionsphase	Digitale Einbindungen von Kunden und Zulieferern zur gemeinsamen Bearbeitung eines virtuellen Produkts. Durchgehende Wertschöpfungskette mit Datenkompatibilität - über Organisationsgrenzen mit Einbindung von Kunden und Lieferanten.
Geometrieentwicklung mit CAx Werkzeugen	Erfahrungsbasierte Produktentwicklung oftmals angelehnt an Referenzteile, 2-D-CAD-Konstruktion, werkstatorientierte Produktgestaltung auf Basis von Normen/Richtlinien und Erfahrungswerten	Nutzung von CAD-Tools zur grafischen/interaktiven Erzeugung von 3-D-Modellen, Einbauuntersuchung, Kollisionsprüfung, Toleranzanalyse, einfache Funktionssimulation (FE-Analyse), methodische rechnergestützte Produktgestaltung auf Basis von Normen/Richtlinien. Nutzung der Simulation von Teilprozessen (z.B. Gießsimulation, Kernschießsimulation) zur Optimierung.	Nutzung der Ergebnisse aus der Simulation zur Produktentwicklung, z.B. Festigkeitsauslegung, Topologieoptimierung, Lebensdauerabschätzung. Ganzheitliche Anwendung von Simulationswerkzeugen zur Prozessentwicklung (z.B. integrierte Simulation von Gießprozessen mit Wärmebehandlung).	Nutzung von Betriebsdaten in der Simulation; Integration von Produktentwicklung und Prozessentwicklung (z.B. Integration von DFMA, Topologieoptimierung, Prozess- und Werkstoffoptimierung). Berücksichtigung der ZfP-Prüfbarkeit in der Konstruktionsphase. Product-Life-Cycle-Management-Systemen (PLM).	Realisierung der CAx-Prozesskette ohne Medienbrüche unter Einbindung von Daten aus dem gesamten Lebenszyklus der Produkte, z.B. Verfolgung der Belastungskollektive über die Lebensdauer bis zur Entsorgung. Cross-funktionale Vernetzung von der Konstruktion bis zum fertigen Produkt über Organisationsgrenzen.
Werkstofftechnologie (beinhaltet Werkstoffauswahl, Werkstoffdaten für Konstruktion und Simulation, Anpassung von Analysengrenzen, Beschaffung, Compliance, QS, Optimierung von Eigenschaften)	Erfahrungsbasierte Werkstofftechnologie unter Nutzung von Normwerten	Nutzung von Werkstoffdatenbanken mit Schnittstellen zu CAD Systemen	Systematische Bewertung, Dokumentation und Ableitung spezifischer Gestaltungsrichtlinien aus Erfahrungen und Variantenuntersuchungen. Nutzung der Produkt- und Baugruppenstruktur als Träger von Informationen und Wissen.	Systematische Anpassung/Optimierung von Legierungen (unter Berücksichtigung von lokalen Anforderungen) und Prozessen innerhalb der möglichen Analysenspannen (ICME Integrated Computational Materials Engineering) und Integration digitaler Werkstoffmodelle in die PLM Landschaft. Integration von Werkstoff-, Geometrie- und Prozessmodellen - Berücksichtigung der Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften	Konsequente Integration von Werkstoffmodellen in die virtuellen Produkte. Übertragung von Werkstoffdaten und Modellen von und zu Kunden und Lieferanten. Berücksichtigung von Compliance Anforderungen, z.B. Reach, ROHS, etc.
Wissensmanagement	Lokale Dokumentation praktischer Erfahrungswerte, z.B. in Reklamationsberichten	Einfache Dokumentation von Erfahrungen/Wissen (bspw. CAD Designrichtlinien oder Exceltabellen für Produktgruppen).	Systematische Bewertung, Dokumentation und Ableitung spezifischer Gestaltungsrichtlinien aus Erfahrungen und Variantenuntersuchungen. Nutzung der Produkt- und Baugruppenstruktur als Träger von Informationen und Wissen.	Methodische Einbindung von virtuellen Erkenntnissen zur Produktqualität aus dem Herstellprozess, Ableitung von Korrelationen Herstellung – Funktion. Überführung statistisch abgesicherter Korrelationen in mathematische Methoden und Modelle	Systemgestützte und systematische Verknüpfung von Daten, Modellen und Wissen sowie Einbindung von Wissen über Organisationsgrenzen hinaus.
Anwendungsbeispiele	Gestaltung und Anpassung von Gusskonstruktionen auf Basis von undokumentiertem Erfahrungswissen (Expertentum) und Handskizzen ohne digitale Dokumentation	Entwicklung eines neuen Gussstücks auf Basis von dokumentierten Vergleichsprodukten sowie durch manuellen, iterativen Aufbau und Analyse von Varianten (Angusspositionen, Speiserkonfigurationen, usw.), Umsetzung und Auswahl der besten geometrischen Lösung erfolgt in CAD	Gussprodukte sowie gießtechnische Elemente werden durchgängig im CAD aufbereitet, Simulationstools zur Vorhersage der Produktfunktion und der Prozessqualität gehören zum Standard, ein Informationsaustausch zwischen Produkt- und Prozessentwicklung findet statt, Geometrievarianten werden systematisch aufbereitet, automatisiert abgearbeitet und	Die Entwicklung eines neuen Gussstücks erfolgt virtuell unter Nutzung von CAD, Funktions- und Prozesssimulation sowie Lebensdauer vorhersagen, Randbedingungen der zerstörungsfreien Prüfung (Ultraschall- oder Röntgen) sowie prozessbedingte Schwankungen der Fertigungsparameter wie Schmelztemperatur oder Wärmebehandlungsparameter werden systematisch virtuell hinsichtlich ihres Einflusses auf die	Das Gussstück wird als rein virtuelles Produkt - über Organisationsgrenzen hinweg entwickelt. Die Einbindung von Big Data aus der realen zerstörungsfreien Qualitätsprüfung sowie aus Betriebsdaten in der Anwendung erfolgt systematisch.

FMEA: Failure Mode and Effects Analysis, dt. „Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse“ / DoE: Design of Experiment, dt. statistische Versuchsplanung / DMU: Digital Mock-Up, dt. Digitales Versuchsmodell (D-VM) / HW: Hardware / SW: Software / VP: virtuelle Produktentwicklung / PLM: Product-Lifecycle-Management, dt. Produktlebenszyklusmanagement / Frontloading: möglichst frühzeitige Bewältigung von Entwicklungsaufgaben und Absicherung von Produkt- funktionen durch virtuelle Hilfsmittel / ZfP: zerstörungsfreie Bauteilprüfung / VR: Virtual Reality / AR: Augmented Reality, dt. erweiterte Realität, beschreibt die computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung / MDO: Multi Disciplinary Objectives, dt. multidisziplinäre Optimierung, beschreibt den Einsatz virtueller Optimierungsmethoden für komplexe Fragestellungen hinsichtlich Design und Funktion / FKM: Forschungskuratorium Maschinenbau / DNV GL: Det Norske Veritas - Germanischer Lloyd



Tabelle 8

Reifegrad ▶

▼ Kriterien

	Ereignisbasierte Entwicklung und Optimierung von Prozessen	Strukturierte Prozessentwicklung auf Basis von Abhängigkeiten unterschiedlicher Parameter	Standardisierte Prozessoptimierung auf Basis von Korrelationsanalysen ausgewählter Prozessdaten	Geplante Simulationsgestützte Prozessentwicklung	Selbstoptimierende Prozessentwicklung auf Basis virtueller Varianten
Prozessbeschreibung	Werkstatorientierte Prozessgestaltung auf Basis von Erfahrungswissen, Normen/Richtlinien und Best-Practice	Stufe der Daten und Informationen, Layoutplanung, einfache Prozesssimulation (Excel), intelligent verteilte Betriebsdatenerfassung und Aufbereitung produktionsrelevanter Informationen - Einsatz einfacher Produktionssysteme	Stufe der Aktivitäten und Produktionsabläufe, Digital Mock-up (Digitale Attrappe), Verhaltens-/Funktionssimulation des Prozessablaufs, Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse, systematische rechnergestützte Analyse von Betriebsdaten, Anforderungsprofilen, Risiken (FMEA) und Prozessvarianten zur Optimierung der Arbeitsabläufe der Produktfertigung	Stufe der Modelle und Simulationen, Virtuelle Prototypen, DMU + Ergonomiesimulation, HW-/SW-Simulation, Material-/Informationsfluss-Simulation, virtuelle Prozessoptimierung, Verknüpfung der Informationen aus der operativen Produktion mit den intelligenten Modellen der Digitalen Fabrik	Stufe der autonomen Handlungen, Virtuelle Prozessentwicklung, VP + Kopplung mit Entwicklungs- und Produktionsprozess, Kopplung von Predictive Analytics und optimierten virtuellen Prozessbedingungen, rechnergestützte Kopplung von Funktions- bzw. Verhaltens- und Prozesssimulationen in einem manuellen oder autonomen Optimierungsprozess (selbstständiger Eingriff in die digitale Steuerung des Prozesses auf Basis von Entscheidungsmustern)
Werkzeuge/Methoden	Kein/kaum Einsatz von Prozessplanungsmethoden	BDE/MDE-Basismethode, methodische Prozess- und Logistikplanung, 2-D-CAD, Einsatz statistischer Analysemethoden und systematischer Optimierung (DoE)	PLM/CRM-Anwendungen, CAP (Computer Aided Planning)-Anwendungen/3-D-CAD Wertstromdesign, systematischer Einsatz statistischer Optimierungsmethoden (Design for Six Sigma) Auswahl und Priorisierung relevanter Prozessdaten	MES-Anwendungen, Einsatz von Virtual und Augmented Reality-(VR/AR) Technologien, methodischer Einsatz digitaler Wertstromanalyse und Lean-Production Management (TPM), methodischer Einsatz zerstörungsfreier Prüfmethoden im Prozessablauf (ZfP)	TQM-Anwendungen, prozessinherente systematische ZiP (online/ Echtzeit) gekoppelt an Big Data-Systeme und Predictive Analytics, Big Data-Systeme mit automatisierter Datenerfassung und Predictive Analytics, Smart Manufacturing – selbst-kommunizierende Maschinen, Produkte, Logistik (M2M/H2M)
Risikomanagement	Wenig systematische Analyse potenzieller Risiken bezüglich Qualität oder Wirtschaftlichkeit des Prozesses	Einfache Risikobewertungsmethoden (Excel) und systematische Änderungsdokumentation (Prozessdatenblätter)	Methodische Risikobewertung (Prozess-FMEA) eingebunden in Änderungsmanagement	Anwendung von DFMA-Methoden gekoppelt mit Produktlebenszyklus, gesamter Fertigungs-/Logistikette und methodischem Verbesserungsmanagement	Gekoppeltes Innovations- und Risikomanagement, kontinuierliche Bewertung der Optimierung auf Wiederholbarkeit (SPC), Qualität, Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz
Wissensmanagement	Minimale Dokumentation praktischer Erfahrungswerte	Einfache Dokumentation von Erfahrungen/Wissen (bspw. Prozesseinstellungen und Qualitätsinformationen für Produkte)	Systematische Bewertung, Dokumentation und Ableitung spezifischer Gestaltungsrichtlinien aus den Variantenuntersuchungen – Einsatz Frontloading	Methodische Einbindung von virtuellen Erkenntnissen zur Produktqualität aus dem Herstellprozess, Ableitung von Korrelationen Herstellung – Funktion	Überführung statistisch abgesicherter Korrelationen in mathematische Methoden und Modelle (selbstkorrigierende Produktionseinheiten) zur autonomen Prozesssteuerung
Anwendungsbeispiele	Die Auslegung und Optimierung von Gießprozessen erfolgt auf Basis von undokumentiertem Erfahrungswissen (Expertentum), weitestgehend ohne digitale Dokumentation, manuelle Anpassungen des Prozesses werden vielfach durch Produkt- oder Prozessabweichungen ausgelöst, Optimierungen des Prozesses erfolgen meist regellos, d.h. ohne dokumentierte Kenntnis zu Korrelationen	Die Entwicklung eines neuen Gießprozesses erfolgt auf Basis von dokumentierten Vergleichsprozessen bzw. definierten Standards und Leistungsbeschreibungen, die Umsetzung erfolgt teilweise in CAD (bspw. Werkzeuge), Prozesslayout und -abläufe werden weitestgehend manuell mit Handskizzen dokumentiert, es gibt einen dokumentierten Ablauf für Optimierungen und Änderungen	Die Prozessauslegung erfolgt im CAD-Prozesslayout, Workflows, Betriebsmittel und Anlagen liegen einzeln oder als Zusammenbauten vor, Simulationstools zur Vorhersage der Prozessqualität sowie einzelner detaillierter Prozessabläufe gehören zum Standard, ein Informationsaustausch zwischen Produkt- und Prozessentwicklung findet statt, Einflüsse von Prozessabweichungen werden systematisch aufbereitet, automatisiert abgearbeitet und methodisch ausgewertet	Die Prozessgestaltung erfolgt weitestgehend virtuell unter Nutzung von CAD, Ablauf-, Funktions- und Prozesssimulation sowie frühzeitiger Einbindung zerstörungsfreier Prüfmethoden, Prozessschwankungen werden systematisch virtuell hinsichtlich ihres Einflusses auf die Lebensdauer des Produktes sowie die Qualität und Performance des Herstellprozesses in der Entwicklungsphase bewertet	Prozessauslegung unter Zuhilfenahme von VR auf nahezu rein virtueller Basis, die frühzeitige und verlässliche Vorhersage der Prozessqualität und -performance sowie die Kopplung und die Vorhersage von Produktqualität und Lebensdauer erfolgen mittels eines digitalen Zwillinges. Die Einbindung von Big Data aus vergleichbaren Prozessen erfolgt systematisch über statistische Modellbildung (digitaler Schatten)

FMEA: Failure Mode and Effects Analysis, dt. „Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse“ / DoE: Design of Experiment, dt. statistische Versuchsplanung / DMU: Digital Mock-Up, dt. Digitales Versuchsmodell (D-VM) / HW: Hardware / SW: Software / VP: virtuelle Produktentwicklung / MES: Manufacturing Execution System, dt. Fertigungsmanagementsystem (Produktionsleitsystem) / DFMA: Frontloading, möglichst frühzeitige Bewältigung von Entwicklungsaufgaben und Absicherung von Produktfunktionen durch virtuelle Hilfsmittel / ZfP: zerstörungsfreie Bauteilprüfung / VR: Virtual Reality / AR: Augmented Reality, dt. erweiterte Realität beschreibt die computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung / TPM: Total Productive Maintenance bzw. Manufacturing, dt. im Sinne eines umfassenden Produktionssystems / DFMA: Design for Manufacturing and Assembly, dt. Kombination von zwei Methoden: Design for Manufacture, d. h. das Design für die einfache Herstellung der Teile, die ein Produkt bilden, und Design for Assembly, d. h. das Design des Produkts für die einfache Montage / TQM: Total Quality Management, dt. umfassendes Qualitätsmanagement, bezeichnet die durchgängige, fortwährende und alle Bereiche einer Organisation (Unternehmen, Institution etc.) erfassende, aufzeichnende, sichtende, organisierende und kontrollierende Tätigkeit, die dazu dient, Qualität als Systemziel einzuführen und dauerhaft zu garantieren / M2M-/H2M-Kommunikation: Machine to Machine bzw. Human to Machine



Informations- und Kommunikationsstruktur



Tabelle 9

Reifegrad ▶

▼ Kriterien

Kriterien	Standardanwendungen der Information und Kommunikation (I&K)	I&K überwiegend mittels digitaler Anwendungen	I&K ausschließlich über digitale Anwendungen	I&K ausschließlich über digitale Anwendungen mit erweiterten Funktionalitäten	Ganzheitlich digitale I&K in Echtzeit
Interne Kommunikation u. Datenaustausch in die Produktion	Verbale Kommunikation, z.B. Benachrichtigung von Gruppensprecher und Fertigungsleiter über aktuelle Fahrweisen etc. in Besprechungen und Bereitstellung der notwendigen Daten in Papierform	Bereitstellung der notwendigen Daten auf abteilungsinternen Laufwerken, Informationen über Arbeitsanweisungen und Prozesse werden auf Datenbanken bereitgestellt	Informationen werden über MES-Systeme bereitgestellt, Informationen aus der Produktion fließen über BDE- und MES-Systeme ins ERP-System zurück	Zusätzliche Bereitstellung von Informationen auf Dashboards und Tablets	Informationen werden unmittelbar auf Datenbrillen/Wearables eingeblendet, Zugriff auf alle arbeitsrelevanten Daten zu jeder Zeit und an jedem Ort, Nutzung von Augmented Reality zur Werkerführung im Bereich Instandhaltung und Produktion
Externe Kommunikation	Kommunikation per Telefon und E-Mail	Kommunikation per Telefon- und Videokonferenzsystemen und IP-Telefonie	Kommunikation per Videokonferenzen, IP-Telefonie, Instant-Messaging und Screen-Sharing auch auf mobilen Geräten möglich	Kommunikation per Videokonferenzen, IP-Telefonie, Instant-Messaging und Screen-Sharing auch auf mobilen Geräten möglich	Zusammenarbeit mittels Virtual Reality
Interner Datenaustausch	Austausch von Daten per E-Mail und Nutzung von gemeinsamen Laufwerken zur Dateiablage, Daten werden noch überwiegend lokal gespeichert	Keine lokale Speicherung von Daten auf Laptops etc., Nutzung von gemeinsamen Speicherorten mit Zugriffsmöglichkeit über sichere Internetverbindungen mittels VPN, mobiles Arbeiten hierdurch möglich	Keine abteilungsinterne Speicherung von Daten, Speicherung aller Daten im firmeneigenen Rechenzentrum	Nutzung von Cloudlösungen und gemeinsamen digitalen Workspaces zur gleichzeitigen Bearbeitung von Dateien und Dokumenten	Nutzung von Cloudlösungen und gemeinsamen digitalen Workspaces zur gleichzeitigen Bearbeitung von Dateien und Dokumenten
Externer Datenaustausch	Austausch von Daten per E-Mail und Verschicken von Speichermedien, nur Nutzung von bestimmten Dateiformaten möglich	Nutzung von ftp-Servern, Einigung auf gemeinsame Dateistandards	Nutzung von Datenaustauschportalen auch für sensible Daten, keine einheitlichen Datenformate notwendig durch Nutzung entsprechender Konverter, dadurch Einsatz einer größere Anzahl an Softwarelösungen möglich	Anbindung von Kunden und Dienstleistern an Cloud-Lösungen	Nutzung gemeinsamer Workspaces für die gleichzeitige Bearbeitung von Dokumenten
Allgemeine Unternehmenskommunikation Werker-Ebene	Aushängen relevanter Informationen am Schwarzen Brett, Ausgabe von unternehmensinternen Broschüren und Zeitungen, Zusendung von Gehaltsmitteilungen etc. per Post	Möglichkeit des Zugriffs auf Intranet-Terminals, Zugriff auf allgemeine Informationen	Zusendung sämtlicher Information an firmeneigenen E-Mail-Account, Zugriff auf personalisierte Informationen	Bereitstellung von Apps zur mobilen Nutzung und Zugriff auf Informationen des Intranets inklusive Zugriff auch auf sensible Daten (z.B. Gehaltsabrechnungen etc.) durch SSO	Zusätzliche Chatfunktionen und Instant Messaging für relevante Funktionalitäten, optimierte Einbindung in firmeneigene Social-Media Contents
Allgemeine Unternehmenskommunikation Büroarbeitsplätze	Aushängen relevanter Informationen am Schwarzen Brett, Verteilung relevanter Information per E-Mail	Bereitstellung von Informationen im Intranet, z.B. Shared Folders, Wikis etc.	Erweiterung des Intranets durch firmeninterne Social-Media-Anwendungen	Bereitstellung von Apps zur mobilen Nutzung und Zugriff auf Informationen des Intranets inklusive Zugriff auch auf sensible Daten (z.B. Gehaltsabrechnungen etc.) durch SSO	Zusätzliche Chatfunktionen und Instant Messaging für relevante Funktionalitäten, optimierte Einbindung in firmeneigene Social Media Contents
Öffentlichkeitsarbeit	Zusendung von Printmedien an registrierte Kunden und Informieren von Kunden auf Firmenevents	Bereitstellung von Informationen und Mediatheken auf der Homepage	Bereitstellung von Informationen auf der Homepage, Bereitstellung von Mediatheken etc. auf der Homepage, Verbreitung von aktuellen Nachrichten und Informationen per Newsletter	Verbreitung von Informationen und Produktwerbung in sozialen Medien	Anbindung von Interessenten über eigene App und Bereitstellung kundenspezifischer Informationen über digitale Dienste und Plattformen
Wissensmanagement	Aufbewahrung von Notizen und Dokumenten im Aktenschrank	Anlegen von Ordnern auf Abteilungslaufwerken zur Sammlung von Informationen	Nutzung von Shared Folders mit unternehmensweitem Zugriff	Etablierung von Communitys im Intranet zu Expertenthemen und Aufbau von digitalen Wissensdatenbanken	Ortsungebundener Zugriff auf Wikis, Communitys und Mediatheken
Anwendungsbeispiele	Kommunikation erfolgt überwiegend über das Telefon oder von Angesicht zu Angesicht, Austausch von Informationen meist noch in Papierform oder auf mobilen Datenträgern (CDs, USB-Stick)	Erweiterung der Informations- und Kommunikationsmöglichkeiten durch den Aufbau einer ersten IT-Infrastruktur innerhalb der Firma, der Speicherort von Daten kann neben lokalen Rechnern auch auf Abteilungslaufwerken im Rechenzentrum erfolgen	Ausbau der IT-Infrastruktur mit Einbindung zusätzlicher Geschäftsbereiche, insbesondere die Produktionsebene wird in die digitale Kommunikations- und Informationsstruktur miteinbezogen, eine lokale Speicherung von Daten und Informationen erfolgt nicht mehr	Ganzheitliche IT-Infrastruktur mit Einbindung sämtlicher Geschäftsbereiche bis in die Produktionsebene, interne und externe Kommunikation mit mobilen Geräten und Anbindung an die firmeneigene Cloud	Performante und vollvernetzte IT-Infrastruktur, die Kommunikation erfolgt zunehmend auch mittels des Einsatzes von Zukunftstechnologien wie Augmented Reality und Virtual Reality, Daten und Informationen werden ausschließlich in der firmeneigenen Cloud gespeichert

2. Auflage, Stand 11/2018

SSO: Single Sign-on, dt. einmalige Authentifizierung an einem Arbeitsplatz auf alle Rechner und Dienste, für die Berechtigungen vorliegen



Mitarbeiter, Führung und Organisation

Tabelle 10

Reifegrad

Kriterien

	Starre hierarchische Organisationsstruktur Ergebnisbasiertes Handeln	Strukturiertes Handeln	Standardisiertes Handeln	Geplantes Handeln	Dynamische Unternehmensorganisation Optimiertes Handeln
Mitarbeiter	Der Aufbau und die Anpassung digitaler Anwendungen ist Spezialisten vorbehalten, für diese Aufgaben werden umfangreiche Fachkenntnisse vorausgesetzt (z.B. die Beherrschung von Programmiersprachen), kein durchgängiges Digitalisierungswissen vorhanden	Modulare Programmiermethoden erleichtern das Gestalten digitaler Prozesse, die Durchführung erfordert aber spezifische Qualifikationen, einzelne Prozessexperten haben Basiswissen im Bereich der Digitalisierung	Die anwenderfreundliche Gestaltung von Systemen ermöglicht intuitives Anwenden und Lernen digitaler Technologien, die Gestaltung und Nutzung digitaler Prozesse ist für Mitarbeiter mit technischer Vorbildung problemlos möglich, alle Prozessexperten haben Basiswissen im Bereich der Digitalisierung	Interaktive Lernformate ermöglichen eine individuelle und effiziente Gestaltung von Lernprozessen zum Aufbau von Digitalisierungskompetenzen, die Gestaltung und Nutzung digitaler Prozesse ist auch für den IT-Laien möglich	Lernprozesse sind weitestgehend individualisiert, das Gestalten digitaler Prozesse ist als geforderte Grundfertigkeit in den Lehrplänen von Schulen und Hochschulen verankert, Mitarbeiter sind weitgehend qualifiziert und befähigt digitale Prozess in ihrem Arbeitsumfeld selbständig zu gestalten und zu nutzen
Führung	Hierarchische Führung oft basierend auf „langjähriger Berufserfahrung mit hohem Expertenwissen“, anweisender Führungsstil mit erfahrungsbasierten Entscheidungsprozessen	Hierarchische Führung basierend auf „traditionellen Managementmethoden“, anweisender Führungsstil mit faktenbasierten z.T. partizipativen Entscheidungsprozessen (Mitarbeiter werden zum Teil in Entscheidungen eingebunden)	Partizipative Führung auf Basis von Eigenverantwortung und crossfunktionaler Prozesskenntnisse, grundsätzliche Bereitschaft und Fähigkeit zur Gestaltung von Veränderungsprozessen, partizipative Entscheidungsprozesse sind der Regelfall	Führung ist auf die strategische Ausrichtung und das Management von Veränderungsprozessen fokussiert, Entscheidungsprozesse basieren weitgehend auf der Arbeit von crossfunktional arbeitenden Projektgruppen	Flache Hierarchien sorgen für kurze Entscheidungswege, Führung ist auf die Befähigung der Mitarbeiter und der Organisation fokussiert, Entscheidungsprozesse laufen weitgehend in Projektstrukturen
Organisation	Statische Geschäftsmodelle, starre Organisationsstrukturen, z. B. Linienorganisation, nach außen stark abgegrenzte Arbeitsweise. Wenig praktische Richtlinien, Prozess- oder Anforderungsbeschreibungen	Statische Geschäftsmodelle, Organisationsveränderung meist auf Basis disruptiver Veränderungsprozesse (oft mit Unterstützung externer strategischer Beratung), Kooperation mit externen Partnern oft nur auf Basis bestehender persönlicher Beziehungen, reglemäßiger Datenabgleich zwischen Realität und virtueller Prozessabbildung.	Teilintegrierte und vernetzte Organisationsstruktur, z.B. Matrixorganisation, Geschäftsmodelle werden kontinuierlich den Kundenanforderungen angepasst, selektive Kooperation mit externen Partnern. Nutzung statistischer Prozessdaten und Trendanalysen zur Identifikation von Abhängigkeiten	Integrierte Organisationsstruktur, Geschäftsmodelle werden systematisch überprüft und angepasst, systematische Kooperation mit externen Partnern. Ausgeprägtes Verständnis für Lean-Methoden und vorbeugender Instandhaltung/Wartung.	Hochintegrierte Organisationsstruktur, weitgehend aufgelöste Strukturen, dafür schwerpunktmäßiges Arbeiten in Projekten, integrierte Zusammenarbeit mit externen Partnern, Geschäftsmodelle werden kontinuierlich überprüft, angepasst und weiterentwickelt. Gelebte Innovationskultur und konstruktives Risikobewusstsein (Vermeidung statt Entdeckung)