

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	9
------------------------------------	---

<b>Vorwort</b> .....	11
----------------------	----

## GRUNDLAGENTEIL

<b>1 Warum digitaler Retrofit?</b> .....	15
1.1 Motivation .....	15
1.1.1 Use Case 1: Digitaler Retrofit als Condition-Monitoring-Ansatz .....	16
1.1.2 Use Case 2: Digitaler Retrofit für Predictive Maintenance zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit .....	16
1.1.3 Use Case 3: Digitaler Retrofit als Mittel gegen den Fachkräftemangel .....	16
1.1.4 Use Case 4: Digitaler Retrofit zur Flexibilisierung der Produktion ...	17
1.1.5 Use Case 5: Digitaler Retrofit zur Qualitätssicherung .....	18
1.1.6 Use Case 6: Digitaler Retrofit für das Product-Lifecycle- Management .....	19
1.2 Konzeption des digitalen Retrofit von Maschinen und Produktionsanlagen im Gesamtkontext des Unternehmens .....	19
<b>2 Auswahl der geeigneten Integrationsstufe für den digitalen Retrofit</b> .....	23
2.1 Integrationsstufen des digitalen Retrofit .....	23
2.1.1 Kurzprofil der Integrationsstufe 1: Sustaining .....	24
2.1.2 Kurzprofil der Integrationsstufe 2: Kooperativ .....	25
2.1.3 Kurzprofil der Integrationsstufe 3: Integrativ .....	27
2.1.4 Kurzprofil der Integrationsstufe 4: Disruptiv .....	28
2.1.5 Zusammenfassung .....	29
2.2 «Quick-Check Digitaler Retrofit» – Ermittlung der passenden Integrationsstufe .....	30
<b>3 Retrofit-Strategie</b> .....	35
3.1 Retrofit Strategie für Integrationsstufe 1 Sustaining-Konzept .....	35
3.1.1 Sensorik / Aktorik .....	35
3.1.2 Datenhandling .....	37
3.1.3 Einbindung in höhere Systeme .....	38
3.2 Retrofit Strategie für kooperatives Konzept .....	38
3.2.1 Sensorik / Aktorik .....	38
3.2.2 Datenhandling .....	40
3.2.3 Einbindung in höhere Systeme .....	41
3.3 Retrofit Strategie für integratives Konzept .....	41
3.3.1 Sensorik / Aktorik .....	42
3.3.2 Datenhandling .....	43
3.3.3 Einbindung in höhere Systeme .....	44
3.4 Retrofit Strategie für disruptives Konzept .....	44

3.4.1	Sensorik / Aktorik .....	44
3.4.2	Datenhandling .....	45
3.4.3	Einbindung in höhere Systeme .....	46
<b>4</b>	<b>Entwicklung systemintegrierter Sensoren</b> .....	<b>47</b>
4.1	Grundlagen .....	47
4.2	Generisches Smart-Sensor-Modell .....	51
4.3	Sensorintegration .....	52
4.4	Vorgehensmodell zur Entwicklung systemintegrierter Sensorik .....	59
<b>5</b>	<b>Datenhandling und Netzwerkstruktur</b> .....	<b>63</b>
5.1	Grundlagen .....	63
5.2	Datenhandling und Systemgrenzen .....	65
5.3	Überblick: Schnittstellen, Standards, Protokolle .....	66
<b>6</b>	<b>Datenauswertung und Analyse</b> .....	<b>71</b>
6.1	Datenvisualisierung .....	71
6.2	Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen .....	72
<b>7</b>	<b>Rechtliche Aspekte eines Retrofits</b> .....	<b>77</b>

## PRAXISTEIL

<b>1</b>	<b>Verzahnungsüberwachung in Getrieben – Sustaining</b> .....	<b>81</b>
1.1	Quick-Check .....	81
1.2	Beschreibung des Umfelds .....	84
1.3	Herausforderung .....	84
1.4	Lösung .....	84
1.5	Umsetzung und Zielerreichung .....	86
<b>2</b>	<b>IIoT-Demonstrator aus dem Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Textil vernetzt – Sustaining</b> .....	<b>89</b>
2.1	Quick-Check .....	89
2.2	Beschreibung des Umfelds .....	91
2.3	Herausforderung .....	92
2.4	Lösung .....	93
2.5	Umsetzung und Zielerreichung .....	95
<b>3</b>	<b>Vorausschauender Filterwechsel in Reinstwasseranlagen – Sustaining</b> .....	<b>97</b>
3.1	Quick-Check .....	97
3.2	Beschreibung des Umfelds .....	99
3.3	Herausforderung .....	100
3.4	Lösung .....	100
3.5	Umsetzung und Zielerreichung .....	101
<b>4</b>	<b>Senogate – Sustaining</b> .....	<b>103</b>
4.1	Quick-Check .....	103

4.2	Beschreibung des Umfelds .....	105
4.3	Herausforderung .....	105
4.4	Lösung .....	106
4.5	Umsetzung und Zielerreichung .....	108
<b>5</b>	<b>Sensorgestützter Spritzgießprozess – Kooperativ .....</b>	<b>109</b>
5.1	Quick-Check .....	109
5.2	Beschreibung des Umfelds .....	111
5.3	Herausforderung .....	111
5.4	Lösung .....	112
5.5	Umsetzung und Zielerreichung .....	113
<b>6</b>	<b>Preisauszeichnungssystem – Kooperativ .....</b>	<b>115</b>
6.1	Quick-Check .....	115
6.2	Beschreibung des Umfelds .....	117
6.3	Herausforderung .....	117
6.4	Lösung .....	118
6.5	Umsetzung und Zielerreichung .....	120
<b>7</b>	<b>Sensor Technology Adapter Gateway (STAG) – Sustaining/Kooperativ .....</b>	<b>125</b>
7.1	Beschreibung des Umfelds .....	125
7.2	Herausforderung .....	125
7.3	Lösung .....	126
7.3.1	Definition der Module .....	127
7.3.2	Architekturübersicht .....	128
7.3.3	Internes Informationsmodell .....	130
7.3.4	Automatisches Mapping auf das interne Informationsmodell .....	132
7.4	Umsetzung und Zielerreichung .....	134
<b>8</b>	<b>Integration eines RevPi als «Off-the-Shelf»-Lösungen in eine Werkzeugmaschine – Integrativ .....</b>	<b>137</b>
8.1	Quick-Check .....	137
8.2	Beschreibung des Umfelds .....	139
8.3	Herausforderung .....	139
8.4	Lösung .....	140
8.5	Umsetzung und Zielerreichung .....	140
<b>9</b>	<b>Prozessoptimierung und Fernzugriff in eine Lasersintermaschine Typ EOS Formiga P100 – Integrativ .....</b>	<b>143</b>
9.1	Quick-Check .....	144
9.2	Beschreibung des Umfelds .....	146
9.3	Herausforderung .....	146
9.4	Lösung .....	146
9.5	Umsetzung und Zielerreichung .....	148
<b>10</b>	<b>CNC Drehmaschine – Disruptiv .....</b>	<b>151</b>
10.1	Quick-Check .....	151
10.2	Beschreibung des Umfelds .....	154

10.3 Herausforderung .....	154
10.4 Umsetzung und Zielerreichung .....	154
<b>11 Mustererkennung bei Wafermapdaten .....</b>	<b>161</b>
11.1 Beschreibung des Umfelds .....	161
11.2 Herausforderung .....	162
11.3 Lösung .....	162
11.4 Umsetzung .....	163
<b>Management Statement von FORCAM – Retrofit: «Der Schlüssel zu nachhaltiger Produktion ist die digitale Anbindung jeder einzelnen Maschine – alt wie neu» .....</b>	<b>167</b>
<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>172</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>174</b>
<b>Lebensläufe der Autoren .....</b>	<b>175</b>

# Abkürzungsverzeichnis

## 3

3D-MID (3D Molded Interconnect Devices) 58

## A

AA (Active Alignment) 58  
 AD (Analog-Digital) 48–50  
 ADC (Analog-to-Digital Converter) 48, 50  
 AR (Augmented Reality) 17, 22  
 ArbSchG (Arbeitsschutzgesetz) 77  
 ARM (Advanced RISC Machines) 125

## B

BetrSichV (Betriebssicherheitsverordnung) 77

## C

CAN (Controller Area Network) 68, 155  
 CDC (Capacitance-to-Digital Converter) 50  
 CE (Conformité Européenne) 35, 77, 138  
 CIMTT 137, 139–142, 147, 151–153,  
 155–157, 159, 171  
 CMOS (Complementary Metal-Oxide-  
 Semiconductor) 48  
 CNC (Computerized Numerical Control)  
 151–157

## D

DL (Deep Learning) 72  
 DLP (Digital Light Processing) 58  
 DSGVO (Datenschutz-Grundverordnung) 78

## E

EDX (Energiedispersive Röntgenspektroskopie)  
 119  
 EOS 143, 146  
 ERP (Enterprise Resource Planning) 16, 20, 24,  
 41, 45  
 ESD (Electrostatic Discharge) 51  
 EtherCat (Ethernet für Control Automation  
 Technology) 45, 68

## F

FBMVGROB 159  
 FDM (Fused Deposition Modeling) 58  
 FEM (Finite-Elemente-Methode) 20  
 FFT (Fast Fourier Transformation) 87  
 FMEA (Fehlermöglichkeits- und  
 Einflussanalyse) 39

## G

GaAs (Galliumarsenid) 58  
 GATT (Generisches Attributionsprofil) 126, 135

## H

HDMI (High Definition Multimedia Interface)  
 103  
 HMI (Human-Machine Interface) 140  
 HTTP (Hypertext Transfer Protocol) 159–160

## I

I/O (Input/Output) 158  
 I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) 67, 103, 105, 107  
 IDC (Inductance-to-Digital Converter) 50  
 IIoT (Industrial Internet of Things) 30, 66, 89,  
 91–95, 107, 126, 128  
 InP (Indium-Phosphid) 58  
 IoT (Internet of Things) 94, 103, 106, 108, 112,  
 146  
 IT (Information Technology) 41, 70, 125–126

## K

KPI (Key Performance Indicator) 16

## L

LED (Light-Emitting Diode) 49  
 LwM2M (Lightweight Machine-to-Machine)  
 112, 126, 134–135

## M

M2M (Machine-to-Machine) 93  
 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 48,  
 84, 162  
 MES (Manufacturing Execution System) 16, 20,  
 24, 41, 45, 63, 65–69, 78, 93, 125, 146, 154  
 ML (maschinelles Lernen) 72–75  
 MQTT (Message Queuing Telemetry  
 Transport) 45, 69–70, 93–94, 107, 128,  
 135, 141, 148, 159  
 MRL (Maschinenrichtlinie) 77

## O

OEE (Overall Equipment Effectiveness) 16  
 OPC UA (Open Platform Communications  
 Unified Architecture) 41, 45, 69–70, 93,  
 106–107, 113, 125, 135

**P**

PC (Personal Computer) 69, 87, 93, 146, 155  
PCA (Principal Component Analysis) 75  
PET (Polyethylenterephthalat) 56  
PID 159  
PLM (Product Lifecycle Management) 19  
PPU (Pay-Per-Use) 22  
ProdSG (Produktsicherheitsgesetz) 77  
PRU (Programmable Realtime Unit) 85

**R**

RDC (Resistance-to-Digital Converter) 50  
REM (Rasterelektronenmikroskopie) 119  
RFID (Radio-Frequency Identification) 154, 160  
RTOS (Realtime Operating System) 125

**S**

SPI (Serial Peripheral Interface) 67, 103, 107  
SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) 38, 45, 68, 140, 143, 146  
STAG (Sensor Technology Adapter Gateway) 112, 125–135

**T**

TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 63, 70, 85, 87, 107, 141

TDC (Time-to-Digital Converter) 50  
TICK 106  
TTL (Transistor-Transistor-Logik) 154

**U**

UML (Unified Modeling Language) 130  
USB (Universal Serial Bus) 37, 67, 103, 105, 107–108  
UV (Ultraviolett) 49

**V**

VCO (Voltage-Controlled Oscillator) 48  
VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) 30, 77  
VR (Virtual Reality) 17, 22

**W**

WLAN (Wireless Local Area Network) 67, 69, 103, 140, 148

**X**

X86 125

# Vorwort

Liebe Leserin,  
lieber Leser,

das vorliegende Buch entstand als gemeinschaftliches Projekt der Autoren im Zeitraum vom Juli 2020 bis September 2021. Es war für uns selbst ein spannendes Erlebnis, wie die unterschiedlichen Perspektiven auf den Begriff «Digitaler Retrofit» aufeinandertrafen und sich nach durchaus kontroversen Diskussionen schließlich eine logisch gegliederte Systematik herauskristallisierte.

Am Beginn stand die Beobachtung, dass es beim digitalen Retrofit von Maschinen und Produktionsanlagen eine Abstufung im Hinblick darauf gibt, wie umfassend eine bestehende Anlage durch den Retrofit verändert wird. Dazu kommt, dass der digitale Retrofit unterschiedlichen Zwecken dient, angefangen mit der Retrofit-Sensorik als «Lieferant» für die relevanten Daten aus der Maschine, über die Weiterverarbeitung und Analyse dieser Daten bis hin zu der Frage, wie die Erkenntnisse der Datenanalyse in die Maschine zurückgeführt werden können.

Mit den in diesem Buch erstmals definierten Integrationsstufen «Sustaining» – «Kooperativ» – «Integrativ» – «Disruptiv» wird nun eine systematische Gliederung und Definition vorgeschlagen, die es erlaubt, im Hinblick auf die praktische Umsetzung des digitalen Retrofits den jeweiligen Handlungsspielraum klar zu umreißen. Gleichzeitig werden detaillierte Einblicke in die sich daraus jeweils ergebenden technischen Fragestellungen gegeben.

Darüber hinaus war es uns ein Anliegen, Ihnen als Leserin und Leser eine Hilfestellung bei der Auswahl der für Ihre spezifische Aufgabenstellung am besten geeigneten Retrofitlösung zu geben. Dazu wurden konkrete Schritte im Sinne einer Umsetzungsstrategie für die gewählte Integrationsstufe formuliert.

Obige Intention findet sich im Kapitelaufbau des Grundlagenteils wieder. Nach einer allgemeinen Motivation im Kapitel 1 werden im Kapitel 2 die vier Integrationsstufen des digitalen Retrofits gegeneinander abgegrenzt. Ein Quick-Check ermöglicht sodann im Sinne eines Praxis-handbuches die eigenständige Auswahl der jeweils passenden Integrationsstufe für die eigene Aufgabenstellung.

Im Kapitel 3 werden für die vier Integrationsstufen konkrete Schritte zur Umsetzung des digitalen Retrofits skizziert, zumeist im Sinne einer Darstellung der Aspekte, die in besonderer Weise bei der praktischen Umsetzung zu beachten sind.

Die Kapitel 4 bis 7 bieten detailliertere Informationen zu den Themen Systemintegrierte Sensorik, Datenhandling, Datenanalyse sowie zu rechtlichen Aspekten des digitalen Retrofits.

Abgeschlossen wird das Buch durch einen umfangreichen Praxisteil mit 11 Beispielen aus der beruflichen Erfahrung der Autoren, die die zahlreichen Facetten des digitalen Retrofits greifbar werden lassen.

Wir wünschen eine spannende Lektüre und eine erfolgreiche Umsetzung Ihres konkreten Projekts!





# GRUNDLAGENTEIL



# 1 Warum digitaler Retrofit?

## Intention des Kapitels:

- Der Leser soll verstanden haben, was die Motivation für den digitalen Retrofit ist.

## 1.1 Motivation

Der weltweite jährliche Umsatz im Maschinenbau betrug im Jahr 2019 13,74 Billionen US-Dollar [1]. Multipliziert mit einer angenommenen durchschnittlichen Nutzungsdauer der Anlagen von 15 Jahren ergibt sich überschlägig ein Gegenwert für das weltweit installierte Volumen an Produktionsanlagen in Höhe von knapp 200 Billionen US-Dollar. Aus dieser sehr hohen Summe folgt zwangsläufig, dass die Modernisierung eines Maschinenparks in längeren zeitlichen Zyklen geplant und umgesetzt werden muss.

Auf der anderen Seite durchdringen neueste Entwicklungen und Möglichkeiten der Digitalisierung alle Bereiche des täglichen Lebens mit einer nie dagewesenen Geschwindigkeit. Aus der Generierung von Daten und deren intelligenten Auswertung werden neue Geschäftsmodelle und Dienstleistungen abgeleitet; die maximale Transparenz über den Zustand eines Systems sowie die dazugehörige Historie wird in Zeiten von vernetzten Online-Plattformen fast schon als selbstverständlich vorausgesetzt.

Darüber hinaus bestehen aufgrund der immer kürzer werdenden Innovationszyklen [2], [3] für die Produkte steigende Anforderungen an die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen [4].

Es stellt sich die Frage, wie der sehr langfristig agierende Markt für Produktionsanlagen auf diese Entwicklung reagieren kann, nicht zuletzt vor dem Hintergrund der immer wichtiger werdenden Frage des sparsamen und nachhaltigen Umgangs mit Material- und Energieressourcen.

In diesem Spannungsfeld bietet der digitale Retrofit, durch die nachträgliche Integration von Sensorik und ggf. Aktorik sowie Signalverarbeitung in Produktionsanlagen, Lösungsansätze, um einerseits einen bestehenden Maschinenpark für die gestiegenen Vernetzungsanforderungen zu ertüchtigen und andererseits die auf den Produktionsanlagen ablaufenden Prozesse digital gestützt zu flexibilisieren bzw. in ihrer Performance zu verbessern. Ein weiterer Fokus liegt hierbei auf der Konnektivität.

Ein digitales Retrofitting unterliegt immer einer Zielfunktion. Die in der Produktion vorhandenen Bestandsmaschinen ermöglichen bedingt durch ihr Alter häufig keinen Datenzugriff. Im Rahmen der Zieldefinition ist dieser allerdings entscheidend. Dabei variieren die einzelnen Ziele stark in Abhängigkeit von Firmen- und Fertigungsstruktur, den dort vorhandenen IT-Lösungen im Produktionsumfeld und einer möglichen Integration weit über das betrachtete Unternehmen hinaus über den kompletten Produktlebenszyklus. Für ein tieferes Prozessverständnis sind im Folgenden einige mögliche Anwendungsfälle (*Use Cases*) des digitalen Retrofits kurz umrissen.

### 1.1.1 Use Case 1: Digitaler Retrofit als Condition-Monitoring-Ansatz

Das *Condition Monitoring*, oder übersetzt die «Zustandsüberwachung», stellt dabei das am häufigsten angestrebte Ziel einer Retrofitmaßnahme dar. Dabei können die Ansätze durchaus unterschiedlich sein und sich sowohl auf den Zustand der Maschine (vgl. dazu auch *Predictive Maintenance*) als auch auf den Zustand des gefertigten Produktes beziehen. Bei Letzterem ist neben der Dokumentation der Produktentstehung häufig auch die Prozessoptimierung ein Ziel. Beide Ansätze lassen sich nicht ohne Daten aus dem Prozess respektive von den Maschinenkomponenten erzielen. Je nach Ansatz ist dann die Auswertung anders zu betrachten.

Darüber hinaus können so Stillstandszeiten reduziert und die Anlagenverfügbarkeit erhöht werden. Dazu kommen die Vorteile einer transparenteren Fertigungssteuerung, die bei den häufig nicht verketteten Maschinen die komplexen Steuerungsvorgänge (Material, Werkzeuge, Vorrichtungen, Personal etc.) leichter überschaubar macht und durch entsprechende Entscheidungen die Effizienz der Produktion verbessern kann. So ergibt sich durch die Erfassung und Analyse der Produktionsdaten ein detaillierterer Einblick in einzelne Maschinen, Produktionsketten oder die Gesamtproduktion. Daraus lassen sich im nächsten Schritt, häufig unterstützt durch entsprechende Softwaresysteme (wie z. B. MES, *Manufacturing Execution System*) oder ERP (*Enterprise Resource Planning*), beliebig viele Kennzahlen, kurz KPI (*Key Performance Indicator*) bis hin zur OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), ableiten und für unternehmerische Entscheidungen nutzen.

### 1.1.2 Use Case 2: Digitaler Retrofit für Predictive Maintenance zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit

Geplante Wartungsereignisse (präventive Instandhaltung) binden Kapazitäten und verschwenden Lebenszeit von Anlagenkomponenten. Eine bei älteren Maschinen meist in Kauf genommene Alternative ist das Betreiben einer Maschine oder Anlage bis zum Ausfall einer Komponente (reaktionäre Instandhaltung), was häufig zu höherem potenziellem Schaden führt. Die durch die Retrofitmaßnahme erhöhte Konnektivität bildet die Grundvoraussetzung, um aus *Condition Monitoring* (zustandsbasierte Instandhaltung) eine vorausschauende Wartung zu erzeugen, und so das Versagen von Bauteilen vorherzusagen zu können (prädikative Instandhaltung).

### 1.1.3 Use Case 3: Digitaler Retrofit als Mittel gegen den Fachkräftemangel

An eine im Feld befindliche Produktionsanlage werden sehr hohe Anforderungen in Bezug auf die Anlagenverfügbarkeit gestellt. Abseits von geplanten Stillstandszeiten für Wartungen und den ebenfalls geplanten Rüstzeiten führen ungeplante Stillstandszeiten schnell zu sehr hohen wirtschaftlichen Schäden durch Produktionsausfälle. Aus diesem Grund kommt sowohl der regelmäßigen Wartung als auch der notfallmäßigen Reparatur von Produktionsanlagen eine hohe Bedeutung zu.

Während es früher in den Teams der Maschinenhersteller langjährig erfahrenes Personal für die Wartung und Instandsetzung der Anlagen gab, stellt der Mangel an qualifizierten Facharbeitern die Firmen inzwischen vor die Frage, wie die hohe Anlagenverfügbarkeit in Zukunft sichergestellt werden kann. Das klassische Szenario, dass ein Industriemechaniker-Meister, ausgerüstet mit einem Werkzeugkoffer und einem Standardsatz an Ersatzteilen, in 95 % der Fälle bei einer

stillstehenden Maschine innerhalb eines Tages den Fehler identifiziert und behebt, wird mangels entsprechend ausgebildetem Nachwuchs immer anspruchsvoller aufrechtzuerhalten.

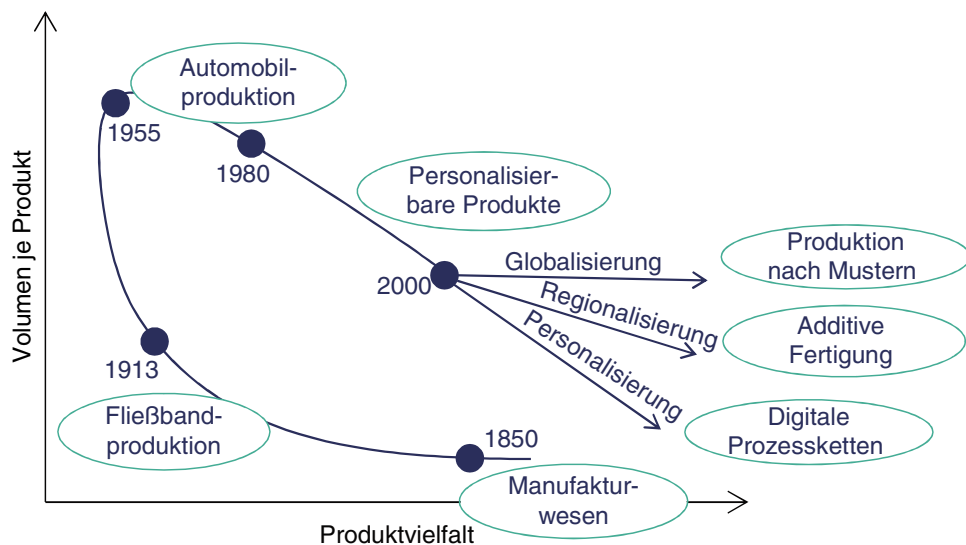
In diesem Fall eröffnet der digitale Retrofit in Kombination mit Datenanalyse über einen längeren Zeitraum die Option, Maschinen- und Systemzustände von Bestandsmaschinen sichtbar zu machen und über definierte Schnittstellen für die Fernwartung bereitzustellen. Dadurch können kritische Verschleißkomponenten überwacht und zum richtigen Zeitpunkt präventiv gewartet oder ausgetauscht werden. Darüber hinaus kann durch Informationen über den Systemzustand und Fehlerursachen der Facharbeiter bei der Reparatur und Wartung von Anlagen gezielt unterstützt werden.

Spannende Berührungspunkte ergeben sich an dieser Stelle auch zu der Frage, wie die Unterstützung des Facharbeiters beispielsweise durch AR- (*Augmented Reality*) oder VR- (*Virtual Reality*)-Lösungen intuitiv und nutzerfreundlich gestaltet werden kann.

#### 1.1.4 Use Case 4: Digitaler Retrofit zur Flexibilisierung der Produktion

Die Individualisierung von Produkten stellt aus Gründen des Verbraucherinteresses, aber auch aus Gründen der durch die Vernetzung ständig steigenden Komplexität der Produkte in zahlreichen Branchen einen deutlich erkennbaren Trend dar [5], [12], [13]. Ziel der individualisierten Produktion ist es, auf möglichst viele kunden- und anwendungsspezifische Randbedingungen für die Produkte reagieren zu können und dabei gleichzeitig die Kosten für deren individualisierte Fertigung in Grenzen zu halten.

Das Bild 1.1 stellt in schematischer Form die zeitliche Entwicklung von Produktvielfalt und -volumen seit der industriellen Revolution dar. Während das Erfolgsrezept der Massenproduktion zunächst auf der drastischen Reduktion der Variantenvielfalt beruhte, womit die Fertigungskosten pro Teil gesenkt und die Produktqualität sichergestellt werden konnte, begann sich der Trend hin zu stärker individualisierten Produkten seit den 1950er-Jahren mehr und mehr umzukehren.



**Bild 1.1** Entwicklungskurve von Produktvielfalt und -volumen

In diesem Zusammenhang sind insbesondere drei Dimensionen der Individualisierung von Produkten zu berücksichtigen:

- Individualisierung der Produktgestalt,
- Individualisierung der Funktionalität,
- Individualisierung von Dienstleistung (*Servicification*).

Während die Erschließung der zweiten und dritten Dimension der Individualisierung heutzutage überwiegend mittels Software angegangen wird, bleibt die Individualisierung der Produktgestalt ein hardwarebezogenes und somit investitionsintensives Themenfeld. Den Schlüssel für die industrielle Umsetzung bilden sogenannte digitale Fertigungsprozesse, also Prozesse, die aus der digitalen Repräsentation eines Bauteils direkt und ohne produktspezifische Werkzeuge, Masken, o. ä. die Fertigung ermöglichen. Am anschaulichsten wird das am Fall eines 3D-Druckers deutlich («Datei rein, Produkt raus»). Allerdings erfordern komplexere Produkte, die unterschiedlichste Materialien und Komponenten in sich vereinen, weitere durchgängig digitale Fertigungsprozesse.

Genau an dieser Stelle findet sich der Use Case für den digitalen Retrofit. Wenn bestehende digitale Fertigungsprozesse durch den Einsatz von (nachgerüsteter) Sensorik und Regelungstechnik weiter flexibilisiert und individualisiert werden, indem die Stabilität der Prozessführung durch anlagenintegrierte Sensoren überwacht wird, dann können z. B. Einfahrprozesse durch entsprechende Regelkreise verkürzt werden. Dies reduziert Ausschussproduktion und Abfälle und bahnt somit einer ökonomisch sinnvollen Produktion bis zur theoretischen Stückzahl eins den Weg.

### 1.1.5 Use Case 5: Digitaler Retrofit zur Qualitätssicherung

Nicht zu vernachlässigen sind im Rahmen der Digitalisierung immer stärker aufkommende Kundenwünsche zur Dokumentation des Entstehungsprozesses von Produkten. Nicht nur ein Mittel der eigenen Qualitätssicherung, sondern auch ein Verkaufsargument ist der direkte mit Zeitstempel versehene Zustand (je nach Messwert) des Produktes im Entstehungsprozess. Insbesondere die Branchen Luft- und Raumfahrt, Verteidigung, Automobil, Lebensmittel und Medizin erwarten von ihren Lieferanten bereits seit Jahren einen Nachweis der Produktionsbedingungen.

So werden Daten genutzt, um die Produktionsbedingungen zu erfassen und somit eine konstante Qualität des Produktes sicherzustellen. Darüber hinaus rücken diese Daten immer mehr in den Fokus, um auftretende Änderungen an Maschinen und Anlagenkomponenten vorherzusehen und somit sowohl eine Verschlechterung der erzielten Qualität schnellstmöglich zu erkennen, als auch die Veränderung der Maschineneigenschaften unter dem Aspekt der Reduzierung der Maschinenausfälle detektieren zu können.

Einen weiteren Aspekt bildet hier auch die Möglichkeit der Chargenrückverfolgung bzw. des Chargennachweises. Nur durch die Kenntnis von Zeit und Produktionsbedingungen kann abgesichert werden, dass komplette Chargen aus dem Umlauf genommen und so ein hoher Qualitätsstandard gesichert werden kann. Teilweise wird dieses auch von den entsprechenden Fachverbänden gefordert, und zwar nicht nur bei einem Erzeuger, sondern über den gesamten Produktentstehungsprozess (vgl. EG Nr. 178/2002 (Basis-Verordnung) für Lebensmittel). Dazu gehören in diesem Beispiel neben dem Lebensmittel auch alle Produkte, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen.

Darüber hinaus führen unter Umständen nicht die an der Maschine für den Produktionsprozess eingestellten Parameter, sondern die Umgebungsbedingungen (relative Luftfeuchte, Temperatur

etc.) zu einer Veränderung der Produkteigenschaften. Häufig ist dieser Nachweis schwer zu erbringen und die Korrelation mit anderen Ereignissen nicht ohne Weiteres zu erkennen. Unter solchen Bedingungen wird erst durch den digitale Retrofit eine Korrelation zu anderen Ereignissen ermöglicht.

Um Entscheidungen zu treffen, ist Transparenz in der Produktion unabdingbar. Dabei können die Möglichkeiten und damit auch die Ausgangslagen für Entscheidungen vielschichtig sein. So erhofft sich die Instandhaltung, aufgrund der sich ändernden Sensorsignale an Anlagenkomponenten, Rückschlüsse auf deren Ausfallzeitpunkt. Die Produktionssteuerung benötigt z. B. Informationen zur aktuellen Auslastung, Störungen und die für deren Abstellung benötigte Restzeit. Oder im Sinne der Ortung von Bauteilen, Vorrichtungen oder Werkzeugen Informationen über deren Standort respektive Bewegungsmuster. Demgegenüber wünscht die Managementebene häufig davon deutlich entkoppelte Informationen auf Basis von Kennzahlen, deren Berechnung wiederum auf einzelnen zu interpretierenden Signalen der Maschine basiert.

### 1.1.6 Use Case 6: Digitaler Retrofit für das Product-Lifecycle-Management

Das *Product-Lifecycle-Management* kurz PLM ist ein Konzept zur kompletten Integration sämtlicher Informationen über den gesamten Produktlebenszyklus. Unter dem Aspekt des Retrofits kann hier die Datengewinnung aus der Produktion ein eindeutiges Ziel sein. Die gewonnenen Daten können entsprechend revisionsicher archiviert und so über den gesamten Produktlebenszyklus genutzt werden. Insbesondere unter dem Fokus der Schadenanalyse kann so auf die exakten Produktionsparameter zurückgegriffen werden (vgl. hierzu auch: Use Case 5: Digitaler Retrofit zur Qualitätssicherung).

## 1.2 Konzeption des digitalen Retrofit von Maschinen und Produktionsanlagen im Gesamtkontext des Unternehmens

Im engeren Sinn können unter dem digitalen Retrofit diejenigen Maßnahmen subsumiert werden, die direkt an der Produktionsanlage vorgenommen werden. Gleichwohl ist es ratsam, diese Maßnahmen – idealerweise vor dem Beginn der technischen Umsetzung – konzeptionell in einen größeren Zusammenhang zu setzen. Dies kann helfen, zusätzlich notwendige Maßnahmen, z. B. bei der technischen Infrastruktur der Produktionsanlagen, rechtzeitig in den Blick zu nehmen und die Durchgängigkeit der technischen Lösung sicherzustellen.

Eine sehr wichtige Perspektive ist neben dem Blick auf die Produktionsanlage dabei der Blick auf die Produkte selbst. Auch wenn in Bezug auf die Produkte in den meisten Fällen nicht von einem digitalen Retrofit, sondern eher von einer Neuentwicklung von Produkten mit digitalen Zusatzfunktionen gesprochen werden könnte, ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten für die intelligente Verknüpfung von Informationen bzw. Datenquellen. So können intelligente Produkte dazu befähigt werden, Informationen über ihren Herstellungsprozess zu erheben und zu speichern. Zusätzlich können entlang des ganzen Produktlebenszyklus weitere Daten eingesammelt und z. B. auch in Beziehung zu den während der Produktion erhobenen Daten gesetzt werden. Je nachdem, ob diese Dimension der Vernetzung erforderlich bzw. sinnvoll ist, ergeben sich Randbedingungen, die bei der Konzeption des digitalen Retrofit zu berücksichtigen sind.

Nicht zuletzt lohnt sich auch die Perspektive, in welcher Form eine Retrofit-Produktionsanlage in höhere Systeme (MES, ERP) eingebunden sein soll und welche Daten hierfür erhoben und übergeben werden sollen. Dies betrifft z. B. auch die Fragestellung nach Lieferkettenübergreifendem Datenaustausch. Auch aus diesem Themenkomplex lassen sich Randbedingungen für die Konzeption einer Retrofitlösung ableiten.

Die folgenden Leitfragen können bei der initialen Konzeption des digitalen Retrofit hilfreich sein, wobei die in den Leitfragen adressierten verwandten Themen an dieser Stelle nur erwähnt werden, ohne detaillierte technische Lösungsvorschläge zu bieten.

### **Wie smart / individuell müssen meine Produkte sein?**

Aus der Definition der Produkte selbst ergeben sich Anforderungen an die Produktion. So führt beispielsweise eine große Produkt- und Variantenvielfalt dazu, dass Herstellungsprozesse für derartige individualisierte Produkte flexibel anpassbar sein müssen. Um die Initialkosten und den Bedieneraufwand während der Herstellungsprozesse zu senken und gleichzeitig eine hohe Bauteilqualität aufrecht zu erhalten, können z. B. sensorgestützte Prozessüberwachungen und -regelungen erforderlich werden.

### **Welche Informationen aus der Produktion sind relevant?**

Die Klärung dieser Frage stellt oftmals selbst den initialen Auslöser für einen digitalen Retrofit dar. In vielen Fällen ist zwar grob bekannt, welche Informationen eine Relevanz besitzen könnten; wie diese Informationen aber aus konkreten Messdaten oder Parametersätzen extrahiert werden müssen, entzieht sich in vielen Fällen der Kenntnis. Sobald diese Frage, ggf. mit Hilfe von analysierenden und experimentellen Voruntersuchungen, geklärt ist, kann die technische Lösung für den digitalen Retrofit zielgerichtet konzipiert und umgesetzt werden. Eine extrem wichtige Hilfe für die Klärung dieser Frage sind Befragungen bei erfahrenen Produktionsmitarbeitern, die entscheidende Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge – wo nicht quantitativ – so doch häufig qualitativ benennen können.

### **Wie erhalte ich überhaupt die benötigten Informationen?**

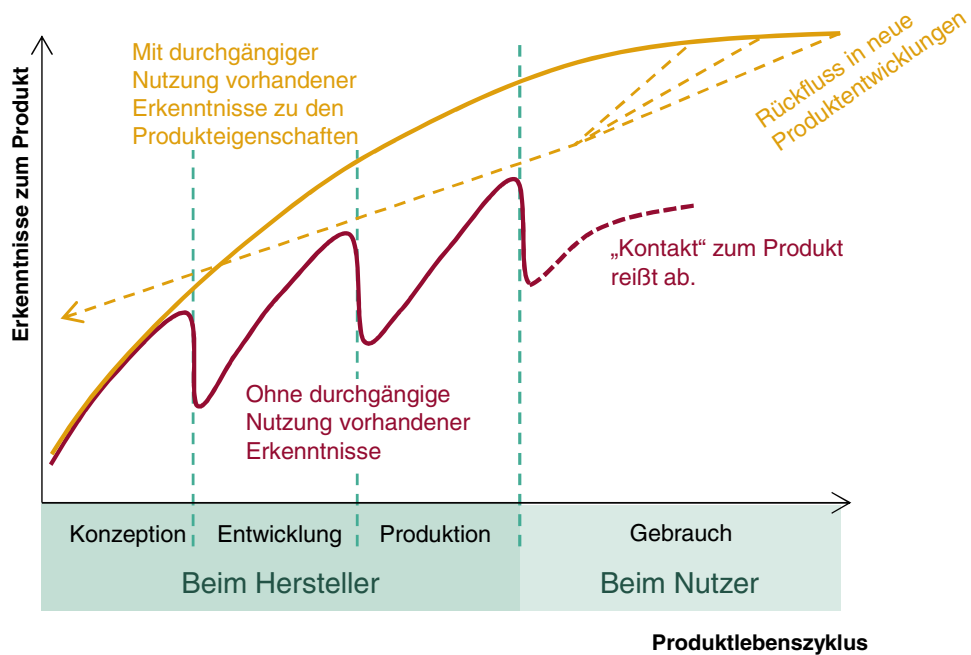
Diese Frage dient der Differenzierung der vorherigen Frage. In vielen Fällen kann eine relevante Information nicht einfach direkt als Messwert eines einzelnen Sensors oder als solitärer Maschinenparameter gewonnen werden. In vielen Fällen müssen Daten aus verschiedenen Quellen kombiniert werden. Diese Tatsache führt in der Praxis regelmäßig zu hohen Entwicklungsaufwänden, da die Kompatibilität der einzelnen Datenquellen – allen Standardisierungsbemühungen zum Trotz – fallspezifisch betrachtet und nicht selten durch zusätzliche Maßnahmen erst hergestellt werden muss.

### **Wie gelingt es, Informationen, die in der Produktentwicklung entstehen (Simulation, CAD), entlang eines Produktionsprozesses weiterzugeben und weiter zu nutzen?**

Sehr häufig kann beobachtet werden, dass die Nutzung digitaler Werkzeuge im Produktentwicklungsprozess bereits sehr weit verbreitet ist. Ein Beispiel ist die in aller Regel lückenlose Absicherung des Füllvorgangs im Spritzgussprozess durch vorangegangene FEM (Finite-Elemente-Methode)-Simulationen. Allerdings fehlt in vielen Fällen die Übertragung des in solchen Simulationsmodellen enthaltenen Know-hows auf den nachfolgenden tatsächlichen Produktionsschritt. So dienen möglicherweise per Simulation ermittelte Prozessparameter als Startwert für die Prozessoptimierung durch den Maschinenbediener, eine weitergehende Nutzung der Modelle, z. B. für die Prozessregelung oder für die Analyse von Produktionsfehlern, findet aber oft nicht statt. Grund hierfür sind häufig fehlende Schnittstellen zwischen aufeinanderfolgenden Produktent-



wicklungsschritten oder -werkzeugen. Die Folge solcher «Wissensbrüche» ist, dass eigentlich gesichertes Wissen aus einem früheren Schritt des Produktentstehungsprozesses für die folgenden Schritte verloren geht und im Zweifelsfall wieder neu erarbeitet werden muss. Im Bild 1.2 ist dies schematisch dargestellt. Die konsequente Nutzung einmal gesicherter Erkenntnisse zum Produkt erhöht nicht nur die Wissensbasis während des Entwicklungs- und Produktionsprozesses, sondern führt auch dazu, dass Erkenntnisse aus dem Produktgebrauch in neue Produktentwicklungen einfließen können.



**Bild 1.2** Effekt der durchgängigen Nutzung von Erkenntnissen entlang des Produktlebenszyklus

Für den digitalen Retrofit einer Produktionsanlage folgt, dass es sinnvoll sein kann, entsprechende Schnittstellen in der Konzeptionsphase mit zu bedenken und einzuplanen.

### Wie gelingt es, aus diesen Informationen Nutzen für den Einsatzfall des Produkts zu ziehen?

Analog zu der vorangehenden Frage sollte bei der Konzeption des digitalen Retrofit auch geprüft werden, ob in der anderen Richtung des Produktlebenszyklus, also für Schritte, die nach dem Produktionsprozess folgen, eine Durchlässigkeit bestimmter Informationen und Daten gegeben sein soll. Beispielsweise ist es vorstellbar, die entsprechenden Daten, oder eine aus den Daten extrahierte Information, nicht nur in der Produktionsanlage selbst oder in einem höheren System zu speichern, sondern in einem «digitalen Produktgedächtnis» in dem Produkt selbst. Wie in dem vorangehenden Fall ist festzuhalten, dass die Durchlässigkeit solcher Informationen keinesfalls von allein entsteht. Bei der Auswahl technischer Standards und Systeme, die diese Funktionalität bieten, spielen selbstverständlich auch Fragen der Datensicherheit eine sehr wichtige Rolle. Konkrete technische Umsetzungen beinhalten hierfür z. B. Blockchain-Lösungen zur Realisierung einer manipulationsgeschützten Produkthistorie.