

## Grundlagen zur Echtzeitdatenerfassung und -verarbeitung

Der derzeit stattfindende strukturelle Wandel im industriellen Bereich, getrieben durch eine immer stärkere Digitalisierung auf dem Weg zur Industrie 4.0, soll Prozesse über den gesamten Produktlebenszyklus vom Einkauf über die Fertigung bis hin zur Kommunikation mit dem Endkunden verbessern. Voraussetzungen für die Realisierung dieses Wandlungsprozesses bilden die Erfassung und Verarbeitung sogenannter **Echtzeitdaten**. Unter Echtzeitdaten werden in der Industrie die regelmäßige und zeitnahe Erfassung und Verarbeitung von Produktionsdaten verstanden. Durch die anschließende Analyse und Interpretation der Echtzeitdaten können so zum einen Verbesserungspotenziale sektorenübergreifend identifiziert und zum anderen potenzielle Fehlerquellen frühzeitig erkannt werden. Echtzeitdaten ermöglichen bspw. die Analyse von Beziehungen zwischen Ereignissen wie Störungen in Produktionsabläufen. Wird eine Korrelation dieser Ereignisse erkannt, können bisher unbekannte zwischen den Ereignissen bestehende Kopplungen identifiziert werden. Dies kann dazu führen, dass durch eine Untersuchung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen entsprechende Kausalitäten der Störungen sichtbar und anschließend behoben werden. Entscheidend für die Umsetzung eines Echtzeitdatenmanagementsystems ist dabei neben dem technologischen Know-how und der benötigten Infrastruktur vor allem die Bereitschaft der betreffenden Akteure, Gewohnheiten zu ändern und die durch die Echtzeitdatenerfassung generierten Erkenntnisse umzusetzen.

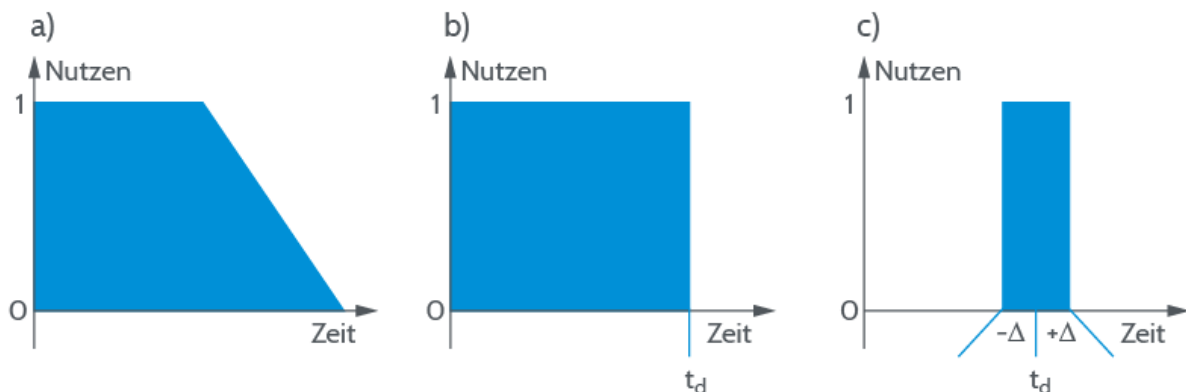
## Definition

Die ursprünglich deutsche Definition der inzwischen durch die englischsprachige DIN ISO/IEC 2382 abgelösten Norm DIN 44300 lautete: „Unter Echtzeit versteht man den Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. Die Daten können je nach Anwendungsfall nach einer zufälligen Verteilung oder zu vorherbestimmten Zeitpunkten anfallen.“

Der Begriff Echtzeit sagt etwas über die Fähigkeit eines Systems aus, auf ein Ereignis innerhalb eines vorgegebenen Zeitrahmens zu reagieren. Hierbei existiert jedoch kein Bezug zur Geschwindigkeit oder Verarbeitungsleistung des Systems. Im allgemeinen Sprachverständnis wird dies fälschlicherweise jedoch oft angenommen. Besser wäre die Verwendung der Begriffe verzögerungs- oder verzugsarm. In der Produktion wird der Begriff mit der sofortigen Erfassung und Verarbeitung von Produktionsdaten gleichgesetzt. Die Erfassungsintervalle können aber von einigen Millisekunden zu mehreren Stunden variieren und fallen trotzdem noch unter den Begriff der Echtzeitdaten. Diese begriffliche Unschärfe muss in der Realisierung eines Echtzeitdatenmanagementsystems berücksichtigt werden [1].

Grundsätzlich kann zwischen drei Ausprägungen von Echtzeit unterschieden werden:

- Bei der weichen Echtzeit (engl. soft real-time) nimmt der Nutzen der Information kontinuierlich nach einer bestimmten Zeitspanne ab und ist nicht plötzlich verloren.
- Bei der festen Echtzeit (engl. firm real-time) verliert die Information ihren Nutzen unmittelbar, sobald eine bestimmte Zeitspanne überschritten wird.
- Bei der harten Echtzeit (engl. hard real-time) muss eine Information zur korrekten Funktion eines Systems zwingend zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegen. Es existiert eine maximal zulässige zeitliche Abweichung. Eine Überschreitung dieser maximal zulässigen Abweichung ist für das System kritisch und muss vermieden werden [2] [3].



Zeit-Nutzen-Diagramme der Echtzeit: in Anlehnung an Frank Dopatka, Ein Framework für echtzeitfähige Ethernet-Netzwerke in der Automatisierungstechnik mit variabler Kompatibilität zum Standard-Ethernet, Dissertation, Universität Siegen, 2008

## Potenziale und Risiken

Zu den Potenzialen bei der Nutzung von Echtzeitdaten gehören neben gesteigerter Ressourceneffizienz und Produktivität sowie gesenkten Risiken in allen Unternehmensbereichen auch Chancen auf ein gesteigertes Umsatzwachstum durch neue Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle. Schlüsselbegriffe sind dabei vor allem **Predictive Maintenance** und **Dynamic Manufacturing**. Sie sollen dafür sorgen, dass die Prozesskosten im Unternehmen gesenkt werden. Auswirkungen können ein verbessertes Ressourcenmanagement, zuverlässigere Fertigungskapazitäten, erhöhte Maschinenauslastungen, geringere Wartungskosten und verbesserte Qualitätssicherung sein.

Ein weiterer Vorteil besteht in der Bereitstellung der Echtzeitdaten für Kreditgeber und Investoren. So ergab eine Studie der TU Darmstadt, dass sich 90 % der mittelständischen Industrieunternehmen vorstellen können, Echtzeitdaten der Produktion zur Verfügung zu stellen, um

flexiblere Laufzeiten der Darlehen, schnellere Kreditentscheidungen oder niedrigere Zinsen zu erhalten [4].

Bei der Umsetzung einer Echtzeitdatenstrategie müssen Kosten, Nutzen und Aufwand jedoch sorgfältig gegeneinander abgewogen werden, um eine gesteigerte Wertschöpfung des Unternehmens zu erreichen und nicht unnötig in eine Hightech-Lösung zu investieren. Die Nutzung von Echtzeitdaten führt meist zu einer besseren Verknüpfung der einzelnen Datenströme (**connected**), aus welcher vorab Lösungen für zukünftige Probleme entstehen können (**proaktiv**). Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an Produktionsänderungen (**agil**) sowie eine Entscheidungsfindung durch leicht zugängliche Informationen (**transparent**).

- **Connected:** Die Verknüpfung mittels kontinuierlicher Echtzeit-Datenströme auf Unternehmensebene verbessert die Zusammenarbeit mit Zulieferern und Kunden. Innerhalb der Unternehmen werden durch die Vernetzung der Produktionsmaschinen die Produktionspläne verbessert und auch durch den Austausch von Daten über die Grenzen der Geschäftsbereiche hinweg (z. B. zwischen Fertigung und Entwicklung) Innovationen gefördert und beschleunigt.
- **Proaktiv:** Durch die Kombination von Sensoren mit intelligenter Datenauswertung sagt *Predictive Maintenance* Anomalien vorher und initiiert vorab Lösungen. Benötigte Ersatzteile werden selbstständig nachbestellt und führen so zu einem verbesserten **Supply-Management**. Durch **dynamische Qualitätsprüfungen** beim Wareneingang werden Mängel in der Zulieferer-Qualität frühzeitig erkennbar.
- **Agil:** Durch die Auswertung von Echtzeitdaten können Produktionsveränderungen erkannt und die Fertigung kann dynamisch an neue Erfordernisse angepasst werden.
- **Transparent:** Daten-Links zu dem Kunden und anderen Unternehmen erleichtern Prognosen über die zukünftige Nachfrage und erleichtern so die Planung der Produktion. Durch das permanente Tracking des Waren- und Materialflusses werden die Logistik-Prozesse verbessert und es erfolgt eine entsprechende Anpassung der Planung [5].

Bei der Datennutzung muss zwischen **Datenerfassung** und **Datenverarbeitung** unterschieden werden. Für eine erfolgreiche Implementierung eines Echtzeitdatenmanagementsystems müssen zunächst die Potenziale der Datenerfassung entlang der Produktionskette evaluiert und anschließend darauf abgestimmt die Möglichkeiten der Datenverarbeitung beurteilt werden.

## Datenerfassung

Produktionsdaten können auf verschiedene Weise erfasst werden. Hierzu zählen die konkrete Erfassung einer Messgröße am Sensor, ihre Weiterleitung und Speicherung. Für die Echtzeitdatenerfassung ist entscheidend, dass die Daten in einem maschinenlesbaren und interpretierbaren Format bereitgestellt werden. Hierzu müssen die von Sensoren zur Verfügung gestellten Daten eventuell aufbereitet werden. Neuere Sensoren sind oft in der Lage, diese Aufbereitung selbst vorzunehmen.

Die zeitliche Auflösung der erfassten Daten hat einen starken Einfluss auf den Speicher- und Rechenaufwand bei der anschließenden **Datenverarbeitung**; je mehr Daten anfallen, desto höher ist der anschließende Aufwand. Daher muss bereits bei der Datenerfassung zwischen der Höhe der Datenqualität und dem hierfür benötigten Erfassungsaufwand abgewogen werden. Eine hohe Datenqualität kann zwar zu einer besseren Bewertung von Produktionsfaktoren führen, oft ist diese jedoch gar nicht für die nachfolgende Auswertung zwingend. Der für die hohe Datenqualität erforderliche Ressourcenaufwand bei höherwertigen Sensoren und der

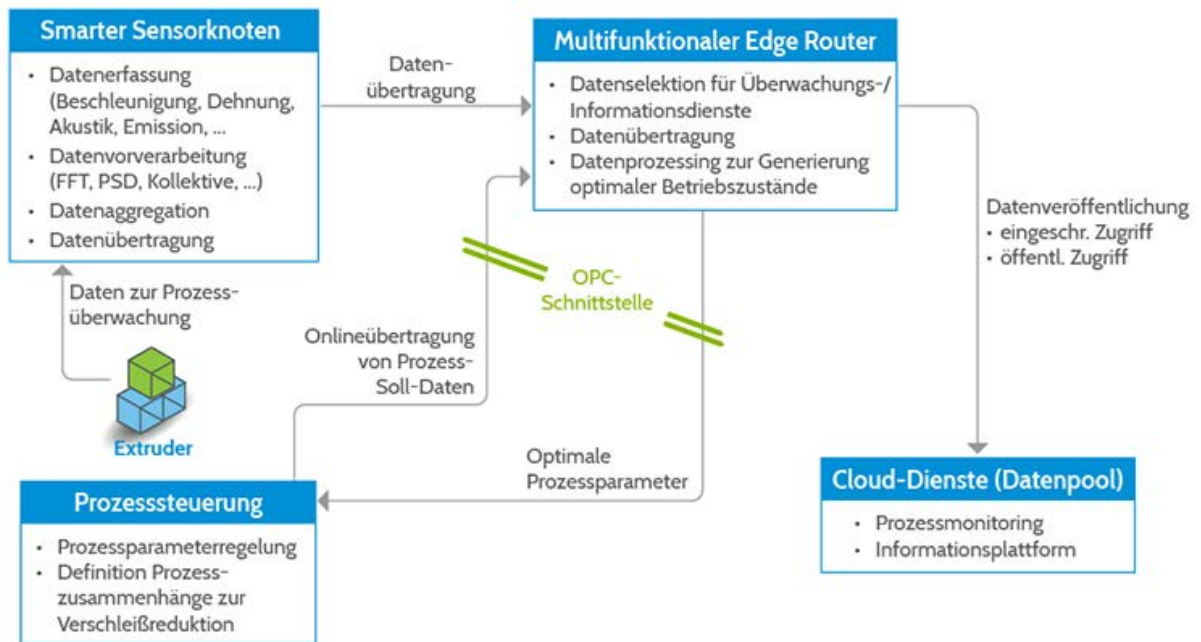
Verarbeitung und Speicherung der Daten steht dann in keinem wertschöpfenden Verhältnis zum Nutzen in der anschließenden Datenauswertung und -interpretation. Eine Echtzeitdatennutzung kann bei allen nichtstatischen Prozessen erfolgen, jedoch bedeutet eine höhere Anzahl an Messwerten nicht unbedingt einen Informationsgewinn [6].

Um Echtzeitdaten sinnvoll nutzen zu können, sollten zunächst die Ziele der Datenerfassung geklärt und anschließend die geeignete Sensorik ausgewählt oder entwickelt werden. Bei der Sensorik lässt sich dabei zwischen weitverbreiteten **Sensoren** im klassischen Sinne und sogenannten **Digital-Enablern** differenzieren. Letztere erschließen bereits im Zuge der Industrie 4.0 und des Echtzeitdatenmanagements immer breitere Anwendungsfelder. Diese Sensoren und Digital-Enabler müssen jedoch erst strategisch miteinander über das Echtzeitdatenmanagement verknüpft werden, um ihr volles Potenzial entfalten zu können.

## Sensorik

Eine Echtzeitdatenstrategie macht eine kontinuierliche oder zeitdiskrete Erfassung der Produktionsdaten nötig. Hierfür steht eine große Anzahl von Sensoren zur Verfügung, die sich je nach Branche und Einsatzgebiet stark unterscheiden. Intelligente Sensoren werden oft für die Echtzeitdatenerfassung eingesetzt: Sie sind neben dem eigentlichen Sensor zusätzlich mit einem Mikroprozessor zur ersten Datenverarbeitung und einer Kommunikationseinheit zur direkten Datenweitergabe ausgestattet. Sie ermöglichen das sogenannte Edge-Computing, also die Verlagerung der Datenauswertung weg von zentralen Rechenzentren und hin zu den Rändern des Datennetzwerks. Hierdurch können Datenströme reduziert und somit auch Ressourcen eingespart werden. Die Sensoren zur Echtzeitdatenerfassung lassen sich in drei Klassen einteilen:

- **Lokalisierungsüberwachung:** Unter den Begriff der Lokalisierungsüberwachung fallen alle Sensoren, die das Tracking der Produkte zu jedem Zeitpunkt der Lieferkette ermöglichen. Neben dem in der Logistik bereits etablierten GPS werden weitere Transmitter auch in der Intralogistik eingesetzt. Zusätzlich zu den Barcodes können Radio-Frequency-Identification-(RFID-), Near-Field-Communication-(NFC-) und Bluetooth-Low-Energy-(BLE-)Transmitter eingesetzt werden, die je nach Einsatzgebiet auch kombiniert werden können.
- **Zustandsüberwachung:** Bei der Zustandsüberwachung können Maschinendaten mithilfe von bereits integrierten oder nachzurüstenden Sensoren erfasst werden. Hierfür ist nicht immer eine Aufrüstung bestehender Maschinen mit neuen Sensoren notwendig. Bereits Stromverbräuche können Rückschlüsse über Maschinenzustände liefern. Von Interesse sind dabei alle Daten, durch die eine Abweichung vom gewünschten Zustand registrierbar ist. Dies können Temperatur-, Strom- und Betriebsmittelverbrauchs-, Eigenschwingungs- oder Durchflussschwankungen sein, welche durch verschiedene Sensoren registriert werden. Einige beispielhafte Sensoren sind: Piezosensor, Kraft- und Drehmomentsensor, Beschleunigungssensor, Druck-/Durchflusssensor, Wärmebildkamera oder Dehnungsmesstreifen (DMS). Neue Sensortypen drängen ständig auf den Markt.
- **Prozessüberwachung:** Die Prozessüberwachung bezieht sich auf die Datenerfassung entlang der gesamten Produktionskette. Sie besteht in der Überwachung des Energie- und Materialverbrauchs, der Maschinenauslastung sowie der Verfügbarkeit von Produktionsmitteln [7][8][9].



Beispiel für die Einbettung intelligenter Sensoren in ein Überwachungssystem für Extruder: in Anlehnung an Fraunhofer LBF

## Digitale Befähiger/Digital Enabler

Neben der **klassischen Sensorik** spielen bei der Smart Factory die **Digital Enabler** eine zunehmende Rolle, welche eine Grundlage für Industrie 4.0 bilden. Große Fortschritte bei der computergestützten Bild- und Spracherkennung ermöglichen den Einsatz von Smart-Glasses, Smart-Watches und anderen audio-visuellen Trägern. Durch sie wird die Übertragung von Logistik- und Produktionsdaten an und durch die Mitarbeiter in Echtzeit möglich. So können während der Fertigung Produktionsaufträge und Handlungsanweisungen dynamisch angepasst werden. In Kombination mit klassischen Sensoren können so Mitarbeiter beispielsweise über Smart-Glasses oder Smart-Watches über bevorstehende Aufgaben in der Fertigungslinie informiert werden oder durch Spracherkennungssoftware Buchungen ohne Hinzunahme der Hände durchführen [5][10][11].

## Datenverarbeitung

Entscheidend für den Erfolg einer Echtzeitdatenstrategie ist neben der geeigneten **Datenerfassung** vor allem die anschließende **Datenverarbeitung**. Erst durch die Interpretation von Daten entstehen nutzbare Informationen. Bei der Verarbeitung sollte darauf geachtet werden, dass die Daten immer mit dem Ziel des Erkenntnisgewinns ausgewertet werden. Wichtige Anforderungen an die zugrundeliegenden Daten sind Aktualität, Nachvollziehbarkeit, Konsistenz, Eindeutigkeit und Vergleichbarkeit. Messbare Parameter, deren Auswertung Verbesserungspotenziale aufdecken kann, entstammen Endgeräten, Sensoren, aber auch Prozessen. Beispiele bilden der Nutzungs-, Rüst- und Leistungsgrad sowie Maschinen- und Personalbelegung oder auch Ausschuss- und Ausbringquote, Overall Equipment Effectiveness (OEE) inkl. Leistung, Qualität und Verfügbarkeit [12].

Die gewonnenen Daten können auf unterschiedliche Art und Weisen verarbeitet werden:

- Daten können visuell aufbereitet und so durch Mitarbeiter interpretiert werden, beispielsweise durch Graphen oder die Darstellung von Prozessen und Produktionsmaschinen in einem virtuellen Abbild der Maschinen in einem sog. digitalen Zwilling (engl.

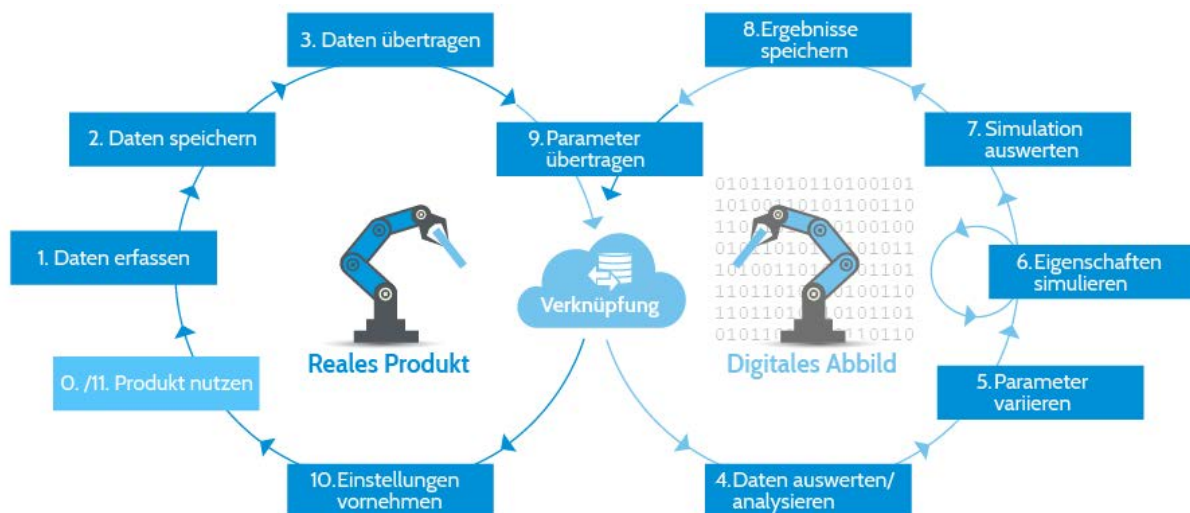


Digital Twin). Hierbei übernimmt der Mensch die Dateninterpretation auf Grundlage maschinell aufbereiteter Daten.

- Daten können auch durch Algorithmen ausgewertet werden, woraufhin dem Mitarbeiter konkrete Handlungsanweisungen für eine Prozessverbesserung gegeben werden. Das Prozesswissen wandert hierbei vom Mitarbeiter beispielsweise zu einer künstlichen Intelligenz (KI). Der Mitarbeiter muss lediglich aus einer Vorauswahl an Entscheidungsoptionen auswählen.

Für die Auswertung und Aufbereitung der Echtzeitdaten sind zusätzliche Hard- und Software erforderlich. Diese müssen garantieren, dass möglichst keine Verzögerungen auftreten. Die Verarbeitung der Daten muss allerdings nicht in jedem Fall im Millisekundenbereich erfolgen, sondern nur garantiert schnell genug für den entsprechenden Anwendungsfall.

Einige Daten werden mithilfe von Edge-Computing bereits dezentral erstmalig interpretiert (vgl. **Smarte Sensoren**) und anschließend an übergeordnete Server übermittelt. Hier werden die Daten der verschiedenen Datenquellen gebündelt und ausgewertet. Erfolgt dies mittels intelligenter Algorithmen, werden oftmals externe Server mit stärkerer Rechenleistung verwendet [13][14][15].



Wirkungsschleife: Datenverarbeitung mittels Digitalen Zwillingen: in Anlehnung an [www.muenchen.digital](http://www.muenchen.digital)

## Lieferanten/Einkauf

Bereits vor dem Eintreffen von Rohstoffen und Halbzeugen in einer Fabrik existieren vielfältige Möglichkeiten, Echtzeitdaten zu erfassen. Entscheidend für eine wertschöpfende Erfassung und anschließende Verarbeitung ist eine vertrauensvoll ausgeprägte Kommunikation mit den Lieferanten.

## Echtzeit-Supply-Management

Die Vernetzung von Unternehmen entlang ihrer Lieferketten führt durch die Echtzeitdatenerfassung zu einem immer besseren Supply-Management. Aufgrund der automatisierten Verschleißüberwachung können mithilfe von **Predictive Maintenance** Anomalien detektiert und selbstständig in naher Zukunft benötigte Ersatzteile bestellt werden, bevor es zu Problemen kommt. Dies wird durch eine umfassende Sensorik sowie die Auswertung der Daten durch Algorithmen und Künstliche Intelligenz (KI) möglich [5].

## Praxisbeispiele und F&E-Projekte

In der LKW-Produktion wird bereits eine Form des Echtzeit-Supply-Managements genutzt. Statt große Ersatzteillager zu betreiben, werden selten benötigte Ersatzteile erst auf On-Demand-Bestellung produziert. Ermöglicht wird dies durch den Einsatz von 3D-Druckern, die eine individuelle Herstellung unabhängig von großen Margen ermöglichen [5].

### Ressourceneffizienzpotenzial

Durch das **Echtzeit-Supply-Management** können Ersatzteillager verkleinert werden. Dies spart nicht nur Lagerfläche, sondern auch Material, da überflüssige Ersatzteile gar nicht erst produziert werden. Durch die koordinierte Ersatzteilbeschaffung, die aufgrund frühzeitiger Informationen durch **Predictive Maintenance** möglich wird, können Bestellungen gebündelt und so Ressourcenverbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Transport eingespart werden [5].

## Vernetzte Kommunikation von Einkauf, Lager und Produktion

Bei der Versorgung der Produktion mit Komponenten, Betriebsmitteln und Verschleißteilen setzen viele Unternehmen auf Kanban-Prozesse für eine verbrauchsorientierte Nachschubsteuerung. Erst der tatsächliche Verbrauch von Materialien oder Gütern löst den Bestellprozess aus. Durch die Vernetzung der gesamten Prozesskette werden so Kapazitätskonflikte aufgezeigt und können durch eine automatisierte Nachbestellung behoben werden [5].

## Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Ein Pumpenhersteller hat in seiner Produktionshalle eine E-Kanban-Lösung implementiert. Zwei Primärdefizite der zuvor eingesetzten manuellen Lösung könnten somit beseitigt werden:

- Das händische Einsammeln der Kanban-Karten durch Mitarbeiter machte eine Echtzeit-Transparenz an Bedarf und Beständen unmöglich.
- Der Verlust einzelner Kanban-Karten führte zu großen zeitlichen Verzögerungen bei der Bearbeitung von Bestellvorgängen.

Mithilfe einer Radio-Frequency-Identification-(RFID)-E-Kanban-Applikation wurden die Regale der Lager mit Lese- und Antennentechnik ausgestattet, sodass diese Daten nun automatisiert in Echtzeit an die Logistik übermittelt und entsprechende Nachbestellungen durch den Einkauf ohne Verzögerung getätigt werden können [16].

### Ressourceneffizienzpotenzial

Durch die verbesserte Vernetzung von Einkauf, Lager und Produktion können Effizienzverluste in der Nachschubsteuerung sowie Bestände reduziert werden. Automatisierte Buchungen und erhöhte Transparenz verhindern Engpässe und damit Stillstand oder die reduzierte Auslastung in der Produktion.

## Wareneingang und Anlieferung

Beim Übergang von Logistik zur Produktion erfolgt aus Haftungs- und Qualitätsgründen immer eine zumindest stichprobenartige Qualitätskontrolle der angelieferten Waren. Die hierbei anfallenden Daten können nicht nur papierbasiert, sondern, wie meist bereits üblich, ebenso digital erfasst und verarbeitet werden. Hierbei existieren bereits heute Technologien, welche auch eine Echtzeitfähigkeit ermöglichen.

## Dynamische Eingangsprüfung

Das **Qualitätsmanagement** beginnt schon bei der Kontrolle der zugelieferten Teile. Aus den Wareneingängen können automatisch Prüfaufträge mit dynamisiertem Stichprobenumfang erzeugt werden. Die so ausgewählten Teile werden dann geprüft, während die restlichen Teile der Charge zwischengelagert werden. Werden Teile beanstandet, werden automatisch Qualitätsberichte erstellt und der Lieferant wird über die mangelhafte Ware informiert. Aufgrund der Echtzeitdatenerfassung der Prüfergebnisse kann der Lieferant schnell in seine Produktionsketten eingreifen und die Fertigung weiterer fehlerhafter Produkte verhindern. Zudem kann das Prüfsystem sofort an die neuen Ergebnisse angepasst und der Stichprobenumfang bei den Wareneingängen des auffälligen Lieferanten dynamisch angepasst werden. Dies ermöglicht ein verbessertes **Qualitätsmanagement** des Wareneingangs [17].

## Ressourceneffizienzpotenzial

Eine dynamische Eingangsprüfung ermöglicht nicht nur ein besseres **Qualitätsmanagement**, sondern spart auch Kosten und Ressourcen, da fehlerhafte Produkte nicht weiterverarbeitet und Mängel in der Prozesskette aufgedeckt werden, wodurch weitere Fehlproduktionen vermieden wird. Durch die Beschleunigung der Kommunikation mit den Lieferanten aufgrund der Echtzeitdatenerfassung und -verarbeitung kann Ausschuss in der Produktion gering gehalten werden.

## Automatisierte Objekterkennung

Die Umsetzung einer **permanenten Inventur** ermöglicht eine lückenlose Erfassung der Bestände und des Bedarfs, erfordert jedoch, Produkte direkt nach Wareneingang zu registrieren. Eine manuelle>Listenerstellung und ihre anschließende Überführung in ein digitales System sind fehleranfällig und können zu einer Verzögerung bei der Übertragung führen. Um qualifizierte Nachbestellentscheidungen bei einer permanenten Inventur treffen zu können, ist eine auf Echtzeitdaten beruhende Informationsgrundlage notwendig. Um dies zu gewährleisten, sind automatisierte Objekterkennungsmethoden vorteilhaft, da durch Barcodes, Radio-Frequency-Identification-(RFID-)Tags oder andere Transmitter ein Echtzeit-Digital-Link zwischen Produkteingang und Inventur geschaffen wird.

## Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Um keine Zeit zwischen Paketeingang und -versand zu verlieren, können Smart Glasses in Distributionszentren genutzt werden. Hierbei handelt es sich um Augmented-Reality-Brillen, auf welche meist mit einem Projektor zusätzliche Informationen eingeblendet werden. Mitarbeiter können durch ihren Einsatz ohne handgeführte Lesegeräte Objekte in ihrem Sichtfeld scannen. Bei dieser sogenannten Assisted Reality werden die erfassten Daten automatisch in das Logistik-System übertragen. Mithilfe dieser **Digital Enabler** können so sämtliche Vorgänge in Echtzeit erfasst und die Handlungsanweisungen für den Umgang mit dem Paket an die Mitarbeiter sofort entsprechend angepasst werden [5].





Einsatz von Smart Glasses für Scanvorgänge in der Lagerhaltung: © Bechtle AG

## Ressourceneffizienzpotenzial

Durch die automatisierte Objekterkennung wird eine langwierige händische Erfassung von Produktdaten obsolet. Dies spart nicht nur Zeit, sondern reduziert auch den Verbrauch von Papier. Dem gegenüber steht jedoch ein erhöhter Ressourcenaufwand für die Produktion und den Betrieb der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) zur Objekterkennung. Beides ist bei der Einführung einer automatisierten Objekterkennung gegeneinander abzuwägen.

## Intralogistik und Lagerhaltung

Die digitale Erfassung und Speicherung der Warenlagerbestände werden bereits von vielen Betrieben genutzt. Trotzdem werden die resultierenden Datenbanken oft händisch gepflegt. Neue Technologien ermöglichen automatisierte Erfassungen und Buchungen und gestalten so die Lagerhaltung effizienter.

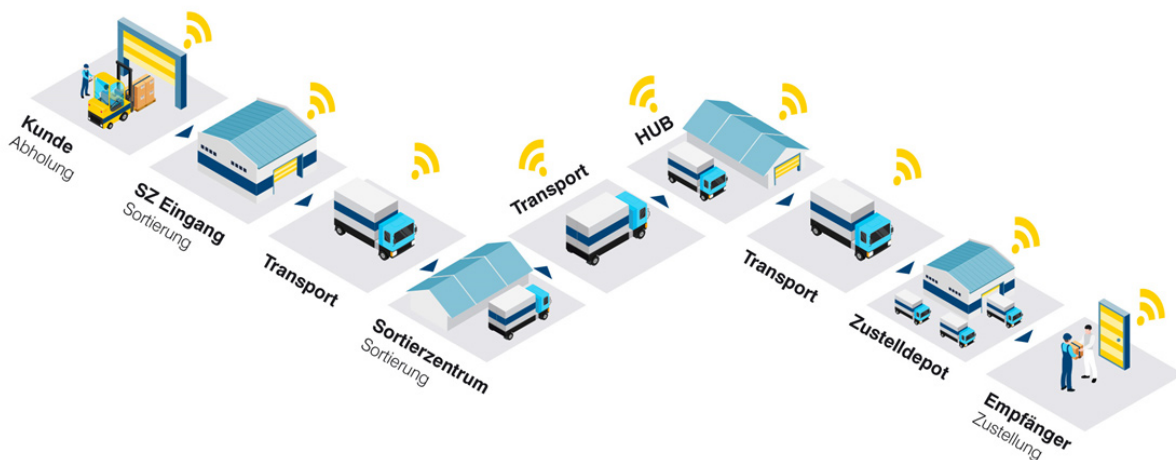
### Permanente Inventur

Durch den Einsatz von Lokalisierungssystemen ist eine Echtzeitdatenerfassung im Lager möglich. Dabei gibt es eine Vielzahl an verschiedenen Realisierungsvarianten, die je nach Betrieb individuell abgestimmt werden können. Eine erste einfache Realisierungsstufe stellen das Scannen und anschließende Übertragen der Daten in eine interaktive Lagersoftware dar, die zu jedem Zeitpunkt Auskunft über den Standort des Produkts im Lager gewährt. Dieser Einstieg kann dann durch **Digital Enabler** ausgebaut werden. Die Produkte können beispielsweise mit Radio-Frequency-Identification-(RFID)-Tags, Bluetooth- oder WLAN-Transmittern ausgestattet werden, welche die Lokalisierung zu jedem Zeitpunkt erlauben. Ein flächendeckendes Netz aus Transmittern und Sensoren ermöglicht das Erstellen eines ganzheitlichen **digitalen Zwilling**s des Lagers. Durch ihn sind keine manuellen Buchungen mehr notwendig, alle Bestände werden automatisch angepasst.

Entscheidend für die Umsetzung dieser auf Echtzeitdaten beruhenden permanenten Inventur sind sogenannte **Digital Enabler**. Je nach Anwendungsfall können diese einzeln oder kombiniert eingesetzt werden.

## Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Die zunehmende Leistungsfähigkeit von Transmittern und Sensoren ermöglicht eine fortlaufend bessere Realisierung der Echtzeitdatenerfassung von Lagerbeständen. Neue Lösungen wie RFID-Tags oder WLAN-Transmitter können aufgrund sinkender Kosten in immer mehr Produktionsbereichen eingesetzt werden. Ein ganzheitliches Konzept kann durch die Kombination von Radio-Frequency-Identification-(RFID-)Tags mit sogenannten RFID-Gates erreicht werden. Lagerhallen werden mit RFID-Sensoren an den Ein- und Ausgängen ausgestattet, sodass die mit den RFID-Tags versehenen Produkte beim Ein- und Auslagern automatisch gebucht werden. So wird eine Echtzeiterfassung des Lagerbestands ohne Mitarbeiterbeteiligung möglich.



Beispiel für den Einsatz von RFID-Technik beim Pakettransport: [www.spectos.com](http://www.spectos.com)

## Ressourceneffizienzpotenzial

Die Echtzeitdatenerfassung in der Intralogistik bietet verschiedene Effizienzpotenziale: Durch die Digitalisierung der Lagerverwaltung entfällt zum einen die aufwändige papierbasierte Erfassung. Zum anderen ermöglicht die kontinuierliche Überwachung der Lagerbestände die Identifizierung und Vermeidung überschüssiger Bestände, wodurch zusätzlicher Raum im Lager nutzbar wird. Des Weiteren kann die Einhaltung einer Kühlkette oder das Mindesthaltbarkeitsdatum von Produkten überwacht und somit eine Verschwendung von Materialien und Produkten vermieden werden. Bei einem vollständigen digitalen Abbild der Produkte entfällt jegliche Buchung durch das Personal, da die intelligente Lagerverwaltung diese automatisiert bei einer Verlagerung umbucht. Hierdurch können Fehler vermieden und Ressourcen geschont werden. Durch die verbesserte Lokalisierung der Produkte können zudem Zeit und Fahrwege von Förderfahrzeugen eingespart werden.

## Produktlokalisierung

Große Lagerhallen mit vielen Einzelteilen erschweren die Lokalisierung von Produkten. Durch den Einsatz von Transmittern und Sensoren kann die Suche deutlich vereinfacht werden, da so zu jedem Zeitpunkt der genaue Standpunkt erfasst wird. Zusätzliche Hilfestellung bieten hier sogenannte Marker, welche optische oder akustische Signale bei Bedarf aussenden und so die Lokalisierung erleichtern.

## Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Durch Indoor-Lokalisierungssysteme kann das Auffinden von Produkten in großen Lagerhallen erleichtert werden. Diese Systeme bestehen meist aus Markern als Transmitter und Satelliten als Sensoren. Die Anwender können die Marker auf Teile oder Teilstapel legen oder an diesen befestigen. Diese senden Signale an die an der Hallendecke befestigten Satelliten, sodass eine kontinuierliche Lokalisierung möglich ist. Wird ein entsprechendes Teil benötigt, kann die Lage exakt bspw. durch Triangulation bestimmt und die Suche durch LEDs des jeweiligen Markers erleichtert werden [18].

## Ressourceneffizienzpotenzial

Aufgrund der vereinfachten Produktlokalisierung können langwierige Produktsuchen verhindert werden. Dies spart nicht nur Zeit, sondern verkürzt auch die zurückgelegten Wege von Gabelstaplern und anderen Lagerfahrzeugen, wodurch Energie und somit Emissionen eingespart werden können.

## Produktion

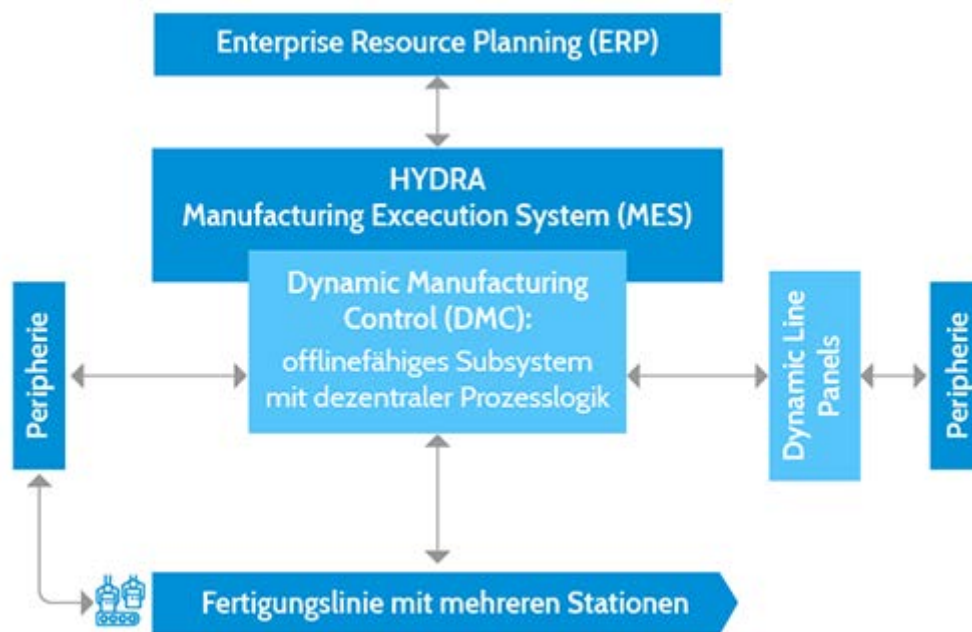
Bei der Produktion von Waren und Gütern liegen große Ressourceneffizienzpotenziale in der Nutzung von Echtzeitdaten. Sowohl in der Stückgutfertigung als auch in der Prozessfertigung kann durch die Aufzeichnung und Auswertung von Echtzeitdaten die Maschinenauslastung gesteigert werden. Gleichzeitig können Organisation und Prognose zukünftiger Wartungsprozesse verbessert und somit die Maschinenausfallrate verringert werden. Durch eine schnelle Anpassung von Produktionsprozessen an geänderte Produkt- und Prozessanforderungen kann ebenfalls eine höhere Produktqualität und somit ein geringerer Ausschuss realisiert werden.

## Dynamic Manufacturing

Mit **Dynamic Manufacturing** wird eine sich an die jeweilige Auftragslage anpassende Produktion bezeichnet. Diese wird durch die kontinuierliche Auswertung von Echtzeitdaten möglich. Durch die Vernetzung der Produktionsmaschinen sowie deren (de-)zentrale Analyse können Planungsdefizite aufgedeckt und Verbesserungspotenziale erschlossen werden. Hierbei muss auch auf Daten des Enterprise-Ressource-Planning-(ERP-)Systems und des Manufacturing Execution Systems (MES) zurückgegriffen werden. So können durch die Auswertung der Produktionsdaten unnötige Wartezeiten von Halbzeugen vor Prozessen durch nicht synchrone Planung und andere schlecht abgestimmte Logistikabläufe identifiziert und durch eine verbesserte Planung eliminiert werden. Es kann die Maschinenauslastung erhöht und damit auch der Durchsatz gesteigert werden. Außerdem können durch den Vergleich verschiedener Produktionsmargen die Batch-Größen angepasst werden, sodass der kumulierte Gesamtaufwand sinkt [19][20].

## Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Dynamische Überwachung von Fertigungslinien: Mithilfe von Künstlicher Intelligenz (KI) kann der Produktionsplan in Bezug auf kürzere Wartezeiten und höhere Maschinenauslastung verbessert werden. Durch die Echtzeitdatenerfassung der Auslastungen aller Produktionsmaschinen und Fertigungszellen kann eine dynamische Anpassung der Produktionsplanung erfolgen, um somit z. B. Eilaufträge bestmöglich in die bestehende Planung zu integrieren [21]. Energieeffizienz industrieller Prozesse steigern: Um Energieverschwendung zu verringern, können Kontrollsensoren an den Produktionsmaschinen und -anlagen angebracht werden. Diese steuern den Standby-Ausschalt-Modus und senken so den Energieverbrauch bei geplanten und unvorhergesehenen Produktionsschwankungen [22].



*Flexible Prozessüberwachung und Steuerung: in Anlehnung an [www.mpdv.com](http://www.mpdv.com)*

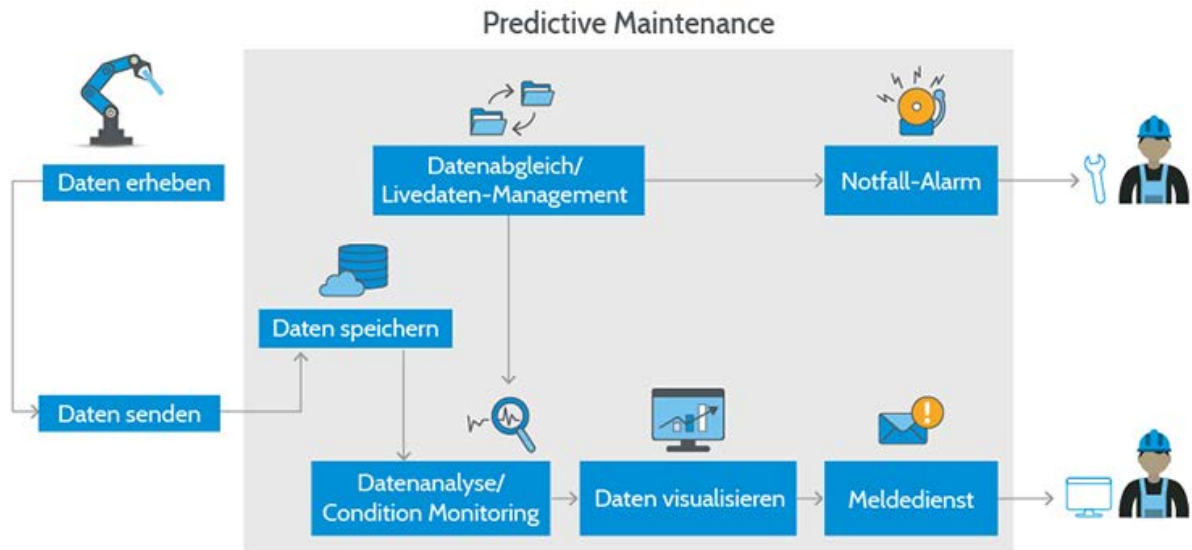
## Ressourceneffizienzpotenzial

Die verbesserte Gesamtauslegung der Produktion durch **Dynamic Manufacturing** in Kombination mit **Predictive Maintenance** (s. u.) führt zu einer Erhöhung der Ressourceneffizienz. So können durch geeignetere Losgrößen sowie verringerten Stillstand der Produktionsmaschinen Energie und Material eingespart werden. Dies kann dazu führen, dass weniger Produktionsmaschinen benötigt werden, da die Maschinen effizienter arbeiten und aufgrund der geringeren Stillstandszeiten weniger Maschinen für die gleiche Produktionsmenge benötigt werden.

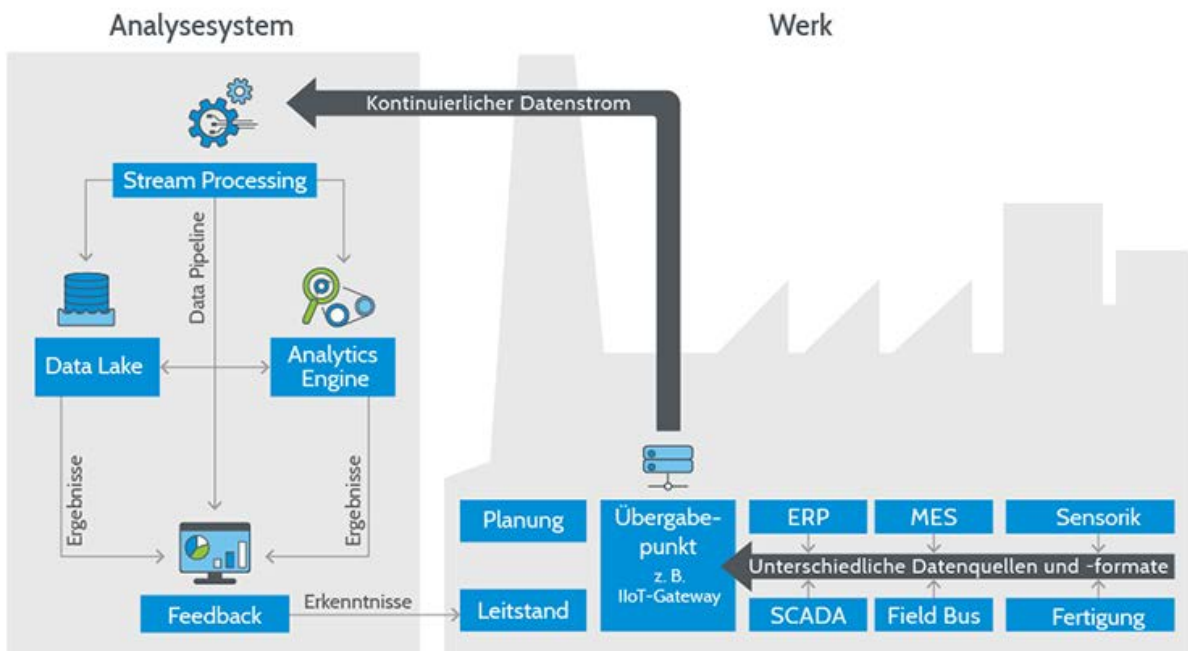
## Intelligente Wartung/Predictive Maintenance

Unter Predictive Maintenance werden die Prognose zukünftiger Maschinenausfälle sowie die damit verbundene Wartungsplanung verstanden. Ziel ist, eine hohe Ausnutzung der Komponenten von Maschinen und Anlagen bei gleichzeitiger Erhöhung ihrer Ausfallsicherheit zu erreichen. Dies wird durch die kontinuierliche Aufzeichnung und Auswertung der Prozessdaten möglich. Durch die Analyse von Maschinendaten wie Strom-, Wasser-, Druckluft- oder Betriebsmittelverbrauch können Abweichungen, welche zu Störungen und Defekten führen können, schnell erkannt werden. So kann ein ansteigender Stromverbrauch einer Werkzeugmaschine z. B. auf ein defektes Lager oder einen verschlissenen Elektromotor hinweisen oder ein gesteigerter Druckluftverbrauch auf einen porösen Dichtungsring oder ein anderes Leck. Leichte Unregelmäßigkeiten im Schwingungsverhalten von Motoren können auf eine Rissbildung in einem der Kugellager hindeuten. Durch die Analyse dieser Daten in Echtzeit wird ein Eingreifen möglich, noch bevor sich der Defekt auf den Produktionsprozess oder die Produktqualität auswirkt. Grundlagen von Predictive Maintenance bilden eine Vielzahl an erfassten Prozesskenngrößen sowie eine Verbindung mit bisherigen Störfällen. Die Anwendung von Predictive Maintenance kann mit hohem Kosten- und Zeitaufwand verbunden sein und sollte nur bei kritischen Prozessen eingesetzt werden, wenn eine entsprechende Wertschöpfungssteigerung zu erwarten ist.





Predictive Maintenance: in Anlehnung an [www.isax.com](http://www.isax.com)



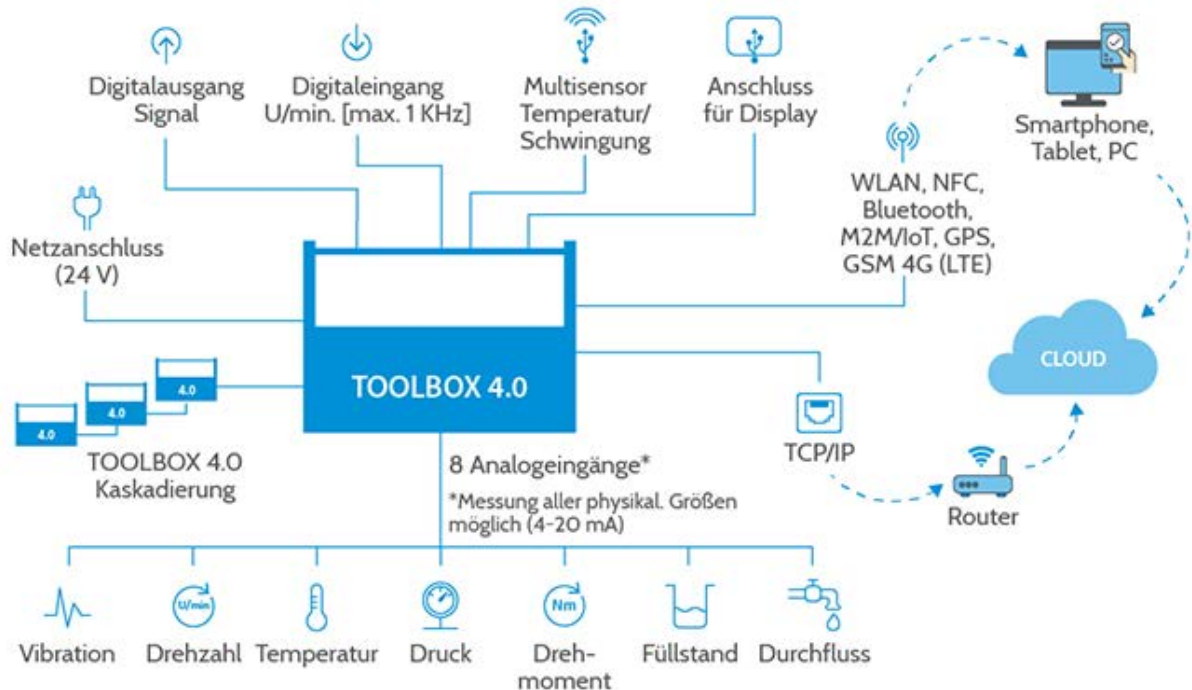
Predictive Maintenance Architektur für ein ganzes Werk: in Anlehnung an [www.dlg.org](http://www.dlg.org)

## Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Oft erfassen Unternehmen bereits über Sensoren den aktuellen Zustand ihrer Maschinen. Die Vielzahl an Sensoren und zu interpretierenden Messwerten erschwert jedoch oft eine Datenauswertung. Eine Möglichkeit, diese Datenmenge zu beherrschen, bildet die Toolbox 4.0. Durch die Option, unterschiedliche Sensoren an standardisierte Schnittstellen anschließen zu können, sowie eine Vielzahl von Übertragungswegen der Messdaten in eine Cloud wird eine ganzheitliche Überwachung von Maschinenparametern wie Stromverbrauch, Schwingungen, Temperatur oder Durchsatz realisierbar. Die in Echtzeit erfassten Daten werden zentral analysiert und interpretiert. Somit können Maschinen nicht nur einfach überwacht, sondern auch mögliche zukünftige Störfälle leicht identifiziert werden. So können unvorhergesehene Ausfallzeiten ebenso wie Instandhaltungs- und Servicekosten reduziert werden. Dies steigert die Produktivität und erhöht die Planungssicherheit [23].



Für einen Einstieg in das Verfahren der Predictive Maintenance eignen sich beispielsweise mobile Schwingungsmesser. Diese können auf eine beliebige Maschine platziert werden, um über einen Zeitraum von wenigen Sekunden Schwingungsmessdaten zu sammeln. Eine drahtlose Triaxialmessung von Maschinenschwingungen erlaubt Rückschlüsse über mögliche Lager Schäden oder andere Maschinendefekte. Eine Auswertung per App oder Tablet bietet eine einfache Interpretation der Messwerte [24].



Funktionsschema Tool-Box 4.0 - in Anlehnung an [www.sh-tools.com/](http://www.sh-tools.com/)

## Ressourceneffizienzpotenzial

Durch die frühzeitige Erkennung von Leckagen oder steigendem Stromverbrauch können Material und Energie eingespart werden. Da Störungen und Defekte effizienter verhindert werden, kommt es auch seltener zu Ausschuss. Dies ermöglicht eine höhere Standzeit von Werkzeugen, wie bspw. Frässpindeln oder Bohrern, ohne einen Qualitätsverlust im Bearbeitungsergebnis.

## Qualitätsmanagement

Die Aufzeichnung und Auswertung von Messwerten und -daten zur Qualitätskontrolle in Echtzeit ermöglichen ein Erkennen von Abweichungen. So können Prozesse frühzeitig angepasst werden. Analog zum **Predictive Maintenance** kann beispielsweise ein erhöhter Stromverbrauch einer Werkzeugmaschine ein Indikator für Qualitätsprobleme aufgrund von Werkzeug- oder Lagerverschleiß sein. Echtzeitdaten ermöglichen es auch hier, Produktqualitätsdefizite zu erkennen, bevor sie entstehen. So können Ausschussraten gesenkt und durchgehende Transparenz entlang der gesamten Fertigungskette geschaffen werden.

## Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Wissensbasierte Prozessintelligenz: In der Bioproduktion werden Enzyme, Wirkstoffe oder Biotreibstoff in Bioreaktoren hergestellt. Die Qualität dieser Produkte wird meist am Ende des Prozesses kontrolliert. Durch eine strategische Allianz verschiedener Branchen sollen Ressourcen mithilfe einer kontinuierlichen Überwachung von Bioreaktoren eingespart werden.

Statt nach dem Bioprozess soll nun das Qualitätsmanagement bereits während der Synthesierung angesetzt werden. So wird es schon während der Produktion möglich zu testen, ob die Organismen das gewünschte Produkt zuverlässig hergestellt haben, und verhindert, dass ganze Chargen verworfen werden müssen. Qualitätsmanagement und Prozessüberwachung verschmelzen miteinander. Der Herstellungsprozess kann dadurch zusätzlich kontinuierlich verbessert werden [25].

### Ressourceneffizienzpotenzial

Durch die Echtzeitdatenerfassung im Qualitätsmanagement können Fehler frühzeitig erkannt und laufende Produktionsprozesse schnell angepasst werden. Dadurch kann die Ausschussrate je nach Branche teilweise sehr stark gesenkt werden.

## Versand und Distribution

Durch die Erfassung und Analyse von Echtzeitdaten bei Versand und Distribution können die Fahrzeugauslastungen gesteigert und die Fahrtrouten verkürzt werden. Dafür sind eine verbesserte Kommunikation in der Produktion und der verstärkte Einsatz von Techniken wie Global Positioning System (GPS) und Radio-Frequency Identification (RFID) notwendig.

### Verpacken

Bevor produzierte Waren versendet werden können, müssen sie sachgerecht verpackt werden. Durch die Erfassung von Echtzeitdaten entlang der gesamten Produktionskette können hier Engpässe vermieden werden. Aufgrund der **permanenten Inventur** ist zu jedem Zeitpunkt der Produktion bekannt, welche Materialien für den nächsten Produktionsschritt benötigt werden. So können zu Beginn der Produktion bereits eventuell nicht mehr vorhandene Verpackungen für den späteren Versand nachbestellt werden, noch bevor das Produkt fertiggestellt wurde. Hierdurch werden lange Zwischenlagerzeiten und die damit einhergehenden Verzögerungen bei der Auslieferung verhindert.

### Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Vernetzte Produktion: Die Fertigungskommunikation in einem bestehenden Beschichtungswerk konnte komplett automatisiert werden. Entstanden ist ein intelligentes Netzwerk von Beschichtungs-, Schneid- und Verpackungsanlagen, das mittels Datentelegrammen kommuniziert. Nach Abschluss eines Fertigungsschritts können beispielsweise die nachfolgenden Verpackungsmaschinen selbstständig die geeignete Verpackungsvariante auswählen sowie die benötigten Verladezettel für Versand und Zoll erstellen. So werden sehr gute Werte für Versandgeschwindigkeit und -korrektheit erreicht [26].

### Ressourceneffizienzpotenzial

Durch die Auswertung der Echtzeitdaten können Lieferengpässe verhindert werden. So kann die Maschinenauslastung gesteigert und der Energieverbrauch gesenkt werden.

### Intelligente Distribution

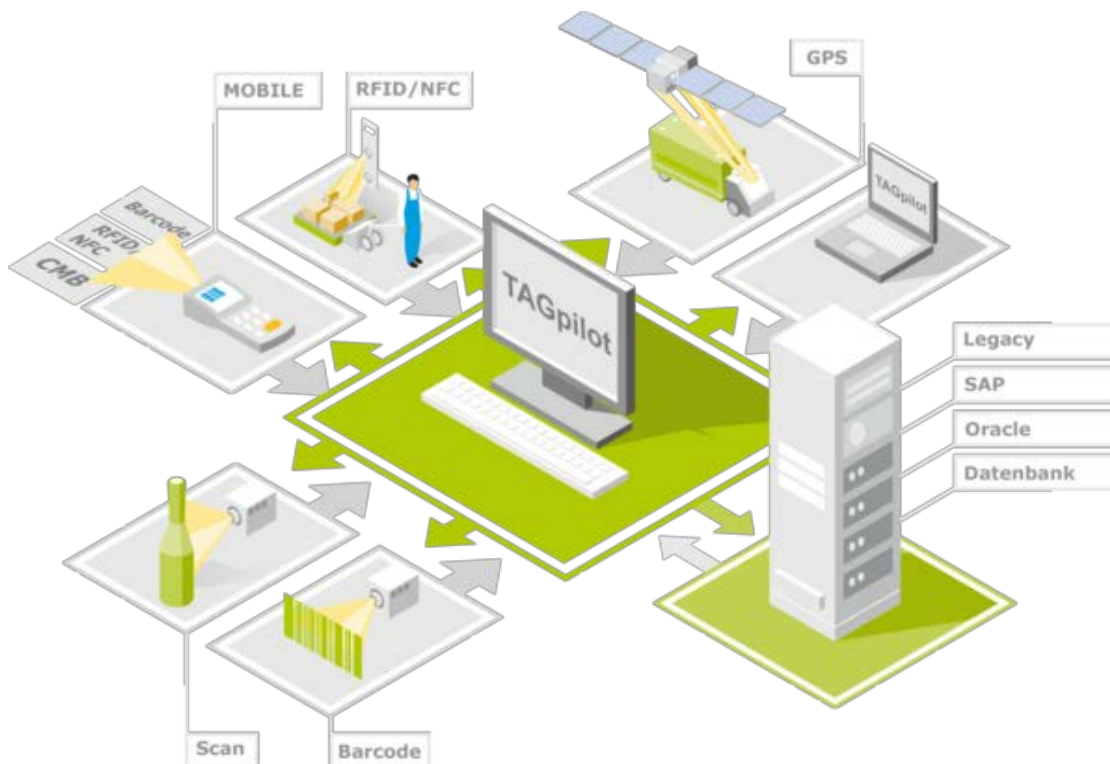
Das kontinuierliche Tracking von Produkten in der Distribution ist gestützt auf Techniken wie Global Positioning System (GPS) oder Radio-Frequency Identification (RFID). Die Analyse der anfallenden Distributionsdaten ermöglicht es, die Organisation der Auslieferung zu verbessern, indem bspw. LKW-Beladungen gesteigert und Fahrtrouten adäquater umgesetzt werden. So können sowohl Auslieferungszeit als auch Transportkosten gesenkt werden [5].

## Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Um Transportkosten einzusparen und Lieferengpässe zu vermeiden, ist eine kontinuierliche Überwachung der Distribution notwendig. Hierfür müssen die zu versendenden Produkte mit GPS- oder RFID-Transmittern ausgestattet werden, sodass sie dauerhaft in Echtzeit lokalisiert werden können. Die Auswertung dieser Daten durch intelligente Algorithmen führt zu einer verbesserten Distribution [27].

## Ressourceneffizienzpotenzial

Durch intelligente Distribution können Transportkosten und damit auch Kraftstoffe und Emissionen eingespart werden, da durch diese Distribution die Kombination von Echtzeitdaten mit Künstlicher Intelligenz effizienter gestaltet werden kann.



Beispielhaftes Funktionsprinzip der Echtzeitüberwachung der Position von Produkten mithilfe von RFID- und anderen Trackern: [www.tagpilot.com](http://www.tagpilot.com)

## Kunde

Neben der Nutzung von Echtzeitdaten in der Kommunikation zwischen Unternehmen (B2B) ist diese auch bei der wachsenden Interaktion von Unternehmen mit den Kunden (B2C) möglich. Kürzere Innovationszyklen von Konsumgütern führen zu geringeren Markteintrittszeiten „time to market“. Diese können u. a. durch eine verbesserte Kommunikation zwischen Produzent und Verbraucher realisiert werden.

## On-Demand-Fertigung

Die zunehmende Produktindividualisierung und -digitalisierung ermöglichen neue Fertigungsstrategien. Echtzeitdaten spielen dabei eine entscheidende Rolle. Neue Technologien wie der 3D-Druck ermöglichen hierbei eine individualisierte und dezentrale Produktion. Konsumenten

können online Produkte gestalten, diese werden dann in Echtzeit lokal gefertigt. Hierbei handelt es sich um eine sogenannte On-Demand-Fertigung.

Auch die zunehmende Kommunikation auf den Webseiten der Produzenten sowie das mittlerweile selbstverständliche Bewerten der Konsumgüter kann in Kombination mit der Echtzeitdatenerfassung genutzt werden, um Anpassungen der Produktion an die Kundenwünsche zu realisieren.

### Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Ein integriertes Beispiel der On-Demand-Fertigung bildet eine innovative Schuhfabrik. Hier können Kunden ihre Schuhe online konfigurieren. Diese werden dann anschließend On-Demand materialeffizient mit einem 3D-Drucker in Kleinstserie hergestellt. Die Fertigung findet somit näher am Absatzmarkt statt, wodurch sich die Transportwege und Lieferzeiten erheblich verkürzen. Die „time to market“ kann so von drei Monaten auf fünf Stunden reduziert werden [28].

### Ressourceneffizienzpotenzial

Durch die On-Demand-Fertigung wird die Produktion zielgerichteter an den individuellen Kunden angepasst. Zum einen können Lagerbestände reduziert werden. Zum anderen wird vermieden, dass unbeliebte Produktvarianten in den Verkaufsregalen platziert werden, da jedes Produkt von einem individuellen Abnehmer designt und gekauft wird. Außerdem können Kraftstoffe und Emissionen beim Transport eingespart werden. Die individuelle Fertigung von Kleinstserien ermöglicht es, dezentral zu produzieren. Lange Lieferwege von den Großfabriken bis zum Verbraucher entfallen somit.

### Echtzeit-Produktionsanpassung

Neben der **On-Demand-Fertigung** ermöglichen Daten-Links zum Kunden weniger spezifische Anpassungen der Produktion. Durch die Kommunikation mit den (industriellen) Kunden (B2B-Market) können Nachfrage-Prognosen erstellt und entsprechende Anpassungen an der Produktion vorgenommen werden. Aktuelle Information durch Echtzeit-Daten können so die Entscheidungsfindung in vielen Unternehmensbereichen beschleunigen.

### Praxisbeispiele und F&E-Projekte

Im Getränkehandel sorgen Wetter, Urlaubszeiten und Großereignisse für erhebliche Nachfrageschwankungen. Analog gilt dies für die vorgelagerte Getränkeproduktion. Die Analyse von Echtzeitbestandsdaten, kombiniert mit weiteren Faktoren wie historischen Absatzmustern, Haltbarkeitszeiten, Mindestbestellmengen und Lieferfreigrenzen, ermöglicht eine präzise Nachfrageprognostizierung. So können sowohl Produktion als auch Versand effizienter verwaltet und eine hohe Produktionsauslastung bei gleichzeitiger Vermeidung von Lieferengpässen realisiert werden [29].

### Ressourceneffizienzpotenzial

Durch Nachfrageprognosen auf Grundlage von Echtzeitdaten können Emissionen durch koordinierte Bestellungen und dadurch reduzierte Lieferwege eingespart werden. Im Falle der Lebensmittelindustrie können außerdem Ausschüsse aufgrund des Auslaufens der Verfalldaten verhindert werden.

## Quellen

- 1 ISO/IEC 2382: 2015-05: Internationale Organisation für Normung, Informationstechnologie – Vokabularien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- 2 Lauber, R.; Göhner, P. (1999): Prozessautomatisierung 2, Springer, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-540-65319-6.
- 3 Berns K., Köpper A., Schürmann B. (2019): Technische Grundlagen Eingebetteter Systeme: Elektronik, Systemtheorie, Komponenten und Analyse, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-26515-1.
- 4 goingpublic.de (2018): Industrieller Mittelstand zunehmend interessiert an Finanzierung 4.0 [online]. GoingPublic Media AG [abgerufen am: 29.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.goingpublic.de/going-public-und-being-public/industrieller-mittelstand-zunehmend-interessiert-an-finanzierung-4-0/](https://www.goingpublic.de/going-public-und-being-public/industrieller-mittelstand-zunehmend-interessiert-an-finanzierung-4-0/)
- 5 Deloitte. (2020): Manufacturing 4.0 – Die digitale Umwälzung der Produktion [online]. Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft [abgerufen am: 29.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://www2.deloitte.com/de/de/pages/operations/articles/manufacturing-40-digitalisierung-der-produktion.html](https://www2.deloitte.com/de/de/pages/operations/articles/manufacturing-40-digitalisierung-der-produktion.html)
- 6 Schenk, M., Hg. (2010): Instandhaltung Technischer Systeme, Springer, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-642-03948-5.
- 7 Neuhold, M. (2019): Wie smarte Sensoren Industrie 4.0 vorantreiben [online]. Ernst & Young GmbH [abgerufen am 29.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.ey.com/de\\_de/industrial-products/wie-smarte-sensoren-industrie-40-vorantreiben](https://www.ey.com/de_de/industrial-products/wie-smarte-sensoren-industrie-40-vorantreiben)
- 8 Spectos (2018): Spectos RFID Lösungen für transparente Logistikprozesse [online]. Spectos GmbH [abgerufen am 29.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.spectos.com/de/post-logistik/rfid/](https://www.spectos.com/de/post-logistik/rfid/)
- 9 Sainathan, P. (2018): Supply Chain Visibility Evolution: Barcodes, RFID, NFC, BLE Beacons [online] roambee [abgerufen am: 29.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://blog.roambee.com/supply-chain-technology/evolution-in-supply-chain-visibility-barcodes-to-rfid-to-ble-beacons](https://blog.roambee.com/supply-chain-technology/evolution-in-supply-chain-visibility-barcodes-to-rfid-to-ble-beacons)
- 10 lydia-voice (2020): Lydia Pick by Voice Lösung für Logistik & Industrie. topsystem Systemhaus GmbH [abgerufen am: 30.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.lydia-voice.com/de/](https://www.lydia-voice.com/de/)
- 11 ACD Gruppe (2020): Mobiler Arbeitsplatz MAX. ACD Holding GmbH & Co. KG [abgerufen am: 30.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.acd-gruppe.de/](https://www.acd-gruppe.de/)
- 12 Kletti, J. (2014): Whitepaper Management Support – Mit Kennzahlen die Produktion im Griff; MPDV Mikrolab GmbH; Mosbach
- 13 Miltner, T. (2019): Echtzeitdaten über den MDM? [online]. MDM User Group [abgerufen am 30.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.mdm-portal.de/echtzeitdaten-ueber-den-mdm-2/](https://www.mdm-portal.de/echtzeitdaten-ueber-den-mdm-2/)
- 14 Datenbanken verstehen (2019): Echtzeitdaten [online]. Begerow Beratungsgesellschaft mbH & Co. KG [abgerufen am: 30.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.datenbanken-verstehen.de/lexikon/echtzeitdaten/](https://www.datenbanken-verstehen.de/lexikon/echtzeitdaten/)



- 15 Vojdani, N.; Erichsen, B.; Lück, T. (2017): Nutzung von Produktionsechtzeitdaten – Eine agentenbasierte Feinplanung mittels Simulation; Logistics Journal: Proceedings – ISSN 2192-9084; DOI: 10.2195/lj\_Proc\_vojdani\_de\_201710\_01
- 16 Natenhorst, W. (2019): Materialbedarfsermittlung in Echtzeit in der Pumpenproduktion [online]. RFID & Wireless IoT Search Engine [abgerufen am: 30.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.rfid-wiot-search.com/de/wilms-materialbedarfsermittlung-in-echtzeit-in-der-pumpenproduktion](https://www.rfid-wiot-search.com/de/wilms-materialbedarfsermittlung-in-echtzeit-in-der-pumpenproduktion)
- 17 Hering, E.; Triemel, J.; Blank, H. (2002): Qualitätsmanagement für Ingenieure, Springer, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-540-43427-6
- 18 IT&Production Online (2019): Lagerbewegung in Echtzeit verfolgen [online]. TeDo Verlag GmbH [abgerufen am: 04.05.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.it-production.com/neuheiten/lagerbewegung-in-echtzeit-verfolgen/](https://www.it-production.com/neuheiten/lagerbewegung-in-echtzeit-verfolgen/)
- 19 TimeLine ERP (2020): Maschinendatenerfassung (MDE) [online]. Gebauer GmbH [abgerufen am 04.05.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.timeline-erp.de/module/datenerfassung/mde/](https://www.timeline-erp.de/module/datenerfassung/mde/)
- 20 IT&Production Online (2016): Materialfluss und Produktion in Echtzeit steuern [online]. TeDO Verlag GmbH [abgerufen am: 04.05.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.it-production.com/allgemein/der-plan-den-man-nicht-aendern-kann-ist-ein-schlechter-plan-sallustmaterialfluss-und-produktion-in-echtzeit-steuern/](https://www.it-production.com/allgemein/der-plan-den-man-nicht-aendern-kann-ist-ein-schlechter-plan-sallustmaterialfluss-und-produktion-in-echtzeit-steuern/)
- 21 mpdv (2017): Monitor and control complex processes and production lines! [online]. MPDV Mikrolab GmbH [abgerufen am: 04.04.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.mpdv.com/en/products-solutions/mes-hydra/dynamic-manufacturing-control/](https://www.mpdv.com/en/products-solutions/mes-hydra/dynamic-manufacturing-control/)
- 22 IT&Production Online (2013): Energieeffizienz industrieller Prozesse steigern [online]. TeDO Verlag GmbH [abgerufen am: 04.05.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.it-production.com/allgemein/it-einsatz-spart-energieenergieeffizienz-industrieller-prozesse-steigern/](https://www.it-production.com/allgemein/it-einsatz-spart-energieenergieeffizienz-industrieller-prozesse-steigern/)
- 23 sh-tools (2020): Wir digitalisieren Ihre Instandhaltung, SH-TOOLS GmbH [abgerufen am: 04.05.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.sh-tools.com/](https://www.sh-tools.com/)
- 24 OneProd (2020): ONEPROD, ACOEM Group [abgerufen am: 04.05.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.oneprod.com/de/](https://www.oneprod.com/de/)
- 25 Graf, P. (2014): Online-Qualitätscheck im Bioreaktor [online]. Bioökonomie.de [abgerufen am: 04.05.2020], verfügbar unter: [LINK https://biooekonomie.de/online-qualitaetscheck-im-bioreaktor](https://biooekonomie.de/online-qualitaetscheck-im-bioreaktor)
- 26 www.herma-etiketten.de (2019): Maschinen senden Datentelegramme – Bei Herma Haftmaterialien ist Industrie 4.0 bereits gelebte Realität, Zeitschrift Produktion Nr. 20, 25.09.2019, S. 31.
- 27 TAGpilot (2016): TAGpilot – Die Software für Auto ID Lösungen, TAGpilot GmbH [abgerufen am: 04.05.2020], verfügbar unter: [LINK http://www.tagpilot.com/index.php/produkte/tagpilot.html](http://www.tagpilot.com/index.php/produkte/tagpilot.html)
- 28 Proff, H., Sandau, J., Gönninger, F., Bittrich, C. (2016): Manufacturing 4.0: Meilenstein, Must-Have oder Millionengrab? – Warum bei M4.0 die Integration den entscheidenden Unterschied macht, Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft [PDF https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/operations/DELO-2267\\_Manufacturing-4.0-Studie\\_s.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/operations/DELO-2267_Manufacturing-4.0-Studie_s.pdf)

29 Karlstetter, F. (2014): Supply Chain Management und Predictive Analytics aus einem Guss – Optimierung und Automatisierung von Nachfrageprognosen [online]. Vogel IT-Medien GmbH [abgerufen am: 04.05.2020], verfügbar unter: [LINK https://www.cloudcomputing-insider.de/optimierung-und-automatisierung-von-nachfrageprognosen-a-470223/](https://www.cloudcomputing-insider.de/optimierung-und-automatisierung-von-nachfrageprognosen-a-470223/)