

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK	Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme Development of mechatronic and cyber-physical systems	VDI/VDE 2206 Ausg. deutsch/englisch Issue German/English
--	---	---

*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.**The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	2
Einleitung.....	2
1 Anwendungsbereich.....	2
2 Begriffe	3
3 Abkürzungen	8
4 Hintergründe der Überarbeitung	8
4.1 Motivation.....	8
4.2 Überarbeitungs- und Aktualisierungsbedarfe	9
4.3 Zielgruppe	10
4.4 Einordnung der Richtlinie.....	10
5 Entwicklung mechatronischer und cyber- physischer Systeme	11
5.1 System und Systemgrenze	11
5.2 Charakterisierung mechatronischer und cyber-physischer Systeme	11
5.3 Potenziale der Digitalisierung und Vernetzung.....	16
5.4 Besonderheiten bei der Entwicklung	17
6 Entwicklungsmethodik für mechatronische und cyber-physische Systeme.....	18
6.1 Einordnung in den Produktlebenszyklus	18
6.2 Das V-Modell zur Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme	19
6.3 Kernaufgaben im mittleren Strang	25
6.4 Aufgaben im inneren und äußeren Strang.....	34
6.5 Verschachtelung des V-Modells zur Ableitung einer zeitlichen Abfolge	37
7 Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme	38
Anhang Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber- physische Systeme	45
Schrifttum	65
Benennungsindex	67

Contents	Page
Preliminary note.....	2
Introduction.....	2
1 Scope.....	2
2 Terms and definitions	3
3 Abbreviations.....	8
4 Background to the revision	8
4.1 Motivation	8
4.2 Needs for revision and updating	9
4.3 Target group	10
4.4 Classification of the standard.....	10
5 Development of mechatronic and cyber-physical systems	11
5.1 System and system boundary.....	11
5.2 Characterisation of mechatronic and cyber-physical systems	11
5.3 Potentials of digitalization and networking	16
5.4 Special features of the development	17
6 Development methodology for mechatronic and cyber-physical systems	18
6.1 Classification in the product life cycle	18
6.2 The V-model for the development of mechatronic and cyber-physical systems	19
6.3 Core tasks in the middle strand	25
6.4 Tasks in the inner and outer strand	34
6.5 Nesting of the V-model to derive a temporal sequence	37
7 Main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems	38
Annex Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems	55
Bibliography	65
Term index	67

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren und in Bearbeitung befindlichen Blätter dieser Richtlinienreihe sowie gegebenenfalls zusätzliche Informationen sind im Internet abrufbar unter www.vdi.de/2206.

Einleitung

Ingenieurwissenschaftliche Anwendungen sind durch ein enges Zusammenwirken der Disziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Softwaretechnik gekennzeichnet. Für die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme ist ein systematisches Vorgehen unabdingbar. Zu diesem Zweck wurde im Jahr 2004 die Richtlinie VDI 2206 veröffentlicht. Durch die zunehmende Vernetzung mit dem Internet der Dinge und Dienste sowie der hohen Interdisziplinarität, Komplexität und Heterogenität der Systeme ist eine Überarbeitung dieser Richtlinie notwendig geworden.

Die Überarbeitung und Erweiterung der Methodik um cyber-physische Aspekte entstand im VDI/VDE-Fachausschuss 4.10 „Interdisziplinäre Produktentstehung“ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). Die neue Richtlinie beinhaltet eine grundsätzliche Überarbeitung des V-Modells (siehe Abschnitt 6) sowie die Verwendung neuer Hilfsmittel für die interdisziplinäre Produktentwicklung. Die Richtlinie schärft damit das Verständnis für Erweiterungen von mechatronischen Systemen um cyber-physische Funktionen.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie gilt für alle Aufgaben in der Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme. Sie umfasst die Darstellung der sachlogischen Zusammenhänge mit dem Ziel, Anwender in die Lage zu versetzen, ein komplexes technisches System erfolgreich entwickeln zu können.

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards and those in preparation as well as further information, if applicable, can be accessed on the Internet at www.vdi.de/2206.

Introduction

Engineering applications are characterized by close interaction between the disciplines of mechanical, electrical engineering and software engineering. A systematic approach is indispensable for the development of mechatronic and cyber-physical systems (CPS). For this purpose, the standard VDI 2206 was published in 2004. Due to the increasing networking with the Internet of Things and Services as well as the high interdisciplinarity, complexity, and heterogeneity of the systems, a revision of this standard has become necessary.

The revision and extension of the methodology to include cyber-physical aspects originated in the VDI/VDE Technical Committee 4.10 “Interdisciplinary Product Development” of the VDI/VDE Society Measurement and Automatic Control (GMA). The new standard includes a fundamental revision of the V-model (see Section 6) as well as the use of new tools for interdisciplinary product development. The standard thus sharpens the understanding for extensions of mechatronic Systems by cyber-physical functions.

1 Scope

This standard applies to all tasks in the development of mechatronic and cyber-physical systems. It covers the presentation of the inherent factual logic with the aim of enabling users to successfully develop a complex technical system.

Die Richtlinie macht dabei keine Vorgaben, welche Methoden oder Werkzeuge oder welche Form der Projektorganisation genutzt werden soll, sondern dient dem Anwender als sachlogisches Rahmenwerk und der Orientierung für die interdisziplinäre Entwicklung von mechatronischen und cyber-physicalen Systemen. Der Anwender soll anhand dieses Rahmenwerks individuelle Ansätze für seine praktische Anwendung ableiten können.

2 Begriffe

Für die Anwendung dieser Richtlinie gelten die folgenden Begriffe:

A/B/C/D-Muster

Muster, das sukzessive die Reife des Systems zur Prüfung der grundlegenden Funktionen im Versuchsumfeld darstellt (A-Muster), Muster u.a. zur Prüfung und Sicherstellung der Funktionen mit seriennaher Hardware (B-Muster), Muster, das unter seriennahen Zuständen gefertigt wurde (C-Muster) und Muster, das für den Freigabeprozess durch den Lieferanten zur Verfügung gestellt wird (D-Muster) [in Anlehnung an [19]]

Aktor

Einrichtung, die der gezielten Beeinflussung von Zustandsgrößen in →mechatronischen Systemen dient [in Anlehnung an [1]]

Analyse

systematisches Untersuchen einer Ausgangslage/Istsituation oder von (Zwischen-)Ergebnissen [in Anlehnung an [2]]

Anforderung

Beschaffenheit, Fähigkeit oder Leistung, die ein Produkt, Prozess oder die am Prozess beteiligte Person erfüllen oder besitzen muss
[in Anlehnung an DIN 69901-5, 3.7]

Anmerkung: Das System kann die geforderten Kriterien gegebenenfalls graduell erfüllen. [in Anlehnung an ISO/IEC Guide 2:2004]

Anforderungsentwicklung (Requirements Engineering)

systematische →Anforderungserhebung und kontinuierliches Management von Anforderungsänderungen (→Anforderungsmanagement) durch die Analyse, Dokumentation, Prüfung und Verwaltung von Anforderungen [in Anlehnung an [3]]

Anforderungserhebung

Ableitung von Anforderungen aus den Bedürfnissen und Wünschen der →Stakeholder sowie aus den Restriktionen nachgelageter Produktlebenszyklusphasen, wobei verschiedene Techniken genutzt werden, um die Anforderungen der Stakeholder und

The standard does not specify which methods or tools or which form of project organization should be used, but serves the user as a factual framework and orientation for the interdisciplinary development of mechatronic and cyber-physical systems. The user should be able to derive individual approaches for his practical application based on this framework.

2 Terms and definitions

For the purposes of this standard, the following terms and definitions apply:

A/B/C/D specimen

specimen successively representing the maturity of the system for testing the basic functions in the test environment (A specimen), specimen for testing and ensuring the functions with near-serial hardware (B specimen), specimen which was manufactured under near-serial conditions (C specimen), and specimen which is made available for the release process by the supplier (D specimen) [adapted from [19]]

actuator

component used for the targeted influencing of state variables in →mechatronic systems [adapted from [1]]

analysis

systematic examination of a starting situation/actual situation or of (interim) results [adapted from [2]]

requirement

characteristic, capability, or performance that a product, process, or the person involved in the process must fulfil or possess
[adapted from DIN 69901-5, 3.7]

Note: The system may meet the required criteria gradually, where appropriate. [adapted from ISO/IEC Guide 2:2004]

requirements engineering

systematic →requirements elicitation and continuous management of requirements changes (→requirements management) through the analysis, documentation, testing, and management of requirements [adapted from [3]]

requirements elicitation

deriving requirements from the needs and desires of →stakeholders and from the restrictions of downstream product life-cycle phases, using various techniques to elicit, detail, and refine the requirements of stakeholders and other sources

anderer Quellen zu gewinnen, zu detaillieren und zu verfeinern [in Anlehnung an [3]]

Anforderungsmanagement

Maßnahmen, die notwendig sind, um →Anforderungen zu strukturieren, hinsichtlich Fakten und Annahmen zu unterscheiden, Annahmen nachzuverfolgen, anwendungsbezogen aufzubereiten sowie konsistent zu halten und an die von Anforderungsänderungen betroffenen Entwicklungsteams weiterzuleiten und nachzuverfolgen [in Anlehnung an [3]]

cyber-physisches System (CPS)

System, das auf einem mechatronischen Kern basiert, der durch seine Vernetzung mit dem Internet der Dinge und Dienste gekennzeichnet ist, wodurch beispielsweise Verhaltens- oder Eigenschaftsänderungen während des Betriebs ermöglicht werden

Anmerkung: Den Kern bilden dabei ein oder mehrere mechatronische Systeme mit Sensoren, der Informationsverarbeitung und Aktoren. Dadurch ist das System in der Lage, über seine Systemgrenzen hinaus mit umgebenden Systemen zu kommunizieren und zu interagieren (siehe Abschnitt 5.2 und Bild 4 in Abschnitt 5.2).

Dekomposition

schrittweise erfolgende Untergliederung von Funktionen und/oder Hardware eines →Systems innerhalb der Produktentwicklung

digitaler Zwilling

digitale Repräsentation einer Produktinstanz (reales Gerät, Objekt, Maschine, Dienst oder immaterielles Gut) oder einer Instanz eines Produkt-Service-Systems (eines aus Produkt und zugehöriger Dienstleistung bestehenden Systems)

[in Anlehnung an [5]]

Ecosystem

<betriebswirtschaftlich> ökonomisches Umfeld eines Produkts

Anmerkung: Ein Ecosystem im wirtschaftlichen Sinn beschreibt einen Verbund von Unternehmen, der durch einen Orchestrator auf eine gemeinsame Wertschöpfung ausgerichtet wird. Dabei übersteigt die Leistung des gesamten Ecosystems aus Sicht der Kunden die Summe der Einzelbeiträge aller Beteiligten [6]. In dieser Richtlinie wird das Ecosystem von CPS betrachtet. Dies umfasst Verbindungen zwischen CPS, unternehmensinterne und -übergreifende Netzwerke sowie diverse Dienste.

Eigenschaft

aufgrund von Beobachtungen, Messergebnissen, Simulationen, allgemein akzeptierten Aussagen etc. festgestelltes Systemverhalten [in Anlehnung an [7]]

Eigenschaftabsicherung

zentraler Teil des V-Modells, der →Verifikation und →Validierung umfasst

Anmerkung: Das kontinuierliche, mehrfache Durchlaufen der damit verbundenen Aufgaben gewährleistet eine Absicherung des Systems, der Teilsysteme und der Systemelemente [8].

[adapted from [3]]

requirements management

measures necessary to structure →requirements, distinguish between facts and assumptions, track assumptions, prepare them in an application-oriented manner, and keep them consistent, and to forward and track changes in requirements to affected development teams [adapted from [3]]

cyber-physical system (CPS)

system based on a mechatronic core that is characterized by its networking with the Internet of Things and Services, which enables, for example, changes in behaviour or properties during operation

Note: The core is formed by one or more mechatronic systems with sensors, information processing and actuators. This enables the system to communicate and interact with surrounding systems beyond its system boundaries (see Section 5.2 and Figure 4 in Section 5.2).

decomposition

step-by-step subdivision of functions and/or hardware of a →system within product development

digital twin

digital representation of a product instance (real device, object, machine, service or intangible good) or an instance of a product-service system (a system consisting of product and associated service) [adapted from [5]]

ecosystem

<business> economic environment of a product

Note: An ecosystem in the economic sense describes a network of companies that is aligned by an orchestrator towards a common value creation. In this context, the performance of the entire ecosystem from the customer's point of view exceeds the sum of the individual contributions of all participants [6]. In this standard, the ecosystem of CPS is considered. This includes connections between CPS, intra- and inter-organizational networks, and diverse services.

property

system behaviour determined based on observations, measurement results, simulations, generally accepted statements, etc. [adapted from [7]]

assurance of properties

central part of the V-model, comprising →verification and →validation

Note: Continuous, multiple running of the associated tasks ensures assurance of the system, subsystems, and system elements [8].

Geschäftsmodell

Grundlage dafür, wie eine Organisation Wert schafft, liefert und erfasst [in Anlehnung an [9]]

Hardware-in-the-Loop (HiL)

→Integration von realen Komponenten (Bauteilen) und Systemmodellen in eine gemeinsame Simulationsumgebung

Beispiel: Simulation eines Gesamtfahrzeugs am Rechner mit der Anbindung eines realen Steuergeräts und der Aktorik für eine Funktionsregelung zur Fahrstabilitätsregelung

Anmerkung: Die HiL-Nachbildung (Simulation) dynamischer Systeme durch physikalische und mathematische Modelle muss dabei in Echtzeit und unter Nachbildung der physikalischen Lasten erfolgen. Ein entscheidender Vorteil der HiL ist der Funktionstest des Steuergeräts unter realen Bedingungen bei gleichzeitiger Einsparung an zeit- und kostenintensiven Fahrmanövern.

Hauptmerkmalliste

Werkzeug, um Anforderungen zu erheben, indem generische →Merkmale, die in Hauptmerkmale und Nebenmerkmale kategorisiert werden, in einer Liste zusammengefasst werden

Anmerkung: Diese Liste soll den Anwender darin unterstützen, eine vollständige, eindeutige, richtige und widerspruchsfreie Spezifikation zu erarbeiten [10]. Zugehörige Leitfragen dienen als Orientierung, um den Anwender beim Festlegen von Anforderungen zu unterstützen [11].

holistischer Produktlebenszyklus

sämtliche Phasen des Produktlebens, die die Aspekte „Mensch“, „Organisation“ sowie „Informations- und Kommunikationstechnologien“ miteinander verbinden [in Anlehnung an [10; 12]]

Integration

Zusammenführung einer Menge von Systemelementen zu einem realisierten System in einem definierten Reifegrad (z.B. →A/B/C/D-Muster)

Internet der Dinge und Dienste

(Internet of Things and Services)

Verknüpfung eindeutig identifizierbarer Dienste und physischer Objekte über das Internet, sodass diese Gegenstände selbstständig miteinander kommunizieren können, dadurch erweiterte Funktionalitäten besitzen und so zusätzlichen Kundennutzen erzeugen

Anmerkung: Die Interaktion erfolgt von Maschine zu Maschine, von Objekt zu Objekt [13]. Der Anwendungsbereich erstreckt sich dabei von einer allgemeinen Informationsversorgung über automatische Bestellungen bis hin zu Warn- und Notfallfunktionen [14].

Kontrollpunkt

Einrichtung, die den Fortschritt der Systementwicklung beschreibt und Kontrollfragen beinhaltet, die dem Anwender helfen, die zugehörige Entwicklung strukturiert zu planen und durchzuführen

business model

basis for how an organization creates, delivers, and captures value [adapted from [9]]

hardware-in-the-loop (HiL)

→integration of real components (parts) and system models in a common simulation environment

Example: simulation of a complete vehicle on the computer with the connection of a real control unit and the actuators for a function control for driving stability control

Note: The HiL replication (simulation) of dynamic systems by physical and mathematical models must be carried out in real time and under replication of the physical loads. A decisive advantage of HiL is the functional test of the control unit under real conditions with simultaneous savings in time-consuming and cost-intensive driving manoeuvres.

main-feature list

tool to elicit requirements by categorizing generic →characteristics into main characteristics and secondary characteristics in a list

Note: This list is intended to assist the user in developing a complete, unambiguous, correct, and consistent specification [10]. Associated guiding questions serve as orientation to support the user in defining requirements [11].

holistic product life cycle

all phases of product life that combine the aspects of “people”, “organization”, and “information and communication technologies”

[adapted from [10; 12]]

integration

combination of a set of system elements to a realized system in a defined maturity level (e.g. →A/B/C/D specimen)

Internet of Things and Services

linking uniquely identifiable services and physical objects via the Internet so that these objects can communicate with each other independently, thereby possessing enhanced functionalities and thus generating additional customer benefits

Note: Interaction takes place from machine to machine, from object to object [13]. The scope of application ranges from general information supply to automatic orders and warning and emergency functions [14].

checkpoint

mechanism describing the progress of the system development and including control questions that help the user to plan and carry out the associated development in a structured manner

mathematisches Modell

Grundlage zur Verhaltensbeschreibung von Systemen

Anmerkung: Hierzu werden z.B. physikalische Modelle in eine abstrakte Darstellung überführt und die beschriebenen physikalischen Eigenschaften des Modells werden mithilfe von mathematischen Beschreibungen, die im Allgemeinen Differentialgleichungen darstellen, formuliert (Whitebox-Modelle). Alternativ können direkt anhand von Messdaten zu Ein- und Ausgängen von Systemen oder Systemelementen mathematische Modelle, beispielsweise in Form von künstlichen neuronalen Netzen, aufgestellt werden (Blackbox-Modelle).

mechatronische Systeme

→Integration von mechanischen, elektrisch/elektronischen →Systemen und zugehöriger Informationsverarbeitung

Anmerkung: Wesentlich sind dabei die durch die Integration von Sensoren und Mikrorechnern mögliche Erweiterung von Funktionen und die Erzielung synergetischer Effekte [15].

Methodik

planmäßiges Vorgehen unter Einschluss von Methoden, Arbeitsmitteln (Hilfsmitteln) und Instrumenten [in Anlehnung an VDI 2223]

Model-based Systems Engineering (MBSE)

formalisierte Anwendung der Modellierung zur Unterstützung von Systemanforderungen, Entwurfs-, Analyse-, Verifikations- und Validierungsaktivitäten, die in der Konzeptentwurfsphase beginnen und sich über die gesamte Entwicklung und spätere Lebenszyklusphasen erstrecken/fortsetzen [in Anlehnung an [16; 17]]

Modell

zweckgebundenes Abbild eines vorhandenen oder vorausgedachten Originals, wobei das Modell nicht alle Eigenschaften des Originals aufweist
[in Anlehnung an VDI 2209]

Modellierung

zielgerichtete Vereinfachung eines (nicht notwendigerweise realen) Originals durch Abstraktion [18]

physikalisches Modell

Darstellung, die von der Systemarchitektur ausgehend erstellt wird und durch systemangepasste Größen, z.B. Massen und Längen, bei mechanischen oder durch Widerstände und Induktivitäten bei elektrischen Systemen definiert ist

Anmerkung: Bei den mechanischen Systemelementen werden dabei z.B. Anzahl und Verbindungen von Starrkörpern, Definition von flexiblen Körpern und Lagerreibung festgelegt. Bei den elektrischen Systemelementen werden z.B. Widerstände, Kondensatoren, Dioden und physikalische Effekte, wie Hysteresen oder Wirbelströme, betrachtet.

Sensor

Einrichtung zur Erfassung und Zurverfügungstellung von Informationen über die aktuellen Eigen-

mathematical model

basis for describing the behaviour of systems

Note: For this purpose, e.g. physical models are transferred into an abstract representation and the described physical properties of the model are formulated with the help of mathematical descriptions, which generally represent differential equations (white box models). Alternatively, mathematical models, for example in the form of artificial neural networks, can be set up directly using measurement data on the inputs and outputs of systems or system elements (black box models).

mechatronic system

→integration of mechanical, electric/electronic →systems, and associated information processing

Note: The expansion of functions possible through the integration of sensors and microcomputers and the achievement of synergetic effects are essential [15].

methodology

planned procedure including methods, tools (aids), and instruments [adapted from VDI 2223]

model-based systems engineering (MBSE)

formalized application of modelling to support system requirements, design, analysis, verification, and validation activities that begin in the concept design phase and extend/continue throughout development and later lifecycle phases [adapted from [16; 17]]

model

purpose-bound reproduction of an existing or anticipated original, whereby the model does not have all the properties of the original
[adapted from VDI 2209]

modelling

purposeful simplification of a (not necessarily real) original through abstraction [18]

physical model

representation created from the system architecture and defined by system-adapted quantities, e.g. masses and lengths, in the case of mechanical systems or resistances and inductances in the case of electrical systems

Note: For the mechanical system elements, the number and connections of rigid bodies, the definition of flexible bodies and bearing friction are determined. For the electrical system elements, e.g. resistors, capacitors, diodes, and physical effects such as hysteresis or eddy currents are considered.

sensor

component for detecting and providing information about the current properties of the basic system and

schaften des Grundsystems und über die Umgebung [in Anlehnung an [18]]

Software-in-the-Loop (SiL)

→Integration von Software in eine gemeinsame Simulationsumgebung mit der Modellierung sowohl der zu entwickelnden Funktion als auch des Prozesses (Regelstrecke), auf den die Funktion einwirkt

Anmerkung: Die SiL-Nachbildung (Simulation) dynamischer Systeme durch mathematische Modelle muss dabei nicht in Echtzeit erfolgen. Ein entscheidender Vorteil der SiL ist der Funktionstest unter simulierten Bedingungen bei gleichzeitiger Einsparung zeit- und kostenintensiver Experimente (z.B. Fahrmanöver). Ausgehend von einer SiL-Umgebung, können entweder die Funktion, der Prozess oder beide Teile physikalisch realisiert und im geschlossenen Kreis hinsichtlich ihres Verhaltens analysiert werden.

Spezifikation

formale Beschreibung eines Systems mit dem Ziel, →Anforderungen zu definieren und zu quantifizieren, mit denen das →Produkt des Auftragnehmers bei der Übergabe an den Auftraggeber geprüft und durch den Auftraggeber abgenommen werden kann [20]

Anmerkung: Der Begriff der Systemspezifikation wird aus Gründen der Eindeutigkeit in dieser Richtlinie nicht verwendet.

Stakeholder

Person oder Gruppe, die ein berechtigtes Interesse am System/Projekt hat [4]

System

Menge von Elementen, die in Beziehung stehen [21]

Systemarchitektur

grundlegender Aufbau und Strukturierung eines technischen Systems über verschiedene Konkretisierungsstufen hinweg, also die Korrelationen zwischen Anforderungen, Funktionen, logischer und physischer Struktur [22; 23]

Systems Engineering

strukturierte multidisziplinäre Vorgehensweise für die Entwicklung komplexer technischer Gesamtsysteme zur Erzielung eines disziplinübergreifenden Optimums in einem festgelegten Zeit- und Kostenrahmen [24]

Anmerkung: Hierfür werden die Disziplinen modelltechnisch strukturiert und miteinander vernetzt.

Validierung

Überprüfung der Systemeigenschaften gegenüber einem vordefinierten Einsatzzweck oder Nutzen [in Anlehnung an [21]]

Beispiel: Überprüfung, ob der aktuelle Entwicklungsstand nach wie vor die Bedürfnisse des Kunden sowie anderer Stakeholder erfüllt

Anmerkung: Inhaltlich repräsentiert die Validierung die Beantwortung der Fragen: Haben wir das richtige System entwickelt? Ist der Kunde zufrieden? Waren die Anforderun-

about the environment [adapted from [18]]

software-in-the-loop (SiL)

→integration of software into a common simulation environment with modelling of both the function to be developed and the process (controlled system) on which the function acts

Note: The SiL replication (simulation) of dynamic systems through mathematical models does not have to be carried out in real time. A decisive advantage of SiL is the functional test under simulated conditions while saving time- and cost-intensive experiments (e.g. driving maneuvers). Starting from an SiL environment, either the function, the process or both parts can be physically realized and analysed in a closed loop with regard to their behaviour.

specification

formal description of a system with the aim of defining and quantifying →requirements with which the contractor's →product can be tested and accepted by the client when it is handed over to the client [20]

Note: The term system specification is not used in this standard for reasons of clarity.

stakeholder

person or group that has a legitimate interest in the system/project [4]

system

set of elements that are related [21]

system architecture

basic design and structuring of a technical system across different levels of concretization, i.e. the correlations between requirements, functions, logical, and physical structure [22; 23]

systems engineering

structured multidisciplinary approach for the development of complex overall technical systems to achieve a cross-disciplinary optimum within a defined time and cost framework [24]

Note: For this purpose, the disciplines are structured in terms of models and interlinked.

validation

review of system requirements against a predefined intended use or benefit [adapted from [21]]

Example: review if the current state of development still meets the needs of the customer as well as of other stakeholders

Note: In terms of content, validation represents answering the questions: Have we developed the right system? Is the customer satisfied? Were the requirements correct? Do they rep-

gen richtig? Repräsentieren sie die Bedürfnisse der Beteiligten? [25]

Verifikation

Überprüfung des Systems in Bezug auf die Spezifikation auf unterschiedlichen Systemebenen und Konkretisierungsniveaus

Anmerkung: Die Verifikation beantwortet die Fragen: Haben wir richtig entwickelt? Entspricht der aktuelle Entwicklungsstand der gültigen Spezifikation?

3 Abkürzungen

In dieser Richtlinie werden die nachfolgend aufgeführten Abkürzungen verwendet:

ASIC	anwendungsspezifische integrierte Schaltungen
CAD	Computer-Aided Design
CASE	Computer-Aided Software Engineering
CE	Conformité Européenne (französisch: europäische Konformität)
CPS	cyber-physisches System
CTS	Cybertronische Systeme
EDA	Electronic Design Automation
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
FDTD	Finite Difference Time Domain
FEM	Finite-Elemente-Methoden
FIT	Finite Integration Technique
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FPGA	Field Programmable Gate Array
HiL	Hardware-in-the-Loop
HPLZ	holistischer Produktlebenszyklus
IDE	Integrated Development Environment
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IoT	Internet of Things
ITS	Intelligentes Technisches System
IT	Informationstechnik
MBSE	Model-based Systems Engineering
PCB	Printed Circuit Board
PLM	Produktlebenszyklus-Management
SiL	Software-in-the-Loop
SoS	System of Systems

4 Hintergründe der Überarbeitung

4.1 Motivation

Die Überarbeitung der Richtlinie VDI 2206:2004 berücksichtigt sowohl technische als auch organisatorische Veränderungen in der interdisziplinären Produktentstehung seit der vergangenen Ausgabe im Jahr 2004. Die technischen Veränderungen

resent the needs of the stakeholders? [25]

verifikation

review of the system in relation to the specification at different system levels and levels of concretization

Note: Verification answers the questions: Have we developed correctly? Does the current development status correspond to the valid specification?

3 Abbreviations

The following abbreviations are used throughout this standard:

ASIC	application-specific integrated circuits
CAD	computer-aided design
CASE	computer-aided software engineering
CE	Conformité Européenne (French: European conformity)
CPS	cyber-physical system
CTS	cybertronic system
EDA	electronic design automation
EMC	electromagnetic compatibility
FDTD	finite difference time domain
FEM	finite element method
FIT	finite integration technique
FMEA	failure mode and effects analysis
FPGA	field programmable gate array
HiL	hardware-in-the-loop
HPLZ	holistic product life cycle
IDE	integrated development environment
ICT	information and communication technology
IoT	Internet of Things
ITS	intelligent technical system
IT	information technology
MBSE	model-based systems engineering
PCB	printed circuit board
PLM	product life-cycle management
SiL	software-in-the-loop
SoS	system of systems

4 Background to the revision

4.1 Motivation

The revision of standard VDI 2206:2004 considers both technical and organizational changes in interdisciplinary product creation since the last edition in 2004. The technical changes can be seen, for example, in the intensive networking of technical

zeigen sich z.B. in einer intensiven Vernetzung der technischen Systeme, der Digitalisierung von Produkten und Dienstleistungen sowie der Anbindung an das Internet der Dinge und Dienste. So eröffnet beispielsweise die Anbindung eines Elektrofahrzeugs an das Internet und an einen Webstore neue Möglichkeiten des nachträglichen Verkaufs von On-Demand-Leistungen, wie die Freischaltung zusätzlicher Batteriekapazität oder Motorleistung. Gleichzeitig stellen sich aber auch neue Herausforderungen an die Cyber Security.

Die organisatorischen Veränderungen umfassen eine gestiegene Komplexität in der Kommunikation zwischen den beteiligten Disziplinen, agile Trends in der Projektorganisation bis hin zur Einbeziehung der strategischen Planung zur Realisierung von digitalen Geschäftsmodellen. Beispielsweise erfordert die Integration von prädiktiver Instandhaltung in einen Computertomografen, dass eine disziplinübergreifende Kommunikation stattfindet, da Fehler in mechanischen Elementen durch eine softwareseitige Auswertung erkannt werden müssen, damit Instandhaltungszeitpunkte rechtzeitig abgeschätzt werden können. Eine relevante Fragestellung für das Geschäftsmodell ist hierbei z.B., ob sich das Vorgehen zur Instandhaltung ändert, wenn sich der Computertomograf in einem Krankenhaus oder einer Radiologiepraxis befindet.

Die ganzheitliche Betrachtung eines Systems, das sogenannte „Systemdenken“, stellt ein Kernelement des V-Modells dar. Betrachtet werden müssen alle Anforderungen aus vor- und nachgelagerten Produktlebenszyklusphasen gemäß dem Systems Engineering, um den umfangreichen technischen und organisatorischen Veränderungen gerecht zu werden. Die Grundlagen heutiger technischer Systeme sind dabei die mechatronischen Systeme, weshalb die Richtlinie und das zugehörige V-Modell nicht ersetzt, sondern einer grundsätzlichen Überarbeitung unterzogen wurde.

4.2 Überarbeitungs- und Aktualisierungsbedarfe

Die Richtlinie VDI 2206 aus dem Jahr 2004 beinhaltet als Leitlinie für das Entwickeln mechatronischer Systeme und zum einheitlichen Verständnis Modelle, Methoden und Werkzeuge. Um die Entwicklung mechatronischer Systeme erfolgreich zu gestalten, erfolgte die Beschreibung anwendungsdomänenübergreifend.

Der Überarbeitungsbedarf der Richtlinie entstand sowohl aus Erkenntnissen der industriellen Anwender als auch aus dem technologischen Fortschritt [26]. Hieraus resultieren folgende Überarbeitungsschwerpunkte der Neuauflage:

systems, the digitalization of products and services and the connection to the Internet of Things and Services. For example, the connection of an electric vehicle to the Internet and to a webstore opens new possibilities for the subsequent sale of on-demand services, such as the activation of additional battery capacity or engine power. At the same time, however, new challenges arise for cyber security.

The organizational changes include increased complexity in communication between the disciplines involved, agile trends in project organization, and the inclusion of strategic planning for the realisation of digital business models. For example, the integration of predictive maintenance into a computed tomography scan requires that cross-disciplinary communication takes place, as faults in mechanical elements must be detected by software evaluation so that maintenance times can be estimated in time. A relevant question for the business model is, for example, whether the maintenance procedure changes when the CT scanner is located in a hospital or a radiology practice.

The holistic view of a system, the so-called “systems thinking”, represents a core element of the V-model. All requirements from upstream and downstream product life-cycle phases shall be considered in accordance with systems engineering to do justice to the extensive technical and organizational changes. The foundations of today’s technical systems are mechatronic systems, which is why the standard and the associated V-model have not been replaced but have undergone a fundamental revision.

4.2 Needs for revision and updating

The standard VDI 2206 from 2004 contains models, methods, and tools as a standard for the development of mechatronic systems and for uniform understanding. In order to make the development of mechatronic systems successful, the description should be carried out in cross-application domains.

The need to revise the standard arose both from the findings of industrial users and from technological progress [26]. This has resulted in the following revision priorities for the new edition:

- die Erweiterung des Vorgehens um die Entwicklung cyber-physischer Systeme
- die Vermeidung von Fehlinterpretationen in der Anwendung der Richtlinie und des V-Modells, wie durch *Gräßler* [27] beschrieben
- die Repräsentation einer kontinuierlichen Planung und Durchführung der Eigenschaftabsicherung im Sinne eines präventiven Qualitätsmanagements
- die Einbeziehung von Aspekten des Systems Engineerings sowie die damit verbundene Berücksichtigung vor- und nachgelagerter Produktlebenszyklusphasen [28]
- die Repräsentation des zugrunde liegenden Geschäftsmodells
- die vollumfängliche Darstellung der Anforderungsentwicklung
- die umfassende Repräsentation von Modellierung und Analyse des betrachteten technischen Systems
- die Berücksichtigung von Einflüssen durch selbstlernende Systeme und die Auswirkung auf die Systemsicherheit (u.a. Cyber Security)
- die Aktualisierung der Anwendungsbeispiele mit Hinblick auf mechatronische und cyber-physische Systeme

4.3 Zielgruppe

Die Richtlinie wendet sich in erster Linie an Entwicklerinnen und Entwickler von mechatronischen und cyber-physischen Systemen in der Praxis. Sie soll die Grundzüge des interdisziplinären Entwickelns vermitteln und zu einer ganzheitlichen Sichtweise über die einzelnen beteiligten Disziplinen hinaus anregen, wie es insbesondere auch im Systems Engineering gelebt wird. Systems Engineers haben Vorteile bei der Entwicklung komplexer technischer Gesamtsysteme, da sie Kenntnisse aus verschiedenen Fachdisziplinen vereinen und übergreifend modellieren.

Die Richtlinie dient des Weiteren Führungskräften zur Optimierung der unternehmenseigenen Referenzprozesse und als Grundlage, um methodisch fundierte Entscheidungen in der Entwicklung zu treffen. Darüber hinaus stellt die Richtlinie die Grundlage für die Lehre und Ausbildung von Ingenieurinnen und Ingenieuren in der interdisziplinären Produktentstehung dar.

4.4 Einordnung der Richtlinie

Die Richtlinie VDI 2206 ordnet sich in die Reihe der 2000er-Richtlinien ein und befasst sich innerhalb des holistischen Produktlebenszyklus (HPLZ) mit dem Abschnitt „Entwicklung“ unter besonderer Berücksichtigung von mechatronischen und cyber-

- the expansion of the approach to include the development of cyber-physical systems
- avoiding misinterpretations in the application of the standard and the V-model, as described by *Gräßler* [27]
- the representation of continuous planning and implementation of property assurance in the sense of preventive quality management
- the inclusion of systems engineering aspects and the associated consideration of upstream and downstream product life-cycle phases [28]
- the representation of the underlying business model
- the full representation of requirements engineering
- the comprehensive consideration of modelling and analysis of the technical system
- the consideration of influences by self-learning systems and the impact on system security (including cyber security)
- updating the application examples with regard to mechatronic and cyber-physical systems

4.3 Target group

The standard is primarily aimed at practical developers of mechatronic and cyber-physical systems in practice. It is intended to convey the basic principles of interdisciplinary development and to encourage a holistic view beyond the individual disciplines involved, as is also practiced in systems engineering in particular. Systems engineers have advantages in the development of complex technical overall systems, as they combine knowledge from different disciplines and model them in an overarching manner.

The standard also serves managers to optimize the company's own reference processes and as a basis for making methodologically well-founded decisions in development. Furthermore, the standard is the basis for teaching and training engineers in interdisciplinary product development.

4.4 Classification of the standard

VDI 2206 is part of the series of standards 2000 and deals with the section “development” within the holistic product life cycle (HPLZ) with special consideration of mechatronic and cyber-physical systems. For supplementary aspects of methodical

physischen Systemen. Für ergänzende Aspekte der methodischen Produktentwicklung und Lösungsfundung wird auf die Richtlinien VDI 2221, VDI 2222, VDI 2223 und VDI-MT 2807 verwiesen.

In dem übergreifenden VDI-Fachausschuss 7.02 der VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP) sowie der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) sind zentrale Begriffe und Inhalte abgeglichen und erarbeitet worden. Innerhalb dieses Fachausschusses erfolgte ein regelmäßiger Austausch im Rahmen der gleichzeitigen Überarbeitung der Richtlinie VDI 2221. Hauptaugenmerk von VDI 2221 ist das Beschreiben eines generischen Vorgehens, wohingegen der Schwerpunkt der vorliegenden Richtlinie auf der Entwicklung von mechatronischen und cyber-physischen Systemen liegt. Vor diesem Hintergrund sind im Fachausschuss 4.10 neben Methodikern auch Regelungstechniker und Mechatroniker aus Wissenschaft und Industrie vertreten.

5 Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme

5.1 System und Systemgrenze

Ein System ist eine eindeutig abgegrenzte Einheit und besteht aus verschiedenen Subsystemen und Systemelementen (Hardware, Software, Dienstleistungen, Personen etc.) sowie deren Verknüpfungen. Das Systemelement stellt dabei die niedrigste Systemhierarchieebene dar. Das System besitzt eine Systemgrenze, die durch die Entwicklerin/den Entwickler unter Berücksichtigung der jeweiligen Perspektive zu definieren ist. Ein übergeordnetes System besteht aus mehreren eigenständigen Subsystemen, deren Zusammenwirken zur Erfüllung einer geforderten Gesamtfunktion beiträgt.

Im Kontext des Systems Engineering wird das Zusammenspiel von selbstständig agierenden Systemen als System of Systems (SoS) bezeichnet [4]. Ein anschauliches Beispiel für ein SoS ist das Zusammenwirken eines Mähdreschers mit einem Traktor, der Getreide abtransportiert. Beide Systeme erfüllen individuell ihre Funktionen: das Dreschen und das Abtransportieren des Getreides. Für die Gesamtfunktion des Erntens bilden sie ein gemeinsames System of Systems, das Erntesystem.

5.2 Charakterisierung mechatronischer und cyber-physischer Systeme

Der Begriff „Mechatronik“ wurde bereits in den 1960er-Jahren für nicht programmierbare Roboter geprägt, die aus mechanischen und elektrischen/elektronischen Elementen bestanden [29]. Aufgrund von Fortschritten im Bereich der Mikroelektronik und Mikroprozessortechnik hat sich Soft-

product development and solution finding, reference is made to the standards VDI 2221, VDI 2222, VDI 2223, and VDI-MT 2807.

In the overarching VDI technical committee 7.02 of the VDI Society Product and Process Design (GPP) and the VDI/VDE Society Measurement and Automatic Control (GMA), central terms and contents have been aligned and elaborated. Within this technical committee, a regular exchange took place in the context of the simultaneous revision of the standard VDI 2221. The main focus of VDI 2221 is the description of a generic procedure, whereas the focus of the present standard is on the development of mechatronic and cyber-physical systems. Against this background, control engineers and mechatronics engineers from science and industry are represented in the technical committee 4.10 in addition to methodologists.

5 Development of mechatronic and cyber-physical systems

5.1 System and system boundary

A system is an unambiguously defined unit which consists of various subsystems and system elements (hardware, software, services, people, etc.) as well as their relations. The system element represents the lowest system hierarchy level. The system has a system boundary that is to be defined by the developer considering the respective perspective. A higher-level system consists of several independent subsystems whose interaction contributes to the fulfilment of a required overall function.

In the context of systems engineering, the interaction of independently acting systems is referred to as a system of systems (SoS) [4]. An illustrative example of a SoS is the interaction of a combine harvester with a tractor that transports crop away. Both systems fulfil their functions individually: threshing and transporting the crop away. For the overall function of harvesting, they form a common system of systems, the harvesting system.

5.2 Characterisation of mechatronic and cyber-physical systems

The term “mechatronics” was coined as early as the 1960s for non-programmable robots that consisted of mechanical and electric/electronic elements [29]. Due to advances in microelectronics and microprocessor technology, software has established itself as an essential component of mech-

ware als wesentlicher Bestandteil mechatronischer Systeme etabliert [18].

Mechatronische Systeme sind räumlich und/oder funktionell integrierte Gesamtsysteme, die sich aus Elementen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software zusammensetzen [15; 30] (Bild 1). Unter Hinzunahme anderer Disziplinen, z.B. der Optik, entstehen spezielle Ausprägungen, wie die Optomechatronik [31]. Aus dieser ganzheitlichen Betrachtung heraus resultieren weitreichende Potenziale für die Lösung komplexer technischer Herausforderungen.

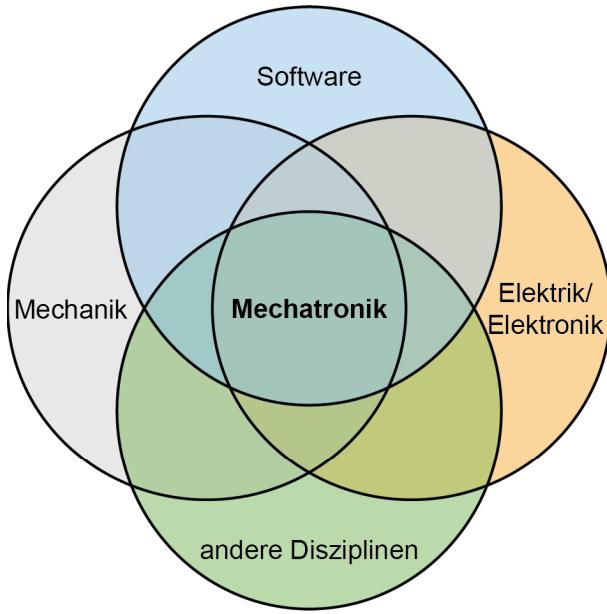


Bild 1. Struktur mechatronischer Systeme, basierend auf [15; 32]

Mechatronische Systeme haben die Aufgabe, mithilfe von Sensoren, Informationsverarbeitung und Aktoren die Energie-, Stoff- und Informationsflüsse umzuwandeln, zu transportieren und/oder zu speichern [32], siehe Bild 2. Das Grundsystem mechatronischer Systeme ist in Abhängigkeit von der geforderten Funktionalität mit mechanischen, elektrischen, elektronischen, magnetischen, thermischen, optischen und darüber hinaus erforderlichen Bauelementen verknüpft. Sensoren erfassen ausgewählte Zustandsgrößen des physischen Grundsystems sowie der Umgebung und geben diese maschinenlesbar aus [33]. Die Informationsverarbeitung erhält die von den Sensoren erfassten Eingangsgrößen, verarbeitet diese weiter und veranlasst über die Aktoren eine gezielte Änderung des Systemzustands. Dadurch werden Zustandsgrößen eines erfassten Ausgangszustands in einen beabsichtigten Zielzustand überführt [34]. Über die Mensch-Maschine-Schnittstelle werden Informationen zwischen Mensch und mechatronischem System ausgetauscht.

atronic systems [18].

Mechatronic systems are spatially and/or functionally integrated overall systems that are composed of elements of mechanics, electrics/electronics and software [15; 30] (Figure 1). With the addition of other disciplines, such as optics, special characteristics arise, such as optomechatronics [31]. This holistic approach results in far-reaching potential for solving complex technical challenges.

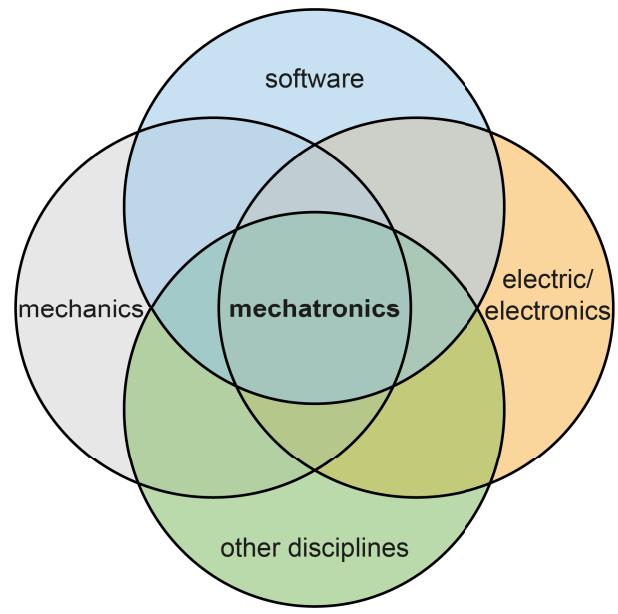


Figure 1. Structure of mechatronic systems, based on [15; 32]

Mechatronic systems have the task of converting, transporting, and/or storing energy, material, and information flows with the help of sensors, information processing, and actuators [32], see Figure 2. Depending on the required functionality, the basic system of mechatronic systems is linked with mechanical, electrical, electronic, magnetic, thermal, optical, and other necessary components. Sensors detect selected state variables of the physical basic system and the environment and output them in a machine-readable form [33]. The information processing receives the input variables detected by the sensors, processes them further and initiates a targeted change of the system state via the actuators. In this way, state variables of a detected initial state are converted into an intended target state [34]. Information is exchanged between humans and the mechatronic system via the human-machine interface.

Zusammengesetzt aus den Begriffen „cyber“ und „physisch“, beschreiben cyber-physische Systeme die Verknüpfung der virtuellen Welt, dargestellt durch den Cyberspace (globales Internet der Dinge und Dienste), mit der physischen Welt, die über die Materie und die gegebenen physikalischen Effekte beschrieben werden [35].

Synonym zu dem Begriff „cyber-physische Systeme“ werden je nach Übersetzung, Schwerpunktlegung, regionaler Schule und Unternehmen die Begriffe „Cybertronische Systeme (CTS)“, „IoT-Systeme“, „Intelligente Technische Systeme (ITS)“, „Adaptronik“ u.a. verwendet.

Durch neu entstandene Einsatzmöglichkeiten und das wachsende Verständnis der zusätzlichen Funktionsumfänge kristallisierte sich zwischenzeitlich der Begriff „CPS“ heraus. Die ursprüngliche Definition cyber-physischer Systeme geht auf *Helen Gill* aus dem Jahr 2006 zurück [36]. *Broy* definiert CPS wie folgt:

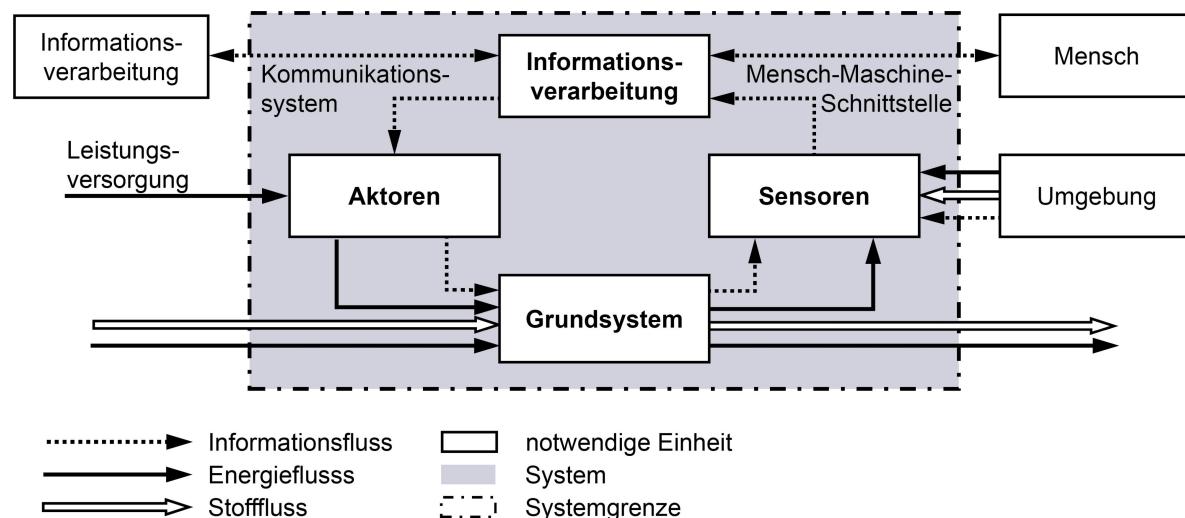


Bild 2. Grundstruktur des mechatronischen Systems (aufbauend auf [34])

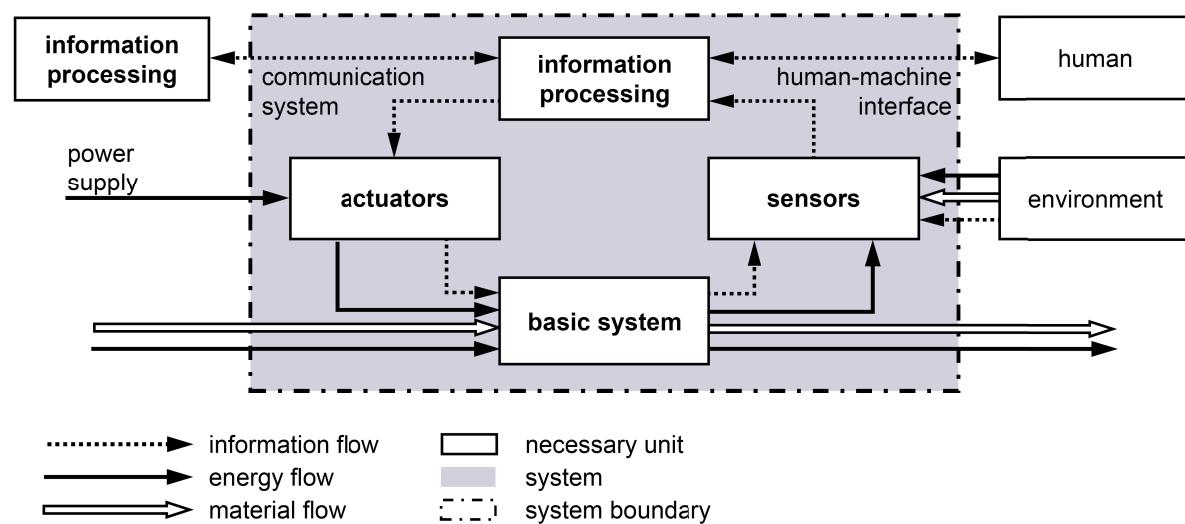


Figure 2. Basic structure of a mechatronic system (based on [34])

Composed of the terms “cyber” and “physical”, cyber-physics systems describe the linking of the virtual world, represented by cyberspace (global Internet of Things and Services), with the physical world, described via matter and the given physical effects [35].

Depending on the translation, focus, regional school, and company, the terms “cybertronic systems (CTS)”, “IoT systems”, “intelligent technical systems (ITS)”, “adaptronics” and others are used synonymously with the term “cyber-physics systems”.

In the meantime, the term “CPS” has crystallized due to newly emerging application possibilities and the growing understanding of the additional functional scopes. The original definition of cyber-physics systems goes back to *Helen Gill* from 2006 [36]. *Broy* defines CPS as follows:

„Steuerung physikalischer Vorgänge mittels Sensoren und Aktuatoren über Kommunikationseinrichtungen mit den globalen digitalen Netzen (dem ‚Cyberspace‘). Dieser Typus von Systemen ermöglicht über Wirkketten eine Verbindung zwischen Vorgängen der physikalischen Realität und den heute verfügbaren digitalen Netzinfrastrukturen. Dies erlaubt vielfältige Applikationen mit hohem wirtschaftlichem Potenzial und starker Innovationskraft“ [37] (siehe auch [38 bis 41]).

Die gesteigerte Nutzung der digitalen Kommunikation über die verfügbaren Netzwerke ermöglicht so auch die Einbindung innovativer Dienste und Technologien und erhöht das ökonomische Potenzial von CPS. Diese erweiterte Definition des CPS ist im darauffolgenden Jahr von der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften acatech aufgegriffen und in einem Positionspapier [35] veröffentlicht worden:

„Cyber-physical systems“ sind Systeme mit eingebetteter Software (als Teil von Geräten, Gebäuden, Verkehrsmitteln, Verkehrswegen, Produktionsanlagen, medizinischen Prozessen, Logistik-, Koordinations- und Managementprozessen), die

- über Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und durch Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken,
- erfasste Daten auswerten und speichern und aktiv oder reaktiv mit der physikalischen sowie der digitalen Welt interagieren,
- über digitale Kommunikationseinrichtungen untereinander sowie in globalen Netzen verbunden sind (drahtlos und/oder drahtgebunden, lokal und/oder global),
- weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen,
- über eine Reihe dezidierter, multimodaler Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen“.

Ein CPS wird maßgeblich durch seine Vernetzung mit dem Internet der Dinge und Dienste gekennzeichnet. Beispielsweise erlaubt dies die Einbindung von KI-Diensten, die Verhaltens- oder Eigenschaftsänderungen während des Betriebs ermöglichen. Den Kern bilden dabei ein oder mehrere mechatronische Systeme mit Sensoren, Informationsverarbeitung und Aktoren. Dadurch ist das System in der Lage, über seine Systemgrenze hinaus mit umgebenden Systemen zu kommunizieren und zu interagieren.

Cyber-physische Systeme stellen die nächste Evolutionsstufe von einfachen mechatronischen Systemen über programmierbare mechatronische Systeme hin zu vollständig softwaretechnisch integrierten und miteinander vernetzten Systemen dar (Bild 3).

“Control of physical processes by means of sensors and actuators via communication devices with global digital networks (cyberspace). This type of system enables a connection between physical reality processes and the digital network infrastructures available today. This allows diverse applications with high economic potential and strong innovative power” [37] (see also [38 to 41]).

The increased use of digital communication via the available networks thus also enables the integration of innovative services and technologies and increases the economic potential of CPS. This expanded definition of CPS was taken up the following year by the German Academy of Science and Engineering acatech and published in a position paper [35]:

“Cyber-physical systems“ are systems with embedded software (as part of equipment, buildings, means of transport, traffic routes, production facilities, medical processes, logistics, coordination, and management processes) which

- directly capture physical data via sensors and act on physical processes through actuators,
- evaluate and store captured data and interact actively or reactively with the physical as well as the digital world,
- are connected to each other via digital communication devices as well as in global networks (wireless and/or wired, local and/or global),
- use globally available data and services,
- have a set of dedicated, multimodal human-machine interfaces”.

A CPS is mainly characterized by its connection to the Internet of Things and Services. For example, this allows the integration of artificial intelligence (AI) services that enable changes in behaviour or properties during operation. One or more mechatronic systems with sensors, information processing, and actuators form the core. This enables the system to communicate and interact with surrounding systems beyond its system boundary.

CPS represent the next evolutionary stage from simple mechatronic systems to programmable mechatronic systems to fully software-integrated and interconnected systems (Figure 3).

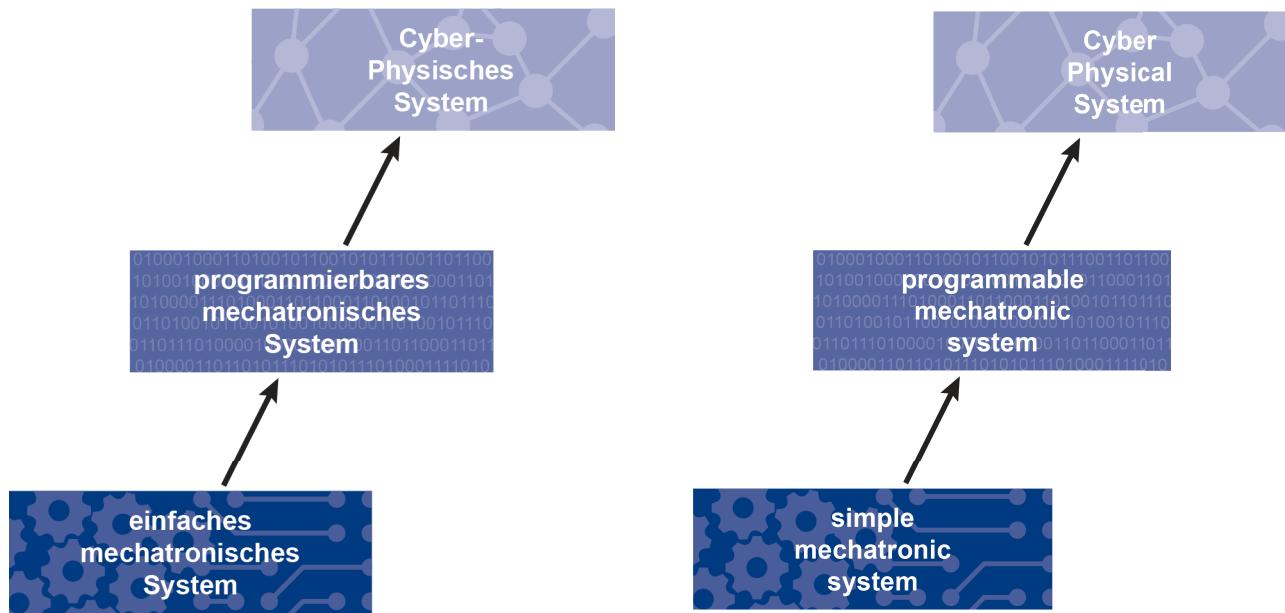


Bild 3. Historische Entwicklung vom einfachen mechatronischen System zum CPS

CPS detektieren die Umgebung und interagieren mit dieser. Wie in Bild 4 dargestellt, sind CPS ein oder mehrere miteinander verbundene mechatronische Systeme, die zusätzlich über ein digitales globales Netzwerk interagieren, in dem Daten und Dienste dem CPS zur Verfügung stehen. Die digitale Kommunikation innerhalb eines Netzwerks erfolgt über drahtgebundene oder drahtlose Infrastrukturen auf lokaler und/oder globaler Ebene.

Der Datentransfer innerhalb des Netzwerks erfolgt uni- oder bidirektional. Dabei treten sowohl einmalige diskrete Datenaustausche als auch kontinuierliche Echtzeitdatentransfers auf. In Bild 4 wird das gemeinsame Wertschöpfungsnetz (Ecosystem) eines CPS, bestehend aus einem Verbund an Unternehmen, abgebildet. Dabei wird zwischen der globalen Vernetzung über das Internet der Dinge und Dienste und unternehmensinternen Netzwerken unterschieden. Die Nutzung dieser Dienste ermöglicht es beispielsweise, die Systemeigenschaften während der Nutzungsphase innerhalb des Produktlebens auf den spezifischen Gebrauch des Nutzers anzupassen [42]. CPS sind für differenzielle, spezifische Aufgabenstellungen vorgesehen, deren optionale Mensch-Maschine-Schnittstellen in vielen Ausführungen erfolgen können [43; 44].

Figure 3. Historical development from simple mechatronic system to CPS

CPS detect and interact with the environment. As shown in Figure 4, CPS are one or more interconnected mechatronic systems that additionally interact via a digital global network in which data and services are available to the CPS. Digital communication within a network takes place via wired or wireless infrastructures on a local and/or global level. Data transfer within the network is uni- or bidirectional.

Both one-time discrete data exchanges and continuous real-time data transfers occur. Figure 4 shows the common value creation network (ecosystem) of a CPS consisting of a network of companies. A distinction is made between global networking via the Internet of Things and Services and internal company networks. The application of these services makes it possible for example, to adapt the system properties to the specific use of the user during the operating phase within the product life [42]. CPS are intended for differential, specific tasks whose optional human-machine interfaces can take many forms [43; 44].

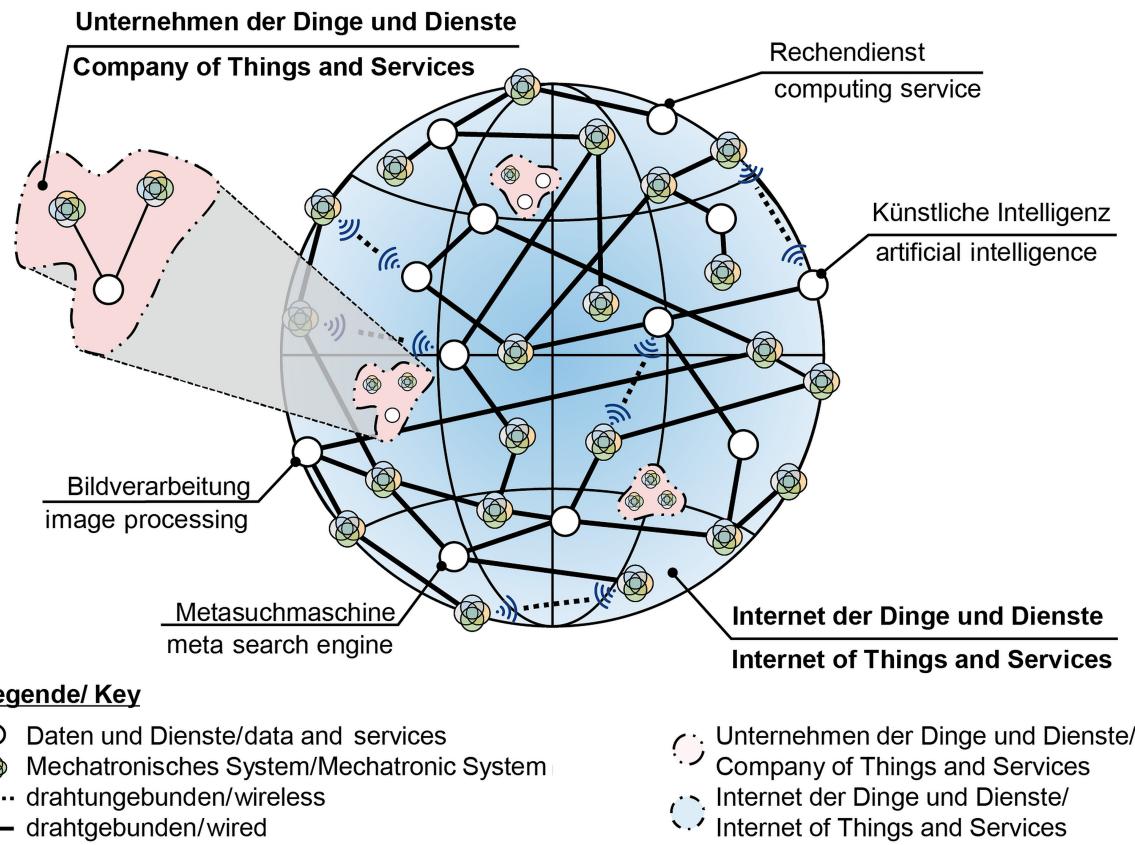


Bild 4. Ecosystem eines CPS (Quelle: [42]) /
Figure 4. Ecosystem of a CPS (source: [42])

5.3 Potenziale der Digitalisierung und Vernetzung

Die Vernetzung mechatronischer Systeme und die Digitalisierung eröffnen neue Potenziale in wirtschaftlicher und funktionaler Hinsicht. So ermöglichen es beispielsweise dezentral gesteuerte führerlose Transportsysteme einem produzierenden Unternehmen, flexibel auf Änderungen in dem Produktionsprozess zu reagieren [45].

Ein weiteres Beispiel für die Potenziale sind autonome Systeme, die im Betrieb lernen, auf neue Ereignisse und Aktionen zu reagieren. Ihre Funktionalität ist vollständig oder teilweise darauf ausgerichtet, in kaum vorhersagbaren Umgebungen und unter kaum spezifizierbaren Bedingungen eine spezifizierte Leistung weitgehend ohne menschliche Intervention zu erbringen [35].

Interaktive soziotechnische Systeme bieten Potenziale in der Interaktion zwischen Mensch und Maschine: Systeme unterstützen den Anwender kontextsensitiv und stellen Informationen in Echtzeit zur Verfügung. Die Interaktion erfolgt multimodal (z.B. Sprache oder Gestik). Ein Anwendungsbeispiel für den Einsatz von Augmented Reality ist die

5.3 Potentials of digitalization and networking

The networking of mechatronic systems and digitalization open up new potential in economic and functional terms. For example, decentrally controlled driverless transport systems enable a manufacturing company to react flexibly to changes in the production process [45].

Another example of the potentials are autonomous systems that learn to respond to new events and actions during operation. Their functionality is fully or partially geared towards performing a specified service largely without human intervention in barely predictable environments and under barely specifiable conditions [35].

Interactive socio-technical systems offer potential in the interaction between humans and machines: systems support the user context-sensitively and provide information in real time. The interaction is multimodal (e.g. speech or gestures). An application example for the use of augmented reality is the support of learning for the maintenance of ship

Unterstützung des Lernens für die Instandhaltung von Schiffskomponenten [46].

Produkt-Service-Systeme beruhen auf einer engen Verzahnung von Sach- und Dienstleistungen für Problemlösungen, die auf den Kunden ausgerichtet sind [47]. Der Nutzen entsteht durch Dienstleistungen zur Erfassung, Verarbeitung und Auswertung von Daten. Diese werden bedarfsgerecht angeboten. Nutzt der Kunde beispielsweise ein Pay-per-Use-Geschäftsmodell, bezahlt er lediglich für die anfallenden Betriebsstunden anstatt für Betrieb, Wartung, Instandhaltung und Abschreibung des Systems. Anhand einer integrierten Sensorik werden das Systemverhalten und der Systemzustand erfasst und über das Internet der Dinge und Dienste an den Anbieter übermittelt, der seinerseits Systemoptimierungen und Wartungsvorgänge anstößt.

5.4 Besonderheiten bei der Entwicklung

Die klassischen Disziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Softwaretechnik beinhalten eigene Terminologien, Methoden und spezifisches Wissen. Die daraus resultierenden limitierten Sichtweisen erschweren das interdisziplinäre Zusammenwirken. Das V-Modell setzt dort an und beschreibt eine ganzheitliche methodische Unterstützung. Eine der wesentlichen Besonderheiten des V-Modells liegt in dem dezidierten Herunterbrechen der komplexen Aufgabenstellung in Funktionen, logische und physische Struktur einschließlich partitionierter Subsysteme und Systemelemente (Decomposition, siehe Bild 6 in Abschnitt 6.1). Die in den Disziplinen implementierten Systemelemente werden schrittweise wieder zu Subsystemen und einem Gesamtsystem integriert (Integration). Systemeigenschaften werden währenddessen kontinuierlich verifiziert und validiert.

Die Besonderheiten bei der Entwicklung von CPS liegen in der starken Vernetzung der hochintegrierten Systeme und in der Fähigkeit, Systemeigenschaften während des laufenden Betriebs ohne direkten physischen Zugriff zu ändern. Hieraus ergeben sich hohe Anforderungen an das präventive Qualitätsmanagement im Sinne einer kontinuierlichen Planung und Ausführung der Eigenschaftsabsicherung mit dem Ziel, die System Sicherheit herzustellen (Safety und Security). Zusätzlich steigt die Komplexität der Systeme durch eine Vielzahl von dynamischen Abhängigkeiten und Systemelementen [45]. Ein gemeinsames Verständnis des entwicklungsmethodischen Vorgehens für das System ist dabei die Grundlage der interdisziplinären Produktentstehung.

components [46].

Product-service systems are based on a close interlocking of material and services for problem solutions that are oriented towards the customer [47]. The benefit arises from services for the collection, processing, and evaluation of data. These are offered according to need. If the customers use a pay-per-use business model, for example, they only pay for the operating hours incurred instead of for the operation, maintenance, servicing, and depreciation of the system. With the help of integrated sensors, system behaviour and system status are recorded and transmitted via the Internet of Things and Services to the provider, who in turn triggers system optimization and maintenance processes.

5.4 Special features of the development

The classical disciplines of mechanics, electrical engineering and software engineering use their own terminologies, methods, and specific knowledge. The resulting limited perspectives make interdisciplinary cooperation difficult. The V-model starts there and describes a holistic methodological support. One of the essential special features of the V-model is the dedicated breakdown of the complex task into functions, logical and physical structure including partitioned subsystems and system elements (decomposition, see Figure 6 in Section 6.1). The system elements implemented in the disciplines are gradually integrated again into subsystems and an overall system (integration). System properties are continuously verified and validated during this process.

The special features in the development of CPS lie in the strong networking of the highly integrated systems and in the ability to change system properties during ongoing operation without direct physical access. This results in high demands on preventive quality management in the sense of continuous planning and execution of the assurance of properties with the aim of establishing system safety security. In addition, the complexity of the systems increases due to a multitude of dynamic dependencies and system elements [45]. A common understanding of the development methodology for the system is the basis for interdisciplinary product creation.

6 Entwicklungsmethodik für mechatronische und cyber-physische Systeme

Sowohl die Erfahrungen aus der industriellen Praxis als auch die Ergebnisse der empirischen Konstruktionsforschung haben gezeigt, dass Entwicklungsprozesse unternehmenstypologische Ausprägungen haben und keinem festen sequenziellen Ablauf folgen [11]. Um diese Erfahrungen und Ergebnisse bei der Entwicklung von CPS zu berücksichtigen, wird im Rahmen dieser Richtlinie ein V-Modell erläutert, das die sachlogischen Abhängigkeiten der Entwicklungsaufgaben darstellt, ohne eine zeitliche Einordnung oder gar sequentielle Abarbeitung vorzugeben. Denn erst das partiell parallele und iterative Durchlaufen von Entwicklungsaufgaben führt zu wirtschaftlich erfolgreichen Produkten. Damit bleibt das V-Modell zugleich unabhängig von der gewählten Projektorganisation. Es kann sowohl für agil organisierte Entwicklungsprojekte im volatilen Umfeld als auch für Großprojekte eingesetzt werden, die einem klassischen Projektmanagement folgen.

6.1 Einordnung in den Produktlebenszyklus

Das V-Modell für die Entwicklung von mechatronischen und cyber-physischen Systemen ordnet sich, wie in Bild 5 illustriert, in den holistischen Produktlebenszyklus ein. Mit den Ergebnissen der strategischen Planung liegen das angestrebte Geschäftsmodell und der Entwicklungsauftrag fest. Dies ist der Einstiegspunkt in das V-Modell, das die Aufgaben innerhalb der Produktentwicklung sachlogisch strukturiert. In der Produktentwicklung sind das Erfüllen der Kundenbedürfnisse, die in der Aufgabenstellung festgelegten Systemeigenschaften, die Einhaltung von Funktionsumfang, budgetierten Kosten und Liefertreue nachzuweisen. Mit der Serienfreigabe erfolgt die Übergabe der Entwicklungsergebnisse an die Realisierung/Produktion und damit auch der Ausstieg aus dem V-Modell. Bei immateriellen Wirtschaftsgütern werden in der Realisierung die Betreibermodelle für die Produktnutzung vorbereitet. Hierunter fallen z.B. bei digitalen und vernetzten Systemen die Bereitstellung und/oder die vertragliche Verankerung onlinebasierter Speicher- und Serverdienste (Cloud), zugehöriger Datenprotokolle sowie die Konzeption und Schulung ergänzender Dienstleistungen. Für die während der Produktnutzung angebotenen Dienstleistungen werden im Rahmen der Realisierung beispielsweise Anwendungstools und Anwendungssoftware (Apps) entwickelt. Der vierte Abschnitt „Produktnutzung“ beschreibt sämtliche Aktivitäten der im Ecosystem agierenden Unternehmen während der Nutzung des Produkts. Hier-

6 Development methodology for mechatronic and cyber-physical systems

Both experience from industrial practice and the results of empirical design research have shown that development processes have company-typological characteristics and do not follow a fixed sequential flow [11]. To take these experiences and results into account in the development of CPS, a V-model is explained within the framework of this standard, which represents the inherent factual logical dependencies of the development tasks without prescribing a time classification or even sequential processing. As it is only the partially parallel and iterative execution of product development tasks that leads to economically successful products. Thus, the V-model remains independent of the chosen project organization. It can be used for agilely organized development projects in a volatile environment as well as for large-scale projects that follow classic project management.

6.1 Classification in the product life cycle

The V-model for the development of mechatronic and cyber-physical systems fits into the holistic product life cycle, as illustrated in Figure 5. With the results of the strategic planning, the intended business model and the development task are fixed. This is the entry point into the V-model, which structures the tasks within product development in an inherent factual logical way. In product development, the fulfilment of customer needs, the system characteristics defined in the task, compliance with the functional scope, budgeted costs, and delivery reliability shall be proven. With the serial release, the transfer of the development results to the realisation/production takes place and thus also the exit from the V-model. In the case of intangible assets, the operator models for product use are prepared during realisation. For example, in the case of digital and networked systems, this includes the provision and/or contractual anchoring of online-based storage and server services (cloud), associated data protocols, and the design and training of supplementary services. For the services offered during product use, for example, application tools and application software (apps) are developed as part of the realisation. The fourth phase, “product use”, describes all activities of the companies operating in the ecosystem during the use of the product. Supplementary, furthermore to maintenance and servicing, this also includes the design of additional services and applications that are only offered after a product launch. The final

zu zählen neben Instandhaltung und Wartung auch die Konzeption zusätzlicher Dienste und Applikationen, die erst nach einer Produkteinführung angeboten werden. Die abschließenden Aktivitäten eines Anbieters für das Produkt, die den Auslauf und die Abkündigung umfassen, markieren den fünften Abschnitt des holistischen Produktlebenszyklusmodells, das Produktlebensende.

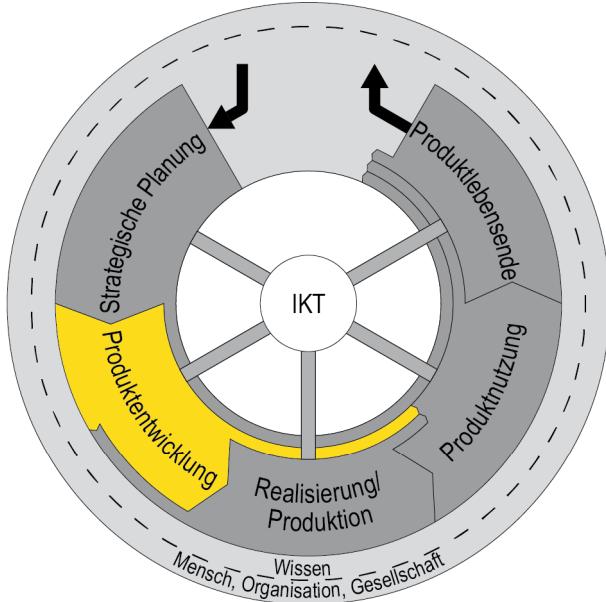


Bild 5. Einordnung der Richtlinie in den holistischen Produktlebenszyklus [10; 12]

Die Verfügbarkeit der erzeugten Informationen und der gemachten Erfahrungen wird durch die zentrale Anordnung der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) in dem Produktlebenszyklusmodell hervorgehoben (Bild 5). Der Mensch sowie die Organisation und Gesellschaft markieren eine Umrahmung und bilden das Fundament, auf dem der Produktlebenszyklus aufbaut.

6.2 Das V-Modell zur Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme

Die initiale Idee eines V-Modells wurde 1979 erstmalig in der Softwareentwicklung durch *Boehm* aufgebracht [48] und 1995 von *Bröhl* und *Drösche* aufgegriffen [49]. Im Kern steht das Symbol des „V“ für die Zerlegung des Systems in seine Elemente auf dem linken Schenkel und die schrittweise erfolgende Integration von Elementen und Subsystemen zum Gesamtsystem auf dem rechten Schenkel (Bild 6). Zwischen diesen beiden Schenkeln des „V“ werden die Eigenschaften des in der Entwicklung befindlichen Systems kontinuierlich verifiziert und validiert.

activities of a provider for the product, which include the phase-out and discontinuation, mark the fifth phase of the HPLC model, the product end of life.

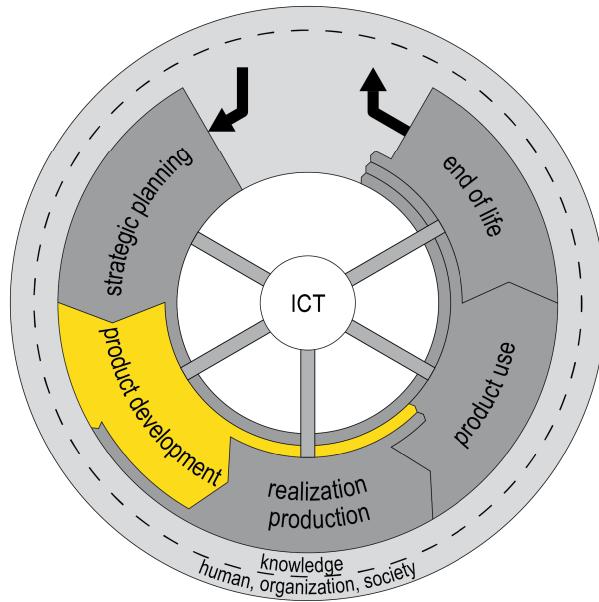


Figure 5. Placement of the standard in the holistic product life cycle [10; 12]

The availability of the information generated and the experience gained is highlighted by the central placement of information and communication technology (ICT) in the product life cycle model (Figure 5). People as well as the organization and society mark a frame and form the foundation on which the product life cycle is built.

6.2 The V-model for the development of mechatronic and cyber-physical systems

The initial idea of a V-model was first introduced in software development in 1979 by *Boehm* [48] and taken up by *Bröhl* and *Drösche* in 1995 [49]. In essence, the symbol of the “V” stands for the decomposition of the system into its elements on the left thigh and the step-by-step integration of elements and subsystems into the overall system on the right thigh (Figure 6). Between these two thighs of the “V”, the properties of the system under development are continuously verified and validated.

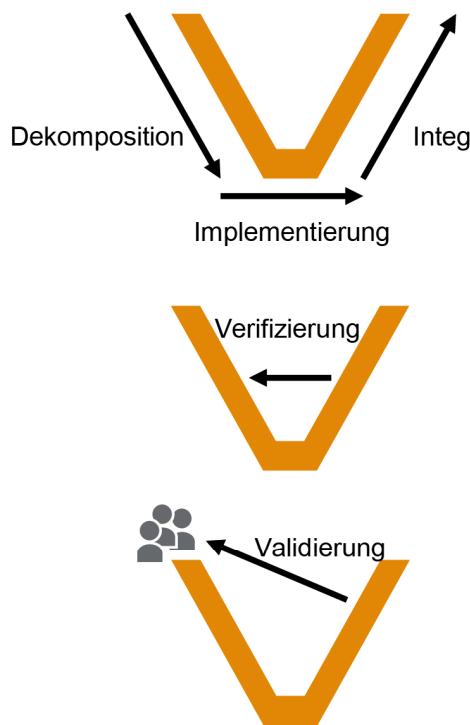


Bild 6. Kernidee des V-Modells (Quelle: [12])

Die ursprüngliche Richtlinie VDI 2206:2004 ergänzte diese Grundidee des V-Modells um die Anforderungen an die Entwicklung mechatronischer Systeme. Auf Basis von Erfahrungen aus der industriellen Anwendung und dem technologischen Fortschritt wurde seither eine Vielzahl von Weiterentwicklungen des V-Modells publiziert [26]. So fokussiert beispielsweise das V-Modell von *Bender* die System-, Subsystem- und Komponentenebene [50], während *Anderl* das V-Modell zu einem W-Modell für die Entwicklung aktiver Systeme erweitert [51]. Das V-Modell des INCOSE-Handbuchs ist auf die wesentlichen Schritte reduziert, um auf jeden Kontext im Systems Engineering anpassbar zu sein [52] und im V-Modell der Fraunhofer IPK wurden durch *Stark* insbesondere die frühen Phasen erweitert [53]. Das Department of Transportation integriert erstmals vor dem Hintergrund von Systems Engineering Aspekte vor- und nachgelagerten Produktlebenszyklusphasen in Form von Flügeln. Vorgelagerte Produktlebenszyklusphasen münden in das „V“ und nachgelagerten Phasen knüpfen an das „V“ an [54]. Das Modell von *Eigner* ergänzt darüber hinaus die Richtlinie VDI 2206:2004 um die funktionale Produktbeschreibung und die Schnittstelle zum Product Lifecycle Management [23; 55]. Das nachfolgend vorgestellte V-Modell ist entsprechend diesem zwischenzzeitlichen technischen und organisatorischen Fortschritt angepasst und erweitert worden.

Das V-Modell beschreibt eine sachlogische Verknüpfung von Aufgaben der interdisziplinären

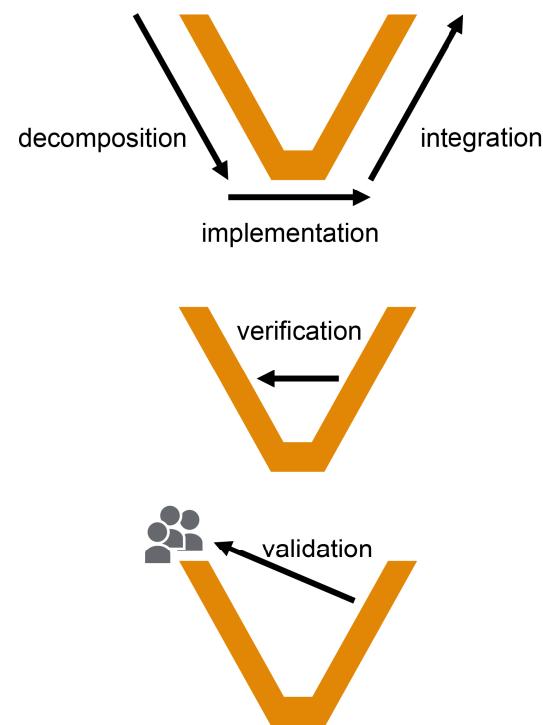


Figure 6. Core idea of the V-model (source: [12])

The original standard VDI 2206:2004 supplemented this basic idea of the V-model with the requirements for the development of mechatronic systems. Based on experience from industrial application and technological progress, a large number of further developments of the V-model have been published since then [26]. For example, *Bender*'s V-model focuses on the system, subsystem and component levels [50], while *Anderl* extends the V-model to a W-Model for the development of active systems [51]. The V-model of the INCOSE manual is reduced to the essential steps to be adaptable to any context in systems engineering [52] and in the V-model of Fraunhofer IPK, the early phases in particular were extended by *Stark* [53]. The Department of Transportation integrates aspects of upstream and downstream product life cycle phases in the form of wings for the first time against the background of systems engineering. Upstream product life-cycle phases lead into the “V” and downstream phases link to the “V” [54]. *Eigner*'s model also supplements VDI 2206:2004 with the functional product description and the interface to product life-cycle management [23; 55]. The V-model presented below has been adapted and expanded in line with this technical and organizational progress that has taken place in the meantime.

The V-model describes an inherent factual logical connection of tasks in interdisciplinary product

Produktentwicklung. Es stellt kein Ablaufmodell dar, sondern dient vielmehr als Rahmenwerk, das die Vernetzung der Aufgaben in der Entwicklung von mechatronischen und cyber-physicalen Systemen beschreibt. Bedingt durch die Individualität eines jeden Systems können Teilschritte entfallen oder weniger ausführlich bearbeitet werden. Iterationen einzelner Aufgaben können an jedem Punkt im V-Modell erfolgen. So ist es beispielsweise möglich und sinnvoll, kritische Subsysteme zur Minimierung des Entwicklungsrisikos bis kurz vor die Serienreife zu bearbeiten, bevor mit der Entwicklung des davon abhängigen übergeordneten Systems begonnen wird. Zusätzlich zum V-Modell muss für jedes konkrete Entwicklungsprojekt über die anzuwendende Organisationsform entschieden werden. So können die Inhalte des V-Modells sowohl mit Methoden der agilen Produktentwicklung als auch mit klassischem Projektmanagement umgesetzt werden. Dies ergibt in Summe eine generische Ablauflogik für die Entwicklung von mechatronischen und cyber-physicalen Systemen, die anwendungsspezifisch unterschiedlich ausgeprägt sein wird.

Das in Bild 7 dargestellte neue V-Modell besteht aus drei Strängen, die parallel durchlaufen werden. Der äußere Strang repräsentiert die parallel zu den Kernaufgaben der Entwicklung verlaufende Modellbildung und Analyse des Systems und möglicher Subsysteme. Der mittlere Strang beschreibt die Kernaufgaben der Systementwicklung. Der innere Strang betont die Anforderungsentwicklung und umfasst den kontinuierlichen Umgang und die Arbeit mit den Anforderungen.

Zur Veranschaulichung des Zusammenwirkens der beteiligten Disziplinen werden die drei Stränge in Form von miteinander vernetzten Teilsträngen als gepunktete, gestrichelte oder durchgezogene Linien dargestellt. Diese grafische Repräsentation betont, dass die Implementierung der Systemelemente auf einer tiefgreifenden Vernetzung zwischen den beteiligten Disziplinen beruht. Diese Aussage wird verstärkt durch die jeweils einheitliche Hintergrundfarbe des jeweiligen Strangs, da der Austausch und die Koordination zwischen den Disziplinen entscheidend sind. Kann die erforderliche Positioniergenauigkeit eines Roboters durch die Regelstrategie allein nicht erfüllt werden, so ist beispielsweise eine Iteration und Optimierung der Hebelarmlängen des Roboters oder auch eine Bildverarbeitung als Softwarelösung möglich. Neben den Kerndisziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Softwaretechnik symbolisiert die durchgezogene Linie innerhalb der drei Stränge die je nach An-

development. It does not represent a process model, but rather serves as a framework that describes the connection of tasks in the development of mechatronic and cyber-physical systems. Due to the individuality of each system, substeps can be omitted or processed in less detail. Iterations of individual tasks can take place at any point in the V-model. For example, to minimize the development risk, it is possible and makes sense to work on critical subsystems until shortly before they are ready for serial production, ahead of the beginning with the development of the higher-level system that depends on them. In addition to the V-model, the organizational form to be used must be decided for each concrete development project. Thus, the contents of the V-model can be implemented with methods of agile product development as well as with classical project management. All in all, this results in a generic process logic for the development of mechatronic and cyber-physical systems, which will vary depending on the application.

The new V-model shown in Figure 7 consists of three strands that run in parallel. The outer strand represents the modelling and analysis of the system and possible subsystems running parallel to the core tasks of development. The middle strand describes the core tasks of system development. The inner strand emphasizes requirements engineering and includes the continuous handling and work with requirements.

To illustrate the interaction of the disciplines involved, the three strands are shown as dotted, dashed, or solid lines in the form of interconnected substrands. This graphic representation emphasizes that the implementation of the system elements is based on a profound networking between the disciplines involved. This statement is reinforced by the uniform background colour of each strand, as the exchange and coordination between the disciplines is crucial. If the required positioning accuracy of a robot cannot be fulfilled by the control strategy alone, it is possible, for example, to iterate and optimize the lever arm lengths of the robot or even to use image processing as a software solution. In addition to the core disciplines of mechanical, electrical, and software engineering, the solid line within the three strands symbolises the additional disciplines involved, e.g. optics, hydraulics, magnetics, depending on the application. The starting point of the logical sequence is the customer need,

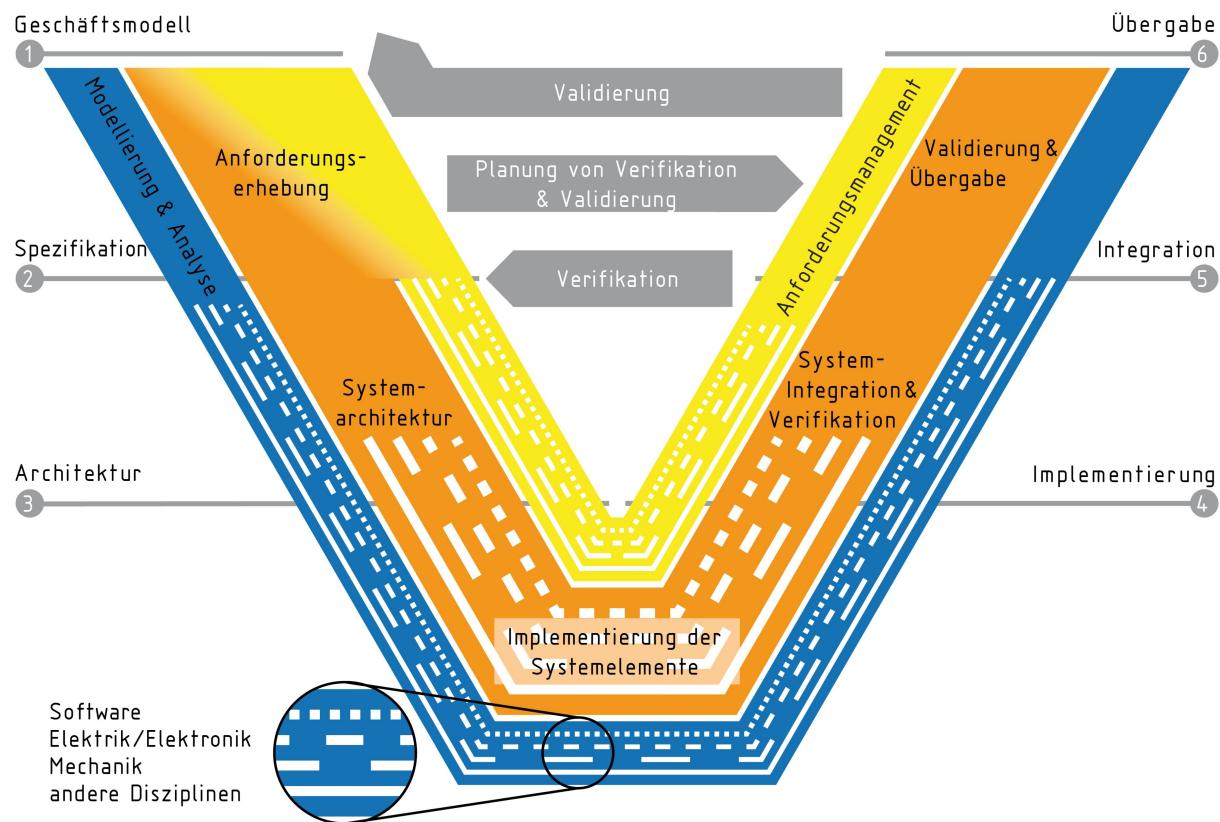


Bild 7. V-Modell für die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme (siehe Schrifttum für den freien Download)

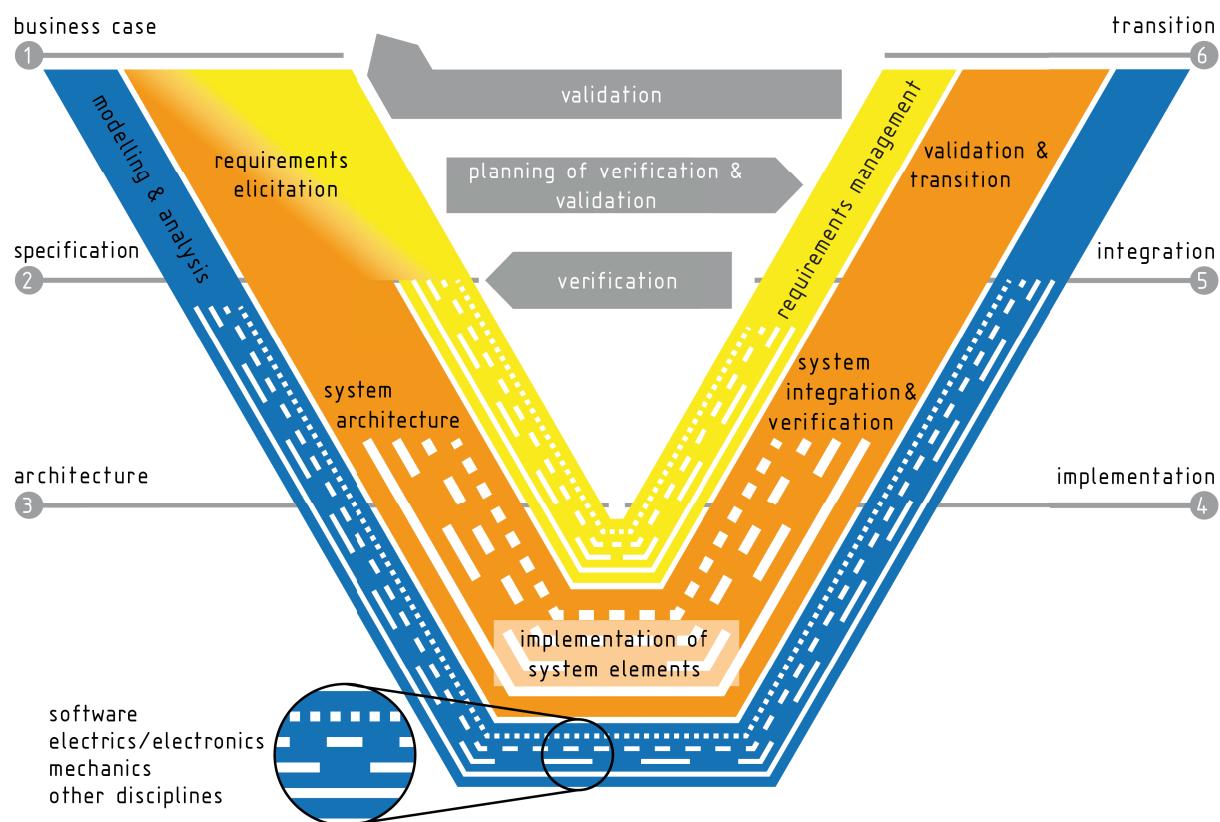


Figure 7. V-model for the development of mechatronic and cyber-physical systems (see Bibliography for free download)

wendungsfall zusätzlich beteiligten Technologien, z.B. Optik, Hydraulik, Magnetik. Ausgangspunkt der sachlogischen Abfolge stellt das Kundenbedürfnis, das aus der strategischen Planung resultierende Geschäftsmodell oder der Entwicklungsauftrag dar (Kontrollpunkt 1 in Bild 7). Aufbauend auf der erfolgten Dekomposition (linker Schenkel des „V“), der Implementierung (Spitze des „V“) und der Integration (rechter Schenkel des „V“) endet die Systementwicklung mit der Übergabe an die Realisierung und Produktion (Kontrollpunkt 6 in Bild 7).

Entlang der Systementwicklung passieren die drei Stränge des V-Modells sechs Kontrollpunkte. Diese repräsentieren den Fortschritt des zu entwickelnden Systems. Sie enthalten Kontrollfragen, die dem Anwender helfen, die zugehörigen Entwicklungsaufgaben strukturiert zu planen und durchzuführen.

Zwischen den Schenkeln des V-Modells sind die Planung und Durchführung der Eigenschaftsabsicherung exemplarisch als Blockpfeile dargestellt. Die Blockpfeile stehen repräsentativ für die parallel zu den Kernaufgaben der Entwicklung verlaufende Planung und Durchführung der Eigenschaftsabsicherung. Abhängig von den Randbedingungen wird diese kontinuierlich, mehrfach und beliebig häufig durchgeführt. „Planung von Verifikation und Validierung“ beschreibt die Notwendigkeit, bereits im linken Schenkel des V-Modells, also beispielsweise beim Aufsetzen eines Systemmodells, Kriterien für die Verifikation und Validierung festzulegen. Es wird festgelegt, wie parallel zu den Kernaufgaben der Entwicklung überprüft werden soll, ob die Systementwicklung erfolgreich verläuft. Die Planung geht dabei über die Beschreibung einer „guten“ Anforderung [3; 11; 56] hinaus. Denn sie beschreibt nicht nur, dass eine Anforderung abgesichert werden muss, sondern auch, in welcher Form dies geschehen soll.

Die Blockpfeile „Verifikation“ und „Validierung“ beschreiben die Eigenschaftsabsicherung mit den Fragen „Haben wir richtig entwickelt?“ (Verifikation) und „Haben wir das Richtige entwickelt?“ (Validierung). Im Rahmen der Verifikation wird überprüft, inwieweit der aktuelle Entwicklungsstand noch die Spezifikation erfüllt. Im Rahmen der Validierung wird überprüft, ob der aktuelle Entwicklungsstand nach wie vor die Bedürfnisse des Kunden sowie anderer Stakeholder erfüllt. Der Blockpfeil „Validierung“ wird daher durch einen nach oben gerichteten Blockpfeil illustriert, dessen Spitze auf die Stakeholder zeigt (siehe Bild 6). Die Validierung ist deshalb so bedeutsam, weil der häufigste Grund für das Scheitern von Entwicklungsprojekten

the business model resulting from strategic planning or the development order (checkpoint 1 in Figure 7). Building on the decomposition (left thigh of the “V”), the implementation (tip of the “V”) and the integration (right thigh of the “V”), system development ends with the transition to realisation and production (checkpoint 6 in Figure 7).

Along the system development, the three strands of the V-model pass through six checkpoints. These represent the progress of the system under development. The checkpoints contain control questions that help the developer to plan and carry out the associated development tasks in a structured way.

Between the thighs of the V-model, the planning and implementation of the property assurance are shown as exemplary block arrows. The block arrows are representative of the planning and implementation of the property assurance that runs parallel to the core tasks of the development. Depending on the boundary conditions, this is carried out continuously, repeatedly, and as often as required. “Planning of verification and validation” describes the necessity to define criteria for verification and validation already in the left thigh of the V-model, for example when setting up a system model. It is determined how, parallel to the core tasks of development, it is to be checked whether system development is proceeding successfully. Planning goes beyond the description of a “good” requirement [3; 11; 56]. It describes not only that a requirement must be assured, but also in what form this should be done.

The block arrows “verification” and “validation” describe the property assurance with the questions “Have we developed the system correctly?” (verification) and “Did we develop the right system?” (validation). Verification checks to what extent the current development status still meets the specification. Validation checks whether the current development status still meets the needs of the customer as well as other stakeholders. The block arrow “validation” is therefore illustrated by a block arrow pointing upwards, with the tip pointing to the stakeholders (see Figure 6). Validation is so significant because the most common reason for the failure of development projects is inadequately executed requirements engineering [57]. However, not only

eine unzureichend durchgeführte Anforderungsentwicklung darstellt [57]. Aber nicht nur eine fehlerhafte oder unvollständige Erhebung von Anforderungen kann zu einem negativen Validierungsergebnis führen, sondern auch Stakeholderbedürfnisse, die sich während des laufenden Entwicklungsprojekts verändert haben.

Die in Bild 7 dargestellten Kontrollpunkte unterstützen den Anwender in der Nachverfolgung des Fortschritts seines Entwicklungsprojekts [12]. Kontrollpunkte geben exemplarische Anreize zu überprüfen, welche Ergebnisse und Arbeitsinhalte dem Anwender möglicherweise noch fehlen, welche er abgearbeitet haben sollte und dienen der inhaltlichen Konkretisierung der sachlogischen Vernetzung von Aufgaben in der Systementwicklung.

Im Gegensatz zu den in Stage-Gate-Modellen etablierten „Gates“ oder Meilensteinen [58] korrelieren die Kontrollpunkte weder mit einem Zeitpunkt innerhalb des Entwicklungsprojekts, noch erfüllen sie eine Freigabefunktion. Sie dienen vielmehr der Entwicklerin/dem Entwickler zur Reflexion seines eigenen Entwicklungsstands. Die Integration von Inhalten aus Kontrollpunkten ins Projektmanagement sowie ins individuelle entwicklungsmethodische Vorgehen, z.B. in Form von „Gates“ oder Meilensteinen, bleibt dem Anwender überlassen.

Die Repräsentation des zugrunde liegenden Geschäftsmodells als ersten Kontrollpunkt im V-Modell ist Voraussetzung für die Gestaltung digitaler Geschäftsmodelle (Bild 8).

incorrect or incomplete requirements elicitation can lead to a negative validation result, but also stakeholder needs that have changed during the ongoing development project.

The checkpoints shown in Figure 7 support the developers in tracking the progress of their development project [12]. Checkpoints provide exemplary incentives to check which results and work content the user may still be missing, which he should have completed and serve to concretize the content of the logical connection of tasks in system development.

In contrast to the “gates” or milestones [58] established in Stage-Gate Models, the checkpoints neither correlate with a point in time within the development project nor do they fulfil a release function. Rather, they serve the developer to reflect on his own development status. The integration of contents from checkpoints into project management as well as into the individual product development methods, e.g. in the form of “gates” or milestones, is left to the users.

The representation of the underlying business model as the first checkpoint in the V-model is a prerequisite for the design of digital business models (Figure 8).

Kontrollpunkt 1 – Geschäftsmodell

- Trägt der Entwicklungsauftrag zum Geschäftsmodell und zur Rendite bei?
- Ist der Zweck der Produktentwicklung bekannt?
- Sind alle Impulse für das Anforderungsprofil aufgenommen worden? (Use Cases, Stakeholderanalyse, Abgrenzung aus Sicht der Produktprogrammplanung etc.)
- Liegt ein digitales Geschäftsmodell oder eine Einbindung in Dienste eines solchen Modells vor?
- Ist allen Beteiligten klar, welches Geschäftsmodell warum verfolgt wird?
- Sind sämtliche relevanten Stakeholder identifiziert und eingebunden?
- Sind erfolgversprechende Use Cases identifiziert? (Marktrelevanz, funktionaler Mehrwert etc.)
- Sind alle Impulse aus Technologieentwicklung, Marktbeobachtung, Wettbewerbsanalyse, Benchmark etc. berücksichtigt?
- Fördern und unterstützen die Produkt- und Prozessideen das verfolgte Geschäftsmodell?
- Sind die notwendigen Produkt-/Produktionstechnologien bekannt?
- Ist die Technologie verfügbar? Wie gut beherrschen wir diese?
- Ist ein adäquates Risikomanagementkonzept aufgesetzt worden?

Bild 8. Kontrollpunkt 1 – Geschäftsmodell

Checkpoint 1 – Business model

- Does the development contract contribute to the business model and the return on investment?
- Is the purpose of the product development known?
- Have all the impulses for the requirements profile been included? (use cases, stakeholder analysis, delimitation from the perspective of product program planning, etc.)
- Is there a digital business model or an involvement in services of such a model?
- Is it clear to all involved which business model is being pursued and why?
- Have all relevant stakeholders been identified and involved?
- Have promising use cases been identified? (market relevance, functional value added, etc.)
- Have all impulses from technology development, market analysis, competition analysis, benchmark, etc. been taken into account?
- Do the product and process ideas promote and support the business model being pursued?
- Are the necessary product/production technologies known?
- Is the technology available? How well do we master it?
- Has an adequate risk management concept been set up?

Figure 8. Checkpoint 1 – Business model

Um neue Wertversprechen zu erfinden, müssen beispielsweise Vertriebs- und Marketingmitarbeiter eng mit Ingenieurinnen und Ingenieuren zusammenarbeiten, da diese bestens über aufkommende Produkt- und Prozesstechnologien informiert sind. Im Gegenzug müssen Ingenieurinnen und Ingenieure von den Vertriebs- und Marketingkollegen lernen, wie der Anwender das Produkt benutzt, um daraus Impulse für Produktinnovationen zu erhalten. Aus diesem Grund wird über den Kontrollpunkt 1 (Geschäftsmodell) die Anbindung an die strategische Planung und über den Kontrollpunkt 6 (Übergabe) die Schnittstelle zu Produktion, Anwendung, Wartung und Entsorgung abgebildet (siehe Bild 5). Dieser Ansatz basiert auf einem vom US-Verkehrsministerium vorgeschlagenen V-Modell-Ansatz, in dem die vor- und nachgelagerten Produktlebenszyklusphasen als Flügel des V dargestellt werden [54].

6.3 Kernaufgaben im mittleren Strang

Den Ausgangspunkt der Systementwicklung bilden das verfolgte Geschäftsmodell, der Entwicklungsauftrag und die Restriktionen aus den nachgelagerten Produktlebenszyklusphasen. Im Rahmen der Systementwicklung werden iterativ und teilweise überlappend die Kernaufgaben

- Anforderungserhebung,
- Systemarchitektur,
- Implementierung der Systemelemente,
- Systemintegration und Verifikation sowie
- Validierung und Übergabe

bearbeitet. Diese Kernaufgaben repräsentieren den mittleren Strang des V-Modells und werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

To invent new value propositions, for example, sales and marketing people need to work closely with engineers, as engineers are well informed about emerging product and process technologies. In turn, engineers need to learn from sales and marketing colleagues how the customer uses the product to gain impulses for innovations. For this reason, the link to strategic planning is mapped via checkpoint 1 (business model) and the interface to production, application, maintenance, and disposal via checkpoint 6 (transition) (see Figure 5). This approach is based on a V-model proposed by the US Department of Transportation, in which the upstream and downstream product life-cycle phases are represented as wings of the V [54].

6.3 Core tasks in the middle strand

The starting point of system development is formed by the pursued business model, the development order, and the restrictions from the downstream product life-cycle phases. Within the framework of system development, the following core tasks are iteratively and partially overlapped processed:

- requirement elicitation
- system architecture
- implementation of the system elements
- system integration and verification
- validation and transition

These core tasks represent the middle strand of the V-model and are explained in the following sections.

6.3.1 Anforderungserhebung

Ausgangspunkt der Anforderungserhebung ist der interne oder externe Entwicklungsauftrag (VDI 2220, VDI 2221). Die Erhebung, Strukturierung und Analyse von Anforderungen bilden die Grundlage der Entwicklung von mechatronischen und cyber-physischen Systemen. Stakeholder stehen stellvertretend für eine Personengruppe oder Organisation, die berechtigte Erwartungen und Ansprüche an ein System haben [4]. Aus den Bedürfnissen und Wünschen der Stakeholder werden Kundenanforderungen abgeleitet und anschließend dokumentiert. Anhand der Kundenanforderungen werden Bedingungen und Fähigkeiten festgelegt, die von einem System oder Teilsystem erfüllt werden müssen, die sogenannten „Systemanforderungen“, wodurch eine norm- und spezifikationsgerechte Entwicklung ermöglicht wird (siehe IEEE 610.12.1990). Ziel ist es, mit der Finalisierung der Systemarchitektur (Kontrollpunkt 3) alle wesentlichen Systemanforderungen definiert und berücksichtigt zu haben. Die Spezifikation bildet den Abschluss der Anforderungserhebung, der durch den Kontrollpunkt 2 markiert wird (Bild 9).

6.3.1 Requirements elicitation

The starting point for requirements elicitation is the internal or external development order (VDI 2220, VDI 2221). The elicitation, structuring, and analysis of requirements form the basis for the development of mechatronic and cyber-physical systems. Stakeholders represent a group of people or an organization that have justified expectations and demands on the system [4]. Customer requirements are derived from the needs and wishes of the stakeholders and then documented. Based on the customer requirements, conditions, and capabilities that must be fulfilled by a system or subsystem are defined, the so-called “system requirements”, thus enabling development conforms to standards and specifications (see IEEE 610.12.1990). The goal is to have defined and considered all essential system requirements with the finalization of the system architecture (checkpoint 3). The specification forms the conclusion of the requirements elicitation, which is marked by checkpoint 2 (Figure 9).

Kontrollpunkt 2 – Spezifikation

- Sind aus der Hauptmerkmalliste alle relevanten Anforderungen abgeleitet worden? (alle Nebenmerkmale erfasst oder überprüft?)
- Sind die Anforderungen eindeutig formuliert und/oder messbar?
- Sind die Anforderungen vollständig, richtig und widerspruchsfrei?
- Sind die in den Anforderungen geforderten Spezifikationen nachvollziehbar und realistisch?
- Ist die Spezifikation lösungsneutral formuliert?
- Sind die spezifizierten Anforderungen absicherungsfähig und sind die Methoden und Mittel zur Verifikation und Validierung bekannt und verfügbar?
- Wurde zwischen Fest- und Wunschforderungen oder Optimierungszielen unterschieden?
- Ist ein Prozess zur Änderung der Anforderungen vereinbart?

Bild 9. Kontrollpunkt 2 – Spezifikation

Checkpoint 2 – Specification

- Have all relevant requirements been derived from the main-feature list? (all secondary features recorded or checked?)
- Are the requirements clearly formulated and/or measurable?
- Are the requirements complete, correct, and free of contradictions?
- Are the requirement specifications comprehensible and realistic?
- Is the specification formulated in a solution-neutral way?
- Are the specified requirements capable of being assured and are the methods and means for verification and validation known and available?
- Was a distinction made between fixed and desired demands or optimization goals?
- Is a process for changing the requirements agreed upon?

Figure 9. Checkpoint 2 – Specification

Wesentliche Gütekriterien für eine Spezifikation sind Vollständigkeit, Eindeutigkeit, Widerspruchsfreiheit und Richtigkeit [57]. Vollständigkeit wird erreicht, indem sowohl funktionale als auch nicht funktionale Anforderungen, implizit erwartete wie auch explizit geäußerte Anforderungen sowie die entsprechend den Zielmärkten variierenden Anforderungen erfasst werden. Bei offenen Fragen werden Erwartungswerte angenommen sowie ein Verantwortlicher und ein Termin zur Klärung der Annahmen benannt. Diese Trennung in Fakten und Annahmen stellt eine wesentliche Grundlage für das Verfolgen, Ergänzen und Korrigieren der einmal erhobenen initialen Anforderungen im Rahmen des Anforderungsmanagements dar.

Eindeutigkeit wird in erster Linie durch Quantifizierung der Angaben hergestellt. Daneben trägt die Beschreibung der Einbau- und Umgebungsbedingungen zur Eindeutigkeit von Anforderungen bei. Widerspruchsfreiheit wird durch Abgleichen gegensätzlicher Anforderungen untereinander und Festlegung von Kompromissen erreicht. Die Richtigkeit von Anforderungen, z.B. der tatsächlich wirkenden Lastkollektive, kann vor Ort bei Betrieb, Einbau oder Service ermittelt werden, aus Nutzungsdaten von Vorgängerprodukten oder z.B. gezielten Testfeldern. Sollten keine entsprechenden Messungen oder Informationen vorliegen, werden die Werte zumindest mit dem Kunden oder dem Marketing abgestimmt und festgelegt [57].

Um die Vollständigkeit der Anforderungen sicherzustellen, beinhaltet die vorliegende Richtlinie ein zusätzliches Hilfsinstrument: die Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme. Diese wird volumnäßig in Abschnitt 7 dargestellt. Sie soll den Anwender der Richtlinie darin unterstützen, ganzheitliche Spezifikationen mit eindeutigen Anforderungen zu erarbeiten [59]. Die Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme wird von Leitfragen geführt, die als Hilfestellung dienen, weitere Assoziationen der Nebenmerkmale hervorzurufen und somit die Vollständigkeit der Anforderungen sicherzustellen (siehe Anhang).

6.3.2 Systemarchitektur

Ausgehend von der Spezifikation wird bei der Kernaufgabe „Systemarchitektur“ eine interdisziplinäre Gesamtlösungsstruktur des Systems entwickelt. Die Systemarchitektur umfasst die Korrelation zwischen Anforderungen, Funktionen, logischer und physischer Struktur. Diese umfasst in den beteiligten Disziplinen die Baustuktur (Mechanik), Signalflussstrukturen und Schaltpläne (Elektrik/Elektronik) sowie die Strukturierung eines Soft-

Essential quality criteria for a specification are completeness, unambiguity, consistency, and correctness [57]. Completeness is achieved by recording both functional and non-functional requirements, implicitly expected as well as explicitly expressed requirements, and requirements that vary according to the target markets. In the case of open questions, expected values are assumed and a person responsible and a deadline for clarifying the assumptions are named. This separation into facts and assumptions provides an essential basis for following up, supplementing, and correcting the initial requirements once they have been elicited in the context of the requirements management.

Unambiguity is primarily established by quantifying the specifications. In addition, the description of the installation and environmental conditions contributes to the unambiguousness of requirements. Consistency is achieved by comparing conflicting requirements and determining compromises. The correctness of requirements, e.g. the load spectra actually acting, can be determined on site during operation, installation, or service, from usage data of predecessor products or e.g. targeted test fields. If no corresponding measurements or information are available, the values are at least coordinated and determined with the customer or marketing [57].

To ensure the completeness of the requirements, the present standard includes an additional auxiliary tool: the main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems. This is presented in full in Section 7. It is intended to support the users of the standard in developing holistic specifications with clear requirements [59]. The main feature list for mechatronic and cyber-physical systems is accompanied by guiding questions that serve as an aid to elicit further associations of the secondary features and thus ensure the completeness of the requirements (see Annex).

6.3.2 System architecture

Based on the specification, an interdisciplinary overall solution structure of the system is developed in the core task “system architecture”. The system architecture includes the correlation between requirements, functions, logical and physical structure. In the disciplines involved, this includes the building structure (mechanics), signal flow structures and circuit diagrams (electric/electronics) as well as the structuring of a software

wareprogramms in seine Module und Komponenten einschließlich der jeweiligen Schnittstellen (Software). Die Systemarchitektur verkörpert somit Elemente, Beziehungen und notwendige Prinzipien eines Systems [4].

Strukturelle Alternativen werden anhand nachvollziehbarer Kriterien, z.B. der Realisierung von Abhängigkeiten, Funktionsanalysen und der Berücksichtigung von Ausschlusskriterien, verglichen. Diese Bewertung wird idealerweise unter Beteiligung der Nutzer durchgeführt. Die bestmögliche Zuordnung der einzelnen Funktionen zu den beteiligten Disziplinen wird in einem iterativen Verfahren auf der Basis einer Systempartitionierung ermittelt [30]. Die Aufgabe des Systemarchitekten ist die Zerlegung des Systems in implementierbare Einheiten. Ausgehend von den erforderlichen Systemfunktionen und -eigenschaften, wird ein System schrittweise aus Funktions-, Eigenschafts- und Implementierungssicht zerlegt und hinsichtlich funktionaler und räumlicher Integration ausgelegt. Das Ergebnis sind verifizierbare Einheiten, also Systemelemente mit zugeordneten spezifizierten Anforderungen und relevanten Schnittstelleninformationen. Die Anzahl und Gestaltung der Schnittstellen innerhalb einer Architektur und zur Systemgrenze beeinflusst die Einfachheit, Anpassbarkeit und Testbarkeit eines Systems maßgeblich.

Die funktionale Integration von mechanischen, elektrischen/elektronischen und Software-Systemelementen erfolgt durch Verbindung und Zusammenführung der jeweiligen Übertragungseigenschaften über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse. Ein Vorteil der funktionalen Integration liegt darin, dass Subsysteme oder Systemelemente bei geschickter Gestaltung des Gesamtsystems mehrfache Funktionen übernehmen können und damit zur Reduktion der Anzahl von Subsystemen oder Systemelementen führen. Beispielsweise kann beim Elektrofahrzeug der Rückwärtsgang entfallen, da der Elektromotor in beide Richtungen Drehmomente bereitstellen kann. Die Systemelemente können hierbei räumlich getrennt angeordnet sein.

Bei der räumlichen Integration bilden die mechanischen und elektrischen/elektronischen Systemelemente eine bauliche Einheit im Sinne einer gemeinsamen Gestalt. Vorteile sind u.a. ein kleinerer Bauraum, höhere Zuverlässigkeit durch Reduktion der Schnittstellen, schnellere Datenübertragung, höhere Leistung und geringerer Montageaufwand.

In vielen Fällen ist dies jedoch mit zusätzlichem technischen Entwicklungsaufwand verbunden, um beispielsweise elektronische Systemelemente an das Einsatzumfeld mechanischer Systemelemente

into its modules and components including the respective interfaces. The system architecture thus embodies elements, relationships, and necessary principles of a system [4].

Structural alternatives are compared on the basis of comprehensible criteria, e.g. the realisation of dependencies, functional analyses, and the consideration of exclusion criteria. This evaluation is ideally carried out with the participation of the stakeholders. The best possible assignment of the individual functions to the disciplines involved is determined in an iterative process based on system partitioning [30]. The system architect's task is to break down the system into implementable units. Starting from the required system functions and properties, a system is decomposed step by step from a functional, property and implementation point of view and designed with regard to functional and spatial integration. The result is verifiable units, i.e. system elements with associated specified requirements and relevant interface information. The number and design of interfaces within an architecture and to the system boundary significantly influences the simplicity, adaptability, and testability of a system.

The functional integration of mechanical, electrical and software system elements is achieved by connecting and combining the respective transmission properties via material, energy, and information flows. One advantage of functional integration is that subsystems or system elements can take on multiple functions if the overall system is cleverly designed, thus reducing the number of subsystems or system elements. For example, in an electric vehicle, the reverse gear can be omitted because the electric motor can provide torque in both directions. The system elements can be spatially separated.

With spatial integration, the mechanical and electric/electronic system elements form a structural unit in the sense of a common design. Advantages include a smaller installation space, higher reliability due to a reduction of interfaces, faster data transmission, higher performance, and less assembly effort.

In many cases, however, this is associated with additional technical development effort, for example to adapt electronic system elements to the application environment of mechanical system ele-

anzupassen, z.B. Temperaturbeständigkeit oder Schüttel-/Rüttelfestigkeit. Durch die Integration von Mechanik und Elektronik werden etablierte Schnittstellen im System sowie im Entwicklungs- und Produktionsprozess neu definiert. Diese Veränderungen sind nur zu rechtfertigen, wenn daraus gleichermaßen technische und wirtschaftliche Potenziale zu erschließen sind.

Der Kontrollpunkt 3 (Architektur) unterstützt den Anwender bei der Überprüfung seines Entwicklungsstands (Bild 10). Der Anwender wird zudem darauf hingewiesen, dass er sich nun für eine Architekturalternative entscheiden muss, um keine Kapazitäten zu verschwenden.

Auf Basis der Systemarchitektur können die Fachdisziplinen mit der Implementierung der Subsysteme und Systemelemente beginnen. Dabei ist zu beachten, dass eine Vielzahl an Subsystemen und Systemelementen eine intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordern. So kann für ein Subsystem das Durchlaufen eines eigenen V-Modells notwendig sein. Die allokierten Anforderungen an das Subsystem bilden dann den Einstiegspunkt in das untergeordnete V-Modell.

6.3.3 Implementierung der Systemelemente

Bei der Implementierung von Systemelementen werden die spezifizierten Systemelemente ausgelegt, dimensioniert, programmiert und umgesetzt. Mechanische Komponenten werden mithilfe von Computer-Aided Design (CAD), Finite-Elemente-Methoden (FEM) oder weiteren Berechnungen und Simulationen dimensioniert. So werden beispielsweise statische und dynamische Grundgesetze in der Konstruktion angewendet, Spannungen berechnet, Verformungen und Erwärmungen unter Last analysiert und die Lebensdauer von Bauteilen berechnet.

Es folgt eine Detaillierung der Bauteile bis hin zur Bestimmung der für die Funktionserfüllung erforderlichen Toleranzen und Passungen sowie aller Fertigungsvorschriften. Zu den mechanischen Komponenten gehören neben denen zur Übertragung von Kräften und Momenten auch Gehäuse, Deckel und Flansche von Steuergeräten.

Für elektrische und elektronische Komponenten werden z.B. zugehörige Leiterplatten (Printed Circuit Board, PCB) entworfen und die elektronischen Komponenten ausgewählt, anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASICs) spezifiziert oder rekonfigurierbare Schaltungen (Field Programmable Gate Arrays, FPGAs) als vorgefertigte Komponenten ausgewählt. Das klassische PCB ist eine gedruckte Schaltung und dient der mechanischen Befestigung und elektrischen Verbindung der Komponenten. Zur Entwurfsautomatisierung wer-

ments, e.g. temperature resistance or shaking/vibration resistance. The integration of mechanics and electronics redefines established interfaces in the system as well as in the development and production process. These changes can only be justified if technical and economic potential can be tapped in equal measure.

Checkpoint 3 (architecture) supports the users in checking their development status (Figure 10). The users are also informed that they must now decide on an architecture alternative in order not to waste capacity.

Based on the system architecture, the disciplines can start implementing the subsystems and system elements. It should be noted that a large number of subsystems and system elements require intensive interdisciplinary cooperation. For example, it may be necessary to run through a separate V-model for a subsystem. The allocated requirements for the subsystem then form the entry point into the subordinate V-model.

6.3.3 Implementation of the system elements

During the implementation of system elements, the specified system elements are designed, dimensioned, programmed, and implemented. Mechanical components are dimensioned with the help of computer-aided design (CAD), finite element method (FEM), or further calculations and simulations. For example, static and dynamic basic laws are applied in the design, stresses are calculated, deformations and heating under load are analysed, and the service life of components is obtained.

This is followed by a detailing of the components up to the determination of the tolerances and fits required for functional fulfilment, as well as all manufacturing specifications. In addition to those for the transmission of forces and moments, the mechanical components also include housings, covers, and flanges of control units.

For electrical and electronic components, for example, associated printed circuit boards (PCB) are designed and the electronic components are selected, application-specific integrated circuits (ASICs) are specified or reconfigurable circuits (field programmable gate arrays, FPGAs) are selected as prefabricated components. The classic PCB is a printed circuit and is used for mechanical mounting and electrical connection of the components. Electronic design automation (EDA) or electronic CAD (ECAD) as well as simulations of electronics and

den Electronic Design Automation (EDA) oder Electronic CAD (ECAD) sowie Simulationen der Elektronik und des Elektromagnetismus (FEM, FDTD, FIT) eingesetzt.

Neben dem Entwurf von elektrischen Schaltungen werden Sensoren und elektromechanische Aktoren, z.B. Elektromotoren und Tauchspulen, entwickelt oder ausgewählt und die elektrische Infrastruktur entworfen. Hierbei kommt Simulations- und Konstruktionssoftware, wie CAD und FEM-Applikationen, zum Einsatz.

Bei den Softwareelementen umfasst die Implementierung die Umsetzung eines Algorithmus oder Softwaredesigns in ein Computerprogramm mithilfe von IDEs oder CASE Tools. Basierend auf der Softwarearchitektur werden die Funktionen mithilfe von Algorithmen implementiert und der zugehörige Code programmiert. Datenbankmodelle werden implementiert, indem die Modellierung in konkrete Schemata umgesetzt wird.

electromagnetism (FEM, FDTD, FIT) are used for design automation.

In addition to designing electrical circuits, sensors and electromechanical actuators, e.g. electric motors and plunger coils, are developed or selected and the electrical infrastructure is designed. Simulation and design software, such as CAD and FEM applications, are used here.

For software elements, implementation involves the conversion of an algorithm or software design into a computer program using IDEs or CASE tools. Based on the software architecture, functions are implemented using algorithms and the associated code is programmed. Database models are implemented by converting the modelling into concrete schemas.

Kontrollpunkt 3 – Architektur

- Sind alle relevanten (Sub-)Systeme und Elemente vollständig spezifiziert?
- Sind die relevanten lokalen Schnittstellen spezifiziert und Übergabeinformationen beschrieben?
- Sind relevante Schnittstellen zur globalen Vernetzung des Systems (mit dem Internet der Dinge und Dienste) bekannt und beschrieben?
- Sind alternative logische und physische Strukturen analysiert und bewertet worden?
- Sind die Bewertungs- und Gewichtungsfaktoren für die Auswahl der Systemarchitekturalternativen vom Kunden bestätigt? Wurde die bestgeeignete Systemarchitekturalternative ausgewählt?
- Sind die Anforderungen in der Funktionsstruktur repräsentiert?
- Wurden bestehende Elemente (durch geringe Anpassung) wiederverwendet?
- Ist die Planung der Eigenschaftsabsicherung abgeschlossen?
- Gibt es Abweichungen von der Spezifikation und wurden erforderliche Änderungen kommuniziert?

Bild 10. Kontrollpunkt 3 – Architektur

Checkpoint 3 – Architecture

- Are all relevant (sub)systems and elements fully specified?
- Are the relevant local interfaces specified and transfer information described?
- Are relevant interfaces for global networking of the system (with the Internet of Things and Services) known and described?
- Have alternative logical and physical structures been analysed and evaluated?
- Are the evaluation and weighting factors for the selection of the system architecture alternatives confirmed by the client? Has the most appropriate system architecture alternative been selected?
- Are the requirements represented in the functional structure?
- Were existing elements reused (through minor adaptation)?
- Has the planning of the property protection been completed?
- Are there any deviations from the specification and have any necessary changes been communicated?

Figure 10. Checkpoint 3 – Architecture

Darüber hinaus wird die Benutzer- oder System-schnittstelle entworfen. Bei der Implementierung werden die jeweiligen mechanischen, elektronischen und Softwareschnittstellen berücksichtigt. Bei Änderungsbedarf wird interdisziplinär eine integrierte ganzheitliche Lösung erarbeitet. Gleichzeitig dient dieser Abschnitt der Lösung von Problemen, die bei der Systemintegration (Abschnitt 6.2.4) aufgetreten sind.

Mithilfe von Kontrollpunkt 4 (Implementierung) wird überprüft, ob die Implementierung der Systemelemente abgeschlossen ist und alle relevanten Aspekte berücksichtigt worden sind (Bild 11). Die Realisierung von CPS grenzt sich dabei durch erhöhte Aufwände und Koordinationsbedarfe in der Informationstechnologie von klassischen mechatronischen Systemen ab. An Relevanz gewinnen beispielsweise Aspekte wie die Sicherheit von IT-Systemen gegenüber Angriffen (Cyber Security) oder die Standardisierung von Austauschprotokollen.

6.3.4 Systemintegration und Verifikation

Im Zuge der Systemintegration werden die implementierten Systemelemente schrittweise zu Subsystemen der nächsthöheren Systemebene und letztlich zum Gesamtsystem zusammengeführt. Dabei wird das Ziel verfolgt, dass das integrierte Gesamtsystem die zuvor spezifizierten Anforderungen erfüllt. Daher erfolgt die Systemintegration in engem Wechselspiel mit der Verifikation.

Gleichzeitig erfolgt die Systemintegration in enger Verzahnung mit der Implementierung, sodass auftretende Probleme sofort gelöst werden. Das Zusammenspiel der Systemelemente und Subsysteme wird mittels Systemmodellen und durch virtuelle Inbetriebnahme umfassend untersucht. Die Integrations- und Verifikationsstrategie muss im Vorfeld mit allen relevanten Stakeholdern abgestimmt werden.

Eigenschaftsprognose und -absicherung erfolgen parallel zu den Kernaufgaben der Entwicklung. Die zu erwartenden Systemeigenschaften werden frühzeitig auf der Basis von Modellen prognostiziert. Die parallele Eigenschaftsabsicherung dient der kontinuierlichen Überprüfung der angestrebten Lösung anhand von Untersuchungen mit virtuellen Prototypen (Computersimulation, Software-in-the-Loop (SiL)), physischen Prototypen (Hardware-Experimente) oder deren Kombination (z.B. Hardware-in-the-Loop (HiL)).

Der Fortschritt wird dabei gegen die geforderten Systemeigenschaften in einer virtuellen und/oder physischen Umgebung überprüft. Die Eigenschaftsabsicherung umfasst die Verifikation und Validierung.

In addition, the user or system interface is designed. During implementation, the respective mechanical, electronic and software interfaces are taken into account. If changes are required, an integrated holistic solution is developed in an interdisciplinary manner. At the same time, this section serves to solve problems encountered during system integration (Section 6.2.4).

Checkpoint 4 (implementation) is used to check whether the implementation of the system elements has been completed and all relevant aspects have been taken into account (Figure 11). The realisation of CPS is distinguished from classic mechatronic systems by increased efforts and coordination requirements in information technology. Aspects such as the security of IT systems against attacks (cyber security) or the standardization of exchange protocols are becoming more relevant.

6.3.4 System integration and verification

In the course of system integration, the implemented system elements are gradually combined into sub-systems of the next higher system level and finally into the overall system. The aim is to ensure that the integrated overall system fulfills the previously specified requirements. System integration therefore takes place in close interaction with verification.

At the same time, system integration is closely interlinked with implementation so that any problems that arise are solved immediately. The interaction of the system elements and subsystems is comprehensively investigated by means of system models and through virtual commissioning. The integration and verification strategy must be coordinated in advance with all relevant stakeholders.

Property prediction and assurance take place in parallel with the core development tasks. The expected system properties are predicted at an early stage on the basis of models. Parallel property assurance serves to continuously check the targeted solution by means of investigations with virtual prototypes (computer simulation, software-in-the-loop (SiL)), physical prototypes (hardware experiments) or their combination (e.g. hardware-in-the-loop (HiL)).

Progress is thereby checked against the required system properties in a virtual and/or physical environment. Property assurance includes verification and validation.

Kontrollpunkt 4 – Implementierung

- Wurden projektspezifische Vorgaben zu Umsetzungs-/Fertigungsverfahren beachtet?
- Wurde eine einheitliche Beschreibungssprache zur Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den Systemen/Subsystemen/Systemelementen verwendet?
- Wurden Gesetze und Standards (Normen, Richtlinien etc.) für die Implementierung berücksichtigt?
- Wurden vorhandene Maschinen und Anlagen berücksichtigt?
- Wurden bestehende Module (durch geringe Anpassung) wiederverwendet?
- Sind alle Systemelemente modelliert?
- Sind die vorgesehenen Zulieferteile verfügbar?
- Gibt es Abweichungen von der Spezifikation und wurden erforderliche Änderungen kommuniziert?

Bild 11. Kontrollpunkt 4 – Implementierung

Checkpoint 4 – Implementation

- Were project-specific specifications on implementation/production procedures observed?
- Was a uniform description language used to represent the dependencies between the systems/subsystems/system elements?
- Were laws and standards (norms, directives, etc.) taken into account for the implementation?
- Have existing machines and equipment been taken into account?
- Were existing modules reused (through minor adaptation)?
- Are all system elements modelled?
- Are the intended supplier parts available?
- Are there any deviations from the specification and have any necessary changes been communicated?

Figure 11. Checkpoint 4 – Implementation

Verifikation ist die Bestätigung durch den objektiven Nachweis, dass eine spezifizierte Anforderung erfüllt ist [11; 57]. Sie beantwortet die Frage: „Wurde das System korrekt entwickelt?“ Die Anforderungen werden auf der gleichen Systemebene verifiziert, auf der sie spezifiziert wurden. Jede Anforderung muss durch eine geeignete Maßnahme verifiziert werden, z.B. durch Analyse, Inspektion, Demonstration oder Test. Eine Verifikationsmaßnahme kann mehrere Anforderungen nachweisen. Sie sollte so früh wie möglich, also auf einer möglichst niedrigen Systemhierarchieebene, durchgeführt werden. Hierauf ist bereits in der Planung der Eigenschaftsabsicherung Rücksicht zu nehmen.

Aufgrund der engen Verflechtung von Systemintegration und Verifikation muss im Voraus geplant werden, in welchen Phasen das System integriert wird und für welche erforderlichen Bereiche mit welcher Methode, wann und auf welcher Systemebene die Umsetzung nachgewiesen werden soll. Grundsätzlich werden die folgenden Methoden zur Verifikation unterschieden:

- theoretische Analyse: Berechnung, Modellierung und Simulation
- Inspektion: für leicht sichtbare, messbare und erkennbare Eigenschaften

Verification is the confirmation by objective evidence that a specified requirement has been met [11; 57]. It answers the question: “Has the system been developed correctly?” Requirements are verified at the same system level at which they were specified. Each requirement shall be verified by an appropriate measure, e.g. analysis, inspection, demonstration, or test. One verification measure can prove several requirements. It should be carried out as early as possible, i.e. at the lowest possible system hierarchy level. Consideration should be given to this already in the planning of the property assurance.

Due to the close interdependency of system integration and verification, it must be planned in advance in which phases the system is to be integrated and for which required areas, with which method, when and at which system level the implementation is to be verified. Basically, the following methods for verification are distinguished:

- theoretical analysis: calculation, modelling, and simulation
- inspection: for easily visible, measurable, and recognizable properties

- Demonstration: qualitativer Nachweis der Funktionalität, in der Regel mit minimaler Instrumentierung
- Test: quantitativer Nachweis, in der Regel in einer definierten Testumgebung

Die Integration in die nächsthöhere Systemebene darf erst nach Abschluss der Verifikation der Ausgangsebene beginnen. Im Kontrollpunkt 5 (Integration, Bild 12) wird die technische Realisierung des Systems beurteilt.

6.3.5 Validierung und Übergabe

Im Rahmen der Validierung wird nicht die Einhaltung einer Spezifikation, sondern die Umsetzung der Bedürfnisse und Anforderungen der Stakeholder überprüft.

Die Validierung beweist, dass das Arbeitsergebnis vom Anwender für die spezifizierte Anwendung genutzt werden kann [52]. Die Kontrollfragen lauten: „Wurde das richtige System gebaut? Ist der Kunde zufrieden? Waren die Anforderungen richtig? Repräsentieren sie die Bedürfnisse der Beteiligten?“ Die Validierung des Systems erfolgt mit dem Kunden oder zwischen Anforderungsgeber und -empfänger. Die Validierung des Systems erfolgt gegenüber den übergeordneten Anforderungen (nächsthöhere Systemebene) und dient als Nachweis für die Erfüllung des Kundenwerts und der Bedürfnisse der Stakeholder der zugehörigen Systemebene. Alle notwendigen Modelle und Dokumente für die nachfolgenden Phasen des Produktlebenszyklus werden mithilfe des Produktlebenszyklus-Managements (PLM) entlang des Produktentwicklungsprozesses gespeichert und strukturiert. Daraus wird die endgültige Produktdokumentation aufgebaut und vervollständigt.

Als Abschluss des logischen Durchlaufs durch das V-Modell wird das System, sei es ein vollständiges physisches System, ein Prototyp oder ein Simulationsmodell, an eine andere Einheit oder einen Stakeholder übergeben. Dies kann eine Übergabe an den Kunden sein, aber auch an andere Abteilungen oder nachfolgende Projektphasen zur iterativen Entwicklung.

Im letzten Kontrollpunkt des V-Modells wird sichergestellt, dass die Eigenschaftsabsicherung des Gesamtsystems erfolgreich und vollständig dokumentiert wurde (Kontrollpunkt 6, Bild 13). Die Entwicklerin/der Entwickler überprüft, ob ein verifiziertes und validiertes Gesamtsystem vorliegt, das die Bedürfnisse aller Stakeholder berücksichtigt. Durch die Bereitstellung aller benötigten Dokumente und das Erstellen eines Übergabeprotokolls wird eine fehlerfreie Übergabe gewährleistet.

- demonstration: qualitative proof of functionality, usually with minimal instrumentation
- test: quantitative detection, usually in a defined test environment

Integration into the next higher system level may only begin after the verification of the initial level has been completed. In checkpoint 5 (integration, Figure 12), the technical realisation of the system is assessed.

6.3.5 Validation and transition

Validation does not check compliance with a specification, but rather the implementation of the needs and requirements of the stakeholders.

Validation proves that the work product can be used by the user for the specified application [52]. The control questions are: “Was the right system built? Is the customer satisfied? Were the requirements correct? Do they represent the needs of the stakeholders?” Validation of the system is done with the customer or between the requirements giver and receiver. Validation of the system is against the higher-level requirements (next higher system level) and serves as evidence that the customer value and the needs of the stakeholders of the associated system level have been met. All necessary models and documents for the subsequent phases of the product life cycle are stored and structured along the product development process with the help of product life-cycle management (PLM). From this, the final product documentation is built and completed.

As a completion of the logical flow through the V-model, the system, be it a complete physical system, a prototype, or a simulation model, is handed over to another entity or stakeholder. This can be a transition to the customer, but also to other departments or subsequent project phases for iterative development.

The last checkpoint of the V-model ensures that the property assurance of the overall system has been successfully and completely documented (checkpoint 6, Figure 13). The developer checks whether there is a verified and validated overall system that takes into account the needs of all stakeholders. An error-free transition is ensured by providing all required documents and creating a transition protocol.

Kontrollpunkt 5 – Integration

- Sind die Schnittstellen technisch umgesetzt? (Bus, Nachrichtenformat, mechanische Passung etc.)
- Sind die „Prüf-/Messmethoden“ und Rahmenbedingungen bekannt und umsetzbar?
- Liegen ausreichende Integrationsanweisungen (Reihenfolge etc.) vor? (Element – Subsystem – Gesamtsystem)
- Wurden vorgegebene Toleranzen, Testsequenzen und Standards eingehalten? (CE, ISO etc.)
- Gibt es Abweichungen von der Spezifikation und wurden erforderliche Änderungen kommuniziert?
- Sind Fehlermöglichkeiten identifiziert und sind deren Auswirkungen bekannt?
- Wurde konsequent auf allen Systemhierarchieebenen getestet?
- Wurden Aspekte des präventiven Qualitätsmanagements bei der Eigenschaftsabsicherung berücksichtigt? (z.B. FMEA)
- Entspricht das Produkt den aktuellen gesetzlichen Anforderungen?

Bild 12. Kontrollpunkt 5 – Integration

Checkpoint 5 – Integration

- Are the interfaces technically implemented? (bus, message format, mechanical fit, etc.)
- Are the “test/measurement methods” and framework conditions known and feasible?
- Are there sufficient integration instructions (sequence, etc.)? (element – subsystem – overall system)
- Were specified tolerances, test sequences, and standards adhered to? (CE, ISO, etc.)
- Are there any deviations from the specification and have any necessary changes been communicated?
- Are failure modes identified and are their effects known?
- Has testing been done consistently at all system hierarchy levels?
- Were aspects of preventive quality management taken into account in the safeguarding of properties? (e.g. FMEA)
- Does the product comply with the current legal requirements?

Figure 12. Checkpoint 5 – Integration

Kontrollpunkt 6 – Übergabe

- War die Prüfung der Eigenschaftsabsicherung erfolgreich?
- Ist das Produkt vollständig übergeben und gegebenenfalls in Betrieb genommen?
- Ist ein rechtsverbindliches Übergabeprotokoll erstellt und bestätigt?
- Sind die vorgesehenen Produktschulungen durchgeführt?
- Sind Regelungen zur Wartung und Entsorgung des Produkts vereinbart?
- Sind alle relevanten Produktdokumente (Montage-, Betriebs-, Prüf-, Transportvorschriften; Testergebnisse; Bedienungsanleitungen etc.) erstellt und übergeben?

Bild 13. Kontrollpunkt 6 – Übergabe

Checkpoint 6 – Transition

- Was the test of the property assurance successful?
- Is the product completely transitions and, if applicable, put into operation?
- Has a legally binding transition protocol been drawn up and confirmed?
- Have the planned product trainings been carried out?
- Are arrangements agreed for the maintenance and disposal of the product?
- Have all relevant product documents (assembly, operating, testing, transport regulations; test results; operating instructions, etc.) been prepared and handed over?

Figure 13. Checkpoint 6 – Transition

6.4 Aufgaben im inneren und äußeren Strang

Der innere und der äußere Strang stellen relevante übergreifende Aufgaben der Entwicklung mechatronischer und cyber-physicaler Systeme dar, die parallel zu den Kernaufgaben erfolgen: Anforderungsentwicklung (Abschnitt 6.3.1), Modellbildung und Analyse (Abschnitt 6.3.2).

6.4 Tasks in the inner and outer strand

The inner and outer strands represent relevant overarching tasks in the development of mechatronic and cyber-physical systems, which take place in parallel to the core tasks: requirements engineering (Section 6.3.1), modelling and analysis (Section 6.3.2).

6.4.1 Anforderungsentwicklung

Nach erfolgter Anforderungserhebung (Abschnitt 6.2.1) können sich die Systemanforderungen im weiteren Verlauf der Systementwicklung durch Erkenntnisgewinn, Rückkopplungen und Iterationen aus nachgelagerten Bereichen oder durch die Aktualisierung von Kundenwünschen oder Marktanforderungen ändern. Aus diesem Grund ist ein paralleles Anforderungsmanagement erforderlich. Das Anforderungsmanagement dient dazu, Anforderungsänderungen während des gesamten Entwicklungsprojekts zu analysieren, zu strukturieren, zuzuordnen und zu integrieren. Zusammen mit der Anforderungserhebung bildet das Anforderungsmanagement den inneren Strang des V-Modells: die Anforderungsentwicklung.

Der Umgang mit Anforderungen wird dabei von diversen Werkzeugen, Datenbanken und Methoden unterstützt [60]. Das Anforderungsmanagement ist sowohl für die oberen Systemebenen des Gesamtsystems relevant als auch für das Design und die Ausarbeitung von Systemelementen in oder zwischen den Disziplinen. Diese unterschiedlichen Systemebenen beeinflussen sich gegenseitig, sodass Änderungen von Anforderungen aus einer Disziplin jederzeit für das Gesamtprojekt berücksichtigt werden müssen. Solche Anforderungsänderungen sind auch bei der Entwicklung von Produktvarianten oder neuen Produktgenerationen die Grundlage für notwendige Anpassungen des Systems.

6.4.2 Modellierung und Analyse

Für eine effiziente IKT-gestützte Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme ist eine digitale Darstellung des Systems erforderlich. Moderne Produktentwicklungsmethoden werden konsequent durch die Modellierung und Analyse unterstützt. Ein Modell stellt eine digitale Repräsentation des Systems dar, in der die Funktionen vereinfacht dargestellt werden. Modelle werden für Gesamtsysteme, Subsysteme und Systemelemente erstellt und unterscheiden sich in der betrachteten Problemstellung und im Detaillierungsgrad. Wie im V-Modell grafisch dargestellt, wirkt sich die Modellierung und Analyse auch auf die einzelnen Disziplinen aus, die eine große Vielfalt an eigenen Modellierungsansätzen besitzen.

Ziel der Modellierung sind mathematische und deskriptive Ersatzmodelle des Systems, der Subsysteme oder Systemelemente, die die Struktur und das Verhalten mit ausreichender Genauigkeit beschreiben.

Mit dem Fortschritt der Entwicklung erhöhen sich die Anforderungen an die Modellgenauigkeit und Detailtiefe. Alle Änderungen am System sollten

6.4.1 Requirements engineering

After requirements elicitation (Section 6.2.1), the system requirements may change in the further course of system development due to knowledge gain, feedback, and iterations from downstream areas or due to the updating of customer wishes or market requirements. For this reason, parallel requirements management is necessary. Requirements management serves to analyse, structure, assign, and integrate changes in requirements throughout the development project. Together with requirements elicitation, requirements management forms the inner strand of the V-model: requirements engineering.

The handling of requirements is supported by various tools, databases, and methods [60]. Requirements management is relevant both for the upper system levels of the overall system and for the design and elaboration of system elements in or between the disciplines. These different system levels influence each other, so that changes to requirements from one discipline must be taken into account at all times for the overall project. Such changes in requirements are also the basis for necessary adjustments to the system when developing product variants or new product generations.

6.4.2 Modelling and analysis

For efficient ICT-supported development of mechatronic and cyber-physical systems, a digital representation of the system is required. Modern product development methods are consistently supported by modelling and analysis. A model is a digital representation of the system in which the functions are shown in a simplified way. Models are created for overall systems, subsystems, and system elements and differ in the problem considered and the level of detail. As shown graphically in the V-model, modelling and analysis also affect the individual disciplines, which have a great variety of their own modelling approaches.

The aim of modelling is to produce mathematical and descriptive surrogate models of the system, subsystems, or system elements that describe the structure and behaviour with sufficient accuracy.

As development progresses, the requirements for model accuracy and detail increase. All changes to the system should also be reflected in the digital

auch im digitalen Abbild Berücksichtigung finden. Dies ist insbesondere eine Voraussetzung für den digitalen Zwilling [5; 61].

Ausgehend von der Systemarchitektur wird ein physisches Modell in eine abstrakte, systemunabhängige Darstellung überführt. Hierfür gibt es im Wesentlichen zwei Wege:

a) theoretische Modellbildung:

Die Systemgleichungen werden durch Anwenden der physikalischen Grundgesetze abgeleitet, wobei die quantitativen Informationen aus der Geometrie des betreffenden Gebildes, aus Stoffkonstanten und aus empirischen Zusammenhängen gewonnen werden (Whitebox-Modelle).

b) experimentelle Modellbildung:

Aus Messungen an dem zu beschreibenden System wird rückwärts auf die Systemstruktur (-gleichungen) geschlossen (Blackbox-Modelle).

Auch die Kombination beider Wege ist gebräuchlich (Greybox-Modelle), um z.B. das Verhalten des zunächst theoretisch aufgestellten Modells mit Messungen am realen System zu vergleichen oder um noch unbekannte Parameter durch Abgleich mit dem realen System zu bestimmen.

Der Hauptvorteil modellbasierter Ansätze liegt in der Prognose von Systemeigenschaften und Systemverhalten. Beginnend mit der Anforderungs-erhebung und -analyse werden computergestützte Modelle genutzt, um beispielsweise Anforderungszusammenhänge oder Stakeholdereinflüsse abzubilden. Anschließend werden Modelle in der Entwicklung erstellt, die die Systemarchitektur festlegen. Beispiele hierzu sind Funktionsstrukturen oder Morphologien. Im V-Modell wird illustriert, dass die Modellierung und Analyse sowohl innerhalb einzelner Disziplinen als auch disziplinübergreifend erfolgen kann.

Im Kontext der modellbasierten Entwicklung und des Model-Based Systems Engineerings (MBSE) sind die Modelle der Disziplinen mit den Modellen auf Systemebene verknüpft, wodurch ein konsistenter, redundanzfreier Informationsaustausch ermöglicht wird. Im MBSE wird z.B. die Modellierungssprache SysML genutzt und durch Modellierungsmethoden und Werkzeuge unterstützt [62]. Die Anwendung von MBSE dient der Umstellung vom dokumentenzentrierten zum modellbasierten Entwickeln [60]. Im übergeordneten Modell wird die Spezifikation eines Produkts erfasst, analysiert und verwaltet. Die Informationen werden disziplinübergreifend bereitgestellt, wodurch die Kommunikation der an der Systementwicklung beteiligten Instanzen verbessert und ein Bewusstsein und Verständnis für die Systemkomplexität geschaffen

image. This is especially a prerequisite for the digital twin [5; 61].

Starting from the system architecture, a physical model is transformed into an abstract, system-independent representation. There are essentially two ways to do this:

a) theoretical modelling:

The system equations are derived by applying the basic laws of physics, whereby the quantitative information is obtained from the geometry of the entity in question, from material constants and from empirical relationships (white-box model).

b) experimental modelling:

The system structure (equations) is inferred backwards from measurements on the system to be described (black-box model).

The combination of both methods is also common (grey-box models), e.g. in order to compare the behaviour of the initially theoretical model with measurements on the real system or to determine as yet unknown parameters by comparison with the real system.

The main advantage of model-based approaches lies in the prediction of system properties and system behaviour. Starting with requirements elicitation and analysis, computer-aided models are used, for example, to map requirements interrelationships or stakeholder influences. Subsequently, models are created in development that define the system architecture. Examples of this are functional structures or morphologies. The V-model illustrates that modelling and analysis can take place within individual disciplines as well as across disciplines.

In the context of model-based development and model-based systems engineering (MBSE), the models of the disciplines are linked to the models at the system level, enabling a consistent, redundancy-free exchange of information. In MBSE, for example, the modelling language SysML is used and supported by modelling methods and tools [62]. The application of MBSE serves to change from document-based to model-based development [60]. In the higher-level model, the specification of a product is captured, analysed, and managed. The information is provided across disciplines, improving communication among the entities involved in system development and creating awareness and understanding of system complexity. Appropriate information is provided for different relevant people (groups), e.g. customer, program manager, sys-

werden. Für verschiedene relevante Personen(gruppen), z.B. Kunde, Programmmanager, Systemingenieure, Hardware- und Software-Entwickler, Tester und spezielle Ingenieursdisziplinen, werden passende Informationen bereitgestellt. Der Bezug auf ein durchgängiges Modell ermöglicht zusätzlich eine Bewertung des Systems in Bezug auf Konsistenz, Korrektheit und Vollständigkeit [4].

Bei der Wahl von MBSE-Werkzeugen wird zwischen „föderiertem“ und „integriertem“ MBSE unterschieden. Im föderierten MBSE werden mehrere unterschiedliche und für die jeweilige Modellierung optimierte Werkzeuge verwendet, was meist zu einer erhöhten Schnittstellenkomplexität führt. Zur Vermeidung dieser Schnittstellenproblematik wird beim integrierten MBSE die Werkzeugumgebung eines Systemanbieters verwendet, auch wenn dadurch Einschränkungen bei der Erstellung des Anforderungs- und Systemmodells sowie bei der Systemsimulation entstehen [63].

Die Bildung der Modelle erfordert auch eine aktive Analyse und Synthese [64]. Eine Modellanalyse ist notwendig, da Modelle nur ein Abbild der Realität darstellen und auf Eingangsdaten beruhen. Dies betrifft die Simulationsauswertung und Interpretation von Systemelementen, Subsystemen und dem Gesamtsystem.

Mittels Autorenwerkzeugen und Produktlebenszyklus-Management-(PLM)-Systemen werden Produktmodelle und -daten entlang der Systementwicklung erstellt, gespeichert und organisiert. Daraus wird die abschließende Produktdokumentation aufgebaut und vervollständigt. Gleichzeitig dient das Produktmodell mit allen Teilmodellen als Voraussetzung für einen digitalen Zwilling [61].

6.5 Verschachtelung des V-Modells zur Ableitung einer zeitlichen Abfolge

Die sachlogische Anordnung der Entwicklungsaufgaben impliziert, entgegen häufiger Missverständnisse, kein sequenzielles Vorgehen in der Entwicklung. Iterationen sind in der Lösungserstellung gewünscht und erhöhen durch Exploration, Konvergenz, Verfeinerung, Nachbesserung, Verhandlung und Repetition die Qualität der Lösung (VDI 2221 aufbauend auf [65]).

So werden mehrere V-Modelle sukzessive verknüpft, um den Reifegrad des zu entwickelnden Systems zu erhöhen (Bild 14). Die Reife des Systems kann beispielsweise anhand von Funktionsmuster (A-Muster), Grundsatzmuster (B-Muster), seriennahem Muster (C-Muster) und Baumuster (D-Muster) beschrieben werden [19]. Muster sind virtuelle oder reale Implementierungen. Das Anforderungsmanagement ist dabei durchlaufend.

tem engineers, hardware and software developers, testers, and specific engineering disciplines. The reference to a continuous model additionally enables an evaluation of the system in terms of consistency, correctness, and completeness [4].

When choosing MBSE tools, a distinction is made between “federated” and “integrated” MBSE. In federated MBSE, several different tools optimized for the respective modelling are used, which usually leads to increased interface complexity. To avoid these interface problems, the tool environment of a system provider is used in integrated MBSE, even if this results in restrictions in the creation of the requirements and system model and in system simulation [63].

The formation of the models also requires active analysis and synthesis [64]. Model analysis is necessary because models are only a representation of reality and are based on input data. This concerns the simulation evaluation and interpretation of system elements, subsystems, and the overall system.

Using authoring tools and product life-cycle management (PLM) systems, product models and data are created, stored, and organized along the system development process. From this, the final product documentation is built up and completed. At the same time, the product model with all submodels serves as a prerequisite for a digital twin [61].

6.5 Nesting of the V-model to derive a temporal sequence

Contrary to frequent misunderstandings, the inherent factual logical connection of development tasks does not imply a sequential procedure in development. Iterations are desired in solution development and increase the quality of the solution through exploration, convergence, refinement, rework, negotiation, and repetition (VDI 2221 building on [65]).

In this way, several V-models are successively linked to increase the maturity of the system to be developed (Figure 14). The maturity of the system can be described, for example, using functional specimen (A specimen), basic specimen (B specimen), near-serial specimen (C specimen) and pilot-run specimen (D specimen) [19]. Specimens are virtual or real implementations. The requirements management is continuous.

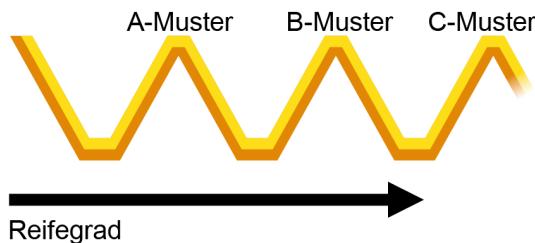


Bild 14. Reifegrade im V-Modell

Für die Entwicklung der Subsysteme und Systemelemente auf niedriger Systemebene wird jeweils erneut das V-Modell angewendet oder eine Entwicklungsmethodik wie die VDI 2221 gewählt (Bild 15). Ausgangspunkt bilden die allokierten und für das jeweilige zu entwickelnde System selektierten Anforderungen. Ergebnis ist jeweils ein integriertes System, das sukzessive im übergeordneten System integriert werden kann.



Bild 15. Entwicklung von Systemelementen

Verifikation und Validierung sind mithilfe virtueller, hybrider und physischer Tests möglich. Im rechten Schenkel erfolgt die Integration des Produkts im jeweils angestrebten oder erforderlichen Reifegrad. Eine Besonderheit stellt der vorzeitige, virtuelle Test von Teilespekten des Systems auf der Grundlage von Systemmodellen ohne disziplinspezifische Detaillierung von Subsystemen und Systemelementen dar (Bild 16).

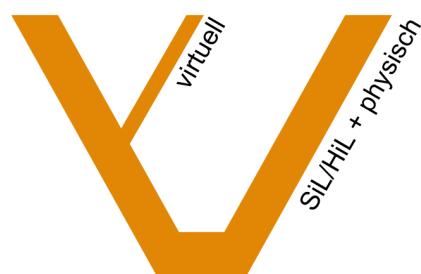


Bild 16. Vorzeitige Verästelung

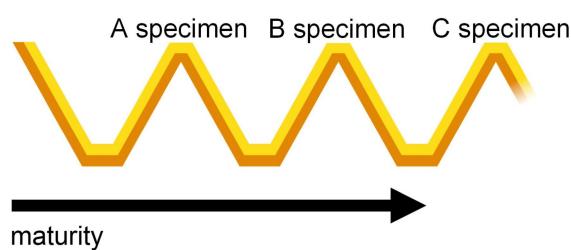


Figure 14: Maturity levels in the V-model

For the development of the subsystems and system elements at low system level, the V-model is applied again or a development methodology such as VDI 2221 is chosen (Figure 15). The starting point is the allocated requirements selected for the respective system to be developed. The result in each case is an integrated system that can be successively embedded into the higher-level system.

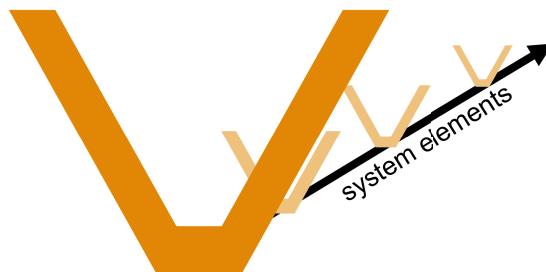


Figure 15. Development of system elements

Verification and validation are possible with the help of virtual, physical, and hybrid tests. In the right-hand thigh, the integration of the product takes place at the respective targeted or required maturity level. A special feature is the early virtual test of partial aspects of the system on the basis of system models without discipline-specific detailing of sub-systems and system elements (Figure 16).



Figure 16. Premature branching

7 Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme

Die Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme dient als Werkzeug, um Anforderungen zu erheben, und ist als Checkliste anzuwenden. Sie soll den Anwender der Richtlinie

7 Main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems

The main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems serves as a tool to elicit requirements and is to be used as a checklist. It is intended to support the user of the standard in developing a

darin unterstützen, eine vollständige, eindeutige, richtige und widerspruchsfreie Spezifikation zu erarbeiten [57]. Weitere Methoden zur Identifikation relevanter Anforderungen werden in [11] beschrieben. Die Idee einer Hauptmerkmalliste zur Unterstützung der Anforderungserhebung wurde bereits im Jahr 1977 von *Pahl/Beitz* geprägt [66]. Die Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme orientiert sich an der Version nach *Pahl/Beitz* aus dem Jahr 2013 [67] und erweitert sie um die für mechatronische und cyber-physische Systeme relevanten und validierten Hauptmerkmale [10]. Diese Erweiterung umfasst auch Merkmale in Bezug auf das Internet der Dinge und Dienste sowie selbstlernende Systeme. Analog zur Ursprungsquelle erhebt die Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll dem Anwender Denkanstöße für weitere Anforderungen geben, um so die Spezifikation zu vervollständigen.

Diese Richtlinie enthält zwei Arbeitsblätter: die in Tabelle 1 dargestellte Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme sowie eine Hilfestellung zum Ausfüllen dieser Liste (siehe Tabelle A1 im Anhang). Die Hauptmerkmale in Tabelle 1 dienen der strukturierten Erfassung aller Anforderungen. Die im Anhang aufgeführten Leitfragen dienen der Unterstützung der Interpretation. Anhand dieser Leitfragen werden beispielhafte Assoziationen geweckt und Unklarheiten in der Interpretation der Haupt- und Nebenmerkmale beseitigt. Diese Hilfestellung unterstützt dabei, die Anforderungen an mechatronische und cyber-physische Systeme vollständig, eindeutig, richtig und widerspruchsfrei zu erheben.

complete, unambiguous, correct, and consistent specification [57]. Further methods for identifying relevant requirements are described in [11]. The idea of a main-feature list to support requirements elicitation was coined by *Pahl/Beitz* in 1977 [66]. The main feature list for mechatronic and cyber-physical systems is based on the version according to *Pahl/Beitz* from 2013 [67] and is extended to include the main features relevant and validated for mechatronic and cyber-physical systems [10]. This extension also includes features related to the Internet of Things and Services as well as self-learning systems. Analogous to the original source, the main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems does not claim to be complete but is intended to give the user food for thought for further requirements in order to complete the specification.

This standard contains two worksheets: the main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems shown in Table 1 and an aid for filling out this list (see Annex, Table A1). The main features in Table 1 are used for the structured collection of all requirements. The guiding questions listed in the Annex serve to support the interpretation. With the help of these guiding questions, exemplary associations are awakened and ambiguities in the interpretation of the main and secondary features are eliminated. This assistance helps to elicit the requirements for mechatronic and cyber-physical systems completely, unambiguously, correctly, and consistent.

Tabelle 1. Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme

Hauptmerkmal	Nebenmerkmal
Funktion	Stoff <ul style="list-style-type: none"> Eigenschaften der eintretenden Stoffe Materialfluss und Materialtransport vorgeschriebene Werkstoffe Speicherung Hilfsstoffe Eigenschaften der austretenden Stoffe
	Energie <ul style="list-style-type: none"> Eingangsenergie Leistung Zustandsgrößen Verluste Speicherung Wirkungsgrad Energiebilanz Transformation Energie, die das System verlässt
	Signal <ul style="list-style-type: none"> Eingangsinformationen Ausgangsinformationen Betriebsgeräte Überwachungsgeräte Signalform Datenaustausch Datenspeicherung
	Schnittstellen <ul style="list-style-type: none"> mechanisch Software elektrisch/elektronisch Update/Upgrade Umwelt digitale Kommunikation
	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> Kompetenz Handhabung
	Planung <ul style="list-style-type: none"> Geschäftsmodell Zielkosten Terminierung Ressourcenzugänglichkeit Rahmenbedingungen
Nachhaltigkeit	Ökobilanz

Table 1. Main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems

Main feature	Secondary feature
Function	Material <ul style="list-style-type: none"> properties of the entering substances material flow and material transport prescribed materials storage auxiliary materials properties of the escaping substances
	Energy <ul style="list-style-type: none"> input energy power state variables losses storage efficiency energy balance transformation energy leaving the system
	Signal <ul style="list-style-type: none"> input information output information control gear monitoring devices signal shape data exchange data storage
	Interfaces <ul style="list-style-type: none"> mechanical software electric/electronic update/upgrade environment digital communication
	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> competence handling
	Planning <ul style="list-style-type: none"> business model target costs scheduling resource accessibility framework conditions
Organization	Sustainability <ul style="list-style-type: none"> life cycle assessment

Tabelle 1. Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme (Fortsetzung)

Hauptmerkmal	Nebenmerkmal		
Realisierung (Produktion)	Organisation (Fortsetzung)	Gesell-schaftliche Akzeptanz	<ul style="list-style-type: none"> Ökologie Ökonomie
		Markt	<ul style="list-style-type: none"> Compliance Wettbewerbsanalyse Kundensegment Kundenverhalten und -bedürfnisse marktübliche Standards Verkaufszahlen Marktanalyse/Benchmarking
		Einkauf	<ul style="list-style-type: none"> Make-or-Buy-Strategie A-Lieferanten Local Content Katalogbaugruppen operativer/strategischer Einkauf Datenaustausch
	Fertigung		<ul style="list-style-type: none"> Einschränkungen durch Produktionsstätten Dimension Fertigungsverfahren Fertigungsmittel mögliche Qualität und Toleranzen
		Montage	<ul style="list-style-type: none"> Montagevorschriften Zusammenbau Installation Prinzip Fundamentierung Werkzeuge Hilfsstoffe Sicherheitsdatenblätter
	Transport		<ul style="list-style-type: none"> Begrenzung durch Hebezeuge Transportmittel Wege Versandart und -bedingungen Lieferzeit
	Kontrolle		<ul style="list-style-type: none"> Mess- und Prüfmöglichkeiten Vorschriften
	Software-bereitstellung		<ul style="list-style-type: none"> Art der Datenübertragung Häufigkeit der Updates Versionierung

Table 1. Main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems (continued)

Main feature	Secondary feature		
Realization (production)	Organization (continued)	Social acceptance	<ul style="list-style-type: none"> ecology economy
		Market	<ul style="list-style-type: none"> compliance competitive analysis customer segment customer behaviour and needs prevailing market standards sales figures market analysis/benchmarking
		Purchasing	<ul style="list-style-type: none"> make-or-buy strategy A-supplier local content catalogue assemblies operational/strategic purchasing data exchange
	Manufacturing		<ul style="list-style-type: none"> restrictions due to production facility dimension manufacturing method manufacturing equipment possible quality and tolerances
			<ul style="list-style-type: none"> mounting instructions pre-assembly installation principle foundation tools auxiliary materials safety data sheets
	Assembly		<ul style="list-style-type: none"> limitation by hoists means of transport pathways shipping method and conditions delivery time
	Transport		<ul style="list-style-type: none"> measuring and testing possibilities regulations
	Control		<ul style="list-style-type: none"> type of data transmission frequency of updates versioning
	Software-deployment		

Tabelle 1. Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme (Fortsetzung)

Hauptmerkmal	Nebenmerkmal						
Realisierung (Produktion) (Fortsetzung)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Instandhaltung</th> <th>Betriebsbedingungen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> • Kompatibilität • Intervall • Austausch und Instandsetzung; Inspektion • Verfügbarkeit der Komponenten im Lebenszyklus (Ersatzteilstrategie) • Funktionserweiterung im Lebenszyklus • Diagnose • Reinigung • Einsatzort • Hilfsstoffe </td><td> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung und Absatzgebiet • Einsatzort • Inbetriebnahme • Komfort • Dienstleistung • Zuverlässigkeit • Verfügbarkeit </td></tr> </tbody> </table>	Instandhaltung	Betriebsbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kompatibilität • Intervall • Austausch und Instandsetzung; Inspektion • Verfügbarkeit der Komponenten im Lebenszyklus (Ersatzteilstrategie) • Funktionserweiterung im Lebenszyklus • Diagnose • Reinigung • Einsatzort • Hilfsstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung und Absatzgebiet • Einsatzort • Inbetriebnahme • Komfort • Dienstleistung • Zuverlässigkeit • Verfügbarkeit 		
Instandhaltung	Betriebsbedingungen						
<ul style="list-style-type: none"> • Kompatibilität • Intervall • Austausch und Instandsetzung; Inspektion • Verfügbarkeit der Komponenten im Lebenszyklus (Ersatzteilstrategie) • Funktionserweiterung im Lebenszyklus • Diagnose • Reinigung • Einsatzort • Hilfsstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung und Absatzgebiet • Einsatzort • Inbetriebnahme • Komfort • Dienstleistung • Zuverlässigkeit • Verfügbarkeit 						
Struktur	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Geometrie</th> <th>Recycling</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> • Abmessungen • Bauraum • Anzahl • Anordnung • Anschluss </td><td> <ul style="list-style-type: none"> • Wiederverwendung • Wiederverwertung • Entsorgung • Beseitigung • Schad- und Gefahrenstoffe • recyclingkritische Stoffe • Zugänglichkeit • Lösbarkeit </td></tr> </tbody> </table>	Geometrie	Recycling	<ul style="list-style-type: none"> • Abmessungen • Bauraum • Anzahl • Anordnung • Anschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederverwendung • Wiederverwertung • Entsorgung • Beseitigung • Schad- und Gefahrenstoffe • recyclingkritische Stoffe • Zugänglichkeit • Lösbarkeit 		
Geometrie	Recycling						
<ul style="list-style-type: none"> • Abmessungen • Bauraum • Anzahl • Anordnung • Anschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederverwendung • Wiederverwertung • Entsorgung • Beseitigung • Schad- und Gefahrenstoffe • recyclingkritische Stoffe • Zugänglichkeit • Lösbarkeit 						
Mechanik	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Gestalt</th> <th>Wärme</th> <th>Kräfte</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> • Stabilität • Oberfläche • Verformung • Festigkeit • Steifigkeit </td><td> <ul style="list-style-type: none"> • Reibung • Wärmeführung • Wärmespannungen </td><td> <ul style="list-style-type: none"> • Gewicht • Last • Kraftrichtung und -größe • Belastungshäufigkeit </td></tr> </tbody> </table>	Gestalt	Wärme	Kräfte	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilität • Oberfläche • Verformung • Festigkeit • Steifigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Reibung • Wärmeführung • Wärmespannungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewicht • Last • Kraftrichtung und -größe • Belastungshäufigkeit
Gestalt	Wärme	Kräfte					
<ul style="list-style-type: none"> • Stabilität • Oberfläche • Verformung • Festigkeit • Steifigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Reibung • Wärmeführung • Wärmespannungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewicht • Last • Kraftrichtung und -größe • Belastungshäufigkeit 					
Kinematik	<ul style="list-style-type: none"> • Bewegungsart/-richtung • Geschwindigkeit • Beschleunigung 						

Table 1. Main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems (continued)

Main feature	Secondary feature						
Realization (production) (continued)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Maintenance</th> <th>Environment of use</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> • compatibility • interval • exchange and repair; inspection • availability of components in the life cycle (spare parts strategy) • feature enhancement in the life cycle • diagnosis • cleaning • location • auxiliary materials </td><td> <ul style="list-style-type: none"> • application and sales area • location • commissioning • comfort • service • reliability • availability </td></tr> </tbody> </table>	Maintenance	Environment of use	<ul style="list-style-type: none"> • compatibility • interval • exchange and repair; inspection • availability of components in the life cycle (spare parts strategy) • feature enhancement in the life cycle • diagnosis • cleaning • location • auxiliary materials 	<ul style="list-style-type: none"> • application and sales area • location • commissioning • comfort • service • reliability • availability 		
Maintenance	Environment of use						
<ul style="list-style-type: none"> • compatibility • interval • exchange and repair; inspection • availability of components in the life cycle (spare parts strategy) • feature enhancement in the life cycle • diagnosis • cleaning • location • auxiliary materials 	<ul style="list-style-type: none"> • application and sales area • location • commissioning • comfort • service • reliability • availability 						
Structure	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Recycling</th> <th>Geometry</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> • reuse • recycling • disposal • final Disposal • harmful and hazardous substances • recycling-critical substances • accessibility • solubility </td><td> <ul style="list-style-type: none"> • dimensions • installation space • number • arrangement • connection </td></tr> </tbody> </table>	Recycling	Geometry	<ul style="list-style-type: none"> • reuse • recycling • disposal • final Disposal • harmful and hazardous substances • recycling-critical substances • accessibility • solubility 	<ul style="list-style-type: none"> • dimensions • installation space • number • arrangement • connection 		
Recycling	Geometry						
<ul style="list-style-type: none"> • reuse • recycling • disposal • final Disposal • harmful and hazardous substances • recycling-critical substances • accessibility • solubility 	<ul style="list-style-type: none"> • dimensions • installation space • number • arrangement • connection 						
Mechanics	<table border="1"> <thead> <tr> <th>forces</th> <th>heat</th> <th>shape</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> • weight • load • force direction and size • force frequency </td><td> <ul style="list-style-type: none"> • friction • heat conduction • thermal stress </td><td> <ul style="list-style-type: none"> • stability • surface • deformation • strength • stiffness </td></tr> </tbody> </table>	forces	heat	shape	<ul style="list-style-type: none"> • weight • load • force direction and size • force frequency 	<ul style="list-style-type: none"> • friction • heat conduction • thermal stress 	<ul style="list-style-type: none"> • stability • surface • deformation • strength • stiffness
forces	heat	shape					
<ul style="list-style-type: none"> • weight • load • force direction and size • force frequency 	<ul style="list-style-type: none"> • friction • heat conduction • thermal stress 	<ul style="list-style-type: none"> • stability • surface • deformation • strength • stiffness 					
Kinematics	<ul style="list-style-type: none"> • movement type/direction • speed • acceleration 						

Tabelle 1. Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme (Fortsetzung)

Hauptmerkmal	Nebenmerkmal
Struktur (Fortsetzung)	Mechanik (Fortsetzung)
	<ul style="list-style-type: none"> Federsteifigkeit Änderung der Bewegung Schwingungen
	Elektrik/Elektronik
	<ul style="list-style-type: none"> Nennspannung Nennströme Netzschwankungen Sicherungen Schirmung Filterung elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Anschluss Verschaltung Isolation Luft- und Kriechstrecken Modulordnung Bauteilverfügbarkeit Funktionsgruppen
Software	<ul style="list-style-type: none"> Integration Versionierung Schnittstellen Updates Hardware Testbarkeit Betriebsarten Entwicklungsumgebung Programmiersprache Open Source Dokumentation Datensicherung Wartbarkeit des Codes Echtzeitanforderungen
	Security
Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> Datenschutz Schutz vor unbefugtem Zugang zum System
Safety (Betriebssicherheit)	<ul style="list-style-type: none"> unmittelbare Sicherheitstechnik mittelbare Sicherheitstechnik hinweisende Sicherheitstechnik Grenzrisiko Betriebssicherheit Arbeitssicherheit Umweltsicherheit Risikobewertung

Table 1. Main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems (continued)

Main feature	Secondary feature
	<ul style="list-style-type: none"> spring stiffness change of movement resonances
Electrics/electronics	<ul style="list-style-type: none"> nominal voltage rated currents power supply fluctuations fuse shielding filtering electromagnetic compatibility (EMC)
Structure (continued)	<ul style="list-style-type: none"> connection wiring insulation air and creepage distances modular order component availability function groups
Software	<ul style="list-style-type: none"> integration versioning interfaces updates hardware testability operating modes development environment programming language open source documentation data backup maintainability of the code real-time requirements
Security	<ul style="list-style-type: none"> data protection protection against unauthorized access to the system
safety (operational safety)	<ul style="list-style-type: none"> immediate safety technology indirect safety technology indicative safety engineering border risk operational safety occupational safety environmental safety risk assessment

Tabelle 1. Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme (Fortsetzung)

Hauptmerkmal	Nebenmerkmal								
Struktur (Fortsetzung)	Regelung								
	Ergonomie								
	Anzeige und Bedienelemente								
Industrial Design	<ul style="list-style-type: none"> • Effekte • Hardware • Struktur • Algorithmen • Inbetriebnahme/Parametrisierung 								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Mensch-Maschine-Interaktion</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> • Wertigkeit • Bedienung • Emissionen • kollaboratives Arbeiten • User Experience </td> <td></td></tr> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> • Bedienung • Übersichtlichkeit • Beleuchtung • Bedienkräfte • Kodierung über Wahrnehmung </td> <td></td></tr> <tr> <td>Formgestaltung</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> • anthropometrische Maße • taktile Kodierung • Haptik </td></tr> </tbody> </table>	Mensch-Maschine-Interaktion		<ul style="list-style-type: none"> • Wertigkeit • Bedienung • Emissionen • kollaboratives Arbeiten • User Experience 		<ul style="list-style-type: none"> • Bedienung • Übersichtlichkeit • Beleuchtung • Bedienkräfte • Kodierung über Wahrnehmung 		Formgestaltung	<ul style="list-style-type: none"> • anthropometrische Maße • taktile Kodierung • Haptik
Mensch-Maschine-Interaktion									
<ul style="list-style-type: none"> • Wertigkeit • Bedienung • Emissionen • kollaboratives Arbeiten • User Experience 									
<ul style="list-style-type: none"> • Bedienung • Übersichtlichkeit • Beleuchtung • Bedienkräfte • Kodierung über Wahrnehmung 									
Formgestaltung	<ul style="list-style-type: none"> • anthropometrische Maße • taktile Kodierung • Haptik 								

Table 1. Main-feature list for mechatronic and cyber-physical systems (continued)

Main feature	Secondary feature
Structure (continued)	Regulation
	Ergonomics
	display and controls
Industrial Design	human-machine interaction
shape design	<ul style="list-style-type: none"> • value • logical operation • emissions • collaborative work • user experience
	<ul style="list-style-type: none"> • operation • clarity • lighting • operating forces • coding via perception
	<ul style="list-style-type: none"> • anthropometric measures • tactile coding • haptics
	<ul style="list-style-type: none"> • importance • aesthetic function • visualization function • symbol function • product recognition • colouring • target group

Anhang Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme (Tabelle A1)

Tabelle A1. Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme

Haupt-merkmal	Nebenmerkmal	Leitfragen
Stoff	Eigenschaften der eintretenden Stoffe	Welche Stoffe gelangen in welchem definierten Zustand (fest, flüssig, gasförmig, als Schüttgut, Festkörper, Halbzeug, Endprodukt etc.) in das System? Welche Eigenschaften (physikalisch, chemisch, biologisch etc.) besitzen die Eingangsstoffe?
	Materialfluss und Materialtransport	Von welcher Art (rotatorisch, translatorisch etc.) ist der Materialfluss im System? Welche Vorgaben (beliebig, aufrecht, Luftdruck etc.) gilt es während der Bewegung des Stoffs zu berücksichtigen? Welche Materialflüsse liegen vor (im System, in der Umgebung)?
	vorgeschriebene Werkstoffe	Welche Werkstoffvorgaben gibt es?
	Speicherung	Existieren Vorgaben zur Stoffspeicherung? Ist ein Puffer zur Kontinuität des Stoffflusses gefordert?
	Hilfsstoffe	Werden zusätzliche Stoffe (Druckluft, Schmierstoffe, Kühlflüssigkeit, Verschleißteile etc.) benötigt oder vorgegeben, um die Gesamtfunktion zu erfüllen?
	Eigenschaften der austretenden Stoffe	Welche vorgegebenen Eigenschaften sollen die Stoffe aufweisen, die das System verlassen?
Funktion	Eingangsenergie	Mit welchen vorgegebenen Energieformen (elektrisch, thermisch, mechanisch, chemisch, optisch etc.) soll das System versorgt werden?
	Leistung	Welche Leistungen (kWh, Druck etc.) benötigt das System?
	Zustandsgrößen	Welche ortsgebundenen Zustandsgrößen (Netzfrequenz, Druck, Temperatur etc.) weist die Energieform auf?
	Verluste	Welche Verluste (Reibung, Strahlung, Wärme etc.) treten auf? In welchem Umfang sind Verluste zulässig?
	Speicherung	Welche Vorgaben gibt es zur Speicherung von Energie (Energiemenge, Art der Energiespeicherung etc.)? Wird voraussichtlich eine kritische Energiedichte (Wärmestau, Druck etc.) erreicht?
	Wirkungsgrad	Welcher Wirkungsgrad soll erreicht werden?
	Energiebilanz	In welchen Teilen des Systems entstehen energetische (thermische, elektrische etc.) Verluste? Müssen innerhalb des Systems (Supraleitern etc.) definierte energetische Vorgaben (Temperatur, Druck etc.) erreicht werden?
	Transformation	Sind Energieumformungen (elektrisch in mechanisch, Frequenzwechsel, Gleichrichter etc.) innerhalb des Systems notwendig? Welche Vorgaben zur Wandlung von Energien müssen erfüllt werden?
	Energie, die das System verlässt	In welcher Form (Strahlung, Abwärme, kinetische Energie, potentielle Energie etc.) verlässt Energie das System? Welche Angaben (Druckdifferenz etc.) zum Energieauslass werden vorgegeben?
Signal	Eingangsinformationen	Welche Eingangsinformationen (Befehle, Artikelnummer, Gewicht, Positionsangabe etc.) sollen in das System gelangen? Wie soll die Eingabe (verbal, taktile etc.) von Befehlen erfolgen?
	Ausgangsinformationen	Welche Informationen sollen in welcher Art (Zykluszeit, Lageinformation, Aufzeichnungsdauer, optisch, haptisch, akustisch etc.) über die Systemgrenze ausgegeben werden?

Tabelle A1. Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme
(Fortsetzung)

Haupt-merkmal	Nebenmerkmal	Leitfragen	
Funktion (Fortsetzung)	Signal (Fortsetzung)	Betriebsgeräte	Welche Betriebsgeräte (Kalibrierungselemente etc.) sind vorgegeben?
		Überwachungsgeräte	Welche Sensoren oder Messsysteme (Kontaktsensor, Ultraschallsensor, Kamerasystem etc.) zur Prozessüberwachung sind zu integrieren?
		Signalform	Wie soll der Signalumsatz (analog, digital, Qualität etc.) erfolgen?
		Datenaustausch	In welcher Form (Bussystem etc.) erfolgt der Datentransfer innerhalb des Systems und zur Umgebung?
		Datenspeicherung	Werden Daten innerhalb oder außerhalb des Systems gespeichert? Sind infolge der Datenverwaltung Datenschutzrichtlinien einzuhalten?
	Schnittstellen	mechanisch	Welche mechanischen Schnittstellen (Gelenke, Schrauben, Kraftschluss etc.) sind vom System vorgegeben?
		Software	Welche internen und externen, softwareseitigen Schnittstellen sind vorgegeben?
		elektrisch/elektronisch	Welche internen und externen, elektrischen und elektronischen Schnittstellen sind vorgegeben?
		Update/Upgrade	Wie sind nach der Inbetriebnahme Software oder funktionelle Erweiterungen in das System zu integrieren?
		Umwelt	Wie beeinflusst das System die unmittelbare Umgebung (Natur, Personal etc.)? Welche Schnittstellen zur Umgebung sind zu beachten?
		digitale Kommunikation	Welche Vorgaben zur digitalen Kommunikation (Big Data, Internet der Dinge und Dienste, mobile Kommunikation, Virtual Reality/Augmented Reality etc.) existieren?
Organisation	Stakeholder	Kompetenz	Welche fachliche Kompetenz bringen die Stakeholder (Personal, Benutzer etc.) mit?
		Handhabung	Wie gestaltet sich die Interaktion (intuitiv, angeleitet etc.) der Stakeholder (Kinder, Menschen mit körperlichen oder geistigen Einschränkungen etc.) mit dem System?
	Planung	Geschäftsmodell	Welche Vorgaben (Gestaltung, Modularisierung etc.) resultieren aus dem angestrebten Geschäftsmodell (Freemium, Razor and Blade, Pay-per-Use etc.)?
		Zielkosten	Ist für die Umsetzung des Projekts/Auftrags ein definierter Kostenrahmen (Herstellkosten, Entwicklungskosten, Werkzeugkosten, Investitionen, Betriebskosten etc.) gegeben? Entstehen zusätzliche Betriebs- oder Nebenkosten?
		Terminierung	Sind die Termine einhaltbar? Gibt es Gestaltungsmöglichkeiten, die die Terminsituation verbessern können? In welchem Rahmen (Entwicklungszeitraum, Kundenmeilensteine, Be-musterungsstufen, Start der Produktion, Liefertermin etc.) ist die Realisierung zeitlich limitiert?
		Ressourcenzugänglichkeit	Ist das zu entwickelnde System abhängig von Ressourcen (Rechenleistung, Zuliefermaterial, Personal etc.), die jetzt oder in Zukunft schwierig zu beschaffen sind?
		Rahmenbedingungen	Unterliegt die Umsetzung des Systems konfliktären Restriktionen (Gesetze, Patente, Normen, Richtlinien, Kundennormen, Zertifizierung, CE-Kennzeichnung etc.)? Ergeben sich durch zukünftige Ereignisse Restriktionen (Urheberrechte bei Unternehmensfusion etc.), die zu berücksichtigen sind?
Nachhaltigkeit	Ökobilanz	Welche Vorgaben treten entlang des Produktlebenszyklus (strategische Planung, Produktentwicklung, Realisierung/Produktion, Produkt-nutzung, Produktlebensende) auf? Wie werden die physischen Komponenten des Systems am Lebensende behandelt (Deponierung, Recycling, Verbrennung etc.)?	

Tabelle A1. Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme (Fortsetzung)

Haupt-merkmal	Nebenmerkmal	Leitfragen
Organisation (Fortsetzung)	Gesellschaftliche Akzeptanz	Ökologie Welche gesellschaftliche, ökologische Akzeptanz (negativ konnotierte Technologie, soziale Bewegung etc.) herrscht vor und wie gestalten sich die Auswirkungen auf das System oder Projekt?
		Ökonomie Welche gesellschaftliche, ökonomische Akzeptanz (Marge, Geschäftspartner, Arbeitsbedingungen etc.) herrscht vor und wie gestalten sich die Auswirkungen auf das System oder Projekt?
	Markt	Compliance Wie wird eine regelkonforme (freiwillige Kodizes, Richtlinien, Gesetze etc.) Umsetzung des Projekts gewährleistet?
		Wettbewerbsanalyse Welche Systeme von Wettbewerbern bieten welche Modifikationen? Wie grenzt sich das System zu Produkten der Wettbewerber ab?
		Kundensegment Welche vorgegebenen Kundenbedürfnisse sollen befriedigt werden? Wie verhält (Kaufverhalten, Nutzungsdauer etc.) sich das Kundensegment?
		Kundenverhalten und -bedürfnisse Welche Systemvorgaben (Handling, Vertriebswege, Serviceleistungen etc.) leiten sich aus den Kundenbedürfnissen und dem Kundenverhalten ab?
		marktübliche Standards Welche Vorgaben (Dimension, Schnittstellen, Bauweise etc.) leiten sich aus dem bestehenden Markt ab?
		Verkaufszahlen Welche Verkaufszahlen werden im Segment angestrebt und wie beeinflussen diese die Produktentwicklung (Fertigungsverfahren, Vertrieb, Überdimensionierung etc.)?
		Marktanalyse/Benchmarking Welche Systemvorgaben (Basisanforderungen etc.) leiten sich aus einer Marktanalyse ab?
Realisierung (Produktion)	Einkauf	Make-or-Buy-Strategie Welche Vorgaben sind zur Eigen- und Fremdfertigung gegeben? Welche Systemvorgaben ergeben sich aus der gewählten Make-or-Buy-Strategie?
		A-Lieferanten Welche priorisierten Lieferanten sind für das System vorgesehen? Welche Vorgaben (Lieferzeit, Qualität, Abnahmemengen, Rabatte etc.) resultierten aus der Wahl des Lieferanten?
		Local Content Welche Vorgaben (Anteil an der Gesamtwertschöpfungskette, internationale Kostenunterschiede, Zölle etc.) zum Local Content gibt es?
		Katalogbaugruppen Welche Vorgaben (Schnittstellen, Software, Dimension, Werkstoffe, Einsatzumgebung etc.) resultieren aus der Nutzung von Katalogbaugruppen?
		operativer/strategischer Einkauf Welche Vorgaben (Material, Lieferanten, Abnahmemengen etc.) ergeben sich aus dem strategischen Einkauf?
		Datenaustausch Welchen Restriktionen (Patente, Geheimhaltungen etc.) unterliegt der unternehmensübergreifende Datentransfer?
	Fertigung	Einschränkungen durch Produktionsstätten Ist die Produktionsstätte vorgegeben und welche Vorgaben (Fertigungsverfahren, Transportwege, Wertschöpfungsstufe etc.) ergeben sich dadurch?
		Dimension Resultieren aus den lokalen Fertigungsmitteln Beschränkungen in den Abmessungen (Länge, Breite, Höhe, Werkzeugaufnahme, Öffnungsweite einer Spritzgussmaschine, Datenvolumen, Speicherplatz, Leiterplatten, kleinstmögliche Größe etc.)?
		Fertigungsverfahren Gibt es Vorgaben (Spritzguss, Fräsen, Drehen, Gießen etc.) bezüglich der Fertigungsverfahren? Sind Fertigungsgesichtspunkte in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht berücksichtigt?
		Fertigungsmittel Welche Systemvorgaben (spritzgussgerecht, stanzgerecht, maschinenpezifische Toleranzen etc.) ergeben sich aus lokal verfügbaren Fertigungsmitteln?

Tabelle A1. Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme (Fortsetzung)

Haupt-merkmal	Nebenmerkmal	Leitfragen
Realisierung (Produktion) (Fortsetzung)	mögliche Qualität und Toleranzen	Sind die Fertigungstechniken für eine Umsetzung der geforderten Qualität und Genauigkeit vorhanden und wirtschaftlich? Sind die Vorgaben zur Sicherung der geforderten Qualität mit den verfügbaren Messmitteln einhaltbar?
	Montagevorschriften	Welche Montagevorschriften (Schutzgas, Reinraum, Reihenfolge etc.) gilt es zu beachten?
	Zusammenbau	In welchem Umfang soll das System vormontiert werden? In welchem Umfang soll die Montage aufgegliedert (zentral, dezentral, einstufig, mehrstufig etc.) werden? Können alle inner- und außerbetrieblichen Montagevorgänge einfach und eindeutig vorgenommen werden?
	Installation	In welchem Umfang (Montageteam, Eigeninstallation etc.) soll der Einbau in der Einsatzumgebung erfolgen?
	Prinzip	Welche Vorgaben (Werkbankprinzip, Werkstattprinzip, Baustellenprinzip, Inselprinzip etc.) der Systemmontage sind festgelegt?
	Fundamentierung	In welchem Umfang (Beton, Verdichten, Schotter etc.) ist der Untergrund für das System vorzubereiten?
	Werkzeuge	Welche Werkzeuge (Schweißgeräte, Momentschlüssel, Nüsse etc.) sind für die Montage bis zur Inbetriebnahme vorgeschrieben?
	Hilfsstoffe	Welche Hilfsstoffe (Öl, Lacke, Klebstoffe) sind für die Montage bereitzustellen?
	Sicherheitsdatenblätter	In welchem Umfang sind sicherheitsrelevante Datenblätter (Gefahrenstoffe, Montagehinweise etc.) zu erstellen?
	Begrenzung durch Hebezeuge	Welche Vorgaben (Gewichtskraft, Volumen, Schnittstellen, Schwerpunkt etc.) resultieren aus den vorhandenen Hebevorrichtungen?
Transport	Transportmittel	Welche Vorgaben (EPAL-Maße, Transportsicherung, etc.) gehen von dem zu wählenden Transportmittel (Bahn, Lkw, Pkw, Flugzeug etc.) aus?
	Wege	Welchen Vorgaben (maximale Tragfähigkeit von Brücken, maximale Höhe von Unterführungen, Hindernisse, Bahnprofil etc.) unterliegt die zu wählende Route?
	Versandart und -bedingungen	Sind inner- und außerbetriebliche Transportbedingungen und -risiken überprüft und berücksichtigt? In welchem Ausmaß unterliegt der Transport bestimmten Vorgaben (Verpackung, Transportsicherung, Abschirmung, Security, Toxizität etc.)?
	Lieferzeit	Welche Auswirkungen und Risiken (Lieferzeitverzögerung, Fachkräfte etc.) ergeben sich durch den Transport?
	Kontrolle	Sind die notwendigen Kontrollmessungen während und nach der Fertigung oder zu einem sonst erforderlichen Zeitpunkt möglich und als solche veranlasst? Sind für die vorgegebenen Messgrößen (Genauigkeit, Ebenheit, Rauheit etc.) entsprechende Messinstrumente vorhanden? Lässt die Produktgestalt eine Prüfung zu?
Software-bereitstellung	Mess- und Prüfmöglichkeiten	Welche vorgegebenen Vorschriften (TÜV, ASME, DIN, ISO etc.) gilt es zu berücksichtigen?
	Art der Datenübertragung	Welchen Vorgaben zur Datenübertragung (Flashen, Aufspielen, Download, Fernwartung etc.) unterliegt das System?
	Häufigkeit der Updates	In welchen Intervallen soll eine Softwareaktualisierung durchgeführt werden?
	Versionierung	Welche softwareseitigen Unterscheidungen (Lizenzen, neue Betriebssysteme etc.) sind vorgesehen?

Tabelle A1. Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme
(Fortsetzung)

Haupt-merkmal	Nebenmerkmal	Leitfragen
Instandhaltung	Kompatibilität	Sind bisherige Produkte oder Produkte eines alternativen Herstellers als Ersatzteile vorzusehen?
	Intervall	In welchem vorgegebenen Umfang (Zeitintervall, nach Bedarf, nach Laufzeit, Testdauer etc.) sind Wartungen durchzuführen?
	Austausch und Instandsetzung; Inspektion	Sind die für eine Wartung, Inspektion und Instandsetzung erforderlichen Maßnahmen in sicherer Weise durchführ- und kontrollierbar?
	Verfügbarkeit der Komponenten im Lebenszyklus (Ersatzteilstrategie)	Über welchen Zeitraum und in welchem Umfang sind Ersatzteile vorzuhalten?
	Funktionserweiterung im Lebenszyklus	Wie sollen Systemerweiterungen (Lizenzen, Module etc.) umgesetzt werden?
	Diagnose	In welchem vorgegebenen Rahmen (Fernwartung, lokal, Testlauf etc.) sollen Systemdiagnosen erfolgen?
	Reinigung	In welchem Umfang (Reinraum, ebene Flächen, besenrein etc.) sind Reinigungen vorzusehen?
	Einsatzort	Wie gestalten sich die Zugänglichkeit des Systems und dessen Elemente in der Einsatzumgebung?
	Hilfsstoffe	In welchen Zeitabständen und in welchem Umfang sind für den Betrieb notwendige Hilfsstoffe (Schmierstoffe, Kühlflüssigkeit, Gummielemente etc.) zu erneuern?
Realisierung (Produktion) (Fortsetzung)	Anwendung und Absatzgebiet	Welche vorgesehene Anwendung soll das System erfüllen? In welchen Segmenten wird das System vertrieben und genutzt?
	Einsatzort	Welche Stoffe oder Umstände (Schwefel, Natriumchlorid, Feuchtigkeit, Tropfen, Arktis) sind in der vorgesehenen Betriebsumgebung vorzufinden?
	Inbetriebnahme	Soll eine intuitive Inbetriebnahme, gegebenenfalls unter Zuhilfenahme der Bedienungsanleitung, möglich sein? Erfordert die Inbetriebnahme geschultes Personal oder spezielle Werkzeuge?
	Komfort	Welche Geräusche, Erschütterungen etc. treten während des Gebrauchs oder im Betrieb auf?
	Dienstleistung	Welche Dienstleistungen (Wartung, Schulungen etc.) sind für das System vorzusehen?
	Zuverlässigkeit	Welche Betriebszuverlässigkeit wird gefordert und wie wird diese definiert?
	Verfügbarkeit	Kann die Verfügbarkeit von Materialien (Sonderwerkstoffen, seltenen Erden etc.), die für die Nutzung notwendig sind, gewährleistet werden?
Recycling	Wiederverwendung	Wird eine Wiederverwendung des Produkts ermöglicht/angestrebt? Gibt es Vorgaben, einzelne Komponenten des Systems nach Beendigung des Lebenszyklus einem neuen Zweck zuzuführen?
	Wiederverwertung	Wird eine Wiederverwertung der Materialien angestrebt? Wie gestalten sich die Möglichkeiten (einheitliche stoffliche Trennung, Separation toxischer Substanzen, Materialdegradation etc.), die im System eingesetzten Materialien, in einem neuen Lebenszyklus zu verwerten?
	Entsorgung	Wie gestaltet sich die Entsorgung (Annahmestellen, Demontage-Team etc.) des Systems am Ende des Lebenszyklus? Welche Vorgaben (politisch orientiert, Wiederverwertungsquoten etc.) sind dabei zu berücksichtigen?
	Beseitigung	Welche Stoffe (Cäsium-137, Strontium-90, Quecksilber etc.) des Systems sind nicht mehr in den Wertschöpfungsprozess (Deponierung, Verbrennung etc.) zurückzuführen?

Tabelle A1. Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme
(Fortsetzung)

Haupt-merkmal	Nebenmerkmal	Leitfragen
Realisierung (Produktion) (Fortsetzung)	Recycling (Fortsetzung)	<p>Schad- und Gefahrenstoffe</p> <p>Welche eingesetzten Materialien (Batterien, Öle, FCKW etc.) sind umweltunverträglich und müssen separat entsorgt oder aufbereitet werden?</p>
		<p>recyclingkritische Stoffe</p> <p>Welche Materialien (Legierungen, Verbundwerkstoffe, lackierte Substrate etc.) dürfen nicht eingesetzt werden, deren Aufbereitung nach der Funktionserfüllung kritisch sind?</p>
	Zugänglichkeit	<p>Wie sind die Vorgaben zur Zugänglichkeit von Werkstoffen (Flüssigkeiten, Gasen, Dichtigkeit, Separation, Säuren, Schwermetalle, Baugruppen etc.) gestaltet?</p>
	Lösbarkeit	<p>Worauf ist zu achten, damit das System nach dem Gebrauch auch stofflich zerlegbar ist?</p>
Struktur	Geometrie	<p>Abmessungen</p> <p>Welche vorgegebenen, geometrischen Abmessungen (Länge, Breite, Höhe, Volumen, Oberfläche etc.) muss das System einhalten?</p>
		<p>Bauraum</p> <p>Wie gestalten sich die von der Einsatzumgebung vorgegebenen, räumlichen Einschränkungen (Montageplatz, Büro, Karosserie etc.)?</p>
		<p>Anzahl</p> <p>Wird eine strategische Gestaltung (Modularisierung, Standardisierung, Wiederholteile etc.) angestrebt?</p>
		<p>Anordnung</p> <p>Ist eine definierte Position (relativ zu anderen Systemen, Packaging Design etc.) für das System vorgesehen?</p>
		<p>Anschluss</p> <p>Wie gestalten sich die Anschlussmöglichkeiten (Geometrie der Anschlüsse, Länge der Verbindung etc.) in der vorgesehenen Einsatz- und Betriebsumgebung?</p> <p>In welchem Rahmen sind die Anschlüsse (Kompatibilität, Standardisierung, hohe Diversität, Zuliefererabhängigkeit etc.) innerhalb des Systems vorgegeben?</p>
	Mechanik	<p>Kräfte</p> <p>Gewicht</p> <p>Welche Gewichtsvorgaben sind in der Einsatzumgebung (Hebevorrichtung, Gebäudestatik etc.) zu berücksichtigen?</p>
		<p>Last</p> <p>Welche Lasten (Punktlast, Flächenlast, thermisch, elektrisch, dynamisch, statisch etc.) treten auf?</p>
		<p>Kraftrichtung und -größe</p> <p>Wo entsteht eine Kraft (intern, extern etc.) und wie verläuft diese innerhalb des Systems (translatorisch, durch das System etc.)?</p>
		<p>Belastungshäufigkeit</p> <p>In welchen zeitlichen Intervallen (sporadisch, zyklisch etc.) tritt die Belastung auf?</p>
	Wärme	<p>Reibung</p> <p>Gibt es Vorgaben (Ort, Höhe etc.) zur reibungsinduzierten Wärmeentwicklung?</p>
		<p>Wärmeführung</p> <p>Wie wird die thermische Energie aus dem System geleitet (Wärmeleitung, Gebläse etc.) oder wie verhalten sich thermische Anomalien?</p>
		<p>Wärmespannungen</p> <p>Welche Komponenten unterliegen einer thermischen, ausdehnungsinduzierten Spannung?</p>
	Gestalt	<p>Stabilität</p> <p>Welche Arten der Stabilität (stabil, labil, indifferent, metastabil) sind in dem System zu erwarten oder zu berücksichtigen?</p>
		<p>Oberfläche</p> <p>Wie ist die Oberfläche (Rauheit, beschichtet, Vorkonditionieren durch z.B. Druckeigenspannungen, Korrosionsschutz, Reflexion etc.) von Elementen des Systems zu gestalten?</p> <p>Welche Ziele (Optik, Mechanik, Beständigkeit etc.) werden bei der Oberflächenbearbeitung verfolgt?</p>
		<p>Verformung</p> <p>Welche Verformungen (maximale Verformung, Dauerfestigkeit etc.) sind zulässig, bezogen auf die Werkstückgeometrie und das wirkende Lastkollektiv (kontinuierlich, zufällige Belastung etc.)?</p>
		<p>Festigkeit</p> <p>Welche Festigkeiten sind im System (werkstoffbezogen, ortsgebunden etc.) einzuhalten?</p>
		<p>Steifigkeit</p> <p>Wie gestaltet sich das Lastkollektiv (Richtung(en), Höhe, dynamisch, thermisch, mechanisch, Strahlung etc.) in Bezug auf das wirkende Systemelement (Sandwich, Wabenstruktur, Hybridbauweise etc.)?</p>

Tabelle A1. Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme (Fortsetzung)

Haupt-merkmal	Nebenmerkmal	Leitfragen
Mechanik (Fortsetzung)	Kinematik	Bewegungsart/-richtung Welche Bewegungen (translatorisch, rotatorisch, zyklisch, reproduzierbar etc.) werden im System umgesetzt?
		Geschwindigkeit Welche Geschwindigkeiten gilt es, inner- und außerhalb des Systems zu berücksichtigen? Welche Wirkungen (Kühlung etc.) resultieren aus den Geschwindigkeiten?
		Beschleunigung Welche Beschleunigungen gilt es innerhalb und außerhalb zu berücksichtigen? Welche Elemente werden beschleunigt?
	Kinetik	Federsteifigkeit Sind im System spezifische Federsteifigkeiten zu berücksichtigen?
		Änderung der Bewegung Wie sind Geschwindigkeitsänderungen bewegter Massen im System zu gestalten (Dämpfung etc.)?
		Schwingungen Unterliegt oder verursacht das System Schwingungen (Resonanzen etc.), die zu Störungen inner- oder außerhalb des Systems führen?
	Struktur/Elektronik (Fortsetzung)	Nennspannung Welche elektrischen Nennspannungen (elektrische Verbraucher, Spannungsquelle etc.) sind zu berücksichtigen?
		Nennströme Welche Elemente (elektrische Motoren, Leuchte etc.) benötigen welche Nennströme?
		Netzschwankungen In welchem Rahmen sind Netzschwankungen zu berücksichtigen?
		Sicherungen Welche Sicherungssysteme (politische Standards, nutzerbezogen, Not-Aus-Schalter, FI etc.) sind ins System zu integrieren?
		Schirmung Welche Komponenten des Systems müssen abgeschirmt werden (elektrische oder magnetische Felder, Strahlung, Kupferbandschleifen etc.)?
		Filterung Ist eine Filterung/Korrektur der elektrischen Signale (Frequenz, Amplitude) notwendig?
		elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Welche systeminternen oder -externen induzierten Störungen (leitungsgebundene Störungen, elektrische und magnetische Felder etc.) können auftreten?
		Anschluss Welche systeminternen oder -externen Anschlussmöglichkeiten (SEV 1011:1998, SN EN 50075, Starkstrom etc.) sind gegeben?
		Verschaltung Welche Elemente (elektrische, elektromechanische etc.) werden in der Verschaltung in Relation gesetzt? Unterliegt die Verschaltung des Systems Restriktionen (Farbkodierung, Anordnung, vorgegebene Zukaufteile etc.)?
		Isolation Unterliegt die Isolation (Spritzwasser, Feuchtigkeit, Druck, elektrische Leitfähigkeit etc.) des Systems internen wie auch externen Vorgaben?
		Luft- und Kriechstrecken Gibt es im System kritische Bereiche (Engpässe, leitendes Material, geringe Durchschlagfestigkeiten etc.), in denen ein Spannungs-durchschlag oder Lichtbogen entstehen kann?
		Modulordnung Ist eine definierte (kundenspezifische etc.) Modulordnung im System zu gewährleisten?
Software	Bauteilverfügbarkeit	Wie ist die langfristige Verfügbarkeit von Systemelementen (Halbleiter-technik, Chips, Halbzeuge etc.) für Produktion und Instandhaltung?
	Funktionsgruppen	Sind im System Module (mechanische, elektrische, optische, thermische, magnetische Module, Sensoren etc.) zu Regelkreisen zusammenzufassen?
	Integration	Welche Vorgaben (Funktionsintegration, Datenintegration, Ge-schäftsprozessintegration, Schnittstellenvermeidung etc.) zur Integra-tion der Softwaretechnik sollen berücksichtigt werden?
	Versionierung	Wie verläuft die Versionierung (Versionenverwaltung, Versionen-nummer etc.) des Systems?

Tabelle A1. Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme (Fortsetzung)

Haupt-merkmal	Nebenmerkmal	Leitfragen	
Struktur (Fortsetzung)	Schnittstellen	Welche Datenschnittstellen (datenorientiert, funktional, Interprozess-kommunikation, Programmkomponente etc.) sind systemintern und -extern zu berücksichtigen? Wie ist die Software zu strukturieren (modular im Freemium-Geschäftsmodell etc.)?	
	Updates	In welchem Umfang (Firmware, Bildschirmaktualisierung etc.) sind Updates zu halten? Über welchen Weg (Internet, Servicemitarbeiter, USB, Bluetooth etc.) gelangen Updates in das System?	
	Hardware	Welche Anforderungen (Speicherbedarf, Nennspannung, Rech-leistung etc.) werden an die IT-Hardware (Steuerwerk, Rechenwerk, Speicherwerk etc.) des Systems gestellt?	
	Testbarkeit	In welchem Umfang (Softwaresystem, Softwaremodul, Softwarearte-fakt etc.) soll die Testbarkeit (Beobachtbarkeit, Isolierbarkeit, Tren-nung, Verständlichkeit, Heterogenität etc.) gewährleistet werden?	
	Betriebsarten	Welche Betriebsarten (Beschreibung, Frequenz, Software, Bezugs-quellen etc.) werden wie (Transceiver, Modem, Interface etc.) umge-setzt?	
	Entwicklungsumgebung	Welche Entwicklungsumgebung (PyCharm, Gambas, BlueJ etc.) ist systemintern und -extern zu berücksichtigen?	
	Programmiersprache	Welche Programmiersprachen (C++, Python, Visual Basic etc.) sind im systeminternen und -externen Kontext zu wählen?	
	Open Source	Welche Vorgaben zur Nutzung oder Verbreitung von Software oder Softwarebausteinen sind gegeben?	
	Dokumentation	Welche Eigenschaften (Funktionsweise, Erzeugung von Daten, Ver-arbeitung von Daten etc.) der Systemsoftware sollen dokumentiert werden?	
	Datensicherung	Welcher Ort (systemintern, externer Server, Backup-Sicherung, Intervall etc.) ist zur Datenverwaltung vorgesehen?	
	Wartbarkeit des Codes	Wie gestaltet sich die Wartbarkeit (Fehlerbehebung, Performance, Attribute etc.) der Software?	
	Echtzeitanforderungen	Welche Elemente (Prozessleittechnik, Motorsteuerung etc.) müssen echtzeitfähig sein?	
Sicherheit	Security	Datenschutz	Wie sicher (Sicherheitsstufe, Datenverarbeitung, Gefährdungspotenzial etc.) sind die zu verwaltenden Daten aufzubewahren? Welche Maßnahmen (Kryptologie, Überwachung, Authentifizierung, Internetzugang, Autorisierung etc.) sind zu treffen, um die Daten vor Unbefugten zu schützen?
		Schutz vor unbefugtem Zugang	Welche Personen dürfen wie auf das System zugreifen?
	Safety/Betriebssicherheit	unmittelbare Sicherheits-technik	Von welchen Elementen geht eine Gefahr aus und können diese gestalterisch angepasst werden?
		mittelbare Sicherheits-technik	Wie können Personen vor nicht zu unterbindenden Gefahren ge-schützt werden (Schutzkäfig, Laserschranke, Abdeckungen etc.)?
		hinweisende Sicherheits-technik	Wie können Gefahren deutlich gekennzeichnet werden (Schilder, Sirene, Position der Markierung, intuitiv verständlich etc.)?
		Grenzrisiko	Wie ist eine potenzielle Gefährdung zu bewerten (Auftreten, Ein-trittswahrscheinlichkeit, Vorschriften etc.)?
		Betriebssicherheit	Welche Maßnahmen (Redundanz, Nutzungsdauer, Wartungspläne etc.) werden verfolgt, um einen anwendungssicheren Betrieb des Systems zu gewährleisten?

Tabelle A1. Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme (Fortsetzung)

Haupt-merkmal	Nebenmerkmal	Leitfragen	
Sicherheit (Fortsetzung)	Arbeitssicherheit	Liegt eine Gefährdung (menschengerecht, Lüftung, Strahlenschutz, Sicherheitstechniken etc.) des Personals vor und wie kann diese gemildert werden?	
	Umweltsicherheit	Welche Umweltbeeinflussungen (Emissionen, Entsorgung etc.) entstehen durch das System und wie können diese abgeschwächt werden (Sicherheitstechniken, Materialien etc.)?	
	Risikobewertung	Wie können die Faktoren, die die Betriebs-, Arbeits- und Umweltsicherheit beeinflussen, ausreichend berücksichtigt werden?	
	Effekte	Sind alternative logische und physische Strukturen analysiert und bewertet worden? Welche Störungen sind durch den Effekt zu erwarten?	
	Hardware	Wie gestaltet sich der Einfluss der inneren Störgrößen (Drift, Hysterese, Bauteile, Reibungseffekte etc.) und wie zulässig sind Abweichungen?	
	Struktur	Welche Strukturen (Kaskadenregelung, einschleifige Regelkreise etc.) sind in der Systemausführung zu berücksichtigen?	
	Algorithmen	Wie ist die Ausführung (dynamisch etc.) des Algorithmus zu gestalten?	
	Inbetriebnahme/ Parametrisierung	Welche Gegebenheiten (Personal, Zugänglichkeit, Tide, Infrastruktur etc.) sind bei der Inbetriebnahme zu berücksichtigen?	
	Mensch-Maschine-Interaktion	Wertigkeit	Wie gestaltet sich die intuitive Wertigkeit (Gewicht, Soft Touch, Cool-Touch-Effekt, Farbeindruck, Beständigkeit etc.) des Systems oder einzelner Elemente?
		Bedienung	Wie ist die individuelle Bedienung ausgelegt (intuitiv, erklärend, Anleitung, Seminare, Schulungen etc.)? Wie wird die Benutzergruppe mit dem System (Software, Hardware etc.) in welcher Situation (Stresssituation, Alltagssituation etc.) interagieren?
		Emissionen	Verursacht das System kritische Emissionen (Schwindungen, Strahlungen, Gerüche, Cybersickness etc.)?
		kollaboratives Arbeiten	Wie entstehen Synergieeffekte (Arbeits erleichterung, Unterstützung etc.) zwischen dem Personal und dem System?
		User Experience	Für welche Benutzergruppen (Senioren, Kinder, junge Erwachsene, Bildung etc.) ist das System anzulegen?
Struktur (Fortsetzung)	Ergonomie	Bedienung	Wie interagiert das Personal physisch (Totmannschalter, Schalter in Reihe, Touch Display, verbal, taktil etc.) mit dem System?
		Übersichtlichkeit	Sind die Interaktionsobjekte des Systems übersichtlich angeordnet (Gruppen ähnlicher Funktionen, in Reihenfolge der Bedienung etc.)?
		Beleuchtung	In welchem Umfang (Bedienelemente, Tasten etc.) ist das System zu beleuchten?
		Bedienkräfte	Sind die Bedienkräfte (Hebel, Druckknopf, Gewicht des Systems etc.) des Systems für das Personal (Mann, Frau, divers) angemessen ausgelegt? Sind Belastungen, Beanspruchungen und Ermüdung berücksichtigt?
		Kodierung über Wahrnehmung	Gibt das System Signale über die Wahrnehmung (taktil, optisch, auditiv, Sirene, Licht etc.) an das Personal weiter?
	Anzeige und Bedienelemente	anthropometrische Maße	Für welche Personengruppen (Gewicht, Arbeitshöhe, Körpergröße etc.) soll das System ausgelegt werden?
		taktile Kodierung	Soll eine taktile Kodierung über die Form beschrieben werden (Not-schalter, Brailleschrift etc.)?
		Haptik	Sind Elemente des Systems mit einer definierten Oberfläche zu versehen (Lack, Soft Touch, antibakteriell, Galvanik etc.)?

Tabelle A1. Leitfragen zur Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme
(Fortsetzung)

Haupt-merkmal	Nebenmerkmal	Leitfragen
Struktur (Fortsetzung) Industrial Design	Bedeutung	Welche Bedeutung (Zielgruppe, Marke etc.) haben mögliche Designvorgaben oder Designs von Vorgängerprodukten?
	ästhetische Funktion	Wie ist die ästhetische Funktion in das Produkt zu integrieren (Sehsinn, Tastsinn, Geschmackssinn, Geruchssinn, Temperaturempfinden, plump, schlank, elegant etc.)?
	Anzeichenfunktion	In welchem Maß sind Oberflächen zur gezielten Interaktion (Rauigkeit zum Greifen, Symbole zur Funktionserläuterung, Kontraste etc.) mit dem Personal zu kennzeichnen?
	Symbolfunktion	Welche Symbolfunktionen (zeitliche Neuerung, Statussymbol etc.) sollen ins System integriert werden?
	Wiedererkennungswert	Wie wird der Wiedererkennungswert (Form, Farbe, Design etc.) des Systems sichergestellt?
	Farbgebung	Was ist bei der Farbgebung zu beachten? Nach welchen Kriterien (Kunde, Reinraum, Medizin etc.) wird die Farbgebung realisiert?
	Zielgruppe	Ist das Design speziell auf ein Kundensegment auszurichten (Sinusmilieu)?

Annex Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems (Table A1)

Table A1. Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems

Main feature	Secondary feature	Guiding questions
Material	properties of the entering substances	Which substances enter the system in which defined state (solid, liquid, gaseous, as bulk, solid, semi-finished product, end product, etc.)? What properties (physical, chemical, biological, etc.) do the input substances have?
	material flow and material transport	What type (rotational, translational, etc.) of material flow is in the system? What specifications (arbitrary, upright, air pressure, etc.) shall be taken into account during the movement of the material? What material flows are present (in the system, in the environment)?
	prescribed materials	What are the material specifications?
	storage	Are there requirements for substance storage? Is a buffer required for the continuity of the substance flow?
	auxiliary materials	Are additional substances (compressed air, lubricants, coolant, wear parts, etc.) required or specified to fulfil the overall function?
	properties of the escaping substances	Which predefined properties should the substances leaving the system have?
Function	input energy	With which specified forms of energy (electrical, thermal, mechanical, chemical, optical, etc.) should the system be supplied?
	power	What outputs (kWh, pressure, etc.) does the system require?
	state variables	Which local state variables (grid frequency, pressure, temperature, etc.) does the energy form have?
	losses	What losses (friction, radiation, heat, etc.) occur? To what extent are losses allowed?
	storage	What specifications are there for storing energy (amount of energy, type of energy storage, etc.)? Is a critical energy density (heat build-up, pressure, etc.) likely to be reached?
	efficiency	What efficiency is to be achieved?
	energy balance	In which parts of the system do energetic (thermal, electrical, etc.) losses occur? Do defined energy specifications (temperature, pressure, etc.) have to be achieved within the system (superconductors, etc.)?
	transformation	Are energy transformations (electrical to mechanical, frequency change, rectifier, etc.) necessary within the system? Which specifications for the conversion of energies must be fulfilled?
	energy leaving the system	In what form (radiation, waste heat, kinetic energy, potential energy, etc.) does energy leave the system? What specifications (pressure difference, etc.) are given for the energy outlet?
Signal	input information	What input information (commands, item number, weight, position information, etc.) should enter the system? How should the input (verbal, tactile, etc.) of commands be done?
	output information	What kind of information (cycle time, position information, recording duration, optical, haptic, acoustic, etc.) should be output across the system boundary?

Table A1. Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems
(continued)

Main feature	Secondary feature	Guiding questions
Function (continued)	Signal (continued)	control gear
		monitoring devices
		signal shape
		data exchange
		data storage
	Interfaces	mechanical
		software
		electric/electronic
		update/upgrade
		environment
Organization	Stakeholder	digital communication
		competence
	Planning	handling
		business model
		target costs
		scheduling
		resource accessibility
		framework conditions
	Sustain-ability	life cycle assessment

Table A1. Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems
(continued)

Main feature	Secondary feature	Guiding questions
Organization (continued)	Social acceptance	ecology What is the social, ecological acceptance (negatively connoted technology, social movement, etc.) and what are the effects on the system or project?
		economy What is the social, economic acceptance (margin, business partners, working conditions, etc.) and what are the effects on the system or project?
	Market	compliance How is a rule-compliant (voluntary codes, standards, laws, etc.) implementation of the project ensured?
		competitive analysis Which competitor systems offer which modifications? How does the system differentiate itself from competitors' products?
		customer segment Which predefined customer needs are to be satisfied? How does the customer segment behave (buying behaviour, duration of use, etc.)?
		customer behaviour and needs Which system specifications (handling, distribution channels, services, etc.) are derived from customer needs and behaviour?
		prevailing market standards Which specifications (dimension, interfaces, construction method, etc.) are derived from the existing market?
		sales figures What sales figures are targeted in the segment and how do these influence product development (manufacturing processes, distribution, oversizing, etc.)?
		market analysis/benchmarking Which system specifications (basic requirements etc.) are derived from a market analysis?
Realization (production)	Purchasing	make-or-buy strategy What are the specifications for in-house and external production? Which system specifications result from the chosen make-or-buy strategy?
		A-supplier Which prioritized suppliers are intended for the system? What specifications (delivery time, quality, purchase quantities, discounts, etc.) resulted from the choice of supplier?
		local content What are the requirements (share in the overall value chain, international cost differences, customs duties, etc.) for local content?
		catalogue assemblies What specifications (interfaces, software, dimension, materials, operating environment, etc.) result from the use of catalogue assemblies?
		operational/strategic purchasing Which specifications (material, suppliers, purchase quantities, etc.) result from strategic purchasing?
		data exchange What restrictions (patents, secrecy, etc.) are imposed on the transfer of data between companies?
	Manufacturing	restrictions due to production sites Is the production site specified and what specifications (production process, transport routes, value-added stage, etc.) result from this?
		dimension Do the local means of production result in restrictions on dimensions (length, width, height, tooling, opening width of an injection moulding machine, data volume, storage space, circuit boards, smallest possible size, etc.)?
		manufacturing method Are there any specifications (injection moulding, milling, turning, casting, etc.) regarding the manufacturing method? Are manufacturing aspects taken into account from a technological and economic point of view?
		manufacturing equipment Which system specifications (injection-moulded, punched, machine-specific tolerances, etc.) result from locally available production equipment?

Table A1. Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems
(continued)

Main feature	Secondary feature	Guiding questions
Realization (production) (continued)	possible quality and tolerances	Are the production techniques for implementing the required quality and accuracy available and economical? Can the specifications for ensuring the required quality be met with the available measuring equipment?
	mounting instructions	Which mounting regulations (protective gas, clean room, sequence, etc.) must be observed?
	pre-assembly	To what extent should the system be pre-assembled? To what extent should the assembly be broken down (centralized, decentralized, single-stage, multi-stage, etc.)? Can all internal and external assembly operations be carried out easily and clearly?
	installation	To what extent (installation team, self-installation, etc.) should the installation be carried out in the operational environment?
	principle	Which specifications (workbench principle, workshop principle, construction site principle, island principle, etc.) of the system assembly are defined?
	foundation	To what extent (concrete, compaction, ballast, etc.) must the subsoil be prepared for the system?
	tools	Which tools (welding equipment, torque spanners, nuts, etc.) are prescribed for assembly up to commissioning?
	auxiliary materials	Which auxiliary materials (oil, lacquers, adhesives) are to be provided for the assembly?
	safety data sheets	To what extent are safety-relevant data sheets (hazardous substances, assembly instructions, etc.) to be prepared?
Transport	limitation by hoists	What specifications (weight force, volume, interfaces, centre of gravity, etc.) result from the existing hoists?
	means of transport	What are the specifications (EPAL dimensions, transport security, etc.) for the means of transport to be chosen (rail, truck, car, plane, etc.)?
	pathways	What are the specifications (maximum load-bearing capacity of bridges, maximum height of subways, obstacles, railway profile, etc.) for the route to be chosen?
	shipping method and -conditions	Have internal and external transport conditions and risks been checked and taken into account? To what extent is transport subject to certain specifications (packing, transport safety, shielding, security, toxicity, etc.)?
	delivery time	What are the effects and risks (delay in delivery time, skilled labour, etc.) of transport?
Controlling	measuring and testing possibilities	Are the necessary control measurements possible during and after production or at any other required time and arranged as such? Are appropriate measuring instruments available for the specified measured variables (accuracy, flatness, roughness, etc.)? Does the product design allow for testing?
	regulations	Which regulations (TÜV, ASME, DIN, ISO, etc.) must be taken into account?
	type of data transmission	Which specifications for data transfer (flashing, uploading, downloading, remote maintenance, etc.) is the system subject to?
Software deployment	frequency of updates	At what intervals should a software update be carried out?
	versioning	What software-related distinctions (licenses, new operating systems, etc.) are envisaged?

Table A1. Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems (continued)

Main feature	Secondary feature	Guiding questions
Maintenance	compatibility	Are previous products or products from an alternative manufacturer to be provided as spare parts?
	interval	To what predefined extent (time interval, as needed, by runtime, test duration, etc.) is maintenance to be carried out?
	replacement and repair; inspection	Can the measures required for maintenance, inspection, and repair be carried out and controlled in a safe manner?
	availability of components in the life cycle (spare parts strategy)	Over what period and to what extent are spare parts to be kept in stock?
	feature enhancement in the life cycle	How should system enhancements (licenses, modules, etc.) be implemented?
	diagnosis	In which predefined framework (remote maintenance, local, test run, etc.) should system diagnoses be carried out?
	cleaning	To what extent (clean room, flat surfaces, broom clean, etc.) are cleanings to be provided?
	location	What is the accessibility of the system and its elements in the operational environment?
	auxiliary materials	At what intervals and to what extent are auxiliary materials necessary for operation (lubricants, coolant, rubber elements, etc.) to be renewed?
Realization (production) (continued)	application and sales area	What is the intended application for the system? In which segments is the system distributed and used?
	location	What substances or circumstances (sulphur, sodium chloride, humidity, dripping, arctic) are found in the intended operating environment?
	commissioning	Should intuitive commissioning be possible, if necessary, with the help of the operating instructions? Does commissioning require trained personnel or special tools?
	comfort	What noises, vibrations, etc. occur during use or operation?
	service	What services (maintenance, training, etc.) are to be provided for the system?
	reliability	What operational reliability is required and how is it defined?
	availability	Can the availability of materials (special materials, rare earths, etc.) necessary for use be guaranteed?
Recycling	reuse	Is reuse of the product made possible/aspired? Are there requirements to rededicate individual components of the system to a new purpose at the end of their life cycle?
	recycling	Is recycling of the materials the aim? What are the possibilities (clear material separation, separation of toxic substances, material degradation, etc.) for recycling the materials used in the system in a new life cycle?
	disposal	How is the system disposed of (collection points, dismantling team, etc.) at the end of its life cycle? What requirements (politically oriented, recycling quotas, etc.) have to be taken into account?
	final disposal	Which substances (caesium-137, strontium-90, mercury, etc.) in the system can no longer be returned to the value-added process (landfilling, incineration, etc.)?

Table A1. Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems
(continued)

Main feature	Secondary feature	Guiding questions
Realization (production) (continued)	Recycling (continued)	harmful and hazardous substances
		recycling-critical substances
		accessibility
		solubility
	Geometry	dimensions
		installation space
		number
		arrangement
		connection
Structure	forces	weight
		load
		force direction and size
		force frequency
	heat	friction
		heat conduction
		thermal stress
	Mechanics	stability
		surface
		deformation
		strength
		stiffness

Table A1. Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems
(continued)

Main feature	Secondary feature	Guiding questions
Mechanics (continued)	kinematics	movement type/direction Which movements (translatory, rotatory, cyclical, reproducible, etc.) are implemented in the system?
		speed What speeds must be taken into account inside and outside the system? What effects (cooling, etc.) result from the speeds?
		acceleration What accelerations need to be considered inside and outside? Which elements are accelerated?
	kinetics	spring stiffness Are there specific spring stiffnesses to be considered in the system?
		change of movement How are velocity changes of moving masses in the system to be designed (damping, etc.)?
		vibrations Is the system subject to or causing vibrations (resonances, etc.) that lead to disturbances inside or outside the system?
Structure (continued)	Electrics/Electronics	nominal voltage Which electrical nominal voltages (electrical consumers, voltage source, etc.) must be taken into account?
		rated currents Which elements (electric motors, luminaire, etc.) require which rated currents?
		power supply fluctuations To what extent are power supply fluctuations to be taken into account?
		fuse Which fuse systems (political standards, user-related, emergency stop switch, RCD, etc.) are to be integrated into the system?
		shielding Which components of the system need to be shielded (electric or magnetic fields, radiation, copper tape loops, etc.)?
		filtering Is filtering/correction of the electrical signals (frequency, amplitude) necessary?
		electromagnetic compatibility (EMC) Which system-internal or -external induced disturbances (conducted disturbances, electric and magnetic fields, etc.) can occur?
		connection Which system-internal or -external connection options (SEV 1011:1998, SN EN 50075, heavy current, etc.) are available?
		wiring Which elements (electrical, electromechanical, etc.) are placed in relation to each other in the circuit? Is the interconnection of the system subject to restrictions (colour coding, arrangement, predefined purchased parts, etc.)?
		insulation Is the insulation (splash water, humidity, pressure, electrical conductivity, etc.) of the system subject to internal as well as external specifications?
	component availability	clearance and creepage distances Are there critical areas in the system (bottlenecks, conductive material, low dielectric strength, etc.) where voltage breakdown or arcing can occur?
		module regulations Can a defined (customer-specific, etc.) module order be guaranteed in the system?
		function groups Are modules (mechanical, electrical, optical, thermal, magnetic modules, sensors, etc.) in the system to be combined into control loops?
		integration Which specifications (function integration, data integration, business process integration, interface avoidance, etc.) for the integration of software technology should be taken into account?
	versioning	How does the versioning (version management, version number, etc.) of the system proceed?
Software	integration	Which specifications (function integration, data integration, business process integration, interface avoidance, etc.) for the integration of software technology should be taken into account?
	versioning	How does the versioning (version management, version number, etc.) of the system proceed?

Table A1. Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems
(continued)

Main feature	Secondary feature	Guiding questions
Structure (continued)	interfaces	Which data interfaces (data-oriented, functional, inter-process communication, program component, etc.) are to be considered internally and externally to the system? How should the software be structured (modular in a freemium business model, etc.)?
	updates	To what extent (firmware, screen updates, etc.) are updates to be kept? Which way (Internet, service staff, USB, Bluetooth etc.) do updates get into the system?
	hardware	What requirements (memory requirements, nominal voltage, computing power, etc.) are placed on the IT hardware (control unit, arithmetic unit, storage unit, etc.) of the system?
	testability	To what extent (software system, software module, software artefact, etc.) should testability (observability, insolubility, separation, understandability, heterogeneity, etc.) be ensured?
	operating modes	Which modes of operation (description, frequency, software, sources of supply, etc.) are implemented and how (transceiver, modem, interface, etc.)?
	development environment	Which development environment (PyCharm, Gambas, BlueJ, etc.) is to be considered internally and externally to the system?
	programming language	Which programming languages (C++, Python, Visual Basic, etc.) are to be chosen in the system-internal and -external context?
	open source	What are the requirements for the use or distribution of software or software modules?
	documentation	Which properties (functionality, generation of data, processing of data, etc.) of the system software should be documented?
	data backup	Which location (internal system, external server, backup, interval, etc.) is intended for data management?
Security	maintainability of the code	How is the maintainability (bug fixing, performance, attributes, etc.) of the software?
	real-time requirements	Which elements (process control technology, motor control, etc.) must be real-time capable?
	security	How secure (security level, data processing, risk potential, etc.) should the data to be managed be kept? What measures (cryptology, monitoring, authentication, Internet access, authorization, etc.) are to be taken to protect the data from unauthorized persons?
		Which persons are allowed to access the system and how?
	safety/operational safety	Which elements pose a danger, and can they be adapted in terms of design?
		How can people be protected from hazards that cannot be prevented (protective cage, laser barrier, covers, etc.)?
		How can hazards be clearly marked (signs, siren, position of marking, intuitively understandable, etc.)?
		How is a potential hazard to be assessed (occurrence, probability of occurrence, regulations, etc.)?
		What measures (redundancy, useful life, maintenance schedules, etc.) are pursued to ensure application-safe operation of the system?

Table A1. Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems
(continued)

Main feature	Secondary feature	Guiding questions	
Structure (continued)	Security (continued) safety/operational safety (continued)	occupational safety Is there a risk (human-related, ventilation, radiation protection, safety techniques, etc.) to the staff and how can it be mitigated?	
		environmental safety What environmental impacts (emissions, disposal, etc.) does the system create and how can these be mitigated (safety techniques, materials, etc.)?	
		risk assessment How can the factors influencing operational, occupational, and environmental safety be sufficiently taken into account?	
	Regulation	operation principles Have alternative logical and physical structures been analysed and evaluated? What disturbances are to be expected from the effect?	
		hardware What is the influence of internal disturbances (drift, hysteresis, components, friction effects, etc.) and how permissible are deviations?	
		structure Which structures (cascade control, single-loop control circuits, etc.) are to be considered in the system design?	
		algorithms How is the execution (dynamic, etc.) of the algorithm to be designed?	
		commissioning/parameterization What conditions (personnel, accessibility, tide, infrastructure, etc.) shall be taken into account during commissioning?	
	Ergonomics	human-machine interaction	value What is the intuitive value (weight, soft touch, cool-touch effect, colour impression, durability, etc.) of the system or individual elements?
			logical operation How is the individual operation designed (intuitive, explanatory, guidance, seminars, training, etc.)? How will the user group interact with the system (software, hardware, etc.) in which situation (stressful situation, everyday situation, etc.)?
			emissions Does the system cause critical emissions (shrinkage, radiation, odours, cybersickness, etc.)?
			collaborative work How do synergy effects (work facilitation, support, etc.) arise between the staff and the system?
			user experience For which user groups (seniors, children, young adults, education, etc.) is the system to be set up?
		display and controls	operation How do staff interact physically (dead man's switch, switches in line, touch display, verbally, tactilely, etc.) with the system?
			clarity Are the system's interaction objects clearly arranged (groups of similar functions, in order of operation, etc.)?
			lighting To what extent (operating elements, buttons, etc.) is the system to be illuminated?
			operating forces Are the operating forces (lever, push button, weight of the system etc.) of the system appropriately designed for the personnel (man, woman, diverse)? Are loads, stresses, and fatigue taken into account?
	shape design	coding via perception Does the system transmit signals to staff via perception (tactile, visual, auditory, siren, light, etc.)?	
		anthropometric measures For which groups of people (weight, working height, body size, etc.) should the system be designed?	
		tactile coding Should tactile coding be described via the form (emergency switch, Braille, etc.)?	
		haptics Are elements of the system to be provided with a defined surface (lacquer, soft touch, antibacterial, electroplating, etc.)?	

Table A1. Guiding questions for the main feature list for mechatronic and cyber-physical systems
(continued)

Main feature	Secondary feature	Guiding questions
Structure (continued) Industrial Design	importance	What is the significance (target group, brand, etc.) of possible design specifications or designs of predecessor products?
	aesthetic function	How is the aesthetic function to be integrated into the product (sense of sight, sense of touch, sense of taste, sense of smell, sense of temperature, plump, slim, elegant, etc.)?
	visualization function	To what extent should surfaces be marked for targeted interaction (roughness for gripping, symbols to explain functions, contrasts, etc.) with staff?
	symbol function	Which symbolic functions (temporal innovation, status symbol, etc.) should be integrated into the system?
	product recognition	How is the recognition value (shape, colour, design, etc.) of the system ensured?
	colouring	What should be considered when choosing the colour? According to which criteria (customer, clean room, medical, etc.) is the colour scheme implemented?
	target group	Is the design to be aimed specifically at a customer segment (sinus milieu)?

Schrifttum / Bibliography

Technische Regeln / Technical rules

DIN 69901-5:2009-01 Projektmanagement; Projektmanagementsysteme; Teil 1: Grundlagen (Project management; Project management systems; Part 5: Concepts). Berlin: Beuth Verlag

IEEE 610.12*ANSI 610.12:1990 Glossary of software engineering terminology (Fachwörterbuch der Terminologie der Softwaretechnik). Piscataway Township, NJ: IEEE Standards Association. Zurückgezogen / Withdrawn 2010, Nachfolgedokument / Following document ISO/IEC/IEEE 24765

ISO/IEC Guide 2:2004-11 Standardization and related activities; General vocabulary (Normung und damit zusammenhängende Tätigkeiten; Allgemeine Begriffe). Berlin: Beuth Verlag

ISO/IEC/IEEE 24765:2017-09 System und Software-Engineering; Begriffe (Systems and software engineering; Vocabulary). Piscataway Township, NJ: IEEE Standards Association

SEV 1011:2009-12 Stecker und Steckdosen für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke (Plugs and socket-outlets for household and similar purposes). Fehraltorf: Electrosuisse

SN EN 50075:1990-00 Flache, nichtwiederaanschließbare, zweipolige Stecker, 2,5 A 250 V, mit Leitung, für die Verbindung von Klasse II-Geräten für Haushalt und ähnliche Zwecke (Flat non-reversible two-pole plugs, 2,5 A 250 V, with cord, for the connection of class II-equipment for household and similar purposes). Fehraltorf: Electrosuisse

VDI 1000:2021-02 VDI-Richtlinienarbeit; Grundsätze und Anleitungen (VDI Standardisation Work; Principles and procedures). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2209:2009-03 3-D-Produktmodellierung; Technische und organisatorische Voraussetzungen; Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen; Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis (3D product modelling; Technical and organizational requirements; Procedures, tools, and applications; Cost-effective practical use). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2220:1980-05 Produktplanung; Ablauf, Begriffe und Organisation (Product planning; flow, terms and organization). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2221 Entwicklung technischer Produkte und Systeme (Design of technical products and systems). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2222 Konstruktionsmethodik (Design engineering methodics). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2223:2004-01 Methodisches Entwerfen technischer Produkte (Systematic embodiment design of technical products). Berlin: Beuth Verlag

VDI-MT 2807:2019-01 Teamarbeit; Anwendung in Wertanalyse-/Value-Management-Projekten (Teamwork; Application in value analysis/value management projects). Berlin: Beuth Verlag

Literatur / Literature

- [1] Roddecker, W.: Einführung in die Mechatronik. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019
- [2] Haberfellner, R.: Systems Engineering. Orell Füssli, 2012
- [3] Pohl, K.; Rupp, C.: Requirements engineering fundamentals. Rocky Nook, 2015
- [4] Walden, D.D.; Roedler, G.J.; Forsberg, K.; Hamelin, R.D.; Shortell, T.M.: Systems engineering handbook. Wiley, 2015
- [5] Stark, R.; Thoben, K.-D.; Gerhard, D.; Hick, H.; Kirchner, E.; Anderl, R.; Wartzack, S.; Krause, F.-L.; Gräßler, I.; Pottebaum, J.; Schleich, B.; Stelzer, R.; Hick, H.K.; Klein, P.K.; Saske, B.K.; Czwick, C.; Gogineni, S.; Klimmeck, L.; Bajzek, M.; Jacobs, G.; Berroth, J.; Zimmermann, T.; Kranabit, P.; Göckel, N.: WiGeP Positionspapier – Digitaler Zwilling. 2020
- [6] Lingens, B.; Gassmann, O.: Das Ende des Branchendenkens. In: Die Volkswirtschaft, 2018

- [7] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Hanser, 2013
- [8] Mattmann, I.; Gramlich, S.; Kloberdanz, H.: Mapping requirements of product properties: The mapping model. In: Design Society (ed.): Proceedings of the DESIGN 2016, 14th International Design Conference, 2016, S. 33–44
- [9] Osterwalder, A.; Pigneur, Y.; Clark, T.: Business model generation. Wiley, 2010
- [10] Gräßler, I.; Dattner, M.; Bothen, M.: Main Feature List as core success criteria of organizing Requirements Elicitation. In: R&D Management Conference 2018, 2018, S. 1–16
- [11] Bender, B.; Gericke, K.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer, 2021
- [12] Gräßler, I.: Competitive Engineering in the Age of Industry 4.0 and Beyond. In: Proceedings of TMCE. Las Palmas de Gran Canaria, 2018
- [13] Baum, G.: Innovationen als Basis der nächsten Industrievolution. In: Sendler, U. (Hrsg.): Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013
- [14] Gabler Wirtschaftslexikon. Springer Gabler, 2019
- [15] Isermann, R.: mechatronische Systeme. Springer, 2008
- [16] International Council on Systems Engineering: Systems Engineering Vision 2020. INCOSE, 2007
- [17] Eigner, M.: System Lifecycle Management. Springer Vieweg, 2021
- [18] Vajna, S.; Weber, C.; Zeman, K.; Hehenberger, P.; Gerhard, D.; Wartzack, S.: CAx für Ingenieure. Springer Vieweg, 2018
- [19] Müller, M.; Hörmann, K.; Dittmann, L.; Zimmer, J.: Automotive SPICE® in der Praxis. dpunkt.verlag, 2016
- [20] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Springer, 2007
- [21] VDI: Statusreport Industrie 4.0. VDI Verlag, 2019
- [22] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Springer, 2011
- [23] Eigner, M.; Gilz, T.; Zafirov, R.: Proposal for Functional Product Description as Part of a PLM Solution in Interdisciplinary Product Development. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the DESIGN 2012, 2012, S. 1667–1676
- [24] Gräßler, I.: Umsetzungsorientierte Synthese mechatronischer Referenzmodelle. In: Konferenzband der VDI Mechatronik, 2015, S. 167–172
- [25] Daigl, M.; Glunz, R.: ISO 29119 – Die Softwaretest-Normen verstehen und anwenden. dpunkt.verlag, 2016
- [26] Gräßler, I.; Hentze, J.; Bruckmann, T.: V-Models for Interdisciplinary Systems Engineering. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the DESIGN 2018, 15th International Design Conference, 2018, S. 747–756
- [27] Gräßler, I.; Hentze, J.; Yang, X.: Eleven Potentials for Mechatronic V-Model. In: Villmer, F.-J.; Padoaao, E. (eds.): Production Engineering and Management, 2016, S. 257–268
- [28] Gräßler, I.; Hentze, J.: Enriching Mechatronic V-Model by Aspects of Systems Engineering. In: Araujo, M.S. (Hrsg.): Smart Structures and Materials, 2015, S. 80–86
- [29] Harashima, F.; Tomizuka, M.; Fukuda, T.: Mechatronics – What Is It, Why, and How? In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Jg. 1, Nr. 1, 1996, S. 1–4
- [30] Gräßler, I.: Kundenindividuelle Massenproduktion. Berlin, Heidelberg, New York u. a.: Springer; Berlin, Heidelberg: Springer, 2004
- [31] Knöchelmann, M.; Ley, P.-P.; Kloppenburg, G.; Mozgová, J.; Lachmayer, R.: Methodische Entwicklung eines optomechatronischen Systems am Beispiel eines hochadaptiven Fahrzeugscheinwerfers. In: Fachtagung Mechatronik 2019

- [32] Czichos, H. (Hrsg.): Mechatronik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2008
- [33] Vajna, S. (ed.): Integrated Design Engineering. Springer Vieweg, 2020
- [34] Wallaschek, J.: Modellierung und Simulation als Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeiten mechatronischer Produkte. In: VDI (Hrsg.): VDI-Berichte, 1995, S. 35–50
- [35] Acatech: Cyber-Physical Systems. Springer, 2011
- [36] Gill, H.: Cyber-Physical Systems. NSF, 2006
- [37] Broy, M.: Cyber-Physical Systems. Springer-Verlag, 2010
- [38] Wang, L.; Wang, G.: Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0. In: International Journal of Engineering and Manufacturing, Jg. 6, Nr. 4, 2016, S. 1–8
- [39] Schoenthaler, F.; Augenstein, D.; Karle, T.: Design and Governance of Collaborative Business Processes in Industry 4.0. In: Proceedings of the Workshop on Crossorganizational and Cross-company BPM (XOC-BPM), 2015
- [40] Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H.-A.: A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. In: Manufacturing Letters, Jg. 3, 2015, S. 18–23
- [41] Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihn, W.; Ueda, K.: Cyber-physical systems in manufacturing. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Jg. 65, Nr. 2, 2016, S. 621–641
- [42] Graessler, I.; Hentze, J.: The new V-Model of VDI 2206 and its validation. In: at – Automatisierungstechnik, Jg. 68, Nr. 5, 2020, S. 312–324
- [43] Lee, E. A.: Cyber Physical Systems. In: 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2008, S. 363–369
- [44] Bauernhansl, T.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Springer Vieweg, 2014
- [45] Gräßler, I.; Pöhler, A.; Hentze, J.: Decoupling of Product and Production Development in Flexible Production Environments. In: 27th CIRP Design Conference, 2017, S. 548–553
- [46] Gräßler, I.; Pottebaum, J.; Taplick, P.; Roesmann, D.; Preuß, D.: Unterstützung des Lernens für kritische Situationen: Potenzial von Augmented Reality für die Instandsetzung auf See. In: Freiherr von Lukas, U. (Hrsg.): Go-3D 2019, Fraunhofer Verlag, 2019, S. 45–57
- [47] acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: Smart Service Welt. Acatech, 2014
- [48] Boehm, B. W.: Guidelines for Verifying and Validating Software Requirements and Design Specifications. In: Samet, P. A. (Hrsg.): Euro IFIP 79, North Holland, 1979, S. 711–719
- [49] Bröhl, A.-P.: Das V-Modell. Oldenbourg, 1995
- [50] Bender, K.: Embedded Systems. Springer, 2005
- [51] Anderl, R.; Nattermann, R.; Rollmann, T.: Das W-Modell – Systems Engineering in der Entwicklung aktiver Systeme. Technische Universität Darmstadt, 2012
- [52] SE Handbook Working Group (INCOSE): Systems Engineering Handbook – A Guide for System Life Cycle Processes And Activities. INCOSE, 2011
- [53] Beier, G.; Rothenburg, U.; Woll, R.; Stark, R.: Modellbausiertes Systems Engineering – Durchgängige Entwicklung mit erlebbaren Prototypen. Fraunhofer IPK, 2012
- [54] U.S. Department of Transportation: Systems Engineering Guidebook for Intelligent Transportation Systems. U.S. Department of Transportation, 2009
- [55] Eigner, M.; Dickopf, T.; Apostolov, H. (eds.): System Lifecycle Management – An Approach for Developing Cybertronic Systems in Consideration of Sustainability Aspects. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017
- [56] Ebert, C.: Systematisches Requirements Engineering. dpunkt-Verlag, 2012
- [57] Gräßler, I.; Haas, V.; Suchowerskyj, W.: Innovation Based on Applying Design Methodology. In: Horváth, I.; Rusák, Z.; Albers, A.; Behrendt, M. (eds.): TMCE 2012, Faculty of Industrial Design Engineering Delft University of Technology, 2012, S. 37–43
- [58] Cooper, R.G.: Stage-gate systems. In: Business Horizons, Jg. 33, Nr. 3, 1990, S. 44–54
- [59] Gräßler, I.; Hentze, J.; Pöhler, A.: Self-organizing production systems: Implications for product design; Self-organizing production systems. In: 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2018, S. 546–550
- [60] Weilkiens, T.: Systems Engineering mit SysML/UML. dpunkt, 2014
- [61] Stark, R.; Damerau, T.: Digital Twin. In: Chatti, S.; Tolio, T. (eds.): International Academy for Production Engineering. Springer, 2019
- [62] Friedenthal, S.; Moore, A.; Steiner, R.: A practical guide to SysML. Elsevier; Morgan Kaufmann, 2015
- [63] Blumör, A.; Pregitzer, G.; Bothen, M.: Werkzeuge für die Entwicklung mechatronischer Systeme mit Methoden des MBSE. In: Tag des Systems Engineering – Paderborn, 8.–10. November 2017. Carl Hanser Verlag, 2017, S. 193–202
- [64] Pohl, K.; Hönniger, H.; Achatz, R.; Broy, M.: Model-Based Engineering of Embedded Systems. Berlin, Heidelberg, Springer, 2012
- [65] Wynn, D. C., Caldwell, N. H. M.; Clarkson, P. J.: Can Change Prediction Help Prioritise Redesign Work in Future Engineering Systems?
- [66] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer, 1977
- [67] Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Springer, 2013

Downloads

Kostenloser Download der Grafik zum V-Modell:
<https://www.vdi.de/richtlinien/programme-zu-vdi-richtlinien/vdi-2206> (abgerufen am / accessed on 26. August 2021)

Benennungsindex

Anmerkung: Bevorzugte Benennungen sind fett gesetzt.

Benennung	Seite	Benennung	Seite
A/B/C/D-Muster	3	Kontrollpunkt	5
Aktor	3	MBSE (Model-based Systems Engineering)	6
Analyse	3	mathematisches Modell	6
Anforderung	3	mechatronische Systeme	6
Anforderungsentwicklung	3	Methodik	6
Anforderungserhebung	3	Model-based Systems Engineering	6
Anforderungsmanagement	4	Modell	6
CPS (cyber-physisches System)	4	Modellierung	6
cyber-physisches System	4	physikalisches Modell	6
Dekomposition	4	Requirements Engineering (Anforderungsentwicklung)	3
digitaler Zwilling	4	Sensor	7
Ecosystem	4	SiL (Software-in-the-Loop)	7
Eigenschaft	4	Software-in-the-Loop	7
Eigenschaftabsicherung	4	Spezifikation	7
Geschäftsmodell	5	Stakeholder	7
Hardware-in-the-Loop	5	System	7
Hauptmerkmalliste	5	Systemarchitektur	7
HiL (Hardware-in-the-Loop)	5	Systems Engineering	7
holistischer Produktlebenszyklus	5	Validierung	7
Integration	5	Verifikation	8
Internet der Dinge und Dienste	5		

Term index

Note: Preferred terms are written in bold.

Term	Page	Term	Page
A/B/C/D specimen	3	methodology	6
actuator	3	model	6
analysis	3	model-based systems engineering	6
assurance of properties	4	modelling	6
business model	5	physical model	6
checkpoint	5	property	4
CPS (cyber-physical system)	4	requirement	3
cyber-physical system	4	requirements elicitation	3
decomposition	4	requirements engineering	3
digital twin	4	requirements management	4
ecosystem	4	sensor	7
hardware-in-the-loop	5	SiL (software-in-the-loop)	7
HiL (hardware-in-the-loop)	5	software-in-the-loop	7
holistic product life cycle	5	specification	7
integration	5	stakeholder	7
Internet of Things and Services	5	system architecture	7
main-feature list	5	system	7
mathematical model	6	systems engineering	7
MBSE (model-based systems engineering)	6	validation	7
mechatronic system	6	verification	8