

# Sensor 4.0 für Industrie 4.0

Dieter Schaudel,  
SCHAUDELconsult, D-79111 Freiburg / Deutschland  
Kontakt: DS@schaudelconsult.com

## Digitalisierung und ‚Internet der Dinge‘

Nur weil Handys allgegenwärtig sind und in immer mehr Fabriken Software eingesetzt wird, ist die sogenannte „digitale Revolution“ noch nicht vollendet. Wenig hat unsere technische und gesellschaftliche Welt in den letzten Jahren so nachhaltig verändert wie neuartige Funktionen auf der Basis digitaler Hard- und Software. Aber in Wirklichkeit geht es jetzt erst richtig los. Treiber sind das Moore'sche Gesetz, die Flexibilität programmierbarer Hardware, die gewaltige Mechatronisierung auch mit Mikrosystemtechnik, die immer noch zunehmende Leistungsfähigkeit der weltweiten digitalen Netze und des World Wide Web und die beinahe unbegrenzte Einsatzbreite der digitalen Techniken - um nur die wichtigsten zu nennen. Die Art und Weise, wie immer mehr Menschen und Unternehmen digitale Technologien nutzen, hebt die Grundsäulen unseres gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Selbstverständnisses aus den Angeln. Das technisch Machbare ist bereits Realität, aber noch längst nicht ausgereizt. Was digitalisiert werden kann, wird digitalisiert. Hierdurch entstehen neue Märkte und etablierte Branchen und Unternehmen geraten unter Druck oder verschwinden vom Markt.

Es ist hier nicht der Ort, in Breite und Tiefe auszuloten, wie es dazu kam, wo wir heute stehen oder wie es weitergehen wird. Aber die fundamentale Wichtigkeit der Sensoren bzw. der Sensorik für diesen evolutionären Wandel wird nur wenig beachtet - vielleicht weil viele der Apologeten in ihrer IT-Welt gefangen sind? Denn sicher ist: Ohne Sensoren (und Aktoren) sind das ‚Internet der Dinge‘ und seine Derivate blind, taub, gefühllos (und stumm), also nicht realisierbar.

## ‚Industrie 4.0‘ - was ist das und warum ist es wichtig?

Dieser Teil des ‚Internet der Dinge‘ ist seit 2012 ein Zukunftsprojekt in der „Hightech-Strategie“ der deutschen Bundesregierung und der deutschen (!) Industrie. Mit ihm soll die Informatisierung (Digitalisierung) der Prozess- und Fertigungstechnik und der Logistik vorangetrieben werden. Marketing- und fördergeldorientierte Enthusiasten reden auch gerne von einer „Vierten industriellen Revolution“ - wohl wissend, dass der (deutsche!) Begriff eher eine Milchstraße von Visionen und Utopien umschreibt als sauber definierte Ziele - und dass wir die Charakterisierung „Revolution“ wie in der Ver-

gangenheit den kommenden Historikergenerationen überlassen sollten. In Abb. 1 sind die vorangegangenen sogenannten „industriellen Revolutionen“ skizziert.

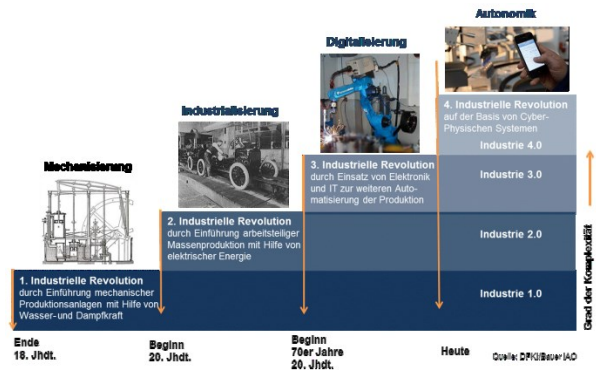


Abb.1: Von ‚Industrie 1.0‘ zu ‚Industrie 4.0‘

Kennzeichnend für „Industrie 4.0“ im Bereich der Industrieproduktion sind die starke Anpassung (bis zur Losgröße 1) der Produkte unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten (Großserien-)Produktion (Mass Customization). Die für ‚Industrie 4.0‘ notwendige Automatisierungstechnik soll durch die Einführung von Verfahren der Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration, Selbstdiagnose und Kognition „intelligenter“ werden und die Menschen bei ihrer zunehmend komplexeren Arbeit besser unterstützen [1].

Basis ist die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen sowie die Fähigkeit, aus den Daten den zu jedem Zeitpunkt optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen entstehen dynamische, echtzeitoptimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie beispielsweise Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen [2]; deshalb wird dafür in der aktuellen „Hightech-Strategie 2020“ der deutschen Bundesregierung auch der Begriff „Autonomik“ verwendet [3].

Die gesetzten Ziele sind anspruchsvoll:

- Mass Customization;
- Modularisierung;
- Collaboration;
- adaptiv;
- Punkt-zu-Punkt-Kommunikation.

Eine intelligente Produktion von morgen soll sein:

- kommunikativ, umfassend vernetzt;
- intelligent und selbstständig;
- durchgängig digital;
- einfach zu installieren und zu bedienen.

„Industrie 4.0“ ist zunächst ein rein deutscher, erst 2012 geprägter Marketingbegriff. Denn ein „Internet of Things“ beschrieb Kevin Ashton vom Massachusetts Institute of Technology schon 13 Jahre vorher [4] als „ein informationstechnisch vernetztes System autonom interagierender Gegenstände und Prozesse, die sich durch eine zunehmende Selbstorganisation charakterisieren und zu einer wachsenden Verschmelzung physischer Dinge mit der digitalen Welt des Internets führen“. In den USA wurde das wirtschaftliche und gesellschaftspolitische Potenzial einer engen Verbindung von realer und virtueller Welt mit extensiver Nutzung des World Wide Web schon früh erkannt und mit Forschungsgeldern insbesondere der Ministerien für Verteidigung (DOD) und Energie (DOE) sowie großer Unternehmen vorangetrieben. Allerdings formierte sich erst im März 2014 das „Industrial Internet Consortium (IIC)“, das seither fast explosionsartig wächst und dem bereits über 200 Mitglieder aus der ganzen Welt angehören; das Ziel ist „*setting the architectural framework and direction for the Industrial Internet*“ [5].

## Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0

Um die Zukunftsfähigkeit des Standorts Deutschland und seiner Industrie abzusichern, wurden durch die „Plattform Industrie 4.0“ [2] in Zusammenarbeit der Verbände BITKOM, VDMA, ZVEI und den Unternehmen der deutschen Industrie die „Umsetzungsstrategie Industrie 4.0“ [6] erarbeitet. Dabei wurde ein „Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)“ für semantische Technologien und deren Nutzen für die Automatisierung und ihr zugeordneten relevanten Technologien vorgestellt, nachzulesen u. a. in einem VDI Statusreport [7]. Darin werden auch der Aufbau und die Arbeitsweise von sogenannten Industrie 4.0-Komponenten beschrieben. Abb. 2 gibt schematisch dieses Referenzarchitekturmodell wieder.

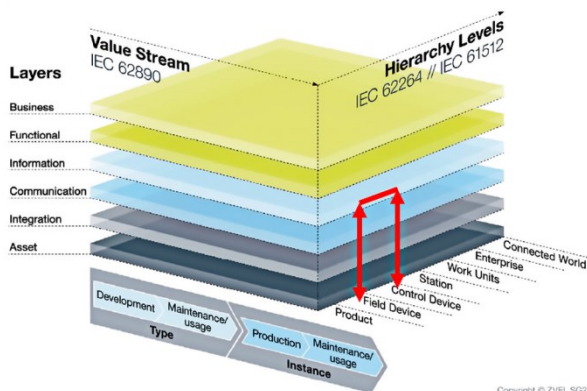


Abb. 2: RAMI 4.0

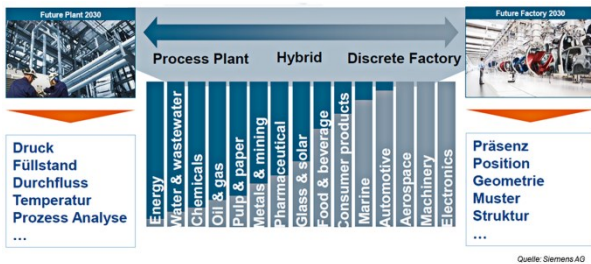
Im Juni 2015 veröffentlichte das IIC „The Industrial Internet Reference Architecture“ als Technical Paper [8] - inhaltlich leider mit nur wenigen Schnittmengen zum RAMI4.0.

## Sensor, ‚Smart Sensor‘, ‚Sensor 4.0‘

Bei einem „Sensor-Symposium“ sollte man eigentlich nicht mehr definieren müssen, was ein Sensor oder ein „Smart Sensor“ ist. Wer es trotzdem versucht, läuft rasch ins Nirwana. Selbst in Wikipedia herrscht dazu Resignation: „Die Abgrenzung der Begriffe Sensor und Messgrößenaufnehmer, Messfühler, Messgerät, Messeinrichtung etc. ist fließend, da dem Sensor zusätzlich zum eigentlichen Aufnehmer teilweise weitere Elemente der Messkette zugeordnet werden. Auch verwandte Begriffe sind in der Literatur nicht eindeutig definiert.“ Beispielsweise definiert die AMA in [9] einen Sensor so: „Eine Messgröße wird durch das physikalische Messprinzip des Sensorelements in ein internes Signal gewandelt. Nach evtl. elektronischer Weiterverarbeitung steht am Ausgang der Messwert als elektrisch verwertbares oder elektrisches Signal zur Verfügung - im einfachen Fall z.B. eine einfallende Lichtintensität als analoger Spannungswert.“ Vorsichtshalber wird dann im Weiteren darauf verzichtet, zu definieren, was ein „Smart Sensor“ sei. Das übernimmt dafür Wikipedia wie folgt: „Ein Smart-Sensor (auch Smartsensor oder intelligenter Sensor, engl. smart sensor) ist ein Sensor, der neben der eigentlichen Messgrößenerfassung auch die komplette Signalaufbereitung und Signalverarbeitung in einem Gehäuse vereinigt. Solche komplexen Sensoren beinhalten meist u.a. einen Mikroprozessor oder Mikrocontroller, wenn nötig auch zusätzlich mit DSP-Funktionalität und dergleichen mehr ausgestattet, komplexe Logikeinheiten wie z. B. FPGAs, ... und stellen standardisierte Schnittstellen zur Kommunikation mit übergeordneten Systemen bereit, z. B. über Feldbussysteme, Sensornetze oder ... Weil sie sozusagen „Intelligenz“ besitzen, werden diese Sensoren als „smart“ bezeichnet. Auf diese Weise soll die komplette anspruchsvolle Aufgabe solcher Sensoren ohne einen externen Rechner erfüllt werden - und dafür gibt es gute Gründe, wie zum Beispiel Miniaturisierung, Dezentralisierung, Erhöhen der Zuverlässigkeit, Reduzieren der Kosten, Verbessern der Flexibilität. Die technologische Basis dafür, dass solche komplexen (sic!) intelligenten Sensoren in Miniaturform überhaupt realisiert werden können, bieten u.a. die Mikroelektronik, die Mikrosystemtechnik und die Nanotechnologie.“

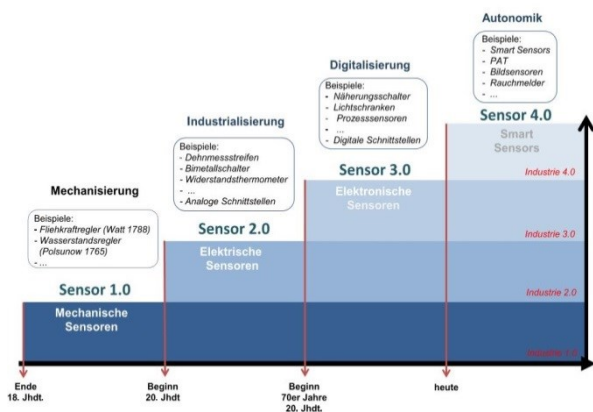
Solche „Smart Sensors“ sind, wenn man so will, in Analogie zu „Industrie 1.0 bis 4.0“ die dritte Generation der Sensoren und Messwertaufnehmer, also „Sensor 3.0“. Abb. 3 gibt eine Anmutung

davon, wo überall solche Sensoren eingesetzt sind, oft als „embedded system“ und von außen unsichtbar.



**Abb. 3:** Einsatzorte und Messparameter von Smart Sensoren.

Den Begriff „Sensor 4.0“ hat wohl Peter Krause, First Sensor AG Berlin, als Vorstandsmitglied der AMA während einer Präsentation auf der Konferenz des BMWi in Berlin ‚AUTONOMIK-Transfer - Industrie 4.0 als Wegbereiter für die Digitalisierung der Wirtschaft‘ am 31.01.2013 spontan verwendet [10]. Kurz danach hat er in einem weiteren Vortrag die Einordnung bildlich dargestellt..



**Abb. 4:** Von ‚Sensor 1.0‘ zu ‚Sensor 4.0‘ (in Anlehnung an eine Vorlage von Peter Krause)

### ‚Sensor 4.0‘: Generisches für das Lastenheft

Aber was macht nun einen „Smart Sensor“ zu einem „Sensor 4.0“?

Im Innovationsprozess beschreibt ein Lastenheft das „Was?“ und das „Wann?“ (das Pflichtenheft dann das „Wie?“ und das „Womit?“). Versuchen wir es damit:

Die meisten der heute schon geltenden generischen Lastenheftanforderungen an Sensoren und Sensorsysteme gelten auch für ‚Sensor 4.0‘:

- eindeutige Marktspezifikation (Markt- und Wettbewerbssituation, Kundennutzen, Preise und Stückzahlen, Vertriebs- und Servicestrategie, ...);

- berechenbar zuverlässig, sicher (Safety!) und hoch verfügbar;
- für den vorgesehenen Einbauort (Umgebungsbedingungen, Kontakt mit dem Messgut und am Messort, ...) mechanisch, thermisch, chemisch und elektronisch (Security!) dauerstandfest;
- konform mit den jeweils einschlägigen nationalen und internationalen Standards, Normen, Richtlinien, Sicherheitsvorschriften, Zulassungen, ...;
- wartbar, nötigenfalls auch im laufenden Betrieb einfach austauschbar.

Zusätzlich (!) werden nach dem heutigen Diskussionsstand um die Referenzarchitekturen von „Industrie 4.0“ (RAMI 4.0) [6] respektive „IIoT“ (Industrial Internet Reference Architecture des Industrial Internet Consortium IIC) [7] und den noch zu schaffenden Normen und Standards weitere Leistungen von einem „Sensor 4.x“ erwartet:

- liefert Information, nicht nur Daten, und zwar in systemverständlicher, standardisierter Semantik in Echtzeit;
- verknüpft und bewertet Daten von unterschiedlichen Sensorelementen zu einer prozessrelevanten Information;
- kann seine aktuelle Information mit vorgegebenen Mustern vergleichen;
- überwacht sich umfassend selbst auf Funktion und auf Richtigkeit der Information, kompensiert Abnutzung oder Verschleiß selbsttätig, meldet eine interne Störung oder seinen Ausfall, meldet seinen Arbeitsort;
- benötigt extrem wenig Fläche und Raum und ist in großen Stückzahlen kostengünstig hochautomatisiert herstellbar;
- ist energieautark, holt sich die benötigte elektrische Leistung aus der Umgebung und speichert sie (Energy Harvesting);
- ist kommunikationsautark, hat eigene IP-Adresse, organisiert seine bidirektionale Kommunikation selbsttätig: wireless, drahtgebunden oder optisch, im Dialog auch mit einer Cloud;
- ist inhärent datensicher (Security!), kommuniziert verschlüsselt;
- kann bei laufendem Betrieb störungsfrei eingebunden oder ausgetauscht werden, konfiguriert sich und seine externe Kommunikation selbst (plug & play);
- ist jahrelang unverändert oder kompatibel lieferbar.

Von Prozesssensoren (also Sensoren für die Chemie, die Pharma- und Bioindustrie, ...) werden darüber hinaus weitere Leistungen erwartet:

- enthalten ein Benutzerinterface zu Standardhardware (Smartphone, Tablet, ...) und können kontrolliert und IT-sicher ferngesteuert werden;
- kommunizieren störungsfrei untereinander mit einheitlichem Protokoll (vorzugsweise OPC-UA [6]) und einheitlicher Semantik;
- die Gültigkeit der Sensorinformationen ist im Hinblick auf Kalibrierung und Validierung sichergestellt;
- automatisierte Updates der Sensorfirmware und der Bedienprogramme sind möglich;
- eine Sensorkalibrierung ist gegebenenfalls kompatibel zu den Anforderungen von Pharmaprozessen;
- für die Planung, Simulation und Überwachung der Prozessanlage werden virtuelle Modelle (3D-Modelle, Simulationsmodelle) bereitgestellt.

Sinngemäß finden sich letztere Anforderungen auch in der Technologie-Roadmap „Prozess-Sensoren 4.0“, die in den letzten Monaten von Fachleuten aus der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik und der NAMUR - Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie erarbeitet wurde [11].

### Einbindung der ‚Sensoren 4.0‘ in Cyber-Physical Systems (CPS)

Wie bei der Begriffsbestimmung „Sensor“: es gibt zahlreiche Erklärungen für CPS, aber keine allgemein anerkannte, scharfe Definition. Die „Integrierte Forschungsagenda CPS“ [12] erklärt beispielsweise wie folgt: „Cyber-Physical Systems (CPS) sind gekennzeichnet durch eine Verknüpfung von realen (physischen) Objekten und Prozessen mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze.“ Cyber-Physical Systems umfassen eingebettete Systeme, also Geräte, Gebäude, Verkehrsmittel und medizinische Geräte, aber auch Logistik-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste, die

- mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken,
- Daten auswerten und speichern sowie auf dieser Grundlage aktiv oder reaktiv mit der physikalischen und der digitalen Welt interagieren,
- mittels digitaler Netze untereinander verbunden sind, und zwar sowohl drahtlos als auch drahtgebunden, sowohl lokal als auch global,
- weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen,

- über eine Reihe multimodaler Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen, also sowohl für Kommunikation und Steuerung differenzierte und dedizierte Möglichkeiten bereitstellen, zum Beispiel Sprache und Gesten.

Diese Vernetzung von Sensoren im Rahmen von „Industrie 4.0“ stellt hohe Anforderungen an die moderne Sensorik. Nicht nur, dass die Sensoren über eine Kommunikationsschnittstelle verfügen müssen, diese muss auch semantisch kompatibel zu den anderen Komponenten der Automatisierung sein. Dies ist die eigentliche Herausforderung im Rahmen von Industrie 4.0. Lediglich dem Sensor ein Feldbus-Interface zu spendieren, reicht in Zukunft nicht mehr aus.

### Wirtschaftliche Aspekte

Es geht um große Märkte und um gewaltige Zuwächse. Yole Développements [13] schätzt beispielsweise das Marktvolumen für IoT-Sensoren wie folgt (man beachte, dass ein IoT-Sensor nicht ein „Sensor 4.x“ gemäß dem generischen Lastenheft (siehe oben) ist!):

	2015	2018	CAGR%
Total Value Market (\$M)	17.895	69.995	42 %
Industrial	4.320	11.226	32 %
Retail & Logistic	-	368	139 %

Tab. 1: Marktvolumen IoT-Sensoren für ausgewählte Anwendergruppen, nach [13], (\$M = Mio USD)

Nach einer Schätzung in [13] wird im Jahr 2024 „Industrial“ und „Retail & Logistic“ zusammen ein Marktvolumen von 14.200 Mio. USD haben oder mehr als 38 % des Gesamtmarktes von IoT-Sensoren ausmachen. Allerdings wird für diesen Zeitraum auch ein dramatischer Preisverfall pro Sensoreinheit vorausgesagt, bei gleichzeitigem großen Mengenwachstum, siehe Abb. 5.

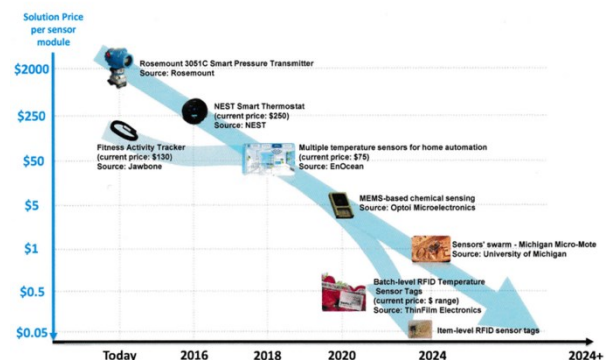
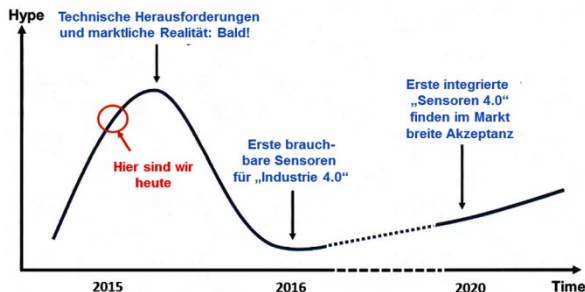


Abb. 5: Preisentwicklung pro Sensormodul (nach [13])

Belastbare Marktzahlen für Deutschland oder für Europa für „Sensoren 4.0“ stehen nicht zur Verfügung. Das ist u.a. auch deshalb nicht verwunderlich, weil es derzeit entgegen vollmundigem Marketingwunschen noch keine „Sensoren 4.0“ nach der generischen Lastenheftvorgabe im Markt gibt; Abb. 6 zeigt die Erwartungen für die Marktreife nach [13]:



**Abb. 6:** Erwartungen für die Marktreife von „Sensoren 4.0“ nach [13]

## Kritische Erfolgsfaktoren für „Sensor 4.0“

Die Reihenfolge der Wichtigkeit sehe ich wie folgt:

1. Unternehmer und Manager, die mutig die Chance ergreifen und innovieren, und zwar nicht nur bei den „Großen“;
2. Standardisierung weltweit, insbesondere der Semantik und der Übertragungstechnologien und -protokolle; (gilt auch generell für „Industrie 4.0“ und IoT)
3. Security, ein großes Thema für sich (gilt auch generell für „Industrie 4.0“ und IoT)
4. ausreichend Bandbreiten für World Wide Web und für Wireless-Übertragung in Echtzeit;
5. eine überbetriebliche Roadmap speziell für „Sensor 4.0“;
6. Low cost, Module, Mass customization;
7. Low power, Energy Harvesting;

## Fazit

Sensoren sind (neben Aktoren) das Fundament allen Automatisierens, weil sie die reale Welt abbilden. Sie sind deshalb auch das Fundament für das „Internet der Dinge“, für „IoT“, für „Industrie 4.0“ und wie der Namen mehr sind. Aber nur wenn sie die generischen Anforderungen an den „Sensor 4.0“ weitestgehend erfüllen und wenn sie sehr kostengünstig angeboten werden können,

wird aus der Utopie „Industrie 4.0“ eine Vision und dann Realität. Dazu braucht es Unternehmer und Manager, die unternehmen (und nicht unterlassen), und zwar sowohl auf der Anbieterseite als auch bei deren Kunden. Es braucht noch gewaltige technologische Anschubhilfe von Instituten und Forschungseinrichtungen sowie beträchtliche öffentliche finanzielle Anschubhilfen, insbesondere auch für mutige Start-Ups. Und es braucht Lehrende in allen Ebenen des Bildungs- und Ausbildungssystems, welche die Digitalisierung unserer Umwelt als große Chance begreifen und die nächsten Generationen darauf bestmöglich vorbereiten - nach eigener Beobachtung ist da in Deutschland noch viel Luft nach oben.

## Literatur:

- [1] JASPERNEITE, J., NIGGEMANN, O.: *Intelligente Assistenzsysteme zur Beherrschung der Systemkomplexität in der Automation*. In: ATP edition - Automatisierungstechnische Praxis, 9/2012, Oldenbourg Verlag, München,
- [2] Plattform Industrie 4.0 <http://www.plattform-i40.de/>
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND MITTELSTAND (Hrsg.): *Autonome und simulationsbasierte Systeme für den Mittelstand*; Berlin November 2011
- [4] ASHTON, K.: *That ‚Internet of Things‘ Thing*; in RFID Journal; Jun 22, 2009
- [5] [www.industrialinternetconsortium.org](http://www.industrialinternetconsortium.org)
- [6] BITKOM e.V.; VDMA e.V.; ZVEI e.V.: *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 - Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*; April 2015
- [7] VDI Statusreport; *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*; April 2015
- [8] INDUSTRIAL INTERNET CONSORTIUM: *Industrial Internet Reference Architecture* [http://www.industrialinternetconsortium.org/II\\_RA.htm](http://www.industrialinternetconsortium.org/II_RA.htm)
- [9] AMA FACHVERBAND FÜR SENSORIK E.V. (Hrsg.): *Sensor-Trends 2014 - Trends in zukunftsorientierten Sensortechnologien*; April 2010
- [10] SIMMONS, T.: *Persönliche Mitteilung Mai 2013*
- [11] VDI/VDE-GMA; NAMUR (Hrsg.): *Technologie-Roadmap „Prozess-Sensoren 4.0“*; voraussichtl. Nov. 2015
- [12] GEISBERGER, E.; BROY, M. (Hrsg.): *> agendaCPS Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*; acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2012
- [13] YOLE DÉVELOPPEMENT (Hrsg.): *Sensors & Technologies for The Internet of Things - Business & Market Trends 2014 - 2024*; May 2014

Freiburg, 02. Oktober 2015

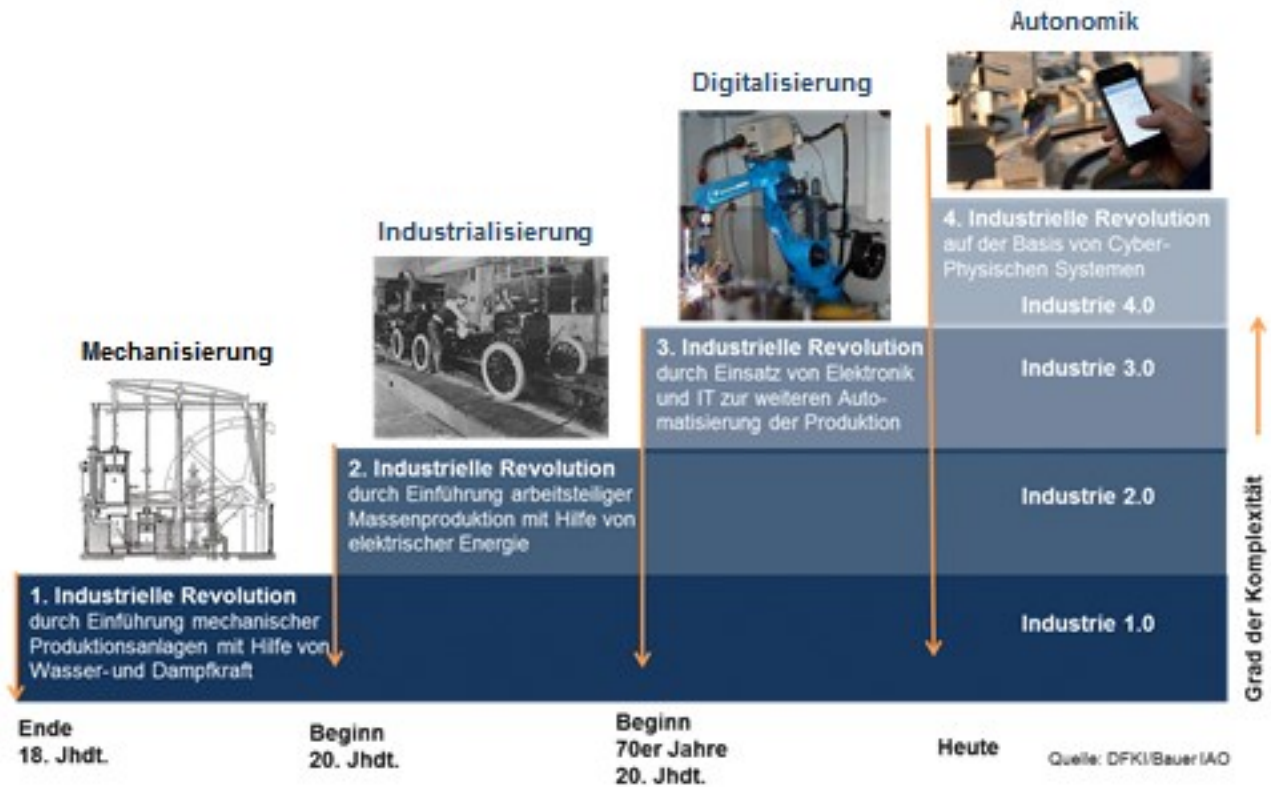


Abb. 1: Von 'Industrie 1.0' zu 'Industrie 4.0'

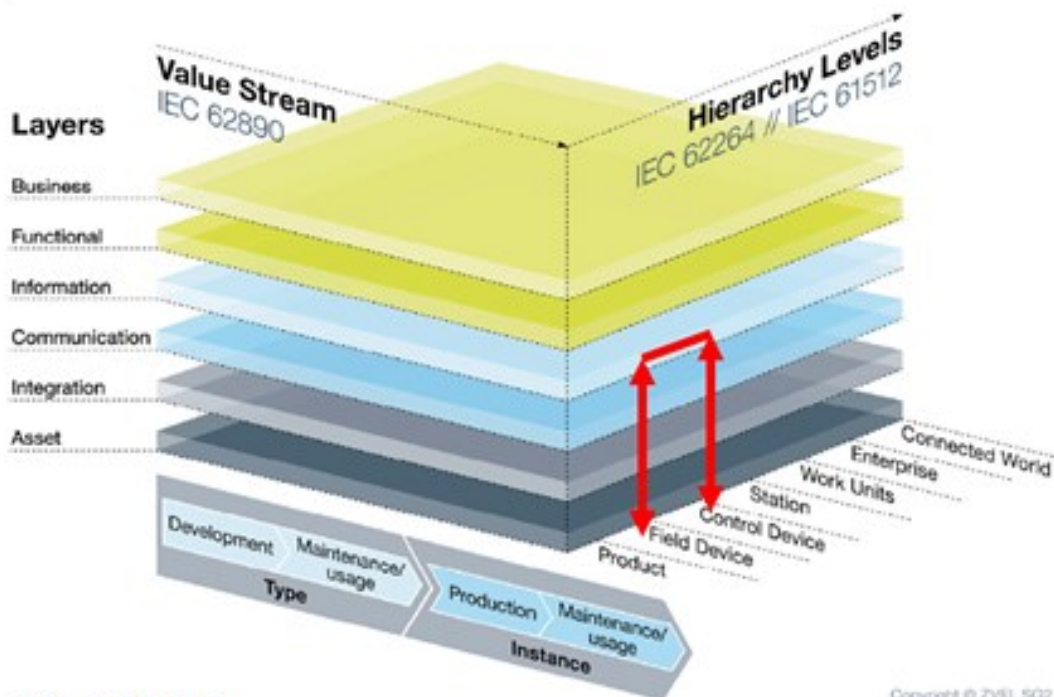


Abb. 2: RAMI 4.0

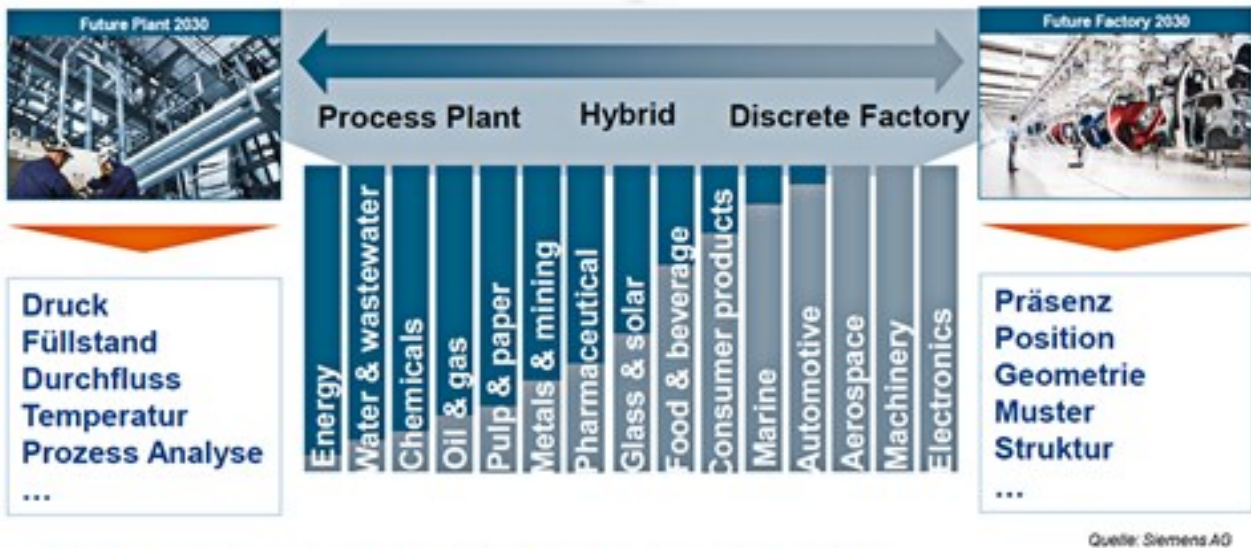


Abb. 3: Einsatzorte und Messparameter von Smart Sensors

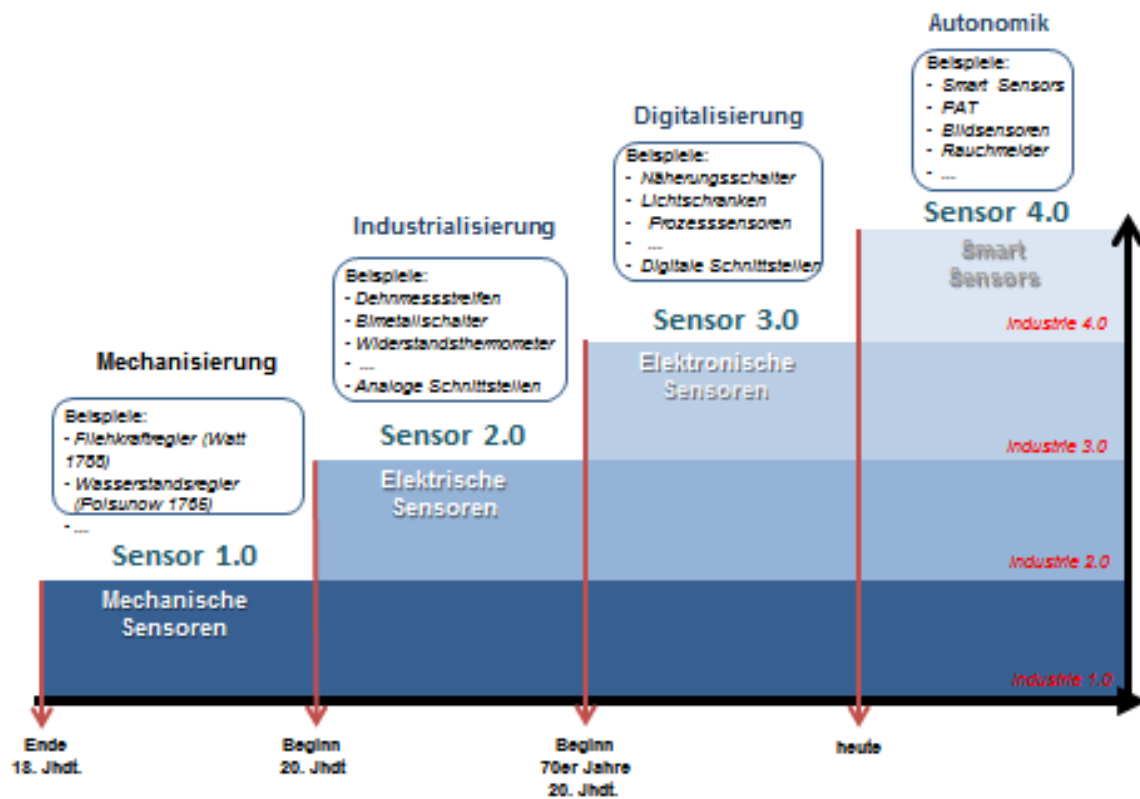


Abb. 4: Von ‚Sensor 1.0‘ zu ‚Sensor 4.0‘ (in Anlehnung an eine Vorlage von Peter Krause)

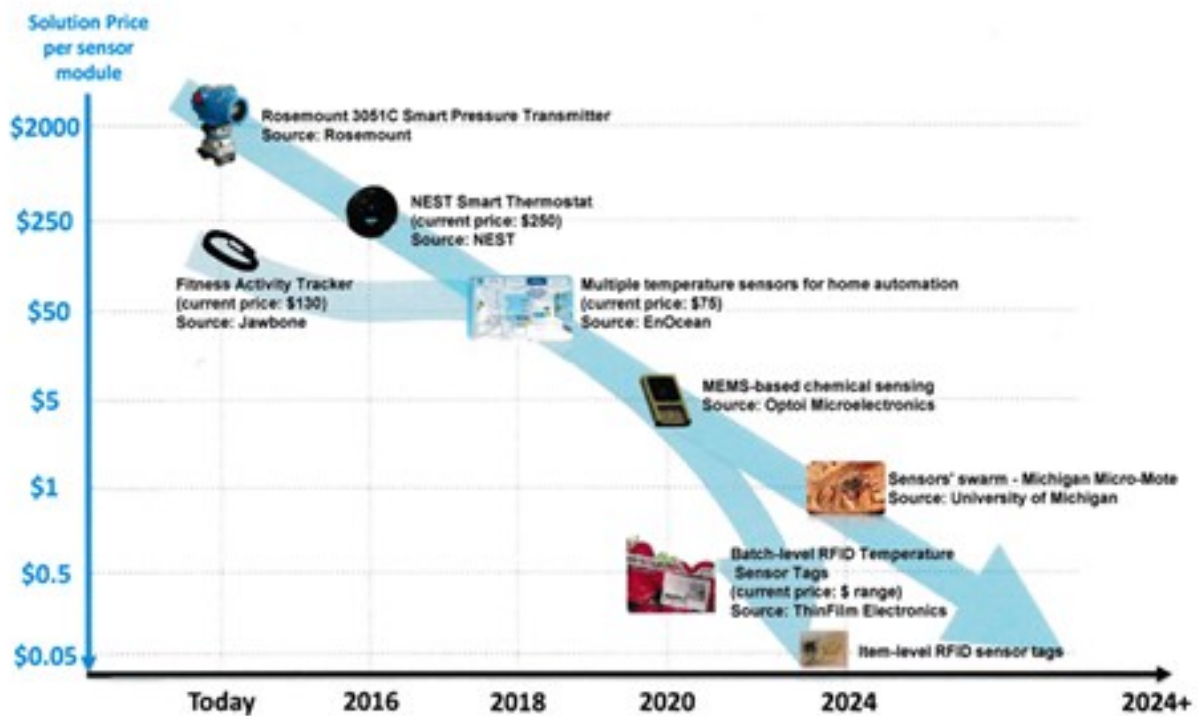


Abb. 5: Preisentwicklung pro Sensormodul (nach [13])

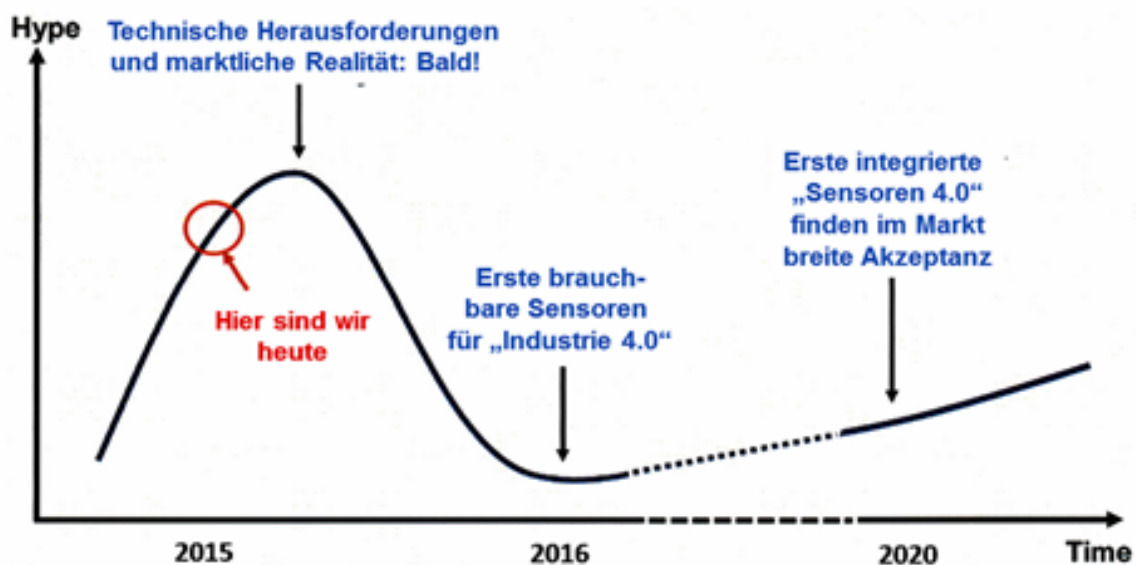


Abb. 6: Erwartungen für die Marktreife von ‚Sensoren 4.0‘ (nach [13])