

**Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken
für die visuelle Analyse fortgeschrittener
mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen**

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Inform. Helene Waßmann
aus *Wannowka*

Tag des Kolloquiums: 20. Dezember 2012
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler

Geleitwort

Das übergeordnete Ziel des von mir vertretenden Fachgebiets Produktentstehung ist die Steigerung der Innovationskraft von Industrieunternehmen. Ein Schwerpunkt der Arbeiten ist das Virtual Prototyping. Die zunehmende Informations- und Kommunikationstechnik in Erzeugnissen des modernen Maschinenbaus steigert deren Komplexität. Ziel ist, Entwicklern und Entwicklerinnen das Verständnis mechatronischer Systeme mittels Simulation und interaktiver visueller Analyse zu erleichtern.

Virtuelle Prototypen ermöglichen die frühzeitige und ganzheitliche Erprobung von in Entwicklung befindlichen mechatronischen Systemen. Insbesondere trägt die Technologie Virtual Reality (VR) als Mensch-Maschine-Schnittstelle dazu bei, Virtuelle Prototypen erlebbar zu machen. Aspekte, wie Gestalt, Kinematik oder Dynamik können mittlerweile sehr gut analysiert werden; für die visuelle Analyse komplexer Abläufe der Informationsverarbeitung in mechatronischen Produkten existieren noch keine etablierten Verfahren. Ferner mangelt es an Leitfäden, die eine strukturierte Entwicklung solcher Verfahren gewährleisten.

Frau Waßmann hat eine Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen entwickelt. Für die Systematik wurden typische Analyseaufgaben bei der Entwicklung mechatronischer Systeme, wie die Analyse von Wirkzusammenhängen zwischen verschiedenen Systemkomponenten, identifiziert und beschrieben. Aus den Analyseaufgaben kann ein Entwickler mit Hilfe der Systematik die zu erfüllenden Visualisierungsaufgaben ableiten. Abschließend werden für diese Visualisierungsaufgaben geeignete Visualisierungstechniken für den Einsatz in VR-Anwendungen vorgeschlagen.

Mit ihrer Dissertation leistet Frau Waßmann einen wertvollen Beitrag zur Steigerung der Akzeptanz des Virtual Prototypings von mechatronischen Systemen.

Paderborn, im Februar 2013

Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier

Zusammenfassung

Virtuelle Prototypen unterstützen dabei, fortgeschrittene mechatronische Systeme rechnerintern abzubilden, zu analysieren und zu verstehen. Um die visuelle Analyse virtueller Prototypen zu begünstigen, werden Visualisierungstechniken in Virtual Reality (VR)-Anwendungen eingesetzt. Die Entwicklung solcher Techniken ist heutzutage ungenügend systematisiert und dokumentiert. Daher wird in dieser Arbeit eine *Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen* erarbeitet. Basiskonzept der Systematik ist die Darstellung des zu entwickelnden mechatronischen Systems in einer virtuellen Umgebung auf verschiedenen Strukturierungsebenen. Zur Analyse dieser Ebenen werden systemunabhängige Primär-Visualisierungstechniken sowie systemabhängige Sekundär-Visualisierungstechniken vorgeschlagen. Die Systematik umfasst drei Hauptkomponenten: Bestandteile zur Spezifikation von Visualisierungsaufgaben und -techniken, ein Vorgehensmodell zur Anwendung dieser Bestandteile sowie eine VR-Anwendung zur Analyse mechatronischer Systeme.

Die Systematik wird anhand von Validierungsbeispielen des Schienenverkehrssystems RailCab erarbeitet und validiert. Die Anwendbarkeit der Visualisierungstechniken wird anhand einer VR-Anwendung nachgewiesen.

Summary

Virtual prototypes facilitate the development and understanding of advanced mechatronic systems, including the modeling, simulation and analysis of a system. Particularly the visual analysis of virtual prototypes can be enhanced by visualization techniques integrated in virtual reality (VR)-applications. However, there are less documentation and approaches for a systematic design of such visualization techniques for mechatronic systems. Therefore in this thesis a *systematics-based design of visualization techniques for the visual analysis of advanced mechatronic systems in VR-application* is acquired. Basic idea of the design framework is the presentation of a mechatronic system on several structuring levels within a virtual environment. For analysis of these levels there are proposed primary visualization techniques, for system-independent analysis, as secondary visualization techniques for system-dependent analysis. Three main components are part of the design framework: multiple elements for the specification of visualization tasks as well as visualization techniques, a well-structured procedure model and a VR-application for the analysis of mechatronic systems.

The design framework is developed and validated by several examples of the rail system RailCab. A prototypically implemented VR-application shows the applicability of the visualization techniques.

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [GBR+08] GAUSEMEIER, J.; BÖCKER, J.; RADKOWSKI, R.; WABMANN, H.; HENKE, C.: Anwendung von Augmented Reality zur Visuellen Analyse einer Konvoi-Simulation am Beispiel der Neuen Bahntechnik Paderborn. In: Hauser, H.; Strassburger, S.; Theisel, H. (Eds.): Simulation und Visualisierung 2008, Proceedings of the 2008 Simulation and Visualization Conference, Feb. 28-29 2008, Magdeburg, 2008
- [RW08] RADKOWSKI, R.; WABMANN, H.: Echtzeit-Visualisierung eines sturzvariablen Fahrwerks zur Analyse des Fahrverhaltens. In: Gausemeier, J.; Grafe, M.: (Hrsg.) 7. Paderborner Workshop, Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 5.-6. Juni 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, S. 43-60, Paderborn, 2008
- [GRW09] GAUSEMEIER, J.; RADKOWSKI, R.; WABMANN, H.: Virtuelle und erweiterte Realität zur Analyse komplexer mechatronischer Systeme. ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 11/2009, Hanser Verlag, München, S. 1024-1030, 2009
- [RW10] RADKOWSKI, R.; WABMANN, H.: Software-Agent Supported Virtual Experimental Environment for Virtual Prototypes of Mechatronic Systems. In: Proceedings of the ASME World Conference on Innovative Virtual Reality (WINVR) 2010, May 12-14 2010, Ames, Iowa, USA, 2010
- [WK11] WABMANN, H.; KREFT, S.: Virtual Prototyping – Ingenieure entwickeln mit Virtueller Realität. In: Marco Hemmerling (Hrsg.): Augmented Reality – Mensch, Raum und Virtualität, PerceptionLab1, Wilhelm Fink Verlag, München, 2011
- [HWK+12] HASSAN B.; WABMANN, H.; KLAAS, A.; KEBLER, J.H.: Cascaded Heterogeneous Simulations for Analysis of Mechatronic Systems in Large Scale Transportation Scenarios. In: Proceedings of the 2012 Spring Simulation Multi-Conference, 26-29 March 2012, Orlando, FL, USA, Spring Simulation Multiconference Books: Emerging M&S Applications in Industry & Academia Symposium (EAIA), 2012
- [WR12] WABMANN, H., RADKOWSKI, R.: Knowledge-based Zooming Technique for the Interactive Analysis of Mechatronic Systems. In: Proceedings of IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES) 2012, pp. 109-114, 13.-15. June 2012, Lisbon, Portugal, 2012

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung	5
1.1 Problematik.....	5
1.2 Zielsetzung	8
1.3 Vorgehensweise	8
2 Problembeschreibung und -analyse.....	11
2.1 Begriffsdefinitionen und Einordnung der Arbeit	11
2.2 Fortgeschrittene mechatronische Systeme.....	13
2.2.1 Mechatronische Systeme	13
2.2.2 Grundaufbau und klassische Regelung	14
2.2.3 Makrostruktur mechatronischer Systeme	16
2.2.4 Adaptive Systeme	17
2.2.5 Fortgeschrittene mechatronische Systeme	18
2.2.6 Anwendungsbeispiel RailCab.....	20
2.3 Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme	20
2.3.1 Aufgaben der Informationsverarbeitung	21
2.3.2 Strukturierung der Informationsverarbeitung	22
2.3.3 Verfahren der Künstlichen Intelligenz.....	24
2.4 Analyse mechatronischer Systeme am virtuellen Prototyp	28
2.4.1 Virtueller Prototyp.....	28
2.4.2 Visuelle Analyse am digitalen Mock-up und virtuellen Prototyp	31
2.4.3 Analyse der Informationsverarbeitung.....	35
2.5 Analyse mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen.....	38
2.5.1 Virtual Reality (VR).....	38
2.5.2 Visuelle Analyse am virtuellen Prototyp in VR.....	42
2.6 Wissenschaftliche Visualisierung und Informationsvisualisierung	46
2.6.1 Grundlagen Visualisierung	46
2.6.2 Spezifikation des Visualisierungsproblems	50
2.6.2.1 Analyseaufgabe	51
2.6.2.2 Visualisierungsaufgabe	52
2.6.2.3 Daten	53
2.6.2.4 Visualisierungstechnik	54
2.6.2.5 Präsentation der Visualisierungstechnik	56
2.6.3 Entwicklung effektiver Visualisierungen	56
2.7 Problemanalyse	57
2.8 Anforderungen	60

3	Stand der Forschung.....	63
3.1	CarComViz – Informationsvisualisierung zur Untersuchung der Kommunikationsprozesse in Automobilen nach SEDLMAIR et al.....	63
3.2	VR-Anwendung zur Überwachung und Steuerung von Drohnen nach BATKIEWICZ et al.	65
3.3	Visualisierung von Optimierungsverfahren zur Wegeplanung nach Stöcklein et al.....	66
3.4	HANNAH – 3D-Visualisierungssystem zur Analyse von Prozessdaten in Kläranlagen nach EINSFELD et al.	68
3.5	Visualisierung von Zuständen in elektrischen Energiesystemen nach LIPIEC et al.....	69
3.6	Integration von Funktionen technischer Systeme in VR und ihre Visualisierung nach KRAPPE.....	70
3.7	Klassifizierung von Visualisierungsverfahren für große Netze in der Logistik nach BERNHARD et al.....	72
3.8	Bewertung des Stands der Forschung und Handlungsbedarf	74
4	Bestandteile zur Entwicklung von Visualisierungstechniken	79
4.1	Basiskonzept – Darstellung mechatronischer Strukturierungsebenen in VR-Anwendungen.....	80
4.2	Validierungsbeispiel RailCab	83
4.2.1	Logistiksimulation.....	84
4.2.2	Konvoiregelung und Kommunikation.....	87
4.2.3	Simulation der aktiven Spurführung am sturzvariablen Fahrwerk	88
4.3	Analyseaufgaben mechatronischer Systeme.....	91
4.3.1	Zusammenfassung der Analyseaufgaben für fortgeschrittene mechatronische Systeme	91
4.3.2	Einordnung der Analyseaufgaben in Ebenen der Makrostruktur.....	95
4.4	Visualisierungsaufgaben mechatronischer Systeme	96
4.4.1	Taxonomie an Visualisierungsaufgaben	97
4.4.2	Visualisierungsaufgaben für Wirkbeziehungen / Flüsse.....	100
4.4.3	Visualisierungsaufgaben der Informationsverarbeitung	100
4.4.4	Klassen-übergreifende Visualisierungsaufgaben	102
4.4.5	Visualisierungs-Zweck	103
4.5	Daten mechatronischer Systeme.....	104
4.6	Visualisierungstechniken mechatronischer Systeme	106
4.6.1	Primär-Visualisierungstechnik: VR-Kontinuum.....	108
4.6.2	Primär-Visualisierungstechnik: Visuelles Netzwerk.....	111
4.6.3	Primär-Visualisierungstechnik: Farbkarte.....	114

4.6.4	Primär-Visualisierungstechnik: Semantisches Zoomen	116
4.6.5	Primär-Visualisierungstechnik: Fokus und Kontext – Datenlinse	119
4.6.6	Primär-Visualisierungstechniken: Struktur- und Verhaltensdiagramme	121
4.6.7	Enthaltene Sekundär-Visualisierungstechniken innerhalb der Primär-Visualisierungstechniken	125
4.6.8	Überblick: Sekundär-Visualisierungstechniken	127
4.7	Steckbrief zur Beschreibung von Visualisierungstechniken.....	128
4.8	Bewertung von Visualisierungstechniken	132
4.9	Werkzeugunterstützung: Architektur der VR-Anwendung.....	132
5	Vorgehensmodell zur Entwicklung von Visualisierungstechniken	137
5.1	Phase 1: Analyse des Systems	138
5.1.1	Entwicklungsaufgabe analysieren und dokumentieren	139
5.1.2	Analyseaufgabe definieren und dokumentieren	139
5.1.3	System-Topologie und -Verhalten dokumentieren und spezifizieren	140
5.2	Phase 2: Spezifikation der Visualisierungsaufgabe	142
5.2.1	Visualisierungsaufgabe festlegen und dokumentieren.....	143
5.2.2	Daten des mechatronischen Systems spezifizieren und dokumentieren	145
5.3	Phase 3: Auswahl von Visualisierungstechniken.....	145
5.3.1	Visualisierungstechnik auswählen und dokumentieren.....	146
5.3.2	Präsentation der Visualisierungstechnik in VR festlegen	148
5.4	Phase 4: Implementierung und Integration der Visualisierungs- technik in eine VR-Anwendung.....	148
5.4.1	Struktur des virtuellen Prototypen und der Umgebung in VR abbilden.....	149
5.4.2	Verhalten des virtuellen Prototypen in VR abbilden	149
5.4.3	Verhalten der Informationsverarbeitung abbilden.....	150
5.4.4	Virtuellen Prototypen mit der Visualisierungstechnik verknüpfen	151
5.5	Phase 5: Analyse des Systemverhaltens.....	152
6	Prototypische Umsetzung und Validierung	155
6.1	Umsetzung der Primär-Visualisierungstechniken	155
6.1.1	Visuelles Netzwerk.....	155
6.1.2	Farbkarte.....	157
6.1.3	Semantisches Zoomen	158
6.1.4	Fokus und Kontext – Datenlinse	164

6.2	Umsetzung der Validierungsbeispiele.....	165
6.2.1	Logistiksimulation.....	166
6.2.2	Sturzvariables Fahrwerk	170
6.3	Visuelle Analyse auf einer hochauflösenden Großprojektion.....	174
6.4	Bewertung der Arbeit an den Anforderungen	176
7	Zusammenfassung und Ausblick	179

Anhang

A1	Ergänzungen zur Problemanalyse	A-1
A1.1	Charakterisierung von Daten.....	A-1
A1.2	Visuelle Variablen und Visuelle Elemente	A-7
A1.3	Designregeln, Gestaltungsprinzipien und Wahrnehmungsregeln.....	A-8
A1.4	Platzierung von Visualisierungstechniken im 3D-Raum	A-12
A2	Ergänzungen zur Konzeption.....	A-15
A2.1	Komponenten des RailCab-Systems	A-15
A2.2	Analyseaufgaben des RailCab-Systems	A-15
A2.2.1	Analyseaufgaben der Logistiksimulation.....	A-15
A2.2.2	Analyseaufgaben der Konvoiregelung und Kommunikation	A-18
A2.2.3	Analyseaufgaben des Sturzvariablen Fahrwerks.....	A-21
A2.3	Simulationsdaten des RailCab-Systems	A-23
A2.3.1	Simulationsdaten der Logistik-Simulation	A-23
A2.3.2	Simulationsdaten der Konvoiregelung und Kommunikation..	A-26
A2.3.3	Simulationsdaten des Sturzvariablen Fahrwerks.....	A-28
A2.4	Visualisierungsaufgaben	A-32
A2.4.1	Zuordnung von Analyseaufgaben zu Visualisierungsaufgaben	A-32
A2.4.2	Auflistung verwendeter Visualisierungstechniken und ihrer Ausprägungen.....	A-33
A2.4.3	Auswahlmatrix – Geeignete Visualisierungstechniken für Visualisierungsaufgaben	A-35
A2.5	Visualisierungstechniken	A-38
A2.5.1	Visualisierungstechniken für Wirkbeziehungen	A-38
A2.5.2	Steckbriefe der Primär-Visualisierungstechniken	A-39
A2.5.3	Steckbriefe der Sekundär-Visualisierungstechniken.....	A-40
A2.5.4	Steckbriefe der Logistiksimulation	A-40
A2.5.5	Steckbriefe des Sturzvariablen Fahrwerks	A-40

1 Einleitung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts RailCab der Forschungsinitiative Neue Bahntechnik Paderborn. Ziel des Projekts ist ein neuartiges Schienenverkehrssystem mit autonom fahrenden Einzelfahrzeugen – sogenannte RailCabs –, die zielrein transportieren, sich vollautomatisch zu berührungslosen Konvois zusammenschließen und ihr Verhalten an neue Umgebungsbedingungen anpassen.

Gegenstand der Arbeit sind in Entwicklung befindliche fortgeschrittene mechatronische Systeme. Die Arbeit beschreibt eine Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken zur interaktiven visuellen Analyse derartiger Systeme mit Hilfe von Virtual Reality (VR)-Anwendungen. Der Fokus liegt dabei auf den in der Informationsverarbeitung ablaufenden Verfahren, die die Leistungsfähigkeit mechatronischer Systeme maßgeblich bestimmen.

1.1 Problematik

Erfolgversprechende Produktinnovationen des modernen Maschinenbaus beruhen zunehmend auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik. Dafür steht der Begriff Mechatronik [GSA+11]. Ein mechatronisches System besteht aus vier grundlegenden Elementen: dem Grundsystem, der Sensorik, der Aktorik und der Informationsverarbeitung. Ziel der Mechatronik ist ein verbessertes Verhalten eines mechanischen Systems; häufig wird der Begriff fortgeschrittenes mechatronisches System verwendet. Fortgeschrittene mechatronische Systeme erkennen selbst die Anwendungssituation und bestimmen zur Laufzeit eigenständig ihre Optimierungsziele, um ein hinsichtlich der Situation optimales Verhalten zu erzielen. Treiber für solche Systeme ist die Informationsverarbeitung [ADG+09], [Dum11].

Zur Entwicklung fortgeschrittener mechatronischer Systeme werden virtuelle Prototypen eingesetzt. Der virtuelle Prototyp ist eine rechnerinterne Repräsentation eines realen Prototypen. Dieser besteht aus einem Digitalen Mock-up (DMU), der die Gestalt repräsentiert, und weiteren Aspekten, wie der Kinematik, der Dynamik, der Festigkeit sowie der Informationsverarbeitung. Jeder Aspekt wird rechnerintern durch ein Aspektmodell repräsentiert [GEK01].

Eine Herausforderung ist die effiziente Integration komplexer Verfahren in der Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Dies sind i.d.R. Verfahren aus dem Bereich Künstliche Intelligenz (kurz: KI-Verfahren). Solche Verfahren sind zum Beispiel die Prädikatenlogik, Fallbasiertes Schließen, Planung oder künstliche neuronale Netze [BK08], [RN07], [ADG+09]. Mit ihrer Hilfe wird Wissen repräsentiert, gespeichert, verarbeitet und wiederverwendet. Während der Entwicklung müssen die Verfahren fortwährend analysiert und angepasst werden. Werkzeuge und Methoden, die

die Analyse der KI-Verfahren am virtuellen Prototypen unterstützen, sind für die Entwicklung essentiell.

Die Analyse des in Entwicklung befindlichen mechatronischen Systems erfolgt vorwiegend durch Simulation des virtuellen Prototypen. Während der Simulation fallen Daten an, die das Verhalten repräsentieren, wie Zustandswechsel, Regel- und Stellgrößen sowie Systemgrößen (Kraft, Spannung, usw.). Die Datenmengen sind häufig immens und liegen z.B. in Zahlenreihen oder Tabellen vor; Mit dem bloßen Auge sind sie nur schwer erfass- und interpretierbar. Zur Analyse solch abstrakter Daten werden bislang konventionelle Visualisierungstechniken, wie Balkendiagramme, Kreisdiagramme oder Liniendiagramme eingesetzt [SM00], [Maz09].

Dabei ergeben sich folgende Herausforderungen:

- Insbesondere die Analyse der Informationsverarbeitung ist schwierig, da diese abstrakte Daten – Daten, ohne intrinsische Gestalt – und nicht sichtbare Vorgänge beinhaltet. Bestehende Visualisierungstechniken sind bei komplexen Systemen meist unübersichtlich und insbesondere Zusammenhänge sind schwer zu erkennen. Das Verhalten simulierter Komponenten kann nicht intuitiv aufgenommen werden [SRH+09], [Sch08].
- Die an der Entwicklung beteiligten Fachdisziplinen verwenden für sie spezifische Aspektmodelle. Möchten Ingenieure unterschiedliche Aspektmodelle zusammenführen und deren Zusammenspiel analysieren, können Fehler auftreten, da Fachleute einer Disziplin Aspektmodelle anderer Fachdisziplinen nur mühsam verstehen. Folglich können redundante Arbeiten und Daten auftauchen. Dies erschwert die Integration der unterschiedlichen Aspektmodelle.

Einen Ansatz, mit dem die Analyse mechatronischer Systeme am virtuellen Prototypen und insbesondere deren Informationsverarbeitung verbessert werden kann, bieten die Technologie Virtual Reality (VR) und Visualisierungstechniken. VR ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die einen Benutzer in ein dreidimensionales computergeneriertes Modell der Realität einbezieht [GEK01]. Sie bietet eine eingängige Darstellung von virtuellen Prototypen und deren komplexen Simulationsdaten und ermöglicht somit intuitiven Zugang zum virtuellen Prototypen. VR ist dadurch charakterisiert, dass sie Modelle im Maßstab 1:1 darstellt, Interaktionstechniken zur Manipulation von 3D-Modellen und Simulationsdaten bietet und vor allem zusätzliche Visualisierungstechniken zur Analyse abstrakter Daten bereitstellt [GEK01], [SHH+11], [GRW09], [LW04].

Bisher hat sich die Forschung im Bereich der VR-Anwendungen für den Maschinenbau auf zwei Anwendungsbereiche konzentriert: Zum einen wird sie zur dreidimensionalen, interaktiven Visualisierung der Gestalt eines technischen Produkts eingesetzt. Beispiel hierfür ist das klassische Design Review, bei dem über Gestalt, Konstruktionsdaten, Form, Farben oder Varianten diskutiert wird [SHH+11]. Zum anderen wird sie zur Darstellung abstrakter Simulationsdaten aus kontinuierlichen Simulationen eingesetzt. Bei-

spiele hierfür sind die Strukturanalyse mit der Finite-Elemente-Methode (FEM), Strömungssimulationen oder das Bewegungsverhalten mit der Kinematik- und Dynamikanalyse. Die Daten der Simulationen werden mit Hilfe von Visualisierungstechniken oder visuellen Metaphern präsentiert, die in der VR-Anwendung mit der Gestalt eines technischen Produktes kombiniert werden [GPW09], [LW04].

Zur Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme können die Charakteristika von VR wie folgt genutzt werden:

- 1) Die Visualisierungstechniken ermöglichen, abstrakte Daten sichtbar zu machen. Mit Hilfe der Visualisierungstechniken wird die Analyse von Daten und Vorgängen in der Informationsverarbeitung unterstützt.
- 2) Die Gestalt eines mechatronischen Systems wird im Maßstab 1:1 realistisch dargestellt. Auf diese Weise kann das mechatronische Grundsystem – der digitale Mock-up – in der Gesamtheit und unverzerrt beurteilt werden.
- 3) Daten unterschiedlicher Aspektmodelle können in einer VR-Umgebung zusammengeführt und deren Wirkzusammenhänge sichtbar gemacht werden.
- 4) Navigations- und Interaktionstechniken unterstützen eine explorative Analyse des Systems. Durch Interaktion wählt ein Anwender gewünschte Informationen aus oder verknüpft diese und gewinnt Erkenntnisse über das Verhalten des Systems oder mögliche Fehler. Mit Hilfe von Navigationstechniken kann nach Wunsch durch ein System und dessen Umgebung navigiert werden.

Für die Informationsverarbeitung mechatronischer Systeme sind VR-basierte Visualisierungstechniken bisher nur bedingt erforscht. Bestehende Forschungsarbeiten zeigen, dass Bedarf für solche Techniken besteht, die Vorteile werden jedoch nur punktuell dargelegt [SRH+09], [ADG+09], [GRW09], [BDK+06]. Standardtechniken und Vorgehensweisen zur Entwicklung solcher Visualisierungstechniken gibt es kaum [Sch08]. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ entstand ein Virtual Prototyping Framework, das die Integration von Visualisierungstechniken ermöglicht [Pae02], [GBR+04b]. Die Visualisierungstechniken selbst müssen jedoch anwendungsspezifisch entworfen werden.

Zusammenfassend lässt sich folgender Handlungsbedarf identifizieren:

- Es fehlen geeignete Visualisierungstechniken, mit denen die Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme in Bezug auf das Systemverhalten analysiert wird und die für VR-Anwendungen geeignet sind.
- Es fehlt eine systematische Vorgehensweise zur Entwicklung solcher Visualisierungstechniken und folglich zur Analyse der Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist eine *Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen*.

Die Systematik umfasst *Methoden und Werkzeuge zur Spezifikation des Visualisierungsproblems*, ein *Vorgehensmodell zur Auswahl geeigneter Visualisierungstechniken* und eine *prototypisch implementierte VR-Anwendung*. Die Bestandteile beinhalten definierte Analyseaufgaben, Visualisierungsaufgaben und charakteristische Daten mechatronischer Systeme sowie einen Katalog an geeigneten Visualisierungstechniken für mechatronische Systeme. Die Vorgehensweise unterstützt – ausgehend von einem virtuellen Prototypen des mechatronischen Systems – einen Entwickler dabei, seine Analyse- und Visualisierungsaufgaben zu beschreiben, die passenden Visualisierungstechniken für seine Visualisierungsaufgaben auszuwählen sowie diese in der VR-Anwendung zur Analyse des Prototypen zu integrieren und zu nutzen. Die prototypisch implementierte VR-Anwendung und die in dieser Anwendung integrierten Visualisierungstechniken stehen für die Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme zur Verfügung.

Das Vorgehensmodell sowie die VR-Anwendung sollen domänenübergreifende Entwicklerteams in die Lage versetzen, Visualisierungstechniken für fortgeschrittene mechatronische Systeme zu entwickeln und solche Systeme am virtuellen Prototypen interaktiv und visuell zu analysieren.

Die Anwendbarkeit und Korrektheit der Methode soll mit Hilfe einer VR-Anwendung nachgewiesen werden, in der ausgewählte Beispiele virtueller Prototypen des Systems RailCab dargestellt werden.

1.3 Vorgehensweise

In Kapitel 2 wird die einleitend dargestellte Problematik konkretisiert und das Forschungsfeld der Arbeit abgegrenzt. Zunächst werden Grundlagen mechatronischer Systeme beschrieben. Der Fokus liegt auf der Informationsverarbeitung, in der u.a. KI-Verfahren zum Einsatz kommen. Anschließend wird beschrieben, wie mechatronische Systeme mit Hilfe virtueller Prototypen entwickelt werden. Daraufhin werden gängige Visualisierungstechniken zur Analyse technischer Systeme zusammengetragen, die mit Hilfe der VR-Technologie angewendet werden. Darüber hinaus wird ein Überblick über Grundlagen, gängige Methoden und Erkenntnisse aus den Forschungsbereichen der wissenschaftlichen Visualisierung und Informationsvisualisierung gegeben. Anschließend werden die Herausforderungen identifiziert, die bei der Entwicklung und Analyse mechatronischer Systeme auftreten. Schließlich werden Anforderungen an die Methode zur Visualisierung der Informationsverarbeitung mechatronischer Systeme abgeleitet.

In Kapitel 3 wird ein kurzer Überblick über den Stand der Forschung gegeben. Hier werden insbesondere verwandte Arbeiten untersucht, die sich mit der Visualisierung abstrakter Daten technischer Systeme in VR-Anwendungen beschäftigen. Der Stand der

Forschung wird gemäß den aufgestellten Anforderungen bewertet und der Handlungsbedarf aufgezeigt.

Kapitel 4 stellt die Bestandteile vor, die innerhalb der in dieser Arbeit entwickelten Systematik verwendet werden. Dies sind Analyseaufgaben, Visualisierungsaufgaben, charakteristische Daten, geeignete Visualisierungstechniken mechatronischer Systeme sowie ihre Präsentation in VR-Anwendungen. Basis zur Bestimmung der Analyse- und Visualisierungsaufgaben sind unterschiedliche Verfahren des Fallbeispiels RailCab. Zur einheitlichen Spezifikation eines konkreten Visualisierungsproblems wird ein Steckbrief entwickelt und seine Anwendung an den verschiedenen Beispielen dieser Arbeit veranschaulicht.

In Kapitel 5 wird das Vorgehensmodell zur Entwicklung von Visualisierungstechniken zur Analyse mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen beschrieben. In dieser werden alle in Kapitel 4 entwickelten Bestandteile systematisch eingesetzt. Ergebnis sind in einer VR-Anwendung integrierte Visualisierungstechniken, die eine interaktive visuelle Analyse eines fortgeschrittenen mechatronischen Systems ermöglichen.

In Kapitel 6 erfolgt die prototypische Umsetzung und die Validierung der Systematik und ihrer Bestandteile. Die entwickelten Visualisierungstechniken sind hierfür in einer VR-Anwendung integriert. Sie werden anhand von drei Validierungsbeispielen des RailCab-Systems getestet: der Logistiksimulation, der Konvoiregelung und Kommunikation sowie der Regelung eines sturzvariablen Fahrwerks.

In Kapitel 7 wird die Arbeit abschließend zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Fragestellungen gegeben. Im Anhang befinden sich ergänzende Informationen zur Problemanalyse, den Bestandteilen der Systematik und dem Vorgehensmodell sowie verschiedene Steckbriefe mit Visualisierungstechniken. Sie stellen den entwickelten Katalog an Visualisierungstechniken für mechatronische Systeme dar.

2 Problembeschreibung und -analyse

Ziel der Problemanalyse sind Anforderungen an eine *Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen*. Zu diesem Zweck zeigt das Kapitel auf, welche Möglichkeiten VR zur Analyse mechatronischer Systeme bietet. Zuerst werden für ein einheitliches Verständnis in Kapitel 2.1 relevante Begriffe definiert und die Arbeit im Kontext des Forschungsprojekts RailCab eingeordnet. In Kapitel 2.2 werden Aufbau und Funktionsweise fortgeschrittener mechatronischer Systeme beschrieben. Kern von Kapitel 2.3 ist die Informationsverarbeitung mechatronischer Systeme. Ein wesentlicher Fokus dieser Arbeit sind ihre Aufgaben und in ihr eingesetzte KI-Verfahren. Diese sind die Grundlage für eine Weiterentwicklung mechatronischer Systeme hin zu fortgeschrittenen mechatronischen Systemen. In Kapitel 2.4 wird die Entwicklung derartiger Systeme mit Hilfe des Digitalen Mock-ups und Virtuellen Prototypen skizziert sowie gängige Techniken zur visuellen Analyse zusammengefasst. In Kapitel 2.5 wird die Technologie Virtual Reality (VR) vorgestellt und relevante Techniken zur visuellen Analyse mit VR zusammengetragen. Zudem werden Methoden und Visualisierungstechniken aus den Fachgebieten der wissenschaftlichen Visualisierung und Informationsvisualisierung dargestellt (Kapitel 2.6), da diese Fachgebiete wesentliche Beiträge zur Visualisierung physikalischer und abstrakter Daten leisten. In Kapitel 2.7 erfolgt die Problemanalyse, aus der die Anforderungen an die in dieser Arbeit entwickelte Systematik hervorgehen (Kapitel 2.8).

2.1 Begriffsdefinitionen und Einordnung der Arbeit

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist eine *Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen*.

Unter einer **Systematik** wird im Kontext dieser Arbeit die Kombination aus einem generischen Vorgehensmodell und dedizierten Hilfsmitteln zur Anwendung des Vorgehensmodells verstanden. Das **Vorgehensmodell** strukturiert die Handlungen zur Auswahl und Integration analyseaufgabenspezifischer Visualisierungstechniken in eine VR-Anwendung sowie zur anschließenden Analyse des zu entwickelnden fortgeschrittenen mechatronischen Systems. Die **Hilfsmittel** umfassen eine Taxonomie für Analyseaufgaben, eine Taxonomie für Visualisierungsaufgaben, einen Katalog aufgabenspezifischer Visualisierungstechniken, eine prototypische VR-Anwendung sowie eine Schablone zur Spezifikation des Visualisierungsproblems. Die Systematik bietet dem Entwickler eine strukturierte Unterstützung beim Aufbau von VR-gestützten Analysewerkzeugen. Der Aufbau erfolgt jedoch nicht automatisch sondern erfordert nach wie vor die Kreativität und Entscheidungskompetenz der Entwickler.

Die Systematik kommt im Entwicklungsprozess fortgeschrittener mechatronischer Systeme zum Einsatz. Sie wird beim Virtual Prototyping mechatronischer Systeme verwendet, wobei **Virtual Prototyping** die Modellbildung, Simulation und Analyse eines mechatronischen Systems umfasst. Fokus der Systematik ist die **visuelle Analyse eines virtuellen Prototyps¹ (VP)** während der Konkretisierungsphase² mit Hilfe der Technologie Virtual Reality und zusätzlichen Visualisierungstechniken. **Virtual Reality (VR)** ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die es erlaubt, in eine computergenerierte, dreidimensionale, virtuelle Welt einzutauchen, diese als Realität wahrzunehmen, Bestandteil dieser zu sein und mit ihr zu interagieren [VDI3633b, S. 2]. Eine **Visualisierungstechnik** ist die grafische Repräsentation von rechnerinternen Daten eines virtuellen Prototyps. Sie ist in der VR-Umgebung integriert und ermöglicht insbesondere die Analyse der durch eine Simulation generierten **abstrakten Daten³**. Die Systematik adressiert somit nicht den Aufbau eines virtuellen Prototyps, der bspw. das kinematische oder dynamische Verhalten des zu entwickelnden Systems abbildet. Der VP ist vielmehr die Voraussetzung für die Anwendung der Systematik.

Durch die Systematik wird die Modellanalyse mechatronischer Systeme unterstützt. Mechatronische Systeme basieren auf dem synergetischen Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik [VDI2206, S. 14]. Für die Modellbildung dieser Systeme ist es erforderlich, sowohl Realdaten über die Eigenschaften des Systems, wie z.B. dessen Geometrie, als auch abstrakte Daten, wie z.B. Kommunikationsnachrichten, abzubilden. Die Abbildung von Realdaten ist Gegenstand der **wissenschaftlichen Visualisierung**; die Abbildung abstrakter Daten der der **Informationsvisualisierung**. Die vorliegende Arbeit integriert Methoden beider Forschungsgebiete und macht sie mit VR als Werkzeug im Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme nutzbar. Sie leistet somit einen Beitrag zur Entwicklungsmethodik⁴, deren Gegenstand Vorgehensweisen, Methoden, Regeln und Prinzipien für die Gestaltung technischer Systeme sowie für die Lösung von Entwicklungsproblemen sind [PBF+07, S. 10].

¹ Der Virtuelle Prototyp ist rechnerintern durch Aspektmodelle der Gestalt, des Verhaltens (z.B. Kinematik, Dynamik) sowie der Informationsverarbeitung beschrieben [GEK01, S. 385].

² In der Konkretisierung erfolgt die fachdisziplinspezifische Ausarbeitung der einzelnen Bestandteile eines zu entwickelnden Systems. Die Ausarbeitung erfolgt sowohl mit Hilfe fachdisziplinspezifischer als auch fachdisziplinübergreifender Methoden, Modelle und Werkzeuge [VDI2206, S. 35ff.].

³ Als abstrakte Daten werden in dieser Arbeit Daten bezeichnet, die keinen räumlichen Bezug zu räumlich angeordneten Objekten haben; sie haben keine intrinsische Gestalt [PD10, S. 435].

⁴ In der Literatur auch „Konstruktionsmethodik“ genannt. Die Entwicklungsmethodik baut auf den Erkenntnissen der Entwicklungs-/Konstruktionswissenschaften, der Denkpsychologie sowie Erfahrungswerten auf [PBF+07, S. 10].

2.2 Fortgeschrittene mechatronische Systeme

Im folgenden Abschnitt werden die Begriffe Mechatronik und mechatronische Systeme erläutert. Anschließend folgt die Beschreibung der Grundstruktur und der Makrostruktur mechatronischer Systeme. In den Abschnitten 2.2.4 und 2.2.5 wird die Entwicklung von geregelten über adaptive bis hin zu fortgeschrittenen mechatronischen Systemen aufgezeigt. Sie werden als aufeinander aufbauende Systemklassen (bzgl. ihrer Leistung) angesehen und entstehen infolge der synergetischen Effekte zwischen den Ingenieurwissenschaften, der Informatik und weiteren Fachdisziplinen, wie z.B. der Mathematik. Zuletzt wird das Schienenverkehrssystem RailCab vorgestellt, das in dieser Arbeit als Anwendungsbeispiel dient.

2.2.1 Mechatronische Systeme

Der Begriff **Mechatronik** ist ein Kofferwort aus Mechanik und Elektronik. Er wurde 1969 von den Japanern T. MORI und K. KIRKUCHI erschaffen und anschließend von YASKAWA Electric Corporation als Handelsname eingetragen [Mor69]. Der Begriff bezog sich ursprünglich auf die Erweiterung mechanischer Systeme um elektronische Komponenten zur Realisierung neuer Funktionen. In darauf aufbauenden Definitionen wird unter Mechatronik das synergetische Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungs- und Softwaretechnik für die Entwicklung und Produktion technischer Systeme verstanden [Sch89], [MDR91], [Wei92]. Definitionen, die neben dem synergetischen Zusammenwirken der Fachdisziplinen auch die Zielsetzung der Mechatronik adressieren, stammen z.B. von ISERMANN [Ise08] oder LÜCKEL [Lüc02]. Den Definitionen zu Folge ist das Ziel der Mechatronik die Verhaltensverbesserung eines rein mechanischen Systems durch Hinzunahme von erweiterten oder neuen Funktionen. Es gilt die für die aktuelle Betriebssituation optimale Reaktion zu finden und umzusetzen. Im Ergebnis entstehen Systeme mit autonomen bis hin zu teil-intelligenten Eigenschaften.

Bisher gibt es keine allgemeingültige Definition von Mechatronik. Die am weitesten gefasste Definition haben HARASHIMA, TOMIZUKA und FUKUDA geprägt [HTF96], an die sich auch die Definition der VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ hält. Die dortige Übersetzung der im Original englischen Definition lautet:

„Mechatronik bezeichnet das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung.“ [VDI2206, S. 14].

Die auf Basis dieser Definition entstehende große Bandbreite mechatronischer Systeme lässt sich nach GAUSEMEIER in zwei **Klassen** unterteilen: Zur Klasse 1 gehören die **integrierten mechatronischen Systeme**, die auf der räumlichen Integration von Mecha-

nik und Elektronik beruhen. Ziel hierbei ist, eine hohe Funktionsintegration auf kleinem Bauraum zu erreichen. Wesentliche Nutzenpotentiale liegen in der Miniaturisierung, der höheren Zuverlässigkeit und den geringen Herstellungskosten. Klasse 2 umfasst **Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten**. Systeme dieser Klasse verändern ihr Bewegungsverhalten in Abhängigkeit von den aktuellen Umgebungs- bzw. Betriebsbedingungen. Im Vordergrund steht der Entwurf einer geeigneten Regelung⁵ als Basis für kontrolliertes Bewegungsverhalten. Beide Klassen können auch in Kombination auftreten. Die integrierten Systeme der ersten Klasse sind oftmals Bestandteil der Systeme der zweiten Klasse; beispielsweise in Form intelligenter Sensoren (smart sensors) und Aktoren (smart actors) [Ise08, S. 24]. In der vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt auf den Systemen der Klasse 2. Daher wird im Folgenden unter einem mechatronischen System stets ein System der Klasse 2 verstanden [GF06, S. 3f.].

2.2.2 Grundaufbau und klassische Regelung

Der prinzipielle **Aufbau eines mechatronischen Systems** besteht aus einem Grundsystem, aus Sensoren, Aktoren, und einer Informationsverarbeitung (siehe Bild 2-1). Diese vier Grundkomponenten bilden gemeinsam den mechatronischen Regelkreis, wobei in der einfachsten Ausbaustufe das Grundsystem die Regelstrecke, der Sensor das Messglied (Messfühler), der Aktor die Stelleinrichtung und die Informationsverarbeitung der Regler ist. Die vier Komponenten werden grundsätzlich in einer Umgebung betrieben. Nach außen bestehen i.d.R. zwei Schnittstellen: eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, über die der Mensch Einfluss auf das System nimmt, und ein Kommunikationssystem für den Informationsaustausch mit anderen (technischen) Systemen. Die Leistungsversorgung kann sowohl systemintern als auch -extern erfolgen. Zudem wird der mechatronische Regelkreis in zwei Ebenen unterteilt: eine logische und eine physikalische. In der logischen Ebene werden digitale Größen (d.h. wert- und zeitdiskrete, i.d.R. Informationen), in der physikalischen Ebene analoge Größen (d.h. wert- und zeitkontinuierliche, i.d.R. Energie- und Stoffumsätze) verarbeitet [GEK01, S. 28].

⁵ Eine Erläuterung der regelungstechnischen Begriffe befindet sich im Anhang A1.1 und wird in der vorliegenden Arbeit der Norm DIN [DIN19226] entnommen.

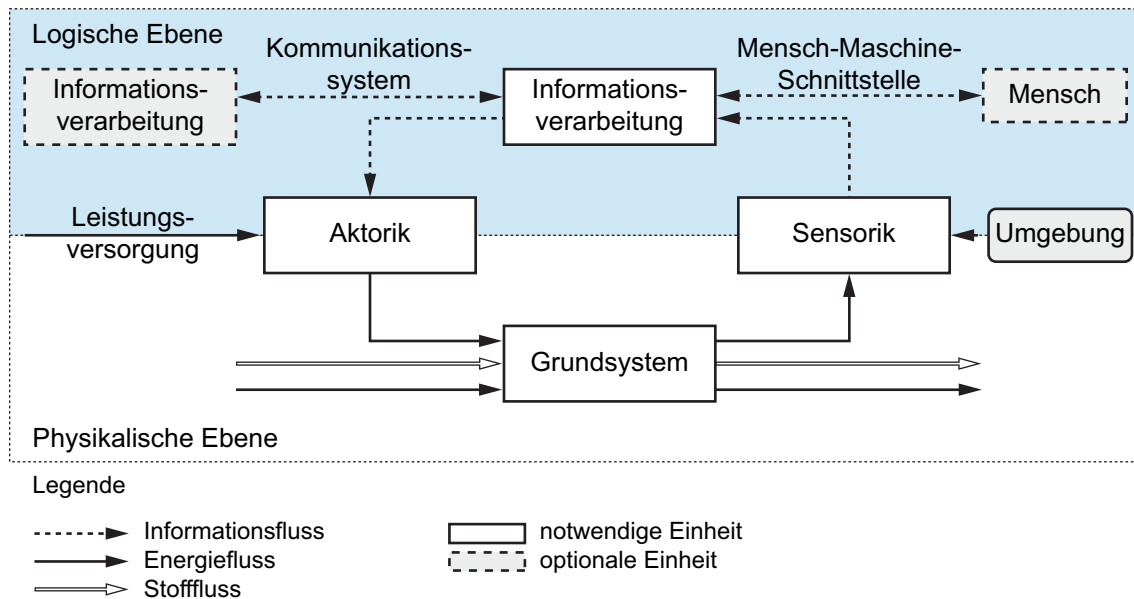


Bild 2-1: Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach [VDI2206, S.14] und [Dum11, S. 8].

Das **Grundsystem** stellt bspw. eine mechanische, elektro-mechanische, pneumatische oder hydraulische Grundstruktur dar und ist über verschiedene Flüsse mit den weiteren Komponenten des Systems verknüpft. Über die **Sensoren** werden sowohl Bewegungs- und Zustandsgrößen des Grundsystems als auch Einflüsse der Umgebung gemessen. Die ermittelten Messwerte werden als Eingangsgrößen an die Informationsverarbeitung weitergeleitet. Die **Informationsverarbeitung** kann ein drahtgebundenes, analoges System sein oder eine Recheneinheit (z.B. Mikroprozessor, Rechenzentrum) mit entsprechenden Softwareprogrammen. Sie verarbeitet die Eingangsdaten, entscheidet über durchzuführende Maßnahmen und gibt Steuersignale (Stellgrößen) an die Aktoren aus. Die **Aktoren** wandeln die Signale der Informationsverarbeitung in Bewegungsgrößen um, die auf das Grundsystem einwirken [GEK01, S. 28], [VDI2206, S. 14ff.].

Die vier genannten mechatronischen Grundkomponenten werden durch Flüsse miteinander verbunden. Nach PAHL/BEITZ sind grundsätzlich die drei Flussarten *Stoffflüsse*, *Energieflüsse* und *Informationsflüsse* (häufig auch als *Signalflüsse* bezeichnet) zu unterscheiden [PBF+07, S. 43]:

Stoffflüsse: Stoffflüsse beschreiben den Transport und den Austausch von Gasen, Flüssigkeiten oder festen Körpern (z.B. Kühlflüssigkeit oder Öl).

Energieflüsse: Jede Energieform wie z.B. mechanische, thermische oder elektrische Energie und entsprechende Kenngrößen (z.B. Kraft oder Strom) werden als Energieflüsse bezeichnet.

Informationsflüsse: Werden Messgrößen (wie z.B. Geschwindigkeit), Steuerimpulse oder Daten zwischen den Einheiten mechatronischer Systeme ausgetauscht, ist diese Verbindung ein Informationsfluss.

Neben der Verbindung der vier Grundkomponenten zu der beschriebenen mechatronischen Grundstruktur können mit den genannten Flüssen auch mehrere Komponenten zu einem komplexeren mechatronischen System verbunden werden. Die Strukturierung solcher komplexen mechatronischen Systeme ist Gegenstand des nachfolgenden Kapitels.

2.2.3 Makrostruktur mechatronischer Systeme

In der Praxis werden mechatronische Systeme oft durch mehrfache Anwendung der Komponenten Grundsystem, Aktorik, Sensorik und Informationsverarbeitung umgesetzt. Die Komponenten können unterschiedlich miteinander vernetzt sein. Um die entstehenden Strukturen beherrschbar zu machen, wird nach LÜCKEL eine konsequente hierarchische Strukturierung komplexer mechatronischer Systeme vorgeschlagen. Sie orientiert sich an der Grundstruktur mechatronischer Systeme und erweitert sie um den Aspekt der Modularisierung und Hierarchisierung. In dem hierarchischen Ordnungsschema wird zwischen drei Strukturierungsebenen unterschieden, die sich an einer funktionalen Dekomposition des Bewegungsverhaltens eines mechatronischen Systems orientieren. Bild 2-2 verdeutlicht dies [LHL01, S. 124], [Hes06, S. 16ff.]:

Die unterste Strukturierungsebene und Basis eines mechatronischen Systems bildet das **mechatronische Funktionsmodul (MFM)**. Es setzt in der Regel eine Teilfunktion der Hauptbewegungsfunktion um. Ein MFM entspricht der Grundstruktur mechatronischer Systeme und besteht demnach aus Aktorik, Sensorik, einem mechanischen Grundsystem und einer lokalen Informationsverarbeitung. Beispiele für MFM sind das Spurführungsmodul eines Schienenfahrzeugs oder ein aktives Federbein eines Automobils. Werden mehrere MFM in ein System verbaut, so ergibt ihre Vernetzung die nächst höhere Ebene: ein **autonomes mechatronisches System (AMS)**. Es enthält eine zusätzliche regelnde Informationsverarbeitung, die eine selbständige Handlung des AMS ermöglicht. Dazu bedient es sich der Aktorik der MFM. Das AMS erfüllt die Hauptbewegungsfunktion. Zudem werden auf dieser Ebene übergeordnete Aufgaben erledigt, wie beispielsweise Überwachung mit Fehlerdiagnose oder das Treffen von Instandhaltungsentscheidungen. Zusammengefasst ist ein AMS ein physikalisch von der Umgebung abgeschlossenes/getrenntes System. Beispiele für AMS sind ein autonom agierendes Schienenfahrzeug oder ein Automobil. Mehrere AMS können auf höchster Strukturierungsebene zu einem **vernetzten mechatronischen System (VMS)** gekoppelt werden. Sie entstehen durch eine rein informationstechnische Kopplung von AMS oder weiteren VMS. Hier werden übergeordnete Aufgaben der Informationsverarbeitung realisiert. Beispiele für VMS sind Roboterschwärme oder Verbände (z.B. Konvois) autonomer Schienenfahrzeuge [LHL01, S. 124], [ADG+09, S. 11f.].

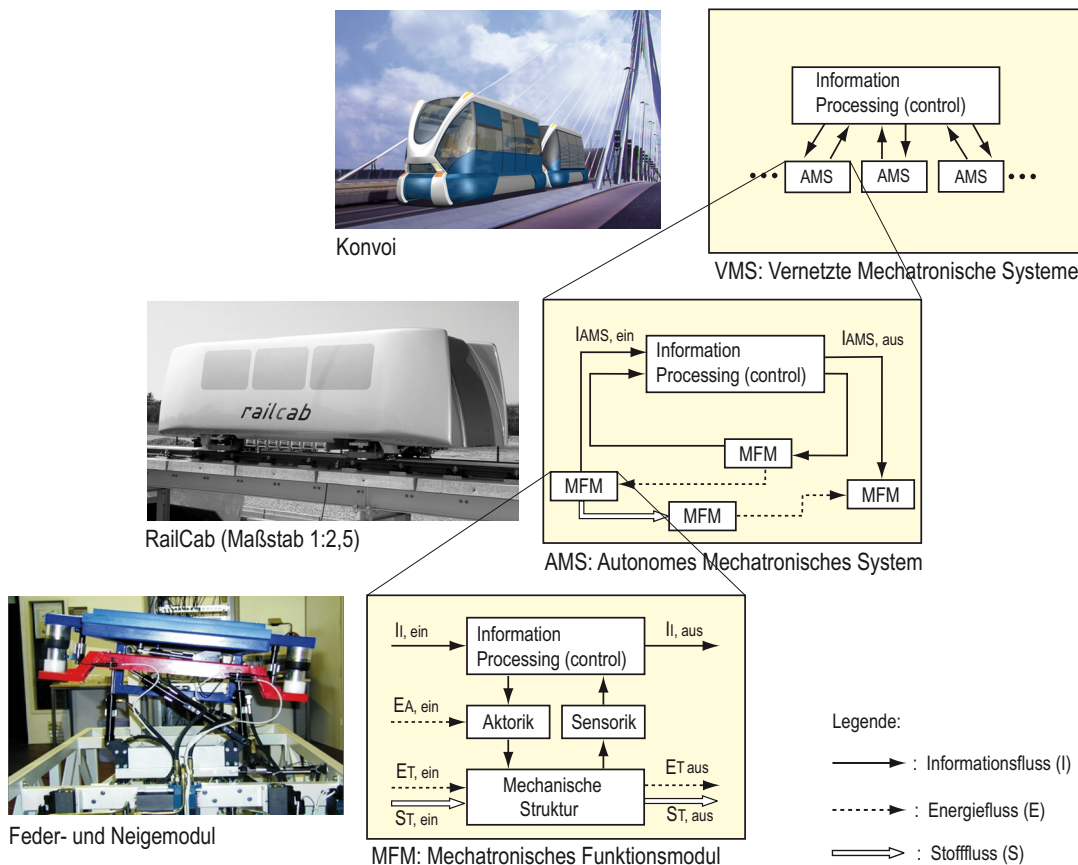


Bild 2-2: Strukturierung mechatronischer Systeme (Makrostruktur) nach Lückel (in Anlehnung an [ADG+09, S. 11]).

Es wird deutlich, dass die Informationsverarbeitung auf jeder der beschriebenen Hierarchieebene von großer Bedeutung ist. Die bisherige und sich weiter fortsetzende Verbesserung der Informationsverarbeitung ermöglicht neue Funktionen, immer flexiblere Verhaltensweisen bis hin zu einem proaktiven Verhalten für mechatronische Systeme auf Basis immer leistungsfähigerer Hardware- und Software-Komponenten. Die Entwicklung von geregelten über adaptive bis hin zu fortgeschrittenen mechatronischen Systemen wird in den nachfolgenden Kapiteln 2.2.4 und 2.2.5 beschrieben.

2.2.4 Adaptive Systeme

Eine Zwischenstufe in der Entwicklung zu fortgeschrittenen mechatronischen Systemen sind adaptive mechatronische Systeme. Der Begriff Adaption beschreibt hierbei die Anpassung des Verhaltens eines geregelten Systems an die Änderungen der Systemdynamik oder an geänderte Störeinflüsse. Kern ist eine adaptive Regelung, die verstellbare Parameter besitzt und in der Lage ist, diese eigenständig zu verändern [AW95, S. 1]. Mit Hilfe einer überlagerten Adaptionseinrichtung wird die Regelung und damit das Systemverhalten derart beeinflusst, dass das Verhalten bei unvorhersehbaren, zeitlich unabhängigen Ereignissen oder Störungen, bestmöglich im Hinblick auf während der Entwicklung des Systems festgelegte Ziele ist [SR88, S. 18]. Adaptive Systeme können

auf diese Weise mit Betriebssituationen umgehen, die zum Zeitpunkt der Systementwicklung nicht vollständig im Detail bekannt waren. Grundsätzlich wird zwischen der Feedforward Adaptive Control und der Feedback Adaptive Control unterschieden. Bei der Feedforward Adaptive Control muss der Einfluss von Veränderungen der Systemeigenschaften oder Störeinflüssen auf das Systemverhalten bekannt sein, um die Regelparameter anpassen zu können. Bei der Feedback Adaptive Control wird der Einfluss der Veränderungen auf das Systemverhalten durch die Adaptionseinrichtung zur Laufzeit ermittelt und daraufhin werden die Regelparameter angepasst.

2.2.5 Fortgeschrittene mechatronische Systeme

Die gegenwärtig teils noch in der Erforschung befindlichen, immer höherwertigeren regelungstechnischen und informationstechnischen Verfahren zur Informationsgewinnung und -verarbeitung ermöglichen neue Funktionen in mechatronischen Systemen. Diese Funktionen steigern nochmals die Flexibilität, Robustheit sowie Effektivität mechatronischer Systeme und ermöglichen eine bessere Anpassung an den Benutzer, indem sie den Übergang vom reaktiven Verhalten geregelter und adaptiver mechatronischer Systeme hin zu einem proaktiven Verhalten unterstützen. Ein Begriff, der sich stellvertretend für die genannten Funktionen etabliert hat, ist der des sogenannten **fortgeschrittenen** (engl.: *advanced*) Verhaltens: Fortgeschrittenes Verhalten ist dadurch gekennzeichnet, dass die mechatronischen Systeme selbst die Anwendungssituation erkennen (bzw. Systemumgebung wahrnehmen), Rückschlüsse auf den eigenen Systemzustand ziehen und im Betrieb entsprechend dem Systemzweck ihre Optimierungsziele planen bzw. bestimmen, um anschließend ein hinsichtlich der Situation optimales Verhalten umzusetzen. Beispiele für solche Systeme sind u.a. autonome Fahrzeuge, wie das *EO smart connecting car*⁶ oder die Fahrzeuge der DARPA Urban Challenge. Mechatronische Systeme mit fortgeschrittenem Verhalten werden in dieser Arbeit als **fortgeschrittene mechatronische Systeme** bezeichnet [Trä09, S. 4], [Dum11, S. 41].

Die Ansätze zur Realisierung fortgeschrittener mechatronischer Systeme adressieren unterschiedliche Hierarchieebenen der in Kapitel 2.2.3 vorgestellten Makrostruktur mechatronischer Systeme. Ansätze, die mehr auf der MFM- und AMS-Ebene ansetzen sind bspw. die **Integration kognitiver Funktionen** oder das Paradigma der **Selbstoptimierung**. Die Integration kognitiver Funktionen in technische Systeme ermöglicht es, den Systemen die Fähigkeit zu verleihen, sich ihres Handelns bewusst zu werden und daraus Schlussfolgerungen zu ziehen; oder sich durch sogenannte Companion-Eigenschaften (Anpassungsfähigkeit, Verfügbarkeit, Individualität, Kooperativität, Vertrauenswürdigkeit) individuell auf den jeweiligen Nutzer einzustellen [BBW07, S. 19], [BW10, S.

⁶ Das EO (lat. für: *ich gehe*) smart connecting car ist ein autonomes Fahrzeug mit einer voll durch Linearakuatoren konfigurierbare Einzelradaufhängung, mit autonomer Konvoibildung, intelligentem Energie- und Kreuzungsmanagement. Es wird vom DFKI in Koop. mit der Universität Bremen entwickelt (siehe <http://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/robotersysteme/eo-smart-connecting-car.html>).

335], [GRS03, S. 19 ff.]. Der Begriff „Selbstoptimierung“ wurde im Rahmen des SFB 614⁷ etabliert:

„Unter Selbstoptimierung (self-optimization) eines technischen Systems wird die endogene Anpassung der Ziele des Systems auf veränderte Einflüsse und die daraus resultierende zielkonforme autonome Anpassung der Parameter und ggf. der Struktur und somit des Verhaltens dieser Systeme verstanden. Damit geht Selbstoptimierung über die bekannten Regel- und Adaptionsstrategien wesentlich hinaus; Selbstoptimierung ermöglicht handlungsfähige Systeme mit inhärenter „Intelligenz“, die in der Lage sind, selbständig und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren.“ [ADG+09, S. 5].

Ein selbstoptimierendes System ist demnach eine Weiterentwicklung adaptiver Systeme und in der Lage, mit Hilfe des sogenannten Selbstoptimierungsprozesses (1. Analyse der Ist-Situation; 2. Bestimmung der Systemziele; 3. Anpassung des Systemverhaltens) seine (Optimierungs-)Ziele selbstständig festzulegen und darauf aufbauend sein Verhalten entsprechend dieser Ziele (endogen) anzupassen. Die **Ziele** beschreiben die geforderten, gewünschten oder zu vermeidenden Systemeigenschaften. Der Schlüssel zur Realisierung des proaktiven Verhaltens selbstoptimierender Systeme liegt in der eigenständigen Auswahl und Gewichtung der Ziele zur Laufzeit.

Beispiele für Ansätze, die die VMS-Ebene adressieren, sind: **Swarm Robotics** oder **Cyber-Physical Systems**. Bei Swarm Robotics kooperieren mehrere mit einfachen physischen Fähigkeiten ausgestattete und durch einfache Handlungsregeln geleitete Roboter miteinander. Die Leistungsfähigkeit entsteht aus der kollektiven Verbindung der einzelnen Individuen ähnlich wie bei in sozialen Strukturen organisierten Insekten [SSW07, S. V]. Cyber-Physical Systems entstehen durch die Vernetzung von mechatronischen Systemen untereinander und mit ortsfesten informationstechnischen Infrastrukturen, wie z.B. fest installierten Videoüberwachungsanlagen. Dadurch wird der Sensorradius und somit die verfügbare Informationsbasis dieser Systeme erhöht, wodurch diese noch kontextsensitiver arbeiten können [Bro10, S. 21ff.].

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erwähnt und durch die vorstehenden Ausführungen nochmals unterstrichen, ist die Informationsverarbeitung und die in ihr eingesetzten informationstechnischen Verfahren der Schlüsselfaktor für die Realisierung fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Da die Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme wesentlicher Fokus der vorliegenden Arbeit ist, werden ihre Struktur und die innerhalb dieser Struktur zur Anwendung kommenden Verfahren in Kapitel 2.3 erläutert.

⁷ SFB 614: Sonderforschungsbereich 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“. Ziel des SFB sind Systeme, die ihr Verhalten selbstständig und bestmöglich auf das aktuelle Systemumfeld einstellen [SFB08].

2.2.6 Anwendungsbeispiel RailCab

Ein repräsentatives Beispiel für fortgeschrittene mechatronische Systeme ist das an der Universität Paderborn entwickelte Schienenverkehrssystem RailCab. Es ist zugleich das Anwendungsbeispiel der vorliegenden Arbeit. Das System wurde 1997 von der Forschungsinitiative Neue Bahntechnik Paderborn initiiert und dient als wichtige Test- und Demonstrationsplattform für die Entwicklung von Regelstrategien und Optimierungsverfahren für fortgeschrittenes Verhalten. Kern des Systems sind autonome Fahrzeuge (RailCabs) für den Personen- und Gütertransport, die nach Bedarf und nicht nach Fahrplan fahren. Die Fahrzeuge handeln proaktiv, indem sie während der Fahrt selbständig berührungslose Konvois zur Reduzierung des Energiebedarfs bilden (Windschatteneffekt) [Trä06].

Das RailCab-System ist modular aufgebaut und besteht aus einem Antriebsmodul, einem Spurführungsmodul, einem Feder-/Neigemodul und einem Energieversorgungsmodul. Der Antrieb erfolgt berührungslos mit Hilfe eines elektromagnetischen Linearantriebs mit berührungsloser Energieübertragung. Tragen und Führen erfolgt über einen Rad-Schiene-Kontakt. Eine aktive Lenkung an Bord der Fahrzeuge sorgt für eine verschleißarme Spurführung im Gleis (Spurführungsmodul). Die Weichen sind passiv, die Richtungswahl an den Weichen erfolgt fahrzeugseitig über die lenkbaren Fahrwerke. Die aktive Feder-/Neigetechnik sorgt im Personenverkehr für einen hohen Fahrkomfort. Die wesentliche Technik ist in einer flach bauenden Bodengruppe untergebracht, auf der Fracht- oder Personenbeförderungsmodule aufgesetzt werden [Trä06], [ADG+09, S. 30]⁸. Wendet man bei dem RailCab-System die Strukturierung mechatronischer Systeme an (Kapitel 2.2.3), so sind diese Module MFM. Ein gesamtes RailCab ist ein AMS und der Fahrzeugverbund oder Konvoi mehrerer RailCabs ein VMS.

2.3 Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme

Die vorangegangenen Kapitel haben deutlich gemacht, dass die Informationsverarbeitung der wesentliche Stellhebel für fortgeschrittenes Verhalten mechatronischer Systeme ist. Voraussetzung ist der Einsatz informationstechnischer Verfahren, die über rein reaktive Regelungen hinausgehen. Beispiele für solche Verfahren sind die Mehrzieloptimierung des Gebiets der mathematische Optimierungsverfahren oder Neuronale Netze des Gebiets der KI.

Im Folgenden wird die Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme analysiert. Zunächst werden die grundsätzlichen Aufgaben der Informationsverarbeitung beschrieben. Anschließend wird das Operator-Controller-Modul als Architek-

⁸ Weitere Informationen zum RailCab-System und dessen Realisierung als umfassende Versuchsanlage im Maßstab 1:2,5 sind unter <http://www.railcab.de> zu finden.

turkonzept vorgestellt, mit dem die Informationsverarbeitung strukturiert wird. Abschließend wird als Beispiel auf Verfahren aus dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz eingegangen, die neben anderen zur Umsetzung fortgeschrittenen Verhaltens in mechatronischen Systemen eingesetzt werden.

2.3.1 Aufgaben der Informationsverarbeitung

Die Informationsverarbeitung eines fortgeschrittenen mechatronischen Systems erfüllt neben den grundlegenden Steuerungs- und Regelungsaufgaben klassischer mechatronischer Systeme (vgl. Kap. 2.2.1) auch höherwertige Aufgaben. Die Aufgaben werden wie folgt unterteilt [Ise08, S. 25ff.], [ADG+09, S. 13]:

- 1) **Signalvorverarbeitung:** Sollen Größen gesteuert, geregelt oder überwacht werden, so müssen die durch die Sensorik gemessenen Signale zunächst durch eine Vorverarbeitung aufbereitet werden. Die Signalvorverarbeitung besteht u.a. aus Filter-Methoden zur Bestimmung von Amplituden und Frequenzen, Filter-Methoden zur Bestimmung von differenzierten oder integrierten Größen, Zustandsgrößen-Beobachtern oder analytischen Funktionen [Ise08, S. 27].
- 2) **Informationsgewinnung:** Zur möglichst genauen Steuerung, Regelung oder Fehlererkennung eines mechatronischen Systems ist die Kenntnis mathematischer Modelle des Grundsystems (Prozess-Modelle) für statisches und dynamisches Verhalten erforderlich. Die Modelle werden auf Basis theoretischer Betrachtungen (z.B. in Form von Differenzialgleichungen) oder verhaltensbasierter Verfahren (z.B. neuronale Netze) gewonnen. Zudem können sie bereits zum Entwurfszeitpunkt erstellt oder mit Hilfe von Lernverfahren zur Laufzeit entwickelt bzw. angepasst werden.
- 3) **Regelung bzw. Steuerung des Systemverhaltens:** Hierbei regelt eine quasi-kontinuierlich arbeitende Regelung das Verhalten des Grundsystems. Regelung bzw. Steuerung müssen den Zustand des Systems und die daraus abzuleitenden Stellgrößen in Echtzeit erfassen und ausgeben.
- 4) **Optimierung des Systemverhaltens:** Adaptionalgorithmen passen die Regelung an verändernde Betriebs- und Umgebungsbedingungen an, sodass ein möglichst optimales Verhalten für die spezifische Betriebssituation gewährleistet wird. Darüber hinaus können mit Hilfe von Planverfahren, zusätzlich zu den aktuellen Betriebs- und Umgebungsbedingungen, auch zukünftige Verhaltensweisen des Systems antizipiert und in die Optimierung des Systemverhaltens mit einbezogen werden.
- 5) **Überwachung, Ablaufsteuerung und Fehleranalyse:** Mechatronische Systeme haben häufig einen sicherheitskritischen Charakter. Daher ist eine gut funktionierende Überwachung wichtig für die Sicherheit, für die zustandsabhängige Instandhaltung aber auch für das Aktivieren redundanter Notsysteme oder das Auslösen von Rekonfiguration fehlertoleranter Systeme [Ise08, S. 30].

- 6) Da mechatronische Systeme oft einen sicherheitskritischen Charakter aufweisen, müssen sie **Sicherungs- und Notfallroutinen** beinhalten.
- 7) Immer mehr spielt die **Vernetzung** mechatronischer Systeme eine Rolle. Daraus resultieren hohe Anforderungen bzgl. der Echtzeitfähigkeit der **Kommunikationsprotokolle**. Sie ermöglichen die Kommunikation zwischen den Systemen.

Um die beschriebenen Aufgaben effizient und zum Teil ineinandergreifend erfüllen zu können, bedarf es eines geeigneten Architekturkonzeptes, mit dem die Informationsverarbeitung eines fortgeschrittenen mechatronischen Systems strukturiert wird.

2.3.2 Strukturierung der Informationsverarbeitung

Zur Erfüllung der im vorherigen Kapitel beschriebenen Aufgaben der Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt, die auf unterschiedliche Art und Weise arbeiten und entsprechend unterschiedlich umgesetzt werden. Um das Zusammenspiel der verschiedenen Verfahren zu ordnen, sind in der Informatik unterschiedliche Architekturen entstanden, die die Informationsverarbeitung in mehrere Hierarchieebenen strukturieren. Sie orientieren sich an psychologischen Mustern und der Gehirn- bzw. Intelligenzstruktur des Menschen. Die entstandenen Architekturen haben gemeinsam, dass sie die direkte Informationsverarbeitung zwischen Sensorik und Aktorik z.B. um eine lernende oder kognitive Datenverarbeitung erweitern [ADG+09, S. 13].

Das für diese Arbeit maßgebliche Architekturkonzept zur Strukturierung der Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme ist das im SFB 614 entwickelte **Operator-Controller-Modul (OCM)**. Es erlaubt, die unterschiedlichen Aufgaben der Informationsverarbeitung innerhalb jeder Ebene der Makrostruktur mechatronischer Systeme (siehe Kapitel 2.2.3) und über die Ebenen hinweg miteinander zu synchronisieren [Nau00], [ADG+09, S. 13]. Bild 2-3 zeigt das OCM im Überblick. Es besteht aus dem Controller, dem reflektorischen Operator und dem kognitiven Operator.

Die drei Bestandteile werden an der Art des Durchgriffs auf das technische System unterschieden [ADG+09, S. 14 ff.]:

- Auf der untersten Ebene enthält der **Controller** die regelungstechnischen Bestandteile der Informationsverarbeitung. Seine Aufgabe ist, das dynamische Verhalten des mechanischen Systems so zu beeinflussen, dass eine gewünschte Dynamik erreicht wird. Dieser innere Regelkreis verarbeitet in direkter Wirkkette die Messsignale, ermittelt Stellsignale und gibt sie aus. Er wird daher als motorischer Kreis bezeichnet. Die Software-Verarbeitung auf dieser Ebene arbeitet quasi-kontinuierlich: Messwerte werden kontinuierlich eingelesen, verarbeitet und unter harten Echtzeitbedingungen wieder ausgegeben. Dabei kann der Controller mehrere Regler enthalten, zwischen denen mit Hilfe unterschiedlicher Strategien umgeschaltet werden kann (vgl. [OMH+08]).

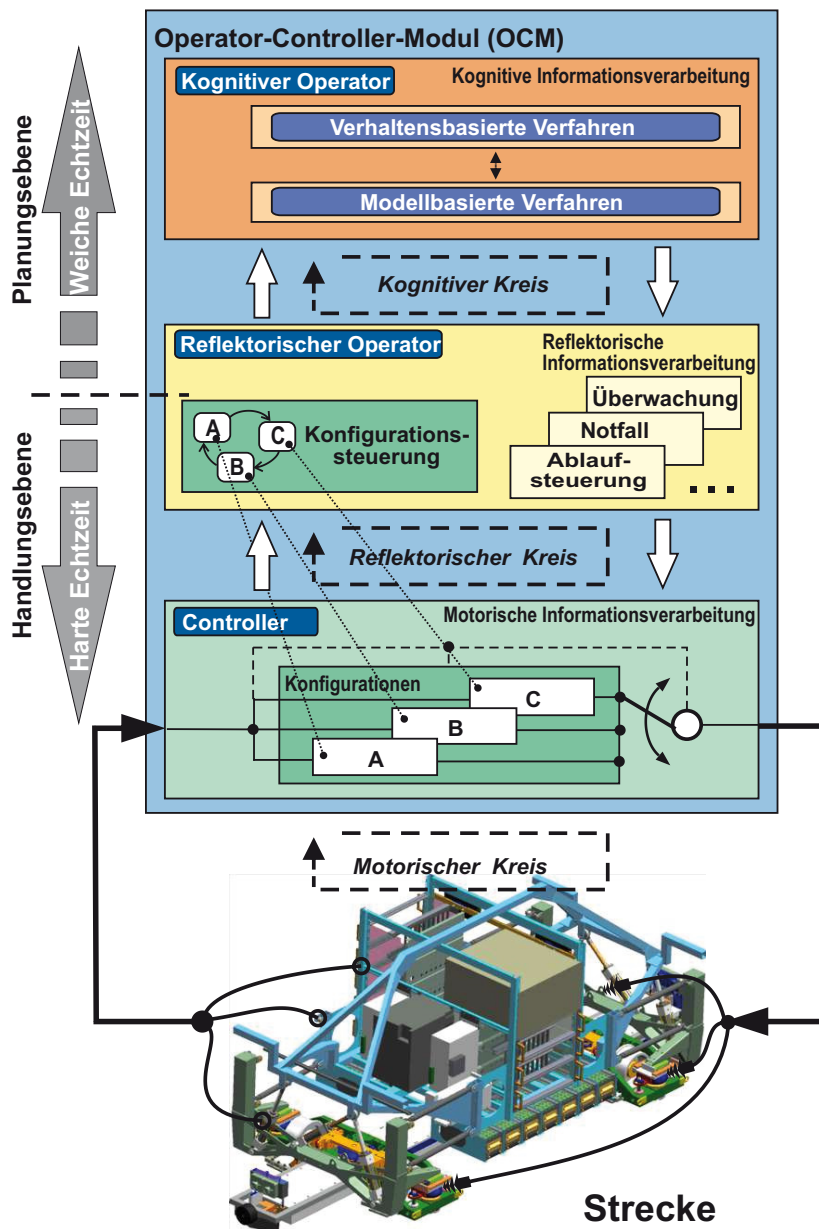


Bild 2-3: Struktur des Operator-Controller-Moduls (OCM) in Anlehnung an [ADG+09, S. 14].

- Der **reflektorische Operator** ist für die Überwachung und Steuerung des Controllers zuständig. Verschiedene Hilfsfunktionen wie Ablaufsteuerung, Überwachungs- und Notfallprozesse, aber auch Adaptionsverfahren zur Verbesserung des Controllerverhaltens, werden hier umgesetzt. Zur Anpassung des Systemverhaltens greift der reflektorische Operator nicht direkt auf die Aktorik des Systems zu, sondern modifiziert den Controller, indem er Parameter- oder Strukturänderungen veranlasst. Bei Strukturänderungen (z.B.. Rekonfigurationen) werden nicht nur die Regler ausgetauscht, sondern auch entsprechende Kontroll- bzw. Signalflüsse im Controller umgeschaltet. Kombinationen aus Reglern, Schaltelementen und zugehörigen Kontroll- bzw. Signalflüssen werden als Controller-Konfigurationen bezeichnet.

net. In Bild 2-3 sind Controller-Konfigurationen im Controller durch die Blöcke A, B und C angedeutet. Die Konfigurationssteuerung legt fest, bei welchem Systemzustand welche Konfiguration gilt und definiert die Bedingungen unter denen zwischen den Konfigurationen umgeschaltet wird. In welcher Reihenfolge und unter welchen Zeitschranken der Rekonfigurations-Prozess durchgeführt wird, bestimmt eine Ablaufsteuerung. Der reflektorische Operator arbeitet weitgehend ereignisorientiert. Die enge Kopplung mit dem Controller erfordert eine Abarbeitung in harter Echtzeit. Der reflektorische Operator stellt zudem die Schnittstelle zwischen dem kognitiven Operator und der motorischen Informationsverarbeitung dar. Er nimmt Ergebnisse des kognitiven Operators entgegen, filtert sie und leitet sie an den Controller. Vice versa werden Messwerte vom Controller zwischengespeichert und an den kognitiven Operator hochgereicht. Abschließend ist der reflektorische Operator für die Echtzeitkommunikation zwischen mehreren OCM verantwortlich.

- Die oberste Ebene des OCM ist durch den **kognitiven Operator** repräsentiert. Hier nutzt das System durch Anwendung vielfältiger Methoden (z.B. Planungs- und Lernverfahren, modellorientierter Optimierungsverfahren oder den Einsatz wissensbasierter Systeme) Wissen über sich und die Umgebung zur Verbesserung des eigenen Verhaltens. Der Schwerpunkt liegt hier auf den kognitiven Fähigkeiten zur Durchführung einer individuellen Verhaltensoptimierung. Während sowohl Controller als auch reflektorischer Operator harten Echtzeitanforderungen unterliegen, kann der kognitive Operator auch asynchron zur Realzeit arbeiten. Dennoch ist eine Antwort innerhalb eines gewissen Zeitfensters erforderlich, da die Verhaltensanpassung aufgrund veränderter Umgebungsbedingungen sonst zu keinen verwertbaren Ergebnissen führt. Der kognitive Operator arbeitet folglich in weicher Echtzeit.

Zusammenfassend bilden sich zwei Trennungsebenen: Zum einen wird die Informationsverarbeitung in einen direkt, auf das System wirkenden, und in einen nur indirekt darauf wirkenden Kreis geteilt. Dies entspricht der Einteilung in Operator und Controller. Andererseits lässt sich nach harter und weicher Echtzeitanforderung trennen. Diese Einteilung führt zu einer Trennung zwischen kognitivem Operator und reflektorischem Operator und Controller. Die Trennungsebenen der OCM-Architektur ermöglichen benötigte Vorhersagen über kritische Verhaltensaspekte (Stabilität, Zeitinkonsistenzen), wodurch ein sicherer Betrieb des Systems gewährleistet werden kann [ADG+09, S. 16].

2.3.3 Verfahren der Künstlichen Intelligenz

Stellvertretend für die verschiedenen, insbesondere im reflektorischen und kognitiven Operator einsetzbaren Verfahren, werden in diesem Kapitel die Verfahren der Künstlichen Intelligenz erläutert. Die **Künstliche Intelligenz (KI, engl.: artificial intelligence)** ist eine wissenschaftliche Disziplin, die das Ziel verfolgt, technische Systeme zu erschaffen, die mit intelligenten Fähigkeiten ausgestattet sind. Sie ist ein Teilgebiet der Informatik und bedient sich zudem der Ergebnisse aus anderen Wissenschaftsgebieten,

wie z.B. der Logik, dem Operations Research, der Statistik, der Regelungstechnik, der Bildverarbeitung, der Linguistik, der Philosophie oder der Neurobiologie [Ert09, S. 10]. Was bei einem künstlichen System im Kontext der KI mit „intelligent“ gemeint ist, ist in der Literatur nicht abschließend definiert. Die Systeme sollen jedoch autonom sein und somit eine ähnliche Leistung der Wahrnehmung und des Verstands wie die des Menschen aufweisen. J. MCCARTHY, einer der Pioniere der KI, prägte 1955 als erster den Begriff der KI im Förderantrag für die Dartmouth-Konferenz⁹ wie folgt:

„Ziel der KI ist es, Maschinen zu entwickeln, die sich verhalten, als verfügten sie über Intelligenz.“¹⁰ [Ert09, S. 6].

Eine etwas greifbarere Definition dieser Disziplin stammt von WINSTON:

„Künstliche Intelligenz ist die Untersuchung von Berechnungsverfahren, die es ermöglichen, wahrzunehmen, zu schlussfolgern und zu handeln.“¹¹ [Win92, S. 5].

Schlussfolgerndes Denken involviert im Allgemeinen interne Prozesse, die es einem Individuum ermöglichen, darüber nachzudenken, was die beste Weise zu handeln ist, bevor tatsächlich gehandelt wird. Wichtig dabei ist der Rückgriff auf Wissen über die Welt und über alternative Möglichkeiten des Handelns in der Welt [Gör00]. Nach RUSSEL und NORVIG muss ein sich intelligent verhaltendes System daher mindestens die folgenden Eigenschaften besitzen [RN07]:

- Wissensrepräsentation und Wissensspeicherung
- Wissensverarbeitung (Entscheidungen treffen und Aktionen planen)
- Lernen
- Wahrnehmung (Erkennen)

Die Summe dieser Eigenschaften ermöglicht intelligentes Verhalten. Um diese Eigenschaften in technischen Systemen zu realisieren, bietet die KI ein breites Spektrum an Verfahren [Ert09, S. 4]. Der Art nach werden diese Verfahren grundsätzlich in modellorientierte und verhaltensorientierte Verfahren eingeteilt [ADG+09, S.125 ff.]:

Modellorientierte Verfahren: Diese basieren auf ingenieurwissenschaftlichen Modellen, die das physikalische Verhalten des Systems abbilden. Sie repräsentieren die physi-

⁹ Die Konferenz fand 1956 zum ersten Mal im Dartmouth College (Hanover, New Hampshire, US) statt und gilt als der Anfang der KI. Der Begriff KI greift jedoch auf ältere Fundamente für die Logik und die theoretische Informatik zurück (z.B. auf den Gödelschen Satz in den dreißiger Jahren, Turingmaschine 1936, Aussagen- und Prädikatenlogik, Neuronale Netze) [Ert09, S. 6ff.].

¹⁰ Sinngemäß aus dem Englischen übersetzt von [Ert09, S. 6], Originaltext z.B. in [Nil12].

¹¹ Sinngemäß aus dem Englischen übersetzt.

kalischen Zusammenhänge zwischen den Ein- und Ausgängen des Systems, die z.B. mit Differentialgleichungen explizit beschrieben werden. Kenntnis der Zusammenhänge ist Voraussetzung für die Bildung eines Modells. Die Modelle bilden die Grundlage für die Optimierung des Systemverhaltens.

Verhaltensorientierte Verfahren: Diese Verfahren basieren auf einer direkten Abbildung von (relevanten) Eingangsgrößen auf die sich ergebenden Ausgangsgrößen. Das System selbst wird als ein Black-Box-Modell betrachtet, welches das Verhalten aber nicht die Physik des Modells repräsentiert (Komponenten eines Modells, wie z.B. die Neuronen eines Neuronalen Netzes bilden hier nicht die Komponenten des Systems ab, sondern lediglich den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen). Damit geht auch meistens eine Diskretisierung der Prozesse einher. Der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen (wie z.B. Umweltzustand, Systemverhalten und Zielgrößen) wird entweder vom Entwickler direkt definiert oder das System lernt diesen Zusammenhang mit Hilfe von Lern- und Explorationsverfahren. Modelle verhaltensbasierter Methoden sind gröber als die Modelle modellbasierter Methoden. Der Vorteil ist jedoch, dass mit diesen Modellen längere Planungshorizonte antizipiert werden können.

Eine feingranularere als die vorstehende Unterteilung, ist eine an den Problembereichen der KI orientierte Unterteilung. ERTEL schlägt hierfür bspw. eine sogenannte *KI-Apotheke* vor (siehe [Ert09, S. 5]); er teilt die KI-Verfahren in fünf Bereiche ein (*Logik, Lernen, Suche/Problemlösen, Schließen mit Unsicherheit, Neuronale Netze*). Ähnlich werden nach RUSSEL und NORVIG sechs **Hauptarbeitsrichtungen** unterschieden, denen Methoden der KI zugeordnet werden können [Ert09, S. 5f.], [RN07, S. 12f.], [Dum11]:

- **Problemlösen/Suche:** Hierunter fallen insbesondere Suchverfahren, wie z.B. die Zustandsraumsuche. Die Hauptaufgabe übernehmen sog. Suchalgorithmen, die den Suchraum nach den gewünschten Merkmalen filtern bzw. explorieren. Grundsätzlich gibt es blinde (uninformierte) Suchverfahren, zu denen die *Breiten-, Tiefen- und bidirektionale Suche* gehören, und heuristische (informierte) Suchverfahren, wie bspw. die *Greedy-* und die *A*-Suche*.
- **Logikbasierte Wissensrepräsentation und Inferenz (logisches Schließen):** Die Fähigkeit, aus vorhandenem Wissen logische Schlussfolgerungen (Inferenzen) ziehen zu können, ist ein zentraler Aspekt intelligenten Verhaltens und eine der Grundannahmen der KI [BK08]. Das Wissen ist durch formale Logik (Symbole) repräsentiert, wie der *Aussagenlogik*, der *Prädikatenlogik erster Stufe* (PL1) oder der *Defaultlogik* [Ert09, S. 5]. Das Wissen (bzw. der Zustand eines Objektes) wird auch nach vielen Schlussfolgerungsschritten nicht verändert. Entscheidend ist, welche Schlussfolgerungen aus der Wissensbasis gezogen werden und damit, welches beobachtbare Verhalten das System zeigt. Die grundlegenden Formen der Inferenz sind *Deduktion*, die vom Allgemeinen zum Speziellen geht (sicheres Schließen) und *Induktion*, die vom Speziellen zum Allgemeinen arbeitet.

- **Planen (auch Aktionen und Planen):** Beim Planen werden Planungsaktivitäten – eine Folge von zukünftigen Aktionen – erstellt, deren Ausführung ein System in einen gewünschten Zustand überführt. Dazu werden zunächst ein vorliegender Zustand und ein gewünschter Zielzustand beschrieben. Nachdem die Zustände beschrieben sind, werden mögliche Planungsaktivitäten erstellt (Problembeschreibung), die sich Schlussfolgerungsmöglichkeiten der Logik bedienen. Planungssysteme erstellen dann aus Beschreibungen der Zustände und Aktionen Aktionsfolgen, die z.B. von Agenten ausgeführt werden. Das Durchführen von Aktionen (Funktionen auf den Objekten) bewirkt – anders als beim klassischen logischen Schließen – dass der Zustand mit der Zeit verändert wird.
- **Unsicherheit (Schließen mit Unsicherheit):** Dabei handelt es sich um quantitative Methoden, die zur Darstellung und Verarbeitung unsicheren Wissens eingesetzt werden. Unsicherheiten oder Vagheiten im verwendeten Wissen werden mit sogenannten Sicherheitsfaktoren oder Wahrscheinlichkeitswerten, die Wissenselementen und Regeln zugeordnet werden, belegt. Dazu werden den Aussagen bzw. Formeln numerische Größen zugeordnet, die den Grad ihrer Gewissheit, die Stärke ihrer Einflussnahme, ihren Zugehörigkeitsgrad zu einer gewissen Menge o.Ä. ausdrücken. Entsprechende Inferenzmechanismen sind notwendig, um die numerischen Werte (quantitatives Wissen) zu verarbeiten. Beispiele für diese Methoden sind wahrscheinlichkeitsbasierte Verfahren, wie *probabilistisches Schließen*, *Lernen von Entscheidungsbäumen aus Daten* und probabilistische Netzwerke, wie die *Markov-Graphen* und *Bayes-Netze*. Alternative Ansätze sind die *Dempster-Shafer-Theorie*, *Fuzzy-Logik* und *Possibilistik* [BK08]. In den Ingenieurwissenschaften besitzen diese quantitativen Methoden eine lange Tradition [BK08, S. 365]. Die Herausforderung ist, die Komplexität der Realität rechnerisch in den Griff zu bekommen und vereinfachte Annahmen geschickt in die Inferenzverfahren einzubauen.
- **Lernen und Data Mining:** Hierzu gehören Verfahren des maschinellen Lernens, wie z.B. das Lernen von Entscheidungsbäumen aus Daten¹² oder das Konzeptlernen. Eng damit verbunden ist der Vorgang der Wissensentdeckung und -klassifizierung, das sogenannte *Data Mining*¹³. Es ist eine eher jüngere Teildisziplin der KI und gehört zum Umfeld der statistischen Datenanalyse mit dem Ziel der Gewinnung von (explizitem) Wissen aus großen Datenbasen [Ert09, S. 9].
- **Kommunizieren, Wahrnehmen und Handeln (Handlungsplanung):** Diese drei Aufgabenfelder werden im Kontext der KI i.d.R. zu einem Bereich zusammengefasst werden [RN07]. Konkrete Forschungsfelder in diesem Bereich sind bspw. die

¹² Systeme wie CART, ID3, C4.5 können sehr schnell und automatisch Entscheidungsbäume mit sehr guter Korrektheit aufbauen, die aussagenlogische Konzepte repräsentieren können und dann als Expertensysteme einsetzbar sind. Sie gehören heute zu den beliebtesten maschinellen Lernverfahren.

¹³ Data Mining gilt seit ca. 1990 als neue Teildisziplin der KI.

Spracherkennung für die Kommunikation mit technischen Systemen, das *Bildverstehen* oder die *Mustererkennung* für die Wahrnehmung des Systemumfeldes sowie die *kognitive Robotik* als Forschungsfeld für die Realisierung handelnder technischer Systeme [GN03].

2.4 Analyse mechatronischer Systeme am virtuellen Prototyp

Zur effizienten Entwicklung mechatronischer Systeme haben sich Methoden der **virtuellen Produktentwicklung (VPE)** durchgesetzt. Dabei umfasst nach DÖBLER die VPE

„die Simulation und Animation aller Phasen des Produktlebens mit weitgehendem Verzicht auf physikalische Objekte sowie die Einbeziehung neuer Verfahren und Werkzeuge der Visualisierung“ [Döb08, S. 9].

Ein wesentliches Ziel ist die Erprobung und Absicherung von Produkteigenschaften und Funktionen in den frühen Entwicklungsphasen. Die virtuelle Produktentwicklung stützt sich auf die Arbeit mit dem virtuellen Prototypen, der im Verlauf der Produktentwicklung immer weiter konkretisiert wird. Dieser unterstützt die gezielte Funktionsabsicherung spezifischer Aspekte eines Produkts.

Im Folgenden werden der virtuelle Prototyp und das Virtual Prototyping vorgestellt. Anschließend werden Verfahren zur visuellen Analyse virtueller Prototypen diskutiert. Zuletzt werden gängige Verfahren zur Analyse der Informationsverarbeitung beschrieben.

2.4.1 Virtueller Prototyp

Der virtuelle Prototyp ist die Basis für die virtuelle Produktentwicklung. Nach GAUSEMEIER wird der virtuelle Prototyp wie folgt definiert:

„Ein virtueller Prototyp bzw. ein digitaler Mock-up ist die rechnerinterne Repräsentation eines realen Prototypen, [...]. Der virtuelle Prototyp ist eine Erweiterung des digitalen Mock-up, weil neben der Gestalt noch weitere Aspekte wie Kinematik, Dynamik, Festigkeit etc. Berücksichtigung finden.“ [GEK01, S. 384 f.]

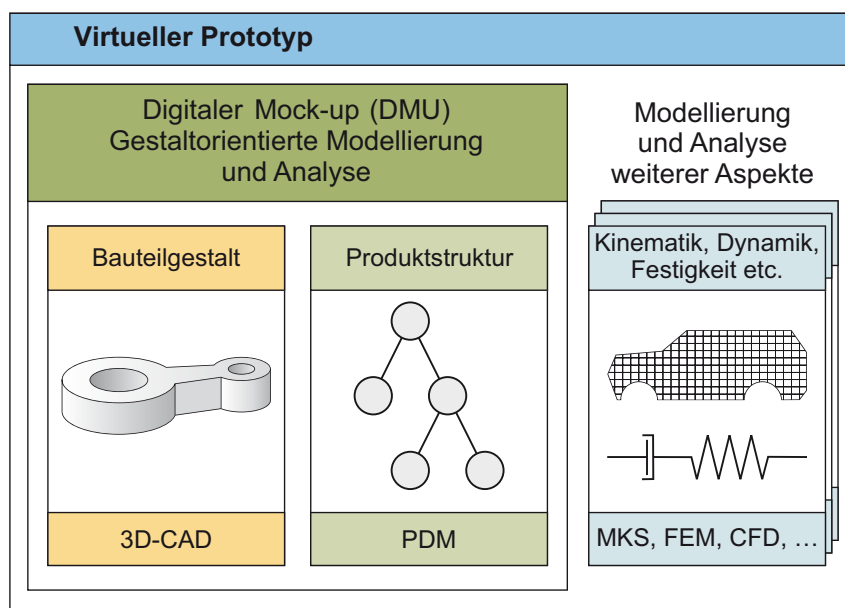
Das Bild 2-4 zeigt eine schematische Begriffserklärung. Der virtuelle Prototyp umfasst demnach den **digitalen Mock-up (DMU)** sowie weitere Aspekte¹⁴. Der DMU ist die Basis für den virtuellen Prototyp. Hier handelt es sich um ein rechnerinternes Modell

¹⁴ Aspekte (auch: Sichten eines Systems o. Produkts) bilden die Basis für Virtuelle Prototypen [GEK01, S. 383ff.]; Dabei sind die wesentlichen Sichten eines Systems die Gestalt, die Struktur und das Verhalten. Zur Struktur gehören die Baustruktur und die Wirkstruktur eines Systems. Das Verhalten enthält Verhaltens-Modelle, wie Zustände, Aktivitäten, Sequenzen und Funktionen (siehe Metapher des Entwurfsraums [GPW09, S. 40f.])

der Gestalt eines komplexen technischen Produkts. Der DMU repräsentiert die Aspekte Gestalt (Geometrie) und Baustruktur¹⁵ eines zu entwickelnden Produkts. Die Gestalt wird rechnerintern durch 3D-CAD-Modelle beschrieben. Zusammen mit der Baustruktur ergeben diese CAD-Modelle den Bauzusammenhang des Produkts [GPW09, S. 375].

Wird der DMU um Aspekte ergänzt, die das Verhalten des zu entwickelnden realen Produkts nachbilden, entsteht ein **virtueller Prototyp (VP)**. Solche Aspekte sind die Kinematik, Dynamik, die Spannungsverteilung auf der Oberfläche des Produkts oder aber die Informationsverarbeitung (siehe Kapitel 2.3). Die Aspekte werden rechnerintern durch Aspektmodelle beschrieben, die Analysen des VP ermöglichen (siehe Kapitel 2.4.2). Ein Ziel bei der Entwicklung virtueller Prototypen ist, dass sich diese wie reale Prototypen verhalten [GEK01, S. 385], [GPW09, S. 375f.].

Virtuelle Prototypen sind heute ein wesentlicher Bestandteil in der Produktentwicklung technischer Systeme. Vor allem in Bereichen wie der Mechatronik, in denen die Komplexität stetig zunimmt und eine Analyse des Systemverhaltens am Rechner notwendig wird. Virtuelle Prototypen helfen den Entwicklern, die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des zu entwickelnden Produktes zu verstehen. Sie können analysiert und bewertet werden wodurch das Verhalten des Produktes verstanden werden kann, lange bevor ein realer Prototyp gebaut wird [GPW09, S. 375f.].



PDM: Produktdatenmanagement; MKS: Mehrkörpersimulation;
 FEM: Finite Elemente Methode; CFD: Computational Fluid Dynamics

Bild 2-4: Schematische Darstellung des Digitalen Mock-ups und virtuellen Prototyps [GPW09, S. 375f.].

¹⁵ Nach Pahl/Beitz repräsentiert die Baustruktur den Bauzusammenhang, d.h. die Anordnung und Verbindung der Bauteile zu Baugruppen und schließlich zum Erzeugnis [PBF+07].

Das Arbeiten mit dem virtuellen Prototypen wird als **Virtual Prototyping** bezeichnet. Nach GAUSEMEIER et al. heißt Virtual Prototyping „Rechnermodelle von in Entwicklung befindlichen Objekten zu bilden und zu analysieren“ [GEK01, S. 384]. Dadurch können Aussagen über das spätere Verhalten technischer Systeme getroffen werden [GEK01, S. 419]. Beim Virtual Prototyping werden im Wesentlichen die drei Phasen *Modellbildung*, *Simulation* und *Analyse* durchlaufen, die der Simulationstechnik entlehnt sind (Bild 2-5) [BZB+09, S. 3]:

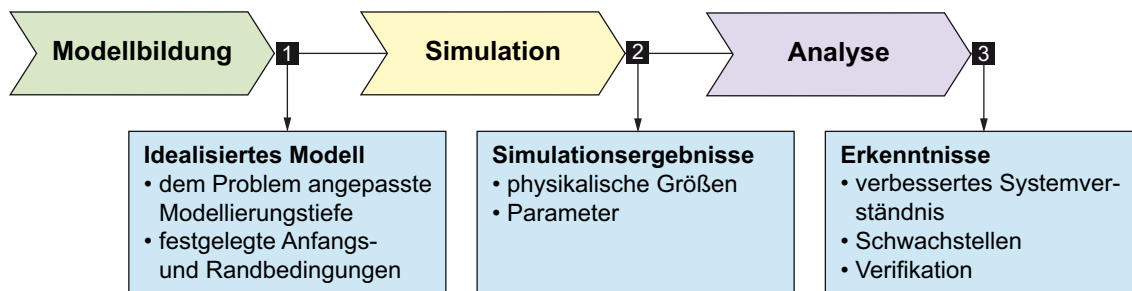


Bild 2-5: Vorgehen beim Virtual Prototyping, in Anlehnung an [GEK01, S. 421].

- **Modellbildung:** Es werden vereinfachte formale Beschreibungen (Modelle) des in Entwicklung befindlichen Produkts gebildet. Sie sind Grundlage der sich anschließenden Berechnungen während der Simulation. Hier wird die *Struktur* des Modells festgelegt; die Ermittlung oder Festlegung seiner *Parameter*¹⁶ erfolgt bei der Simulation.
- **Simulation**¹⁷: Das Modell wird geeignet aufbereitet, um es rechnerintern berechnen zu können. Die eigentliche Berechnung wird dann mittels numerischer Algorithmen (Lösungsmodule: Löser/Solver) durchgeführt. Dabei wird zwischen verschiedenen Arten der Simulation unterschieden: *Nichtinteraktive numerische Simulationen* bestehen in der Regel aus den Schritten Datenbeschaffung und -aufbereitung (Pre-Processing), Berechnung (Solving) und Ergebnisauswertung (Post-Processing)¹⁸. *Interaktive (Echtzeit-)Simulationen* verarbeiten hingegen direkt den interaktiven Eingriff des Benutzers auf ein Modell. Sie sind insbesondere geeignet, dem Benutzer umfangreiche visuelle Eindrücke des Produkts bzw. von Simulationsdaten zu

¹⁶ Parameter „sind diejenigen Prozeßgrößen, die sich nicht oder nur unwesentlich von den unabhängigen Zeit- und Raumvariablen ändern, aber dennoch das Prozeßgeschehen bestimmen“ [KN98, S. 97].

¹⁷ Der Begriff **Simulation** ist in der VDI-Richtlinie 3633 definiert als „[...] das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. [...]“ [VDI3633a]. Hier fasst der Begriff die Phasen Modellbildung, Simulation und Analyse zusammen.

¹⁸ Im Pre-Processing werden die Eingangsdaten zur Verfügung gestellt und Randbedingungen definiert. Zu den wichtigsten Eingangsdaten zählen Materialdaten, Simulationsparameter, Bauteilgeometrie usw. Im Post-Processing werden die im Solving berechneten Ausgangsdaten ausgewertet. Zu den wichtigsten Ausgangsdaten zählen Prozesskräfte, Stofffluss, Deformationen, Temperaturen, Spannungen usw.

präsentieren und eine intuitive Handlung mit dem virtuellen Prototypen zu ermöglichen [SHH+11, S. 25].

- **Analyse:** Hier sind die Ergebnisdaten der Simulation zu interpretieren. Im Wesentlichen sind dabei die relevanten Informationen zu extrahieren, aufzubereiten und anschaulich zu visualisieren. Nach KRAMER et al. soll mit der Analyse angestrebt werden, die Ergebnisse der Simulation einer kritischen Prüfung zu unterziehen [KN98, S. 44]. Die Analyse – insbesondere die interaktive visuelle Analyse – ist der Fokus der vorliegenden Arbeit (siehe Kapitel 2.4.2 und 2.5.2).

2.4.2 Visuelle Analyse am digitalen Mock-up und virtuellen Prototyp

Der digitale Mock-up und der virtuelle Prototyp werden in der Produktentwicklung zur Analyse und zur Bewertung von technischen Systemen eingesetzt. Zur Analyse sind Visualisierungen notwendig, weil die Simulationsdaten zeit- und/oder ortsabhängige Zahlenkolonnen sind, die ohne eine aussagkräftige Grafik nur schwerlich zu interpretieren sind. Im Folgenden werden einige Beispiele für Analysen gegeben, die am DMU und VP durchgeführt werden. Dabei wird der Fokus auf die **visuelle Analyse** gelegt; sobald mit dem digitalen Mock-up oder dem virtuellen Prototypen interagiert wird, wird von **interaktiver visueller Analyse** gesprochen.

Analysen am digitalen Mock-up

Bei Analysen am digitalen Mock-up werden im Wesentlichen gestaltbehaftete Analysen durchgeführt. Hierbei werden Aufgaben gelöst, die die Anordnung der Bauteile, wie bspw. die Überprüfung der Einbaubarkeit, betreffen. Die Analysen beziehen sich meist auf die mechanische Konstruktion mechatronischer Systeme. Bild 2-6 zeigt Beispiele solcher Analysen [GEK01, S. 384], [GPW09, S. 378ff.]:

- Bei **Kollisionsprüfungen** und **Ein- und Ausbauuntersuchungen** werden strukturell nahe liegende Bauteile auf Kollisionen geprüft. Dabei wird untersucht, ob es Bauteilberührungen, Überschneidungen oder Freigangverletzungen gibt (Bild 2-6a). Kollisionsprüfungen sind insbes. wichtig, wenn auf engem Bauraum eine hohe Dichte erreicht werden soll oder komplexe kinematische Ketten im System vorliegen. Ein- und Ausbauuntersuchungen basieren auf Kollisionsprüfungen, wie z.B. bei Bewegungsräumen von Rädern eines Fahrzeugs.
- Mit **Abstandsberechnungen bzw. -messungen** wird die Distanz zwischen Bauteilen überprüft. Sie werden bspw. eingesetzt, wenn ein Mindestabstand zwischen Bauteilen eingehalten werden soll (Bild 2-6b).
- Beim **Design Review** werden Arbeitsergebnisse mehrerer Teams in einem digitalen Mock-up zusammengeführt und im Gesamtkontext betrachtet (Bild 2-6c). Basis ist die 3D-Visualisierung der zu diskutierenden Bauteile und Baugruppen. Gegenstand der Analyse ist das Zusammenspiel verschiedener Bauteile und Baugruppen sowie

die Bewertung des Designs. Die Untersuchungen werden in der Regel in Form von Gruppenbesprechungen durchgeführt. Durch die Visualisierung und gemeinsame Diskussion kann eine Vielzahl von Problemen entdeckt und Verbesserungsmöglichkeiten erarbeitet werden [GEK01, S. 483f.].

Zusätzlich zu den aufgeführten Beispielen wird der DMU auch für **Ergonomieuntersuchungen**, wie z.B. zur Erreichbarkeit von Bedienelementen (Bild 2-6 d), zur **Produktpräsentation** (z.B. Marketingzwecke), zur **Dokumentation**, für **Verkaufsunterlagen** und für die **Daten- und Variantenanalyse** eingesetzt [PD10, S. 150].

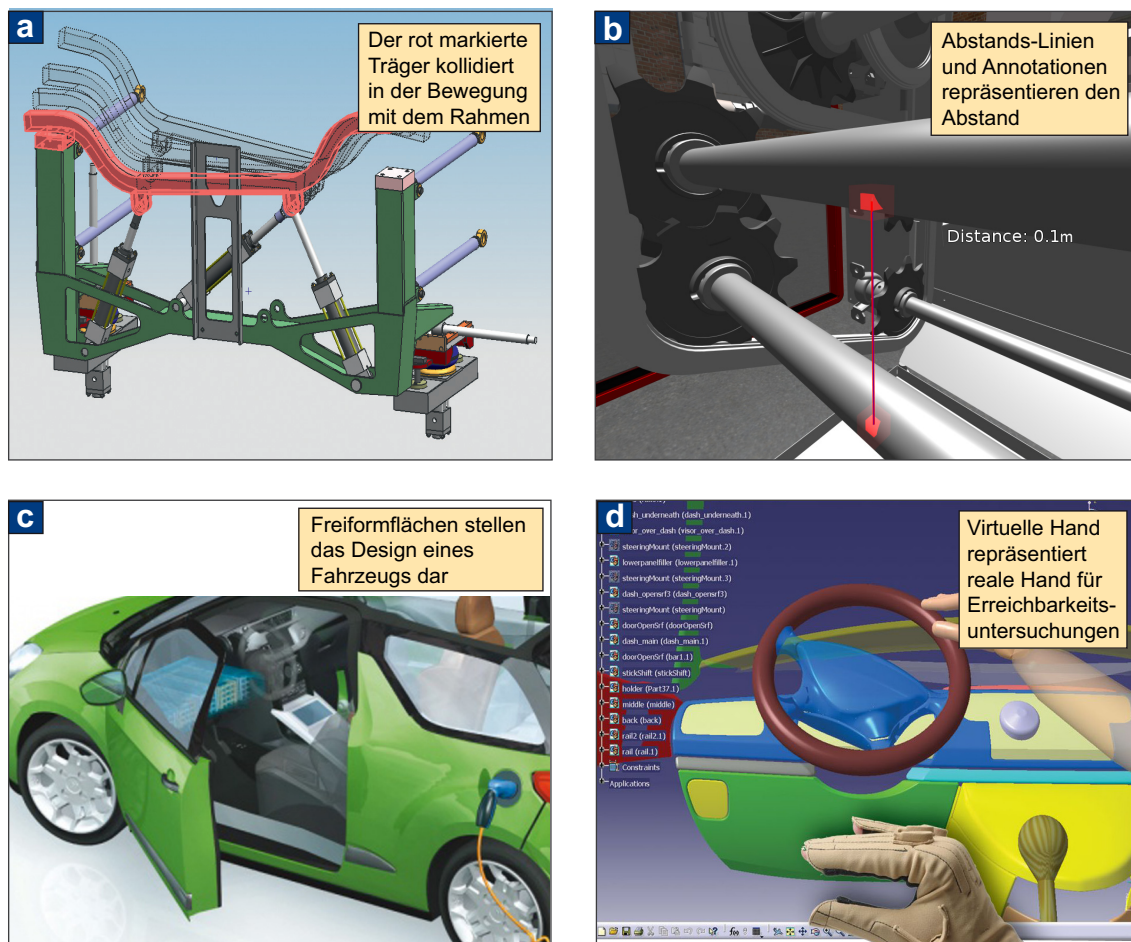


Bild 2-6: Visuelle Analysen am DMU: a) Kollisionsuntersuchung eines Fahrwerks [GPW09, S. 378 ff.], b) virtuelle Messwerkzeuge (Quelle: HNI), c) Designbewertung [Aut13-ol], d) Erreichbarkeitsuntersuchungen [Est12-ol]

Bei den Analysen am digitalen Mock-up werden verschiedene Visualisierungstechniken, wie z.B. Farben, Linien, Transparenzen etc. eingesetzt. Tabelle 2-1 enthält eine Zusammenfassung der relevanten Visualisierungstechniken, die zur Analyse digitaler Mock-Ups verwendet werden:

Tabelle 2-1: Visualisierungstechniken für visuelle Analysen am Digitalen Mock-up

Analyse am DMU	Visualisierungstechnik
Kollision	Farbe, Farbmarkierung, komparative Darstellung, digitale Notizen
Verdeckte Komponenten	Dynamische Schnitte, Transparenzen
Abstandsmessung	Digitale Messwerkzeuge, Text, Linien
Bewegungsraum	Transparenz, Farbmarkierung, subtraktive Darstellung
Gestaltuntersuchung, Design-Review	3D-Modelle, Farben, Materialien
Informationen zum Bauteil (z.B. PDM-Daten)	Selektion, Text, Digitale Notizen

Analysen am virtuellen Prototyp

Die Analysen am virtuellen Prototypen betreffen das Verhalten eines technischen Systems. Im Folgenden werden einige Beispiele und anschließend eingesetzte Methoden und Visualisierungstechniken vorgestellt. Bild 2-7 stellt die Beispiele dar.

Die **Analyse von Mehrkörpersystemen (MKS-Simulation)** wird eingesetzt, um das Bewegungsverhalten komplexer Systeme zu untersuchen, die aus einer Vielzahl gekoppelter beweglicher Teile bestehen. Hierzu gehören Kinematik- und Dynamik-Untersuchungen. Das Bild 2-7a zeigt die Kinematikanalyse eines Roboters mit Schweißzange [GPW09, S. 380 f.].

Bei **Strukturanalysen** werden Spannungsverteilungen und Verformungen von Bauteilen – i.d.R. mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) – berechnet. FEM-Anwendungen sind in der Strukturmechanik, der linearen und nichtlinearen Statik oder Strukturdynamik vertreten [GEK01, S. 423]. Neben Festigkeitsanalysen können mittels FEM Akustikanalysen, zeitliche Temperaturverläufe und elektromagnetische Verträglichkeiten untersucht werden. Das Bild 2-7b zeigt die Temperaturverteilung in einem Verbrennungsmotor [GPW09, S. 381 f.], [CKM05].

Mit Hilfe von **Strömungsanalysen** wird das Verhalten von Flüssigkeiten, Gasen oder Aerodynamik – i.d.R. in einem abgegrenzten Raum – untersucht. Basis hierfür sind numerische Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD). Bei den Analysen können auch Partikel interaktiv eingestreut und entsprechend der Strömungsverlauf dargestellt werden. Im Bild 2-7c ist ein Strömungsfeld in einem Abgasrohr dargestellt [GPW09, S. 382 f.], [LW04].

Zudem werden **flexible Bauteile** aus elastischen bzw. biegeschlaffen Materialien, wie z.B. Kabel, Schläuche oder Dichtungen analysiert. Unter Berücksichtigung von Materi-

alparametern und der Geometrie wird das Verhalten der Bauteile simuliert und analysiert. Im Bild 2-7d ist die Verlegung eines Kabelbündels im Fahrzeug zu sehen [GPW09, S. 382], [OSH10, S. 98].

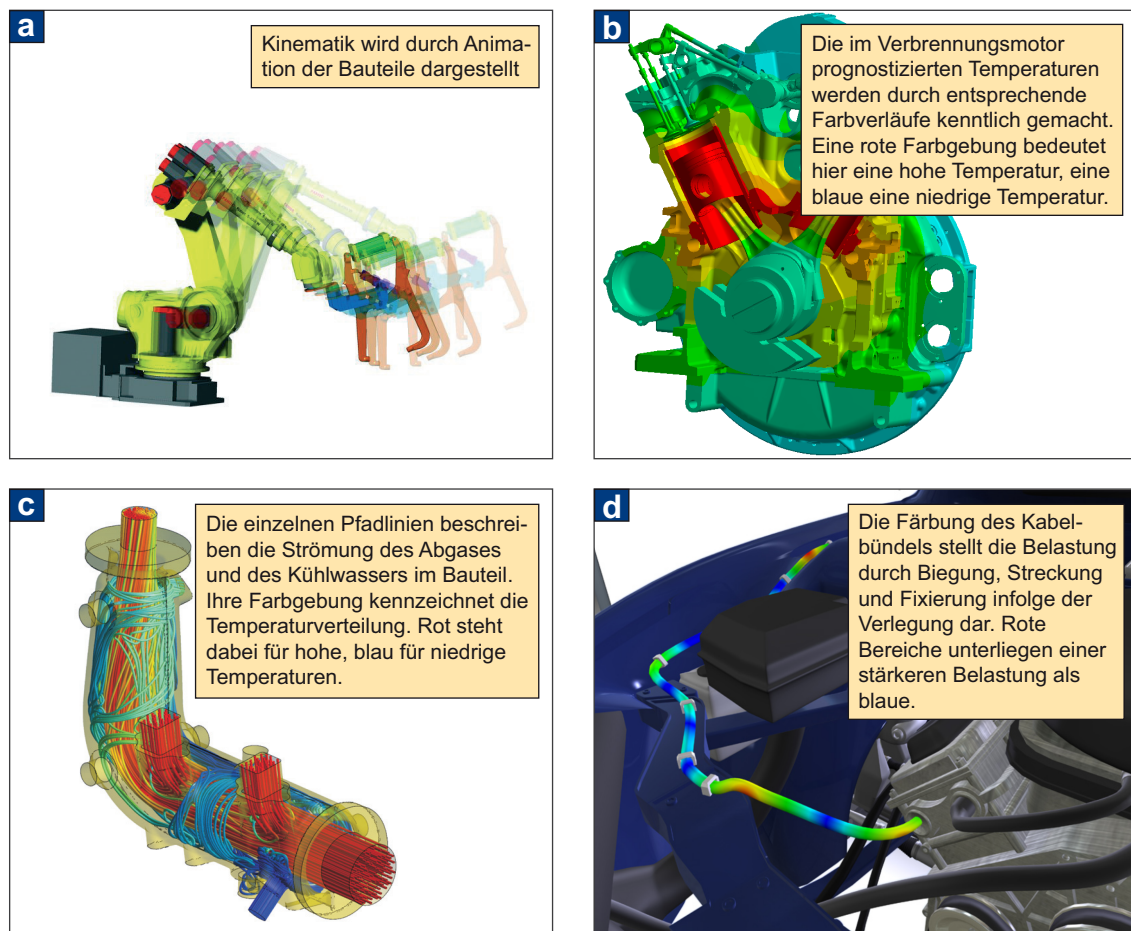


Bild 2-7: Analysen am Virtuellen Prototypen: a) Kinematikanalyse (Quelle: Solid Works GmbH), b) Temperaturanalyse (Quelle: CADFEM GmbH), c) Strömungsverhalten (Quelle: ANSYS GmbH), d) Spannung/Elastizität von Kabelbündeln (Quelle: ICIDO GmbH), [GPW09, S. 380 ff.].

Auch für die Analyse virtueller Prototypen haben sich verschiedene Visualisierungstechniken etabliert. Tabelle 2-2 listet diese auf. Da der virtuelle Prototyp den DMU einschließt, werden die Visualisierungstechniken für den DMU nicht wiederholt.

Tabelle 2-2: Visualisierungstechniken für visuelle Analysen am Virtuellen Prototyp

Analyse am Virtuellen Prototyp	Visualisierungstechnik
Bewegungsverhalten	Animation, Zeitlupe, Superposition
Simulationsdaten, die eine Bewegung repräsentieren (z.B. Strömungsdaten)	Animierte Linien oder Pfeile (Glyph/Metapher für eine Richtung), Superposition
Strukturberechnungen (z.B. Spannungsverteilungen)	Farbe repräsentiert Spannungswert, komparative Darstellung, Superposition
Systemgrößen (z.B. Stärke einer Strömung oder Spannung)	Farbe, Text/Annotation, Selektive Darstellung (Werteunterdrückung), Überhöhung

2.4.3 Analyse der Informationsverarbeitung

Der Fokus der Analyse der Informationsverarbeitung sind abstrakte Daten; Daten, denen keine intrinsische Gestalt zugeordnet werden kann, sondern die eine künstlich geschaffene Form erhalten. Die Analyse erfolgt dabei domänenspezifisch oder domänenübergreifend. Bei domänenspezifischen Analysen werden Simulationsmodelle und Verfahren, wie Kaskaden eines Reglers analysiert. Domänenübergreifende Analysen finden statt, wenn Verfahren unterschiedlicher Domänen gekoppelt oder integriert werden.

Während der Analysen wird überprüft, ob die Ergebnisse eines simulierten Verfahrens den Erwartungen des Entwicklers entsprechen. Dabei werden die Parameter eines Modells so eingestellt, dass ein gewünschtes Ergebnis erreicht wird (siehe Kap. 2.4.1). Bei der Entwicklung eines PID-Reglers werden z.B. die Parameter der Anteile P , I , und D identifiziert. Hierbei wird eine Anregung auf den Regler gegeben, anschließend wird das Verhalten überprüft. Dazu werden SOLL-Werte mit den IST-Werten verglichen. Für ein zufriedenstellendes Ergebnis sollte ein IST-Wert möglichst nahe am SOLL-Wert liegen. Bei der Analyse des Reglers werden zunächst einzelne Parameter, dann Funktionen (i.d.R. in Blöcken modelliert) und anschließend Kaskaden mehrerer Blöcke überprüft (*experimentelle* Methode). Sind zu analysierende Parameter eines Reglers noch recht überschaubar, so wird die Analyse umso schwieriger, je mehr hintereinandergeschaltete Regler untersucht werden müssen (Kaskaden) [Föl08, S. 33ff.].

Auch bei der Entwicklung fortgeschrittener Verfahren (wie z.B. Planung oder Mehrgrößenregelung) werden Parameter variiert und nach der Simulation ausgewertet. Erfüllt bspw. ein autonomes Förderfahrzeug seine Transportaufgabe bzgl. bestimmter Anforderungen optimal, so sind die entsprechenden Parameter richtig eingestellt. Beim Zusammenspiel mehrerer vernetzter Systeme wird untersucht, ob die Interaktion zwischen den Systemen funktioniert und keine Fehler, wie Kollisionen, auftreten.

Zur Durchführung von Analysen komplexer Verfahren existieren analytische und numerische (automatische)¹⁹ und visuelle Analysemethoden. **Analytische und numerische Analysemethoden** liefern Ergebnisse der Daten in textueller Form, z.B. in Log-Dateien. Solche Methoden sind bspw. die *formale Verifikation*, *systematische oder experimentelle* Parametervariation (trial and error) oder *systematisches Testen* (auch: *simulative Verifikation*) [HT10, S. 100], [Rad10, S. 282]. Die Nachteile solcher Methoden sind, dass sie langwierig sind und Analyseschritte nicht im Detail nachvollzogen werden können. Sie werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. **Visuelle Analysemethoden** repräsentieren die zu analysierenden Daten mit Hilfe von Diagrammen oder visuellen Metaphern. Ein Nutzer inspiziert die Ergebnisse visuell und kann in unterschiedlichem Maße auf die Visualisierung der Simulationsdaten Einfluss nehmen. Folgende Visualisierungsszenarien sind dabei möglich: der *Bewegungsmodus*, das *Tracking*, das *interaktive Postprocessing* und die *interaktive Steuerung* (Erläuterungen siehe in [SM00, S. 21 ff.]).

Die visuelle Analyse mechatronischer Systeme basiert heutzutage auf nicht-immersiven 2-dimensionalen Visualisierungstechniken. Der Standard sind *Zeit-Weg-Diagramme* zur Darstellung des Zeit-Weg-Verhaltens, *Signal-Diagramme* zur Darstellung von Signalen oder *Balkendiagramme* zur Darstellung statistischer Auswertungen. Bild 2-8 zeigt zwei Beispiele. Diese Techniken sind i.d.R. in Simulationswerkzeugen wie MATLAB/Simulink oder Dymola enthalten und werden an Simulationsparameter gekoppelt. Bei einem Regler werden zum Beispiel dessen Eingabe- und Ausgabedaten dargestellt. Des Weiteren werden u.a. UML-Diagramme oder Block-Diagramme zur Analyse verwendet.

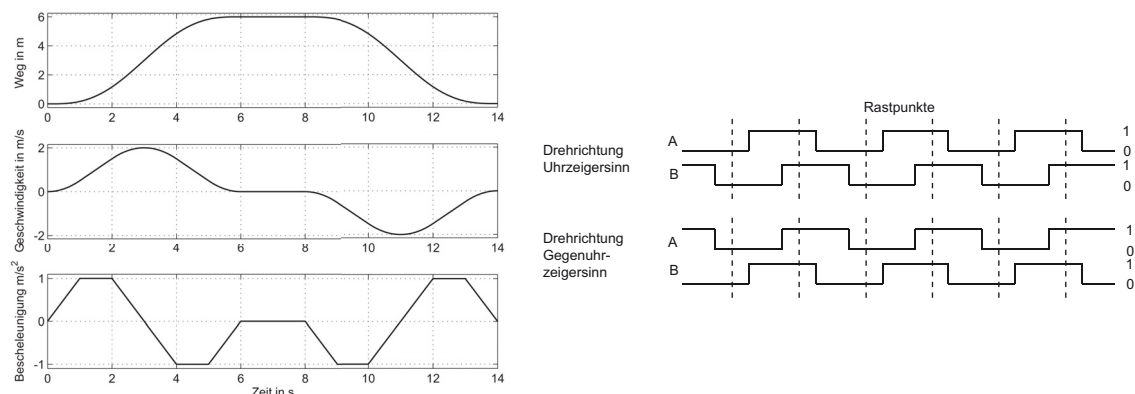


Bild 2-8: links: Zeit-Weg-Diagramm [ADG+09, S. 35], rechts: Signal-Diagramm [Mik12-ol]

¹⁹ Es existieren unterschiedliche Methoden zur Analyse: sie können automatisch durchgeführt werden, wie bspw. bei der *formalen Verifikation* [HT10]. Weitere Analysemethoden sind der Vergleich von Simulationsergebnissen mit experimentellen Erhebungen (*Modell-Objekt-Vergleich: theoretische oder experimentelle Analyse*), (*explorative*) *statistische* Auswertungen oder *Steuerungen* [KN98, S. 45]. Der Modell-Objekt-Vergleich kann wiederum anhand von Plausibilitätstests, Fehlermodellen, statistischen Analyseverfahren oder empfindlichkeitsanalytischen Verfahren durchgeführt werden [KN98, S. 226 ff.]. Diese sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Visuelle Analysen können online oder offline durchgeführt werden. Offline-Analysen werden nach einer Simulation, in einem sogenannten Postprocessing, durchgeführt. Dazu werden statische Visualisierungstechniken eingesetzt, um aufgezeichnete Datensätze zu untersuchen. Der Nachteil dabei ist, dass viele Zusammenhänge nicht erkannt werden, da ausschließlich die für die Visualisierung definierten Parameter analysiert werden. Sollten zur Laufzeit Werte beeinflusst worden sein, ist dies nicht sichtbar.

Bei Online-Analysen werden Visualisierungstechniken zur Laufzeit einer Simulation eingesetzt. Dazu werden die Techniken (z.B. Zeit-Weg-Diagramme) zur Laufzeit dynamisch dargestellt. Ein Anwender beobachtet während der Simulation den Verlauf der Diagramme, um Erkenntnisse zu gewinnen. Der Nachteil hier ist, dass bei hoher Anzahl zu analysierender Parameter der Überblick verloren geht (siehe Bild 2-9). Häufig müssen zu viele Diagramme und Anzeigen gleichzeitig beobachtet werden. Auch gibt es keinen räumlichen Bezug zum mechatronischen Grundsystem. Die Auswirkung von Berechnungen in der Informationsverarbeitung auf das mechatronische Grundsystem können kaum oder nur mit Mühe nachvollzogen werden.

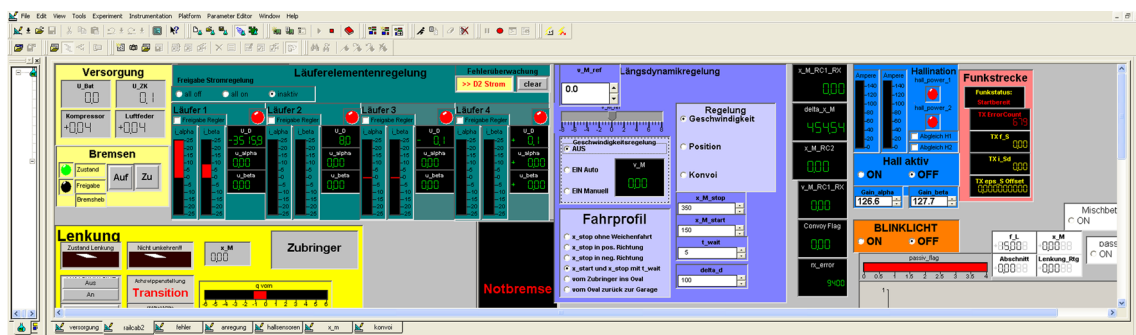


Bild 2-9: Überwachung von Simulationsparametern mit einem ControlDesk (Quelle: RailCab)

Eine Zuordnung der Daten an die Gestalt eines Produktes ist eine Verbesserung für dieses Problem und vereinfacht die Analyse. Bild 2-10 stellt ein Beispiel der Prozessdaten-Visualisierung in einem Werkzeug für die Fahrzeugentwicklung dar. Hier können vielzählige Simulationsergebnisse am jeweiligen Ort ihres Entstehens beobachtet werden. Dazu werden sogenannte virtuelle Instrumente (virtuelle Abbilder realer Anzeigen) an Simulationsdaten, wie Geschwindigkeit, Druck, Temperatur, Umdrehung usw. gebunden und am 3D-Modell des zu entwickelnden Produkts platziert. Die Visualisierungstechniken zeigen die Daten dynamisch an, dies geschieht jedoch nur mit 2-dimensionalen Darstellungen, die nicht immer kontextsensitiv zur Gestalt des Automobils dargestellt werden. Überflüssige Visualisierungstechniken müssen vom Nutzer manuell deaktiviert werden [AMS+11, S. 222], [MHS+02]. Ähnliche konfigurierbare Visualisierungstechniken bieten Simulationswerkzeuge, wie z.B. AMESim (siehe Bild 2-10 rechts).

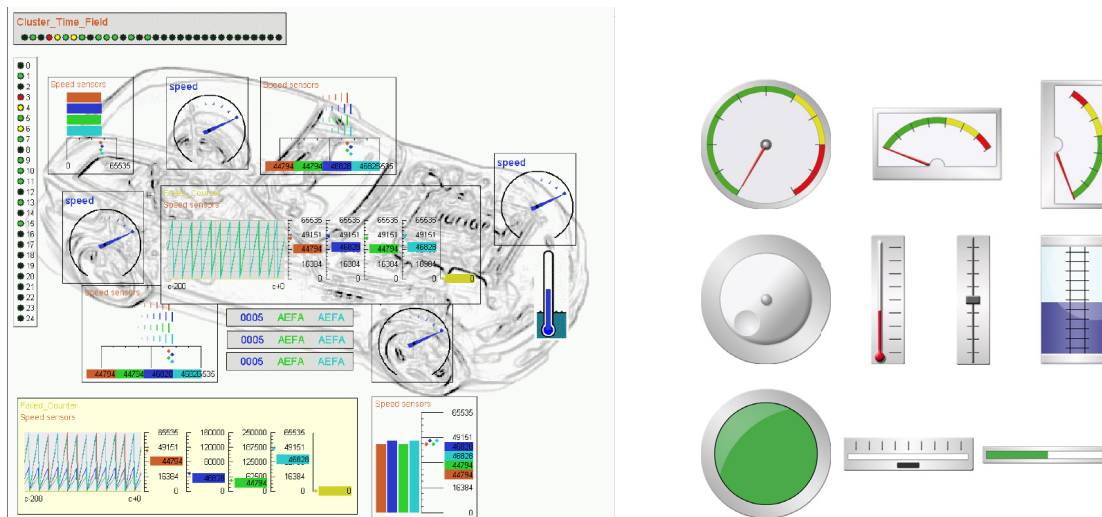


Bild 2-10: links: Prozessvisualisierung in einem Werkzeug für die Fahrzeugentwicklung [MHS+02, S. 68]; rechts: Eine Auswahl von Standard-Visualisierungstechniken gängiger Simulationswerkzeuge [LMS10, S. 3].

2.5 Analyse mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen

Auch wenn das Virtual Prototyping heute fester Bestandteil bei der Entwicklung komplexer technischer Produkte ist, werden dennoch Methoden, Werkzeuge und Basistechnologien kontinuierlich weiterentwickelt, um die Arbeit mit dem virtuellen Prototypen zu optimieren. Die Technologie Virtual Reality (VR) spielt dabei eine bedeutende Rolle. Sie wird heute als Werkzeug zur visuellen Analyse technischer Produkte am virtuellen Prototyp eingesetzt. VR bietet dabei die Möglichkeit, die Produkte 3-dimensional und im Maßstab 1:1 zu betrachten. Durch sie wird ein virtuelles Produkt erfahrbar gemacht und einer frühzeitigen Beurteilung zugeführt [GEK01, S. 482ff.].

Dieses Kapitel zeigt die Einsatzgebiete von VR zur visuellen Analyse technischer Produkte auf. Zunächst erfolgt eine Einführung in die Technologie VR. Anschließend wird ein Überblick über interaktive, visuelle Analysen virtueller Prototypen in VR-Anwendungen gegeben.

2.5.1 Virtual Reality (VR)

Die Technologie **Virtual Reality (VR)** bietet eine intuitive Darstellung von virtuellen Prototypen und deren komplexen Simulationsdaten und ermöglicht somit intuitiven Zugang zu den Prototypen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Definition der VDI-Richtlinie 3633 verwendet:

„Die Virtual Reality ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die es erlaubt, in eine computergenerierte, dreidimensionale, virtuelle Welt einzutauchen, diese als Realität wahrzunehmen, Bestandteil dieser zu sein und mit ihr zu interagieren. Als Teil der computergenerierten

Welt kann man diese von verschiedenen Positionen aus betrachten und sie unmittelbar verändern.“ [VDI3633b, S. 2]

Durch VR taucht der Anwender in eine computergenerierte Welt ein und nimmt diese Welt genau wie die reale Welt wahr. Er kann innerhalb der simulierten virtuellen Umgebung²⁰ handeln (Bild 2-11), die Anwendung steuern und sich im Idealfall wie in seiner bekannten Umgebung verhalten [Bri09, S.6]. Bei großflächigen Szenarien kann der Nutzer zudem einen Überblick über alle dargestellten Komponenten erhalten; Er kann zudem in Komponenten oder Räume hineinsehen und sich an Orte begeben, die in der Realität gefährlich sind.



Bild 2-11: Virtuelle Umgebung erzeugt durch ein immersives VR-System (Quelle: Heinz Nixdorf Institut)

Zur Erzeugung einer virtuellen Umgebung ist ein VR-System notwendig. Ein VR-System besteht aus allen notwendigen Hard- und Softwarekomponenten um Virtuelle Umgebungen zu erzeugen und zu betreiben. Hierzu gehören mindestens ein Rechner, ein Monitor, eine Grafikkarte, Interaktionsgeräte, Softwaretools zur Modellierung von 3D-Modellen sowie Rendering-Software zur Berechnung der Bilder. Bei VR-Systemen

²⁰ In dieser Arbeit werden die Begriffe Virtuelle Realität und VR-Umgebung wie folgt abgegrenzt: Die VR-Umgebung stellt die künstliche Welt dar, in der sich ein Nutzer befindet. VR hingegen umfasst alle Aspekte, die zur Generierung einer VR-Umgebung notwendig sind. Die VR-Umgebung ist ein Teil der Virtuellen Realität.

kann im Wesentlichen zwischen *Desktop-VR-Systemen*²¹ und immersiven „Highend“ VR-Systemen unterschieden werden [GPW09], [GVT08].

Die wesentlichen **Eigenschaften von VR** sind die *Immersion, Präsenz, Interaktion in Echtzeit* und die *Skalierung im Maßstab 1:1*. Zudem bietet sie Raum für *Visualisierungstechniken* zur visuellen Analyse abstrakter Daten [SHH+11], [LW04], [GVT08]:

Die **Immersion** (auch: „Eintauchen“) sagt aus, wie stark ein Nutzer (objektiv) in die virtuelle Umgebung integriert ist. In dem Zusammenhang wird auch vom Immersionsgrad gesprochen. Dieser deutet an, wie viele Sinne des Anwenders (Sehsinn, Hörsinn, usw.) durch Simulationen „getäuscht“ werden. Je weniger die Realität wahrgenommen wird, desto höher ist der Immersionsgrad. Die Immersion wird durch den Einsatz und die Konfiguration der Geräte für das VR-System erreicht. Solche Geräte sind z.B. ein HMD (immersiv), eine CAVE (semi-immersiv) oder ein Display (nicht immersiv) [Bri09, S. 5f.]. Dabei hängt das Eintreten der Immersion von mehreren Faktoren ab: dem Grad der Übereinstimmung zwischen virtueller und realer Umgebung und dem Ausmaß der Beeinflussbarkeit der VR-Anwendung durch den Benutzer, welche Interaktion voraussetzt.

Die **Präsenz** beschreibt das subjektive Empfinden eines Nutzers, sich als Teil der virtuellen Realität wahrzunehmen; sie adressiert einen Bewusstseinszustand. Die Präsenz ist gegeben,

„wenn die multimodalen Simulationen (Bilder, Akustik, Haptik, Feedback, etc.) vom Gehirn berechnet werden und als kohärente Umgebung verstanden werden, in der wir Aktionen und Interaktionen ausführen können“ [GVT08, S. 4].

Eine hohe Präsenz ist erreicht, wenn der Nutzer glaubt, sich mit allen Sinnen in der virtuellen Umgebung zu befinden. Ein Zeichen der Präsenz ist, wenn ein Nutzer sich in der virtuellen Umgebung so verhält, wie er sich in einer ähnlichen Situation in der Realität verhalten würde [GVT08, S. 4f.].

Interaktion in Echtzeit: VR erfordert Interaktionstechniken zur Navigation in der virtuellen Umgebung sowie zur Manipulation der virtuellen Umgebung. Zur Interaktion werden intuitive Interaktionstechniken oder -metaphern, wie das Greifen, das Markieren oder die Selektion von virtuellen Bauteilen eingesetzt. Die Interaktion unterstützende Geräte sind zum Beispiel Datenhandschuhe, Flightsticks, Wii-Controller, Gamepads aber auch die Handgestenerkennung zur möglichst natürlichen Interaktion. Eingabe und

²¹ Ein Desktop-VR-System besteht aus einem Standard-PC und einer 3D-Grafikkarte und ermöglicht einen kostengünstigen Einstieg in die VR-Technologie. Die Bildausgabe erfolgt über einen Standardmonitor. Die Arbeit am Monitor bedeutet, dass ein VR-Anwender wie durch ein Fenster in die virtuelle Welt von außen hineinschaut. Die Interaktion erfolgt mit einer Computermaus oder einem Joystick.

Reaktion eines VR-Systems müssen in Echtzeit²² geschehen. Ansonsten wird die Immersion und die Präsenz des Anwenders reduziert. Auf Interaktionsgeräte wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen, umfassende Beschreibung geben jedoch [GEK01, S. 503ff.] und [PD10, S. 245 bis 279].

Skalierung im Maßstab 1:1: VR stellt Modelle grundsätzlich im Maßstab 1:1 in Relation zum eigenen Körper des Nutzers dar. Folglich wird ein Produkt dem Nutzer in Originalgröße dargestellt, so dass dieser einen realistischen Eindruck über dessen Ausmaße erhält. Bei Bedarf lassen sich die Produkte auch vergrößern oder verkleinern [Rad10].

Raum für zusätzliche Visualisierungstechniken: In virtuelle Umgebungen kann die Gestalt eines Produkts mit zusätzlichen Informationen abstrakter Simulationsdaten angereichert werden. Dazu werden die Informationen mit Hilfe von Annotationen, Visualisierungstechniken oder visuellen Metaphern repräsentiert und kontextsensitiv am 3D-Modell ausgerichtet (vgl. auch Kapitel 2.4.2). Hier entstand der Begriff der sogenannten *Information-rich virtual Environment (Informations-angereicherte virtuelle Realität)* [Pae02, S. 47].

Folgende Vorteile entstehen durch die Kombination von VR mit zusätzlichen Visualisierungstechniken zur Darstellung abstrakter Informationen:

- Das Verständnis der abstrakten Daten wird verbessert. Der Betrachter gewinnt schneller Informationen aus den Daten, da sie im Kontext der Gestalt eines Produkts dargestellt werden. Der Mensch ist konditioniert Informationen einem physikalischen Objekt zuzuordnen, auch wenn dieses nur simuliert ist. Der Kontext erlaubt die Darstellung von Ursache und Wirkung, sodass abstrakte Daten zusammen mit dem Verhalten eines technischen Systems betrachtet und dadurch verständlicher werden. Ein komplexer Sachverhalt ist dadurch ohne Vorwissen (eingängig) verständlich [Wex93, S. 9, 45], [Kra09, S. 82 f.].
- Informationen unterschiedlicher Verfahren und unterschiedlicher Domänen können in einer Umgebung zusammengebracht werden. Basierend auf dem Leitgedanken „*Ich sehe was du siehst*“ (What You See Is What I See) fördert VR die interdisziplinäre Kommunikation. Das Zusammenspiel der abstrakten Daten unterschiedlicher Verfahren kann durch zusätzliche Visualisierungstechniken betrachtet werden, sodass die Herausforderung, die Integration verschiedener Verfahren (siehe Kap. 2.4.1) unterstützt wird [Wex93, S. 41].
- Durch Visualisierungstechniken, wie z.B. Hervorhebung, kann die Aufmerksamkeit des Nutzers auf Bereiche der VR-Umgebung gelenkt werden, in denen interessante

²² Für die Darstellung und Reaktion eines VR-Systems auf Nutzereingaben ist weiches Echtzeitverhalten ausreichend. Weiches Echtzeitverhalten heißt, dass die Dauer eines Vorgangs üblicherweise nicht eine angegebene Obergrenze überschreitet. Für eine realistisch wirkende visuelle Wahrnehmung muss ein Vorgang so schnell berechnet werden, dass eine Bildwiederholrate von mindestens 15-20 Hz gegeben ist. Dies ist durch Randbedingungen der menschlichen Physiologie bedingt [Bri09, S. 7].

Ereignisse oder ungewöhnliches Verhalten stattfinden. Dies kann bspw. die Kollision von Systemkomponenten sein.

2.5.2 Visuelle Analyse am virtuellen Prototyp in VR

In VR werden unterschiedliche visuelle Analysen am DMU und VP durchgeführt. Einer der Hauptgründe hierfür ist die Annahme, dass ein Mensch in einer ihm gewohnten Umgebung Informationen eingängiger aufnehmen kann und dadurch einen höheren Grad an Auffassung und Verständnis erreicht. Didaktische Vorteile von VR-Anwendungen sind bereits vielfach belegt worden [SSS+11, S. 194], [JH09].

Bild 2-12 gibt einen Überblick über den Einsatz von VR-Anwendungen in der Produktentwicklung. Die Einsatzgebiete der VR-Anwendungen erstrecken sich über alle Phasen der Entwicklung technischer Produkte; wobei die Entwicklungsmethodik PAHL/BEITZ als Grundlage dient [PBF+07]: Beim Planen und Klären der Aufgabenstellung, bei der Konzeption und dem Design, der Konstruktion, dem Virtual Prototyping und dem Test.

Beim *Planen und Klären der Aufgabenstellung* werden VR-unterstützte Marktanalysen (z.B. bei Conjoint Analysen) betrieben. Eingesetzte VR- oder Visualisierungstechniken sind hier meist rein **gestaltbehaftete Daten**, die ein Nutzer bewertet [GEM01], [Rot10].

In der Phase *Konzeption und Design* werden (interaktive) Design Reviews durchgeführt. Hier können eine frühzeitige Bewertung des Designs, eine Daten- und Variantenprüfung sowie Konfigurationsprüfung, Ergonomie- und Sichtuntersuchungen sowie virtuelle Dokumentationen und Ergebnispräsentationen durchgeführt werden. Eingesetzte VR- oder Visualisierungstechniken sind hier die **fotorealistische Darstellung**²³, **Transparenz**, **Schnittebenen**, verschiedene **Kamerasichten** und virtuelle **Annotationen**. Durch die realistische Darstellung werden Anmutung, Materialien, Texturen sowie Form und Farbe am digitalen Modell untersucht, wodurch Entscheidungen über Designanforderungen schnell getroffen werden können [CSW09, S. 71ff.], [VDC12].

Während der *Konstruktion* lässt sich VR zur Analyse komplexer Baustrukturen einsetzen. Hierbei werden die Gestalt der Bauteile visualisiert und verschiedene Bauteile **farblich** voneinander abgehoben. Weitere Techniken sind die **Hervorhebung** von Kollisionen und **virtuelles Vermessen** [CSW09, S. 84ff.].

Beim *Virtual Prototyping* erfolgt insbesondere eine Analyse des Verhaltens und somit abstrakter Simulationsdaten, die mit Hilfe zusätzlicher Visualisierungstechniken dargestellt werden. Die Anwendungen der VR-basierten Analyse von virtuellen Prototypen gleichen den Analysen am virtuellen Prototypen aus Kapitel 2.4.2. Dies sind Simulationen, die im Rahmen der Produktentwicklung durchgeführt werden, wie dynamische

²³ Fotorealistische Darstellungen werden durch die Simulation von Lichtverteilungen und dessen Reflexion auf Oberflächen der Modelle berechnet. Die bekanntesten Verfahren sind das sogenannte *Raytracing-Verfahren* und *Radiosity-Verfahren* [NH04, S. 165ff.].

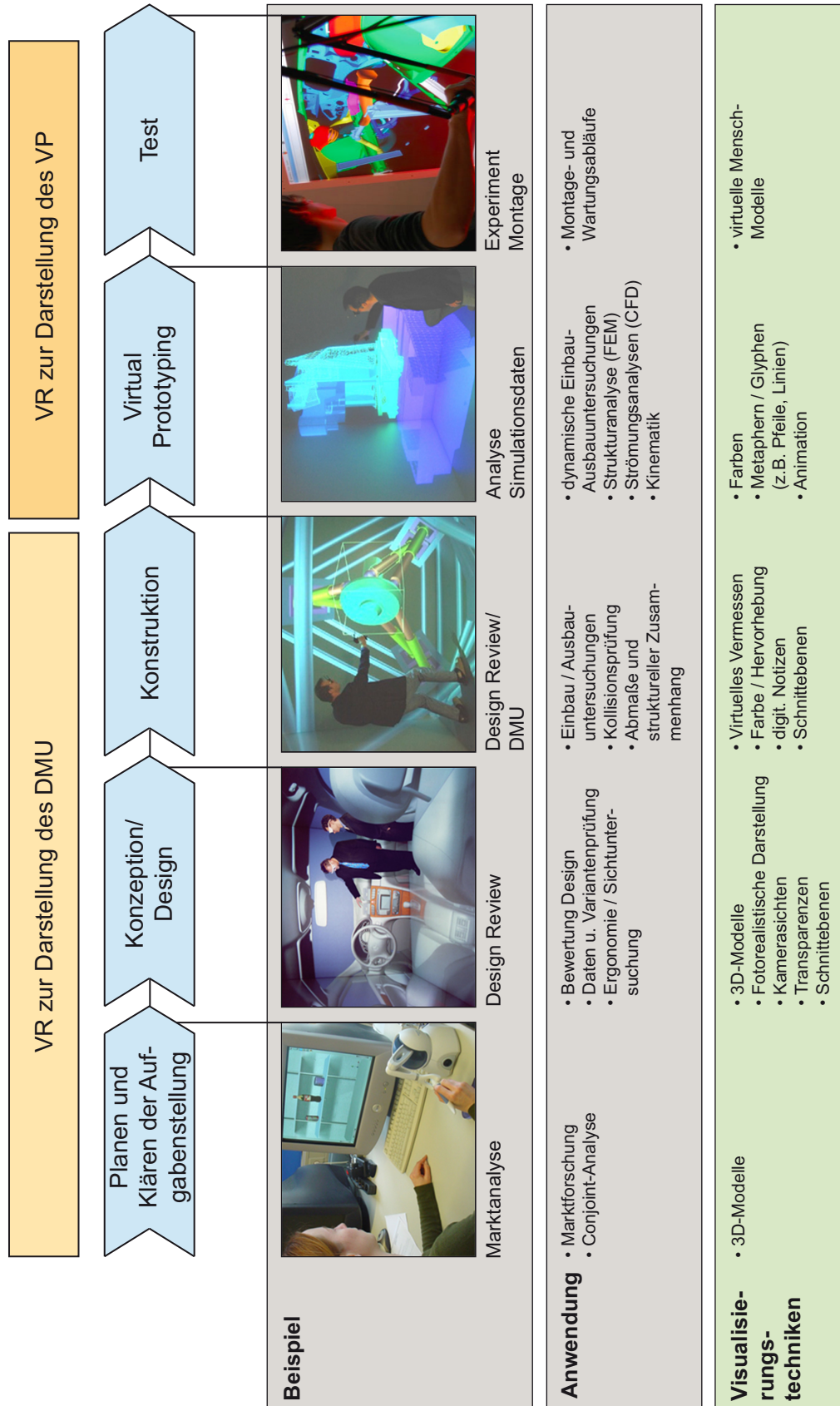


Bild 2-12: Einsatz von VR-Anwendungen im Produktentwicklungsprozess und deren typische Visualisierungstechniken (in Anlehnung an [Rad12])

Einbau-/Ausbauuntersuchungen, die Strukturanalyse, Strömungsanalysen, Mechanische Vorgänge (Kinematik) oder Fluide und Thermodynamische Vorgänge. Die Visualisierungstechniken gleichen hier denen aus Kapitel 2.4.2 [CKM05], [LW04], [CSW09, S. 112ff.]

Beim *Testen* können mit VR Experimente sowie die Überprüfung von geplanten Montage- und Wartungsabläufen durchgeführt werden [VDC12].

Tabelle 2-3 fasst die wesentlichen der vorstehend genannten, in VR genutzten Visualisierungstechniken für Analysen am digitalen Mock-up und dem virtuellen Prototyp nochmals zusammen.

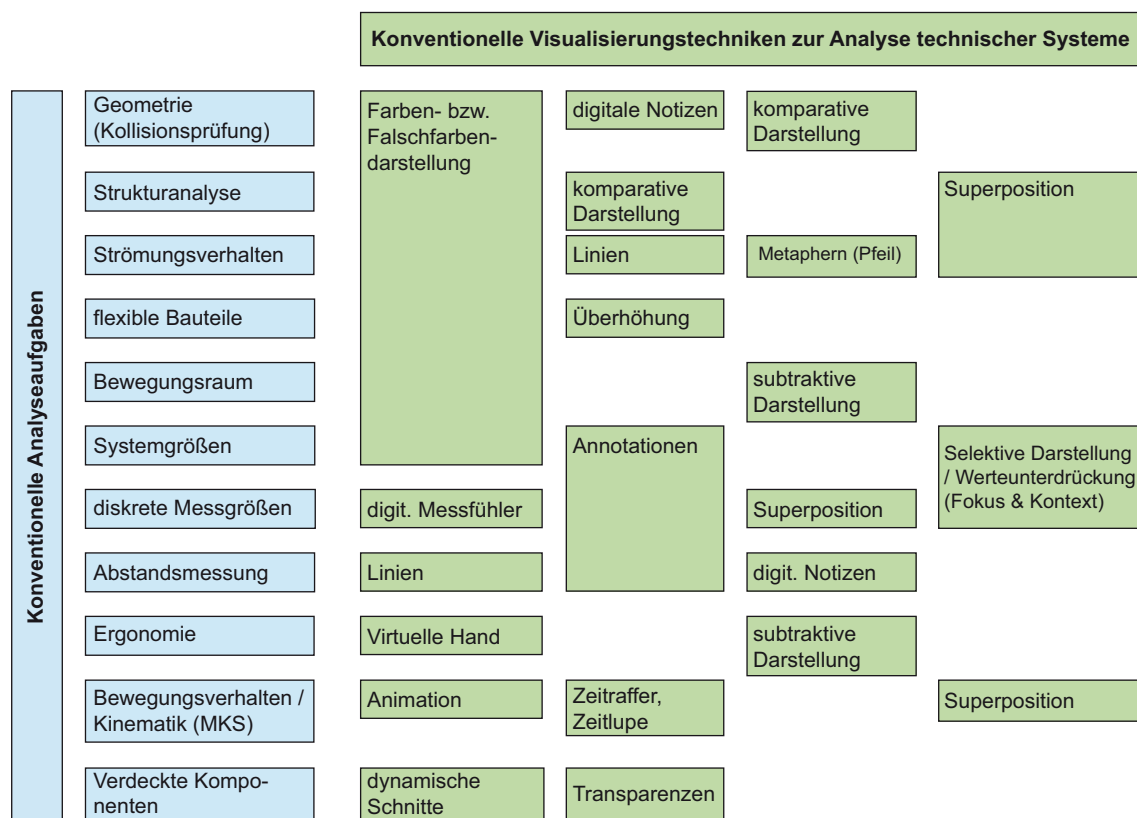
Tabelle 2-3: Visualisierungstechniken für Analysen am DMU und VP in VR

Analyse am DMU und VP	Visualisierungstechnik
Gestaltanalyse (z.B. für Design Review, Marktforschung)	3D-Modelle, fotorealistische Darstellung, Transparenz, Schnittebenen, Kamerasicthen, digitale Notizen
Gestaltanalyse (komplexe Baustrukturen), Kollision	3D-Modelle, Farbmarkierung/Hervorhebung
Bewegungsverhalten	Animation, Zeitlupe, Superposition
Abstandsmessung	Digitale Messwerkzeuge, Text/Annotationen, Linien
Simulationsdaten, die eine Bewegung repräsentieren (z.B. Strömungsdaten)	Animierte Linien oder Pfeile (Glyph/Metapher für eine Richtung)
Hervorhebung von Daten (z.B. Stärke einer Strömung)	Farbe (repräsentiert starke Strömung)
Strukturberechnungen (z.B. Spannungsverteilungen)	Farbe (repräsentiert Spannungswert)
Erreichbarkeitsuntersuchung, Montagen	Virtuelle Hand, virtuelle Mensch-Modelle, subtraktive Darstellung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass visuelle Analysen am virtuellen Prototypen in VR den Entwicklern in allen Phasen der Produktentwicklung einen einfachen und intuitiven Zugang zum technischen System sowie dessen Daten ermöglicht und die fachdisziplinspezifische als auch die fachdisziplinübergreifende Beurteilung des Systems erleichtern [LW04], [CB04]. Dies ermöglicht das frühzeitige Erkennen von Fehlern im Design, der Konstruktion oder der Simulation. Ein weiterer bedeutender Mehrwert liegt in der Kommunikation verschiedener Entwicklungsabteilungen und dem besseren Verständnis von Problemen im Team. Durch das Zusammenführen von Daten und Simulationsmodellen verschiedener Abteilungen können Zusammenhänge und Wirkungswei-

sen besser und schneller verstanden und vermittelt werden. Auch erfolgt durch VR eine Prozessverkürzung durch Reduktion von Änderungswünschen in späten Phasen sowie die Qualitätsverbesserung von Produkten. Dies resultiert in der Einsparung von Zeit und Kosten [OSH10, S. 98], [SHH+11], [GEK01, S. 482ff.]. Ferner können Eindrücke vermittelt werden, die in der Realität nicht greifbar sind. So laufen z.B. bestimmte Vorgänge in der Realität zu schnell ab oder sind gänzlich unsichtbar. Diese können in VR verlangsamt bzw. explizit dargestellt werden; und dies auch jederzeit reproduzierbar [Bri09, S. 5].

In Bild 2-13 sind die im Rahmen der Problemanalyse identifizierten Visualisierungstechniken zusammengefasst. Sie werden für konventionelle technische Systeme verwendet. Links befinden sich die beschriebenen Analyseaufgaben, rechts die dafür eingesetzten Visualisierungstechniken. Dabei unterliegen die Visualisierungstechniken keiner



Legende:
 Konventionelle Analyseaufgaben technischer Systeme
 Visualisierungstechniken
 digit. digitale

Bild 2-13: Konventionelle Analyseaufgaben technischer Systeme (links) und geeignete Visualisierungstechniken (rechts)

Skala oder Bewertung. Zum Beispiel werden für Geometrie-Analysen, Strukturanalysen und Strömungsverhalten Farben- und Falschfarben verwendet aber auch digitale Notizen, komparative Darstellungen, Linien usw. Für abstrakte Daten der Informationsver-

arbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme gibt es jedoch keine etablierten Visualisierungstechniken oder Methoden, die für VR-Anwendungen geeignet sind. Erste Arbeiten zeigen jedoch den Bedarf auf (siehe Kapitel 3).

2.6 Wissenschaftliche Visualisierung und Informationsvisualisierung

Bei der Simulation komplexer mechatronischer Systeme fallen häufig große Datenmengen an, deren Exploration und Analyse zunehmend schwerer ist. Hier liegt es nahe, sich intuitiver Visualisierungen zu bedienen, die die Analyse solcher Daten unterstützt. In diesem Kapitel werden hierfür in Frage kommende Lösungen aus den beiden Fachgebieten Wissenschaftliche Visualisierung und Informationsvisualisierung aufgezeigt. Zunächst erfolgt eine Einführung in die Grundlagen der Visualisierung und die darauf aufbauende Definition der beiden Fachgebiete. Anschließend wird eine allgemeingültige Vorgehensweise zur Spezifikation von Visualisierungsproblemen und der darauf aufbauenden Auswahl von Visualisierungstechniken aus den beiden Fachgebieten dargestellt. Abschließend wird eine generische Pipeline-Architektur aufgezeigt, die bei der Entwicklung von Visualisierungen unterstützt.

2.6.1 Grundlagen Visualisierung

Eine Visualisierung ist nach MCCORMICK et al. wie folgt definiert:

„Visualization is a method of computing. It transforms the symbolic into the geometric, enabling researchers to observe their simulations and computations. Visualization offers a method for seeing the unseen. It enriches the process of scientific discovery and fosters profound and unexpected insights.“ [McC87, S. 3]

Eine Visualisierung muss nicht zwangsläufig rechnergestützt sein [VDI3633b, S. 2]. Die obere Definition meint jedoch vom Rechner erzeugte Darstellungen, die auch im Rahmen dieser Arbeit gemeint sind. Ähnliche Definition der Visualisierung sind in [SM00], [Maz09], [VDI3633b] zu finden.

Übergreifendes Ziel der Visualisierung ist es, die herausragende visuelle Wahrnehmungsfähigkeit²⁴ des Menschen auszunutzen und sie mit der enormen Rechenleistung von Computern zu kombinieren, um das Gewinnen von Erkenntnissen, Einsichten und die Analyse großer Datenmengen zu unterstützen [AMS+11, S. 2].

²⁴ Diese ist zurückzuführen auf die präattentive Wahrnehmung des Menschen. Bei der präattentiven Wahrnehmung werden Informationen sofort ohne bewusste mentale Aufmerksamkeit und Suche erkannt.

Zur Erreichung der beschriebenen Ziele müssen drei wesentliche **Qualitäts-Kriterien** einer Visualisierungstechnik erfüllt werden:

- **Expressivität (Ausdruckskraft):** Eine Visualisierung ist *expressiv*, wenn sie nur die in den Daten enthaltenen Informationen darstellt.
- **Effektivität (Wirksamkeit):** Eine Visualisierung ist effektiv, wenn sie neben expressiven Darstellungen für bestimmte Daten weitere Einflussfaktoren wie die visuellen Fähigkeiten eines Betrachters berücksichtigt (d.h. eine intuitive Informationsvermittlung unterstützt) sowie charakteristische Eigenschaften des Ausgabeegerätes unter Berücksichtigung der Zielsetzung und des Anwendungskontextes optimal ausnutzt.
- **Angemessenheit:** Die *Angemessenheit* wird als Verhältnis zwischen dem Rechen- und Ressourcenaufwand zur Generierung einer Visualisierung und dem Nutzen dieser Visualisierungstechnik definiert.

Die Qualität einer Visualisierungstechnik wird durch folgende **Einflussfaktoren** beeinflusst: die Art und Struktur der Daten, die Visualisierungsaufgabe²⁵, das Wahrnehmungsmodell, das Nutzermodell, das Anwendungsmodell und das Ressourcenmodell, die in [SM00, S. 61ff.] näher erläutert werden.

Das Fachgebiet Visualisierung hat die **Aufgabe**, geeignete visuelle Repräsentationen einer gegebenen Datenmenge zu erzeugen, um damit eine effektive Auswertung dieser Daten zu ermöglichen. Nach SCHUMANN wird das übergreifende Ziel konkretisiert. Indem sie „Unsichtbares sichtbar macht“, soll die Visualisierung [SM00, S. 5]:

- die **Analyse** (Erkenntnisgewinn) und
- das Verständnis sowie die **Kommunikation**

von Modellen, Konzepten und Daten in der Wissenschaft und im Ingenieurbereich erleichtern.

Die **Analyse von Daten** wird unterstützt, indem die entwickelten Bilder einen Betrachter in die Lage versetzen, zu sehen, zu erkennen, zu verstehen und zu bewerten. Innere, sonst verborgene Zusammenhänge sollen aufgezeigt werden, die aus einer Interpretation von z.B. Zahlenreihen nicht ersichtlich sind. Hier kann sie zur Aufdeckung von Fehlern und als Qualitätskontrolle von Messungen oder Simulationen dienen und die wissenschaftliche Produktivität steigern.

Durch **Präsentation der Ergebnisse** wird sowohl die **Kommunikation** als auch das Verständnis über zugrundeliegende Modelle und Konzepte erleichtert. Als gemeinsame

²⁵ Die Visualisierungsaufgabe wird häufig auch als Bearbeitungsziel bezeichnet (z.B. [SM00]) und ist gleichwertig mit der Visualisierungsaufgabe zu verstehen.

Kommunikationsgrundlage der beteiligten Personen kann ein Austausch von Arbeitsergebnissen stattfinden und eine effektive Präsentation von signifikanten Eigenschaften eines (komplexen) Modells oder Ablaufs stattfinden.

Zwei wichtige Begriffe im Kontext der Umsetzung von Visualisierungen sind die Visualisierungstechnik und die visuelle Metapher:

Eine **Visualisierungstechnik** ist die grafische Repräsentation von rechnerinternen Daten, die das Ergebnis eines Visualisierungs-Prozesses ist. Sie ist eine Kombination aus einem oder mehreren visuellen Elementen und mehreren visuellen Variablen. Ein visuelles Element ist ein *Punkt*, eine *Linie*, *Fläche* oder *Volumen*. Visuelle Variablen sind die *Position*, *Größe*, *Orientierung*, *Farbe*, *Helligkeit* und *Form* (weitere Erläuterungen siehe Kapitel A1.2) [Ber83].

Eine besondere Form der Visualisierungstechnik ist die **visuelle Metapher**, wobei eine Metapher ein sprachliches Bild ist, das verwendet wird um Gegenstände oder Situationen anschaulich zu erklären. Hierbei wird ein Wort oder eine Phrase, das/die Objekte oder Aktionen benennt, anstelle eines anderen Begriffs benutzt [PD10, S. 30]. Im Wörterbuch der Kognitionswissenschaften nach STRUBE wird eine Metapher bezeichnet als

*„Übertragung einer Ausdrucksweise auf Fälle in einem anderen begrifflichen Bereich auf der Basis einer Analogie oder Parallelität“
[SBF+96, S. 401].*

Dabei ist die wörtliche Bedeutung außer Kraft gesetzt (z.B. *den Nagel auf den Kopf treffen*). Eine visuelle Metapher ist demnach – ähnlich dem sprachlichen Bild – eine visuelle Repräsentation, die anstelle eines anderen Begriffs verwendet wird²⁶ (z.B. in Betriebssystemen: Papierkorb-Metapher, Schreibtisch-Metapher) [PD10, S. 89ff.].

Ausgehend von den vorstehenden Ausführungen lässt sich das Fachgebiet Visualisierung wiederum in die zwei Fachgebiete Wissenschaftliche Visualisierung (engl: Scientific Visualization) und Informationsvisualisierung (engl: Information Visualization) unterteilen:

Das Ziel der **wissenschaftlichen Visualisierung** ist, Ergebnisse wissenschaftlicher Experimente oder natürlicher Phänomene anzuzeigen [Maz09, S.11]. Ihre Anwendungsdomänen sind häufig die Ingenieurs- und Naturwissenschaften, wie Strömungsmechanik, Radiologie, Klimaforschung oder Geowissenschaften. In diesen Domänen fallen Daten mit Raumbezug an, die häufig durch Sensoren erhoben werden oder Ergebnis von Simulationen sind. Sie werden in der Regel als **physikalische Daten** bezeichnet, da ihnen unmittelbar physikalische Zustände und Prozesse zugeordnet werden (z.B. Kraft, Temperatur, Druck, Geschwindigkeit). Sie rufen konkrete mentale Bilder beim Nutzer

²⁶ Die Verwendung von Metaphern bringt nur dann einen Effektivitätsgewinn, wenn Sinnbilder verwendet werden, die einem Anwender bekannt sind [SM00, S. 116]. Sie stehen in enger Verbindung mit dem mentalen Modell eines Nutzers in Bezug auf einen Anwendungsbereich [PD10, S. 30].

hervor: Z.B. hat eine Strömungsvisualisierung den räumlichen Bezug zu einem Flugzeugflügel. Dabei ist es unerheblich, ob diese Daten in originaler kontinuierlicher Repräsentation vorliegen oder als diskretisierte Näherungswerte [PD10, S. 440].

Die **Informationsvisualisierung**²⁷ stellt diskrete und meist abstrakte Daten dar. Nach CARD et al. ist sie

„die Nutzung computergenerierter, interaktiver, visueller Repräsentationen von abstrakten, nicht-physikalischen Daten zur Verstärkung des Erkenntnisgewinns“ [CMS99, S. 7] (sinngemäß aus dem engl. übersetzt von [PD10, S.440]).

Dabei haben **abstrakte Daten** keinen physikalischen oder inhärent räumlichen Bezug (bzw. Korrespondenz²⁸); sie wecken keine naheliegende Visualisierungsassoziation beim Nutzer. Beispiele für abstrakte Daten sind Aktienkurse und -kennzahlen, Relationen zwischen Dokumenten, Gesundheitsdaten von Patienten, Dateihierarchien auf Computerfestplatten, Auslastungszahlen von Netzwerkbetreibern und allgemein Preise oder Statistiken [Maz09, S. 11], [PD10, S. 435]. Bei der Informationsvisualisierung ist neben der Visualisierung der Ausprägungen von (Daten-)Merkmale auch die Visualisierung der zugrunde liegenden Datenstrukturen insbesondere großer Datenmengen interessant; das Spektrum der zu visualisierenden Daten ist hier in der Regel größer als bei der wissenschaftlichen Visualisierung. Die interaktiven Informationsvisualisierungen sind Benutzungsschnittstellen, mit denen sich derartige Daten explorieren und analysieren lassen. Von traditionellen Benutzungsschnittstellen unterscheiden sie sich durch hochvisuelle Anzeigen und spezialisierte Interaktionstechniken [PD10, S. 435 ff.].

Ein eher neues Gebiet ist das der Visuellen Analytik²⁹ (engl: Visual Analytics). Hier ist es das Ziel, Visualisierungstechniken, Interaktionstechniken sowie automatische Daten-Analysemethoden (ganzheitlich) in realen Szenarios miteinander zu integrieren. Dadurch sollen anwendungsbezogene Probleme gelöst werden. Sie sollen in den Workflow eines Anwenders integriert werden, um ihn dabei zu unterstützen. Bei den Daten werden sowohl abstrakte als auch physikalische Daten betrachtet. Die Analyse der Da-

²⁷ Der Ausdruck Information Visualization wurde von den Wissenschaftlern des Xerox PARC Ende der 1980er geprägt. Die Informationsvisualisierung ist ein interdisziplinäres Gebiet, das unter anderem Methoden aus der Informatik, Statistik, Data-Mining sowie der Kognitionswissenschaft verwendet. Der Begriff Information wird hierbei von Wissen unterschieden; Wissen wird in der Wissensvisualisierung dargestellt.

²⁸ Die Daten beziehen sich auf konkrete Datenwerte, die Werte sind demnach nicht abstrakt. Der Begriff „abstrakt“ hat sich jedoch in der Visualisierung durchgesetzt, und meint, dass die Daten sich nicht auf ein räumlich angeordnetes Objekt beziehen.

²⁹ Methoden der Visuellen Analytik liegen nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit, da die automatische Analyse von Simulationsdaten nicht adressiert werden soll.

ten erfolgt überwiegend automatisch mittels Algorithmen (nähere Ausführungen zu diesem Gebiet finden sich in [AMS+11, S. 263], [TC05]).

Alle drei Gebiete haben gemeinsam, dass sie Daten visualisieren und somit die Analyse der Daten sowie die Mensch-Computer-Interaktion verbessern. Die wesentlichen Unterschiede ergeben sich aus der Herkunft der Daten, ihrem räumlichen Bezug und ob die Verarbeitung automatisch erfolgt. Bild 2-14 zeigt Beispiele der genannten Gebiete.

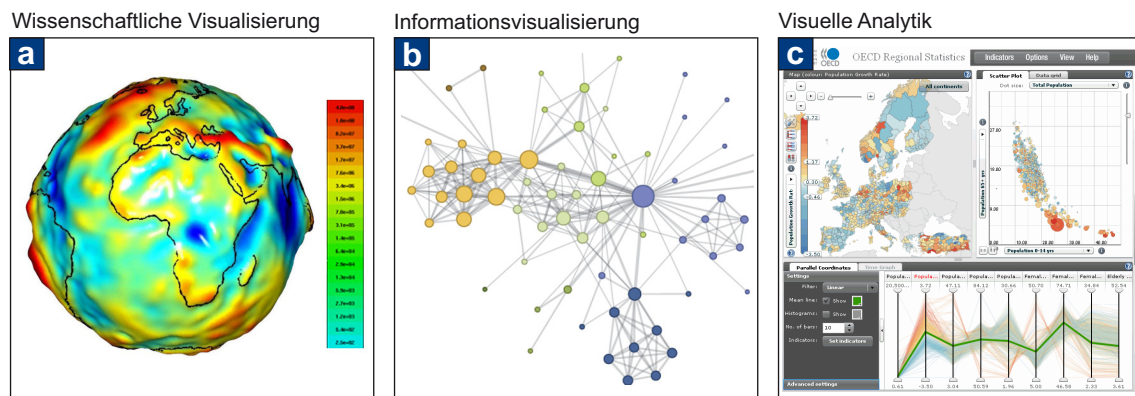


Bild 2-14: Beispielhafte Darstellung von Visualisierungstechniken der Forschungsgebiete wissenschaftliche Visualisierung, Informationsvisualisierung, Visuelle Analytik. Quellen: a) University of Texas, Center for Space Research and NASA; b) und c) angelehnt an [PD10, S. 487], [KKE+10, S. 85].

Trotz der genannten Unterschiede lassen sich die Gebiete nicht scharf abgrenzen. Viele Grundregeln, Methoden bzw. Verfahren sowie z.B. das Grundrepertoire visueller Variablen und Visualisierungstechniken sind in den Gebieten sehr ähnlich [PD10, S. 441].

2.6.2 Spezifikation des Visualisierungsproblems

Das Visualisierungsproblem beschreibt die Fragestellung, die durch eine Visualisierung bearbeitet werden soll. Es ist eine Modellvorstellung, die bei der Entwicklung einer Visualisierung genutzt wird. Das **Visualisierungsproblem** umfasst alle für die Visualisierung wichtigen Bestandteile, Schritte und Einflussfaktoren. Hierzu wird von AIGNER et al. ein Schema³⁰ vorgeschlagen, das im Wesentlichen die drei Fragen beantwortet: 1. Was wird visualisiert - Daten?, 2. Warum wird es visualisiert – Nutzer- und Visualisierungsaufgabe? 3. Wie wird es visualisiert – Visualisierungstechnik? [AMS+11,

³⁰ Zur Entwicklung von Visualisierungstechniken und -systemen sind viele ähnliche, jedoch recht generische Vorgehensweisen entstanden. Im Wesentlichen umfassen sie folgende Schritte: 1. Definition des allgemeinen Ziels, 2. Spezifikation der konkreten Visualisierungsaufgabe, 3. Analyse der zugrunde liegenden Daten 4. Abbildung der Daten auf Visualisierungstechniken 5. Festlegen der Art der Interaktion und 6. Testen (Validierung) (siehe z.B. [Maz09]).

S. 70ff.]. Das Schema und der Zusammenhang der Einflussfaktoren ist in Bild 2-15 dargestellt und wird im Folgenden erläutert³¹:

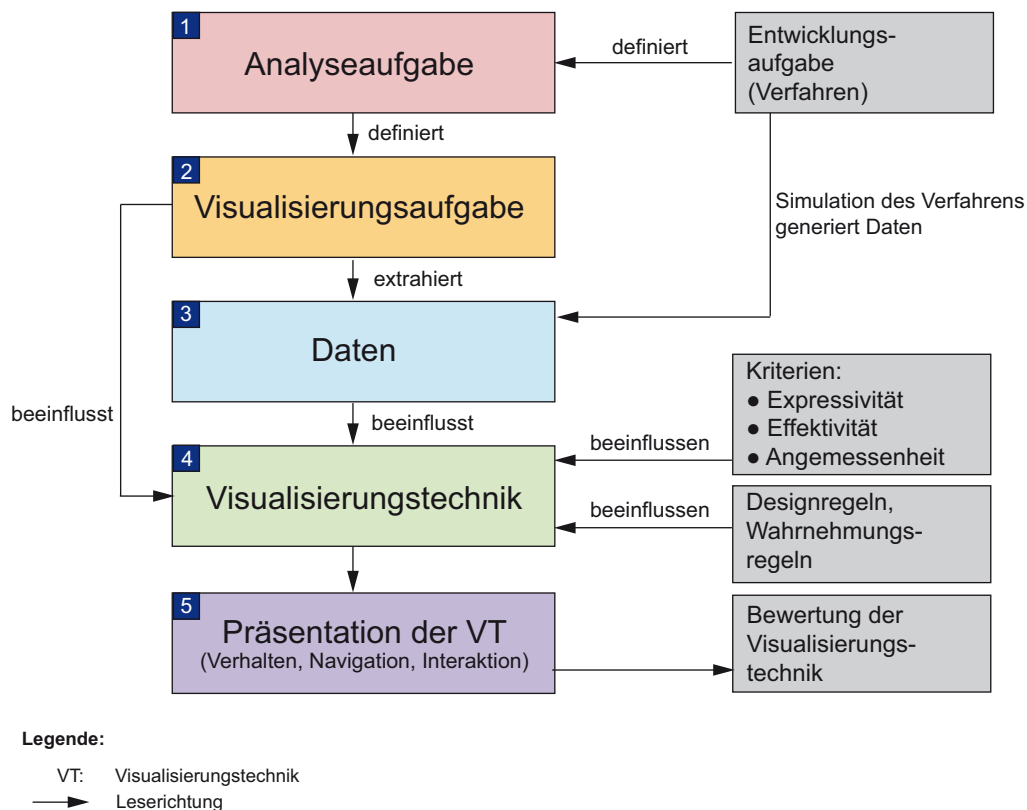


Bild 2-15: Schema zur Spezifikation des Visualisierungsproblems in Anlehnung an [AMS+11, S. 70f.].

2.6.2.1 Analyseaufgabe

Ziel ist es, die Aufgabe zu spezifizieren, die durch die Visualisierung unterstützt werden soll. Im Kontext der Produktentwicklung ist dies eine Entwicklungsaufgabe, wie z.B. das Entwickeln eines Reglers. Dadurch muss deutlich werden, warum bestimmte Daten visualisiert werden und welche Entwicklungstätigkeit ein Anwender mit Hilfe der Visualisierung bewältigen möchte. Die Analyseaufgabe kann mit Use Case-Diagrammen oder Task-Modellen beschrieben werden. Häufig wird sie als Fragestellung formuliert [PMM97], [AMS+11, S. 72ff.].

³¹ Die Reihenfolge der Datenspezifikation (Was wird präsentiert?) und der Visualisierungsaufgabe (Warum wird präsentiert?) wird hier getauscht, da durch die Visualisierungsaufgabe die Datenmenge bereits eingeschränkt wird; so werden lediglich die für die Visualisierung relevanten Daten betrachtet.

2.6.2.2 Visualisierungsaufgabe

Eine **Visualisierungsaufgabe** beschreibt die funktionale Anforderung an eine Visualisierung. Sie bestimmt damit das Ziel (bzw. Zweck) einer Visualisierung (*Was soll die Visualisierung darstellen?*). Es wird definiert, welche Informationen mit Hilfe der visuellen Analyse aus der grafischen Repräsentation der Daten extrahiert werden sollen [SM00, S. 62].

Drei allgemeine, abstrakte Visualisierungsaufgaben sind die explorative Analyse, die konfirmative Analyse und die Präsentation von Analyseergebnissen [AMS+11, S. 4], [SM00, S. 5f.]:

- **Explorative Analyse:** Ziel ist es, neue Strukturen und Zusammenhänge in Daten zu finden, die vorher unbekannt waren. Sie findet meist interaktiv statt, da der Nutzer nach Zusammenhängen suchen muss. Die explorative Analyse ist eine Anwendung der Visualisierungstechniken, von der technische Fachgebiete am meisten profitieren.
- **Konfirmative Analyse:** Hier ist das Ziel, bereits bekannte Zusammenhänge oder vorhandene Hypothesen und Modellvorstellungen durch die Visualisierung zu bestätigen oder zu verwerfen.
- **Präsentation und Kommunikation:** Ziel einer Darstellung ist, die Fakten erkennbar darzustellen, so dass Dritte sie identifizieren und verstehen können um sie als Grundlage für Entscheidungen zu nutzen. Das eigentliche Ziel einer Visualisierung ist die Erreichung dieser dritten Stufe. Eine Visualisierung auf dieser Ebene umfasst auch immer eine Visualisierung auf den zwei unteren Ebenen.

Die allgemein formulierten Visualisierungsaufgaben werden insbesondere für die visuelle Analyse weiter detailliert. Im Folgenden werden Beispiele detaillierter Visualisierungsaufgaben gezeigt.

Die Visualisierungsaufgaben werden durch Texte beschrieben. Aufgrund der unterschiedlichen Begriffsbedeutungen von Visualisierungsaufgaben in verschiedenen Anwendungs- und Benutzerkontexten gibt es Ansätze zur allgemeinen Beschreibung solcher Aufgaben, wie z.B. die Abstraktions-Stufen nach BERTIN: Eine mögliche Verfeinerung der Visualisierungsaufgabe ist eine elementare, eine mittlere und eine obere Abstraktions-Stufe der Informationsvermittlung beim Betrachten eines Bildes. Dies führt darauf zurück, dass die menschliche visuelle Wahrnehmung die Fähigkeit hat, (1) auf ein bestimmtes Element eines Bildes, (2) auf eine Gruppe von Elementen, (3) auf ein Bild als Gesamtes zu fokussieren [Ber83]. Basierend darauf wurden die 3 Kategorien von Interpretationszielen definiert, die angeben welche Werte von Interesse sind, [Rob91, S. 56ff.]:

- PUNKT: Erkennen von Daten für einen gegebenen Beobachtungspunkt,
- LOKAL: Erkennen von Daten in einem lokalen Zusammenhang,
- GLOBAL: Erkennen der (globalen Verteilung der) Datenwerte im gesamten Beobachtungsraum.

Häufig genutzte Aufgaben sind die sieben Aufgaben nach SCHNEIDERMAN, die im Zusammenhang mit einer Taxonomie von Informationsvisualisierungslösungen definiert wurden [Shn96, S. 336], [SP09]:

- *Overview*: Erhalten eines Überblicks über die gesamte Datenmenge, den Informationsraum oder Situation, Erkennen von globalen Mustern oder Trends
- *Zoom*: Heranzoomen von interessanten Daten bzw. Informationsobjekten, Betrachten einer kleineren Untermenge der Daten
- *Filtern*: Herausfiltern von uninteressanten Datenobjekten, Auswahl einer Untermenge anhand von Attributen
- *Details-on-Demand*: Selektieren interessanter Datenobjekte und deren Attribute oder Gruppen von Daten, um Detailinformationen zu erhalten
- *Relate*: Betrachten von Beziehungen zwischen Datenobjekten
- *History*: Protokollieren ausgeführter Aktionen, um Bearbeitungsschritte wiederrufen zu können, erneut abzuspielen oder für progressive Verfeinerungen zu nutzen
- *Extract*: Extraktion von Daten, Daten-Untermengen des Informationsraums und der Anfrageparameter

Im Wesentlichen existieren zwei Möglichkeiten, eine Visualisierungsaufgabe zu beschreiben. Diese sind nicht formalisierte, natürlich-sprachliche Texte oder aber formalisierte Ordnungsschemata bzw. Taxonomien³², die Visualisierungsaufgaben anhand von Kriterien strukturieren und in Klassen einteilen [Shn96, S. 336], [WL90, S. 139ff.].

2.6.2.3 Daten

Mit Daten sind an dieser Stelle die für eine definierte Visualisierungsaufgabe darzustellenden Daten gemeint, die z.B. das Ergebnis von Simulationen oder Experimenten sind. Um eine geeignete Visualisierung zu ermitteln, werden die Daten nach Kategorien eingeteilt [PD10, S. 449]. Einen Überblick solcher Kategorien zeigt Kapitel A1.1.

³² Taxonomien sind Systematiken zur Klassifikation von Gegenständen, wie sie z.B. für die Einordnung von Pflanzenarten nach ihrer Gattung in der Biologie üblich sind [GHK+06, S. 128], [ISO11179].

Basis für sämtliche Visualisierungstechniken ist ein **Datenmodell**. Es besteht aus sogenannten Informationsobjekten mit ihren Attributen (auch: *Merkmale* nach [SM00]) und Relationen untereinander.

- **Informationsobjekte** sind alle Dinge, die für eine Visualisierung innerhalb einer Domäne von Interesse sind, z.B. Personen oder Produkte, wie technische Geräte, Bücher, Filme usw.
- **Attribute**³³ sind Eigenschaften des Informationsobjektes, im Beispiel eines Produktes der Preis, die Variante oder Produktionsmenge. Der konkrete Wert eines Attributes ist die Ausprägung. Typischerweise werden je nach Visualisierungsaufgabe nur bestimmte Attribute ausgewählt. Zwei grundlegende Attributtypen lassen sich unterscheiden: *quantitative* und *qualitative* Daten (siehe Tabelle A-1 in Kapitel A1.1.).
- **Relationen** sind Beziehungen zwischen zwei oder mehreren Informationsobjekten oder Attributen der gleichen oder unterschiedlichen Domänen. Sie können hierarchisch sein oder beliebige andere Relationen darstellen.

Werden Informationsobjekte, deren Attribute oder Attribut-Ausprägungen über die Zeit betrachtet, handelt es sich um *zeit-orientierte* (auch: zeitabhängige) Daten. Einen umfassenden Überblick über die Modellierung zeit-orientierter Daten und deren Abbildung auf Visualisierungstechniken gibt [AMS+11] (vgl. Tabelle A-2 in Kapitel A1.1).

2.6.2.4 Visualisierungstechnik

Effektive Visualisierungen werden in Abhängigkeit von konkreten Visualisierungsaufgaben und Daten entworfen und angewandt [PD10, S. 443]. In diesem Schritt wird festgelegt, wie die Daten visuell repräsentiert werden. Dazu erfolgt die Abbildung der Daten (Mapping) auf die visuellen Variablen und visuellen Elemente.

Die wesentlichen Fragen sind, welche Daten visualisiert werden und wie sie in geeignete Visualisierungen transformiert werden. Die Transformation erfolgt unter Zuhilfenahme von Abbildungsregeln und einer oder mehrerer Visualisierungstechniken. Dies wird nachfolgend an zwei Beispielen demonstriert. Bild 2-16 zeigt beispielhaft zwei unterschiedliche Visualisierungstechniken, die Daten des Bruttoinlandsprodukts unterschiedlicher Länder repräsentieren. Beide Techniken sind expressiv, das Balkendiagramm rechts ist jedoch effektiver, da hier zwischen den unterschiedlichen BIP schneller verglichen werden kann.

³³ Für Attribute (auch: Merkmale) von Daten, z.B. bei multimedialen Informationsobjekten, wird häufig auch der Begriff *Metadaten* verwendet [PD10, S. 449]. In dieser Arbeit wird durchgängig der Begriff Attribute verwendet.

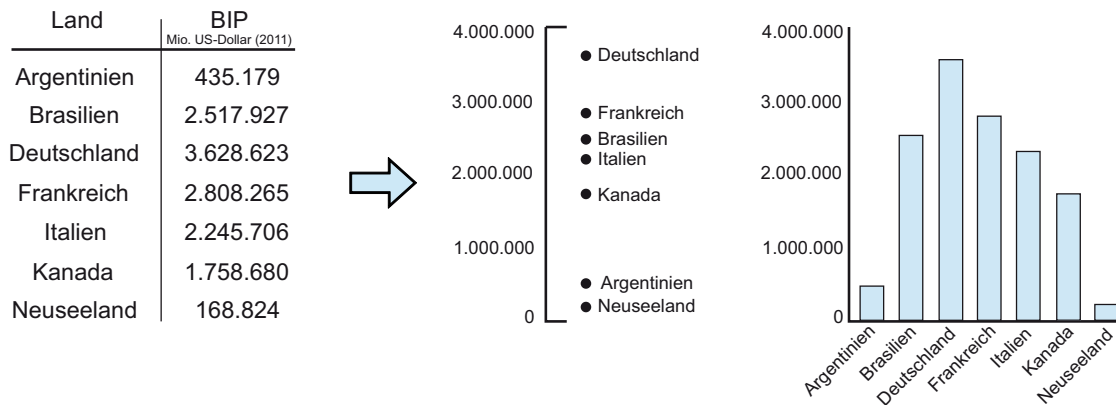


Bild 2-16: Abbildung des BIP unterschiedlicher Länder auf ein Punkt-Diagramm (links) und ein Balkendiagramm (rechts), in Anlehnung an [Maz09, S. 27].

Das zweite Beispiel demonstriert die Abbildung von Zeitdaten auf visuelle Variablen. Praktisch sind zwei Abbildungsmöglichkeiten vorhanden: ein Mapping der Zeit auf eine statische visuelle Variable, wie die Position, Länge oder der Winkel oder aber auf ihre zeitliche Erscheinung (Animation). Bild 2-17 zeigt unterschiedliche Beispiele eines statischen Mapping der Zeit auf visuelle Variablen.

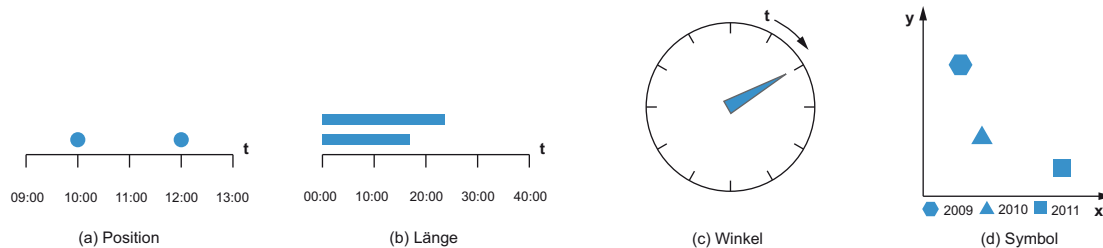


Bild 2-17: Beispiele einer statischen Abbildung der Zeit auf die visuelle Variable a) Position, b) Länge, c) Winkel, d) Symbole nach [AMS+11, S. 77].

Beim statischen Mapping werden Zeit und Daten auf einzelne kohärente visuelle Repräsentation abgebildet, die sich nicht über die Zeit ändern; sie sind *statisch*. Beim Mapping auf die Zeit verändert sich jedoch die visuelle Repräsentation mit der Zeit, sie ist *dynamisch*. Für dynamische Repräsentationen ist eine *Animation* (oder sog. *Frames*) erforderlich, die die Änderung einer zeit-abhängigen Variable, auch mit sich ändernden Bildern repräsentieren. Die Abbildungsmöglichkeiten werden i.d.R. kombiniert [AMS+11, S. 79].

Für die Abbildung von Daten auf visuelle Variablen sind in der Forschung vielzählige Visualisierungstechniken und visuelle Metaphern entstanden, die im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig dargestellt werden können. Einen umfassenden Überblick über Visualisierungstechniken gibt folgende Literatur: zur Informationsvisualisierung [Maz09], zur wissenschaftlichen Visualisierung [SM00], [Wri07], zur Datenvisualisierung [Tel08], zur Visualisierung zeit-orientierter Daten [AMS+11] und zu Visual Analytics [TC05].

2.6.2.5 Präsentation der Visualisierungstechnik

Hier wird festgelegt, wie die ausgewählte Visualisierungstechnik auf einem Ausgabegerät angezeigt wird, wie sie sich verhält und wie damit interagiert wird. Im Folgenden werden die für die Präsentation relevanten Aspekte erläutert [PD10, S. 509]:

- **Platzierung und Ausrichtung:** Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, eine Visualisierung auf dem Ausgabegerät zu platzieren: auf einer virtuellen Wand (Billboard), kontextsensitiv am 3D-Modell oder auf einem separaten Head-Up-Display. Die Konzepte werden im Kapitel A1.4 näher erläutert.
- **Erscheinung:** Die Erscheinung einer Visualisierung beschreibt, zu welchem Zeitpunkt die Technik erscheint und mit welchem Effekt sie erscheint. Ein Effekt kann z.B. ein Einblenden oder ein Blinken sein.
- **Verhalten:** Abhängig der Simulationsdaten verändert sich die Visualisierungstechnik. Sie kann ihre Form, Farbe oder Position dynamisch ändern.
- **Interaktion:** Diese beschreibt, wie ein Anwender mit der Visualisierungstechnik interagiert. Werden z.B. komplexe Graphen visualisiert, muss der Anwender durch diese navigieren und ggf. Ansichten ändern. Auch kann eine Visualisierungstechnik selektiert werden, um weitere Informationen zu erhalten.

2.6.3 Entwicklung effektiver Visualisierungen

Die Visualisierung von Daten ist ein mehrstufiger Prozess, dessen Schritte durch eine sogenannte **Visualisierungspipeline** repräsentiert werden. Die Pipeline transformiert Rohdaten in Bilddaten; Bild 2-18 verdeutlicht dies [AMS11, S. 7]:

Ausgangspunkt sind Daten, die durch Experimente, Erhebungen oder Simulation entstanden sind. Die Pipeline besteht aus den drei Prozess-Schritten *Filtering*, *Mapping* und *Rendering*, die durch die Prozesspfeile dargestellt werden. Die Kästen zeigen Ergebnisse der einzelnen Schritte. Im Schritt *Filtering* werden eingehende Rohdaten für die weiteren Verarbeitungsschritte vorbereitet. Es werden die relevanten Daten selektiert, vervollständigt, reduziert, interpoliert oder gruppiert; je nach Erfordernissen. Ergebnis sind aufbereitete Daten. Im Schritt *Mapping* werden die aufbereiteten Daten auf geeignete visuelle Variablen abgebildet. Ergebnis hier sind Geometriedaten einer Visualisierungstechnik. Beim *Rendering*³⁴ werden Bilder für die berechneten Geometriedaten und visuellen Variablen erzeugt.

³⁴ Das Rendering ist in 3D-Visualisierungssystemen der rechenintensivste Schritt. Dieser besteht wiederum aus mehreren Phasen, die im Gesamten als sogenannte *Rendering-Pipeline* bezeichnet wird [GEK01, S. 400].

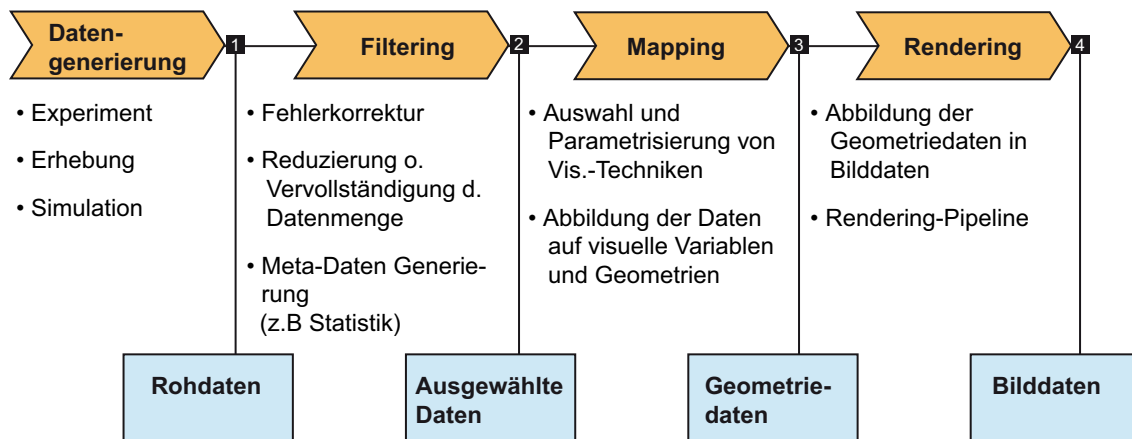


Bild 2-18: Grundaufbau der Visualisierungspipeline (Generische, originale Pipeline nach [HM90, S. 74ff.]).

Die Visualisierungspipeline ist universell zu betrachten. Einen Überblick über erweiterte Formen der Pipeline sind in [AMS+11, S. 7 ff.] zu finden. Wie hierbei der Eingriff des Benutzers auf Simulationsdaten erfolgt, wird anhand von Visualisierungsszenarien in [SM00, S. 21ff.] dargestellt.

2.7 Problemanalyse

Mechatronische Systeme beruhen auf dem engen Zusammenwirken von Maschinenbau, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Informationstechnik. Durch den zunehmenden Anteil an Softwarekomponenten, die komplexe Verfahren umsetzen, entstehen fortgeschrittene mechatronische Systeme mit „inhärenter Teilintelligenz“. Sie sind flexibler, autonomer und besser auf den Benutzer abgestimmt als konventionelle mechatronische Systeme.

Für ihre Realisierung müssen sich die Entwickler zahlreichen Herausforderungen stellen. Drei der bedeutendsten sind:

- **Komplexität der Systeme:** Fortgeschrittene mechatronische Systeme sind komplex. Ihre Komplexität ergibt sich zum einen aus der hohen Anzahl der vernetzten Teilsysteme und zum anderen durch die Hierarchie mechatronischer Systeme. Die Strukturierung in die mechatronischen Ebenen MFM, AMS, VMS ist ein Mittel zur Beherrschung der Komplexität. Dennoch bedürfen die Entwickler weiterer Werkzeuge und Methoden, um die Ebenen im Blick zu behalten.
- **Abstrakte Informationstechnik:** Die fortgeschrittene Regelungstechnik und die Software in fortgeschrittenen mechatronischen Systemen sind abstrakt. Sie verfügen also über keine intrinsische Gestalt. Dies erschwert es, das Verhalten der Informationstechnik und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu analysieren.

- **Disziplinübergreifend:** Die Systeme werden von disziplinübergreifenden Teams entwickelt. Virtuelle Prototypen enthalten Aspektmodelle der verschiedenen Disziplinen. Die Modelle einer jeweils anderen Domäne zu verstehen, sowie das durch die Interaktion zwischen den Modellen simulierte Verhalten nachzuvollziehen, erfordert geeignete Werkzeuge und Methoden.

In Teilen haben sich zur Bewältigung dieser Herausforderungen visuelle Analysen bewährt. Diese fokussieren i.d.R. allerdings nur die Aspekte Gestalt und Verhalten. Sie werden auf Basis des digitalen Mock-ups und des virtuellen Prototypen durchgeführt. Dabei wird die Gestalt mit 3-dimensionalen oder 2,5-dimensionalen grafischen Modellen untersucht. Simulationsdaten, die z.B. bei Strömungs- oder FEM Analysen anfallen, werden mit Hilfe zusätzlicher Visualisierungstechniken oder Visuellen Metaphern analysiert. Eingesetzt werden hier Methoden und Visualisierungstechniken aus der wissenschaftlichen Visualisierung.

Für anspruchsvollere Analysen wird die VR-Technologie verwendet: Durch die stereoskopische Darstellung bietet sie einen realistischen räumlichen Eindruck. Mittels der 1:1 Skalierung und der Immersion in virtuellen Umgebungen werden technische Systeme zudem eingängig dargestellt und folglich besser verstanden. Fachdisziplinübergreifende Teams erfassen ohne spezifische Ausbildung oder Vorwissen das Gesamtverhalten. Darüber hinaus befähigt die Interaktion den Anwender, in Echtzeit mit dem technischen System zu interagieren und es zu explorieren.

Bei fortgeschrittenen mechatronischen Systemen ist die entscheidende, zu analysierende Komponente die Informationsverarbeitung. Ihre visuelle Analyse ist allerdings bis dato nur unzureichend behandelt worden. Dabei bietet die Visualisierung abstrakter Daten zusammen mit der Gestalt ein herausragendes Potential. Die räumliche Zuordnung und die Darstellung von visuellen Metaphern im Kontext eines 3D-Modells ermöglicht ein Verständnis abstrakter Vorgänge der Informationsverarbeitung. Aufgrund der für einen Menschen gewohnten Darstellung durch die räumliche Zuordnung steigt der Informationsgehalt. Für den Bereich Maschinenbau werden solche Informations-angereicherten VR-Anwendungen bereits genutzt; für die Darstellung von komplexen, softwarebasierten Verfahren fortgeschrittener mechatronischer Systeme existieren lediglich Forschungsansätze.

Zur Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme bietet VR folgende Potentiale:

Kombination verschiedener Aspektmodelle in einer Umgebung und Interaktion mit diesen: Aspektmodelle eines Systems, wie Gestalt, Struktur und Verhalten (Funktionen, Aktivitäten usw.) werden während der Entwicklung getrennt betrachtet, um die Komplexität des Gesamtsystems zu reduzieren. In VR können diese Sichten kombiniert werden, um sie zusammen zu betrachten. Durch geeignete Darstellungstechniken kann die Komplexität verringert werden, indem z.B. für einen Nutzer wichtige Informationen einblendet und weniger wichtige ausgeblendet werden. Auch durch Anreicherung von

Visuellen Metaphern können z.B. abstrakte Daten, wie die informationstechnische Interaktion zwischen unterschiedlichen Aspektmodellen oder Systemkomponenten verdeutlicht werden. Das Zusammenwirken von Aspektmodellen wird so zur Laufzeit sichtbar.

Eingängige Visualisierung der Verhaltensanpassung: Konventionelle mechatronische Systeme haben festgelegte Strukturen von Reglern oder gestaltbehafteten Systemelementen; diese ändern sich nicht während des Betriebs. Fortgeschrittene, autonome Systeme sind neben anderen Eigenschaften dadurch gekennzeichnet, dass sie während des Betriebs ihr Verhalten durch Struktur- oder Parameteranpassung anpassen können. Die Strukturveränderung z.B. kann während des Betriebs nun auch als Verhalten des Systems definiert werden; Verhalten und Struktur sind hier nicht mehr strikt trennbar. VR bietet Möglichkeiten die temporäre Struktur- oder Parameteränderung darzustellen. Dazu sind neue Konzepte für Visualisierungstechniken gefragt, wie z.B. die automatische Kennzeichnung von sich ändernden Strukturen.

Analyse einzelner komplexer Aspektmodelle: Im Zusammenhang mit der Gestalt des Grundsystems und der Umgebung können auch einzelne komplexe KI-Verfahren schneller analysiert werden. Daten abstrakter Natur wie Parameter, Schwellwerte oder Entscheidungsalgorithmen haben Einfluss auf das Verhalten des Systems. Durch Darstellung solcher entscheidenden abstrakten Daten kann deren Auswirkung auf das Systemverhalten beobachtet und analysiert werden.

Nach wie vor sind jedoch folgende Herausforderungen bei der Entwicklung von Visualisierungstechniken zu überwinden:

- Zu visualisierende Daten bzw. Modelle eines fortgeschrittenen mechatronischen Systems müssen ermittelt werden; dies erfordert Experten-Kenntnisse der Verfahren und deren Daten [Maz09, S. 24]. Dazu müssen die Verfahren systematisch bzgl. Ihrer Visualisierungsaspekte untersucht werden.
- Die vorhandenen Entwicklungsmethoden sind an Visualisierungsspezialisten ausgerichtet. Es fehlen Leitfäden oder Vorgehensweisen zur Problemspezifikation und Entwicklung solcher Techniken, aber auch Kataloge, die geeignete Visualisierungstechniken oder visuelle Metaphern für bestimmte Problemstellungen vorschlagen.
- Die Auswahl und Entwicklung geeigneter Visualisierungstechniken und Visueller Metaphern ist bisher mühselig; die Transformation von numerischen Daten auf eine Visualisierung immer noch eine „Kunst“ [Wex93, S. 8]. Sie erfordert Experten-Kenntnisse bei der Auswahl visueller Repräsentationen.

Aus den genannten Gründen besteht **Handlungsbedarf** für eine Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen. Der Ansatz dieser Arbeit ist, bestehende Vorgehensweisen, Visualisierungstechniken und Erkenntnisse der Wissenschaftlichen

Visualisierung und Informationsvisualisierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme zu strukturieren und für die interaktive visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme nutzbar zu machen.

Die Systematik sollte im Wesentlichen folgende Bestandteile beinhalten:

Strukturiertes Vorgehensmodell: Das Vorgehensmodell soll den Entwicklungsprozess von Visualisierungstechniken systematisieren und von der Spezifikation einer Visualisierungsaufgabe bis zu ihrer Umsetzung in VR-Anwendungen begleiten. Dazu soll es alle durchzuführenden Tätigkeiten und dazu notwendige Bestandteile integrieren.

Bestandteile zur Spezifikation des Visualisierungsproblems für mechatronische Systeme: Angelehnt an das Schema zur Spezifikation des Visualisierungsproblems (Kapitel 2.6.2) sollen alle notwendigen Bestandteile definiert werden, die zur Visualisierung fortgeschrittener mechatronischer Systeme notwendig sind. Hierzu gehören Analyseaufgaben, Visualisierungsaufgaben, charakteristische Daten fortgeschrittener mechatronischer Systeme, neue für mechatronische Systeme geeignete Visualisierungstechniken und ihre Präsentation in VR.

VR-Anwendung: Eine prototypisch implementierte VR-Anwendung steht zur Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme zur Verfügung. Diese soll alle notwendigen Funktionen zur interaktiven Analyse mechatronischer Systeme bereitstellen. Zum Beispiel sollen Interaktions- und Navigationstechniken bei der Interaktion mit dem virtuellen Prototyp des mechatronischen Systems und den zusätzlichen Visualisierungstechniken unterstützen. Mit Hilfe der VR-Anwendung soll die herkömmliche Analyse ergänzt werden und möglichst einfach, schnell und intuitiv durchgeführt werden.

2.8 Anforderungen

Aus der Problemanalyse resultieren folgende Anforderungen an die Arbeit. Die Anforderungen sind gleichwertig zu betrachten.

An das **Vorgehensmodell** wird folgende Anforderung gestellt:

A1 – Durchgängige systematische Vorgehensweise: Die Systematik soll anhand eines kontinuierlichen Vorgehensmodells vollständig beschrieben und systematisch sein. Sie soll Ingenieure und Visualisierungs-Entwickler von der Spezifikation der Visualisierungsaufgabe bis zu ihrer Darstellung und Nutzung in der VR-Anwendung begleiten. Dazu bietet sie adäquate Methoden und Werkzeuge, die in einen durchgehenden Prozess des Vorgehensmodells integriert sind. Das zu entwickelnde Vorgehensmodell soll allgemeingültig sein und bei der Analyse jeglicher mechatronischer Systeme wiederverwendet werden können.

Zur **Spezifikation des Visualisierungsproblems** sollen folgenden Anforderungen erfüllt sein:

A2 – Methoden und Hilfsmittel strukturiert für mechatronische Systeme: Die im Vorgehensmodell eingesetzten Methoden zur Spezifikation des Visualisierungsproblems sollen für mechatronische Systeme geeignet strukturiert sein. So sollen die Analyseaufgaben ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen widerspiegeln und für unterschiedliche mechatronische Strukturierungsebenen definiert sein. Gleiches gilt für die Visualisierungsaufgaben und -techniken.

A3 – Schablone zur Spezifikation des Visualisierungsproblems für mechatronische Systeme: Es soll eine Schablone entwickelt werden, die einen Entwickler bei der Spezifikation eines Visualisierungsproblems unterstützt: Analyseaufgaben, Visualisierungsaufgaben und -techniken sollen mit dieser erfasst werden können.

A4 - Notation des Maschinenbaus und verwandter Domänen nutzen: Zur Beschreibung von Analyse- und Visualisierungsaufgaben sowie Visualisierungstechniken soll die Notation des Maschinenbaus und verwandter Domänen verwendet werden.

Die **VR-Anwendung** muss folgende Anforderungen erfüllen:

A5 – Visualisierungskonzept für VR-Anwendung: Es soll ein Visualisierungskonzept für VR-Anwendungen erstellt werden, das eine ganzheitliche und ebenen-übergreifende Analyse mechatronischer Systeme ermöglicht. Dies beinhaltet z.B. geeignete Interaktionstechniken zum Wechseln zwischen den mechatronischen Ebenen. Auch soll es die nach den Ebenen strukturierten Visualisierungsaufgaben und folglich -techniken integrieren.

A6 – Unterstützung der ganzheitlichen Analyse mechatronischer Systeme: Die VR-Anwendung soll Entwickler in die Lage versetzen, eine domänenübergreifende intuitive und explorative visuelle Analyse eines fortgeschrittenen mechatronischen Systems am virtuellen Prototypen durchzuführen. Dabei muss eine ganzheitliche Betrachtung des Systems erfolgen: Dazu sind die Aspekte Umfeld, Gestalt, Verhalten und Informationsverarbeitung eines mechatronischen Systems in der VR-Anwendung abzubilden. Die Informationsverarbeitung soll zudem im Kontext der Gestalt und des Verhaltens präsentiert werden und die Auswirkung auf das Verhalten erkennen lassen.

A7 – Unterstützung der Ebenen-übergreifenden Analyse mechatronischer Strukturierungsebenen: In der VR-Anwendung soll eine durchgängige Analyse über alle Strukturierungsebenen mechatronischer Systeme hinweg ermöglicht werden. Dies beinhaltet die Ebenen der Makrostruktur sowie die Ebenen des Operator-Controller-Moduls (siehe Kap. 2.2.3 und 2.3.2). So sollen z.B. ein Konvoi und das Verhalten eines Spurführungsmoduls innerhalb einer Umgebung möglich sein.

A8 – Darstellen von Daten mechatronischer Systeme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten: Durch die Bewegung und dynamische Änderung der Daten mechatronischer Systeme müssen auch die Visualisierungstechniken ihr Verhalten dynamisch an die Daten anpassen (dynamische Visualisierungstechniken). Dazu sind schnelle Verarbeitungs-, Sortier- und Zugriffsalgorithmen innerhalb der VR-Anwendung erforderlich,

die eine Visualisierungstechnik fortwährend richtig positionieren und ihr Verhalten anpassen.

A9 – Visualisierungstechniken geeignet für VR: Die Visualisierungstechniken sollen für den 3D-Raum der VR-Anwendung geeignet sein, sie sollten daher nach Möglichkeit 3-dimensional sein. Sie sollen z.B. einen geeigneten Anzeigort – wie displayfixiert als Head-Up-Display (HUD), objektfixiert, weltfixiert oder anwenderfixiert als Billboard – haben (Erläuterung siehe Kapitel A1.4). Zudem sollen Immersion und Präsenz nicht negativ beeinflusst werden.

3 Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden verwandte Arbeiten beschrieben, deren Gegenstand die Visualisierung informationsverarbeitender Vorgänge in technischen Systemen ist, mit dem Ziel solche Systeme besser analysieren zu können. Die Problemanalyse hat gezeigt, dass es zwar gängige Visualisierungstechniken für die Analyse gestaltbehafteter Daten in VR gibt, jedoch kaum Techniken zur ganzheitlichen Analyse des Grundsystems mechatronischer Systeme zusammen mit den abstrakten Daten der Informationsverarbeitung existieren. Daher beschäftigen sich die Arbeiten dieses Kapitels vorwiegend mit der Entwicklung neuer Methoden und Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse technischer Systeme mit fortgeschrittener Regelungstechnik. In der Regel sind dies Forschungsansätze.

3.1 CarComViz – Informationsvisualisierung zur Untersuchung der Kommunikationsprozesse in Automobilen nach SEDLMAIR et al.

In der Arbeit wird das Visualisierungssystem *CarComViz* zur Analyse von ausgetauschten Datenpaketen in Kommunikationsnetzwerken von Automobilen vorgestellt³³. Dabei wird die Informationsvisualisierung zur Darstellung von Kommunikationsdaten³⁴ (z.B. Signale, Nachrichten) mit der Darstellung des 3D-Modells eines Fahrzeugs räumlich verankert. Dazu wird auf den Ansatz der simultan dargestellten *multiplen koordinierten Ansichten* (vgl. [PD10, S.] 519ff.) aufgebaut. Die Daten des Kommunikationsnetzwerks haben eine Beziehung zum 3D-Modell des Fahrzeugs, da sie ein definiertes Verhalten des Fahrzeugs verursachen. Dadurch wird der Bezug zwischen abstrakten Daten und Realität dargestellt. Andersherum werden Signale durch physikalische Effekte, wie dem Einschalten des Lichts oder Herunterfahren der Fensterscheibe versendet [SRH+09].

Bild 3-1 zeigt die Grafische Oberfläche des Visualisierungssystems, die drei wesentliche Ansichten enthält:

Autobahn-Ansicht: Diese ist die zentrale, abstrakte Sicht der Anwendung (vgl. Bild 3-1a). Die unterschiedlichen Busse werden je als eine Fahr-Bahn dargestellt. Die Nachrichten eines Busses, die von ECU zu ECU versandt werden, werden als vertikale Linien dargestellt. Durch Selektion einer Nachricht können weitere Informationen, wie z.B. Zeitstempel, dargestellt werden.

³³ Die Arbeit entstand in Kooperation der LMU München und der BMW Group Forschung und Technik GmbH.

³⁴ Es werden etwa 15.000 Nachrichten pro Sekunde über 13 Bus-Systeme in einem Auto verteilt. Funktionen zum Versenden von Nachrichten befinden sich in den ECUs (Electronic Control Units). Die Größe und Komplexität solcher Datensätze erfordert die Unterstützung durch ein Visualisierungssystem.

Listen-Ansicht der Nachrichten: Die Listen-Ansicht ermöglicht eine traditionelle Ansicht aller Nachrichten untereinander in textueller Form (Bild 3-1b). Hier werden stets alle notwendigen Informationen sämtlicher Nachrichten dargestellt. Selektiert ein Anwender in der *Autobahn-Ansicht* eine Nachricht, werden ihm die Daten zu der entsprechenden Nachricht angezeigt.

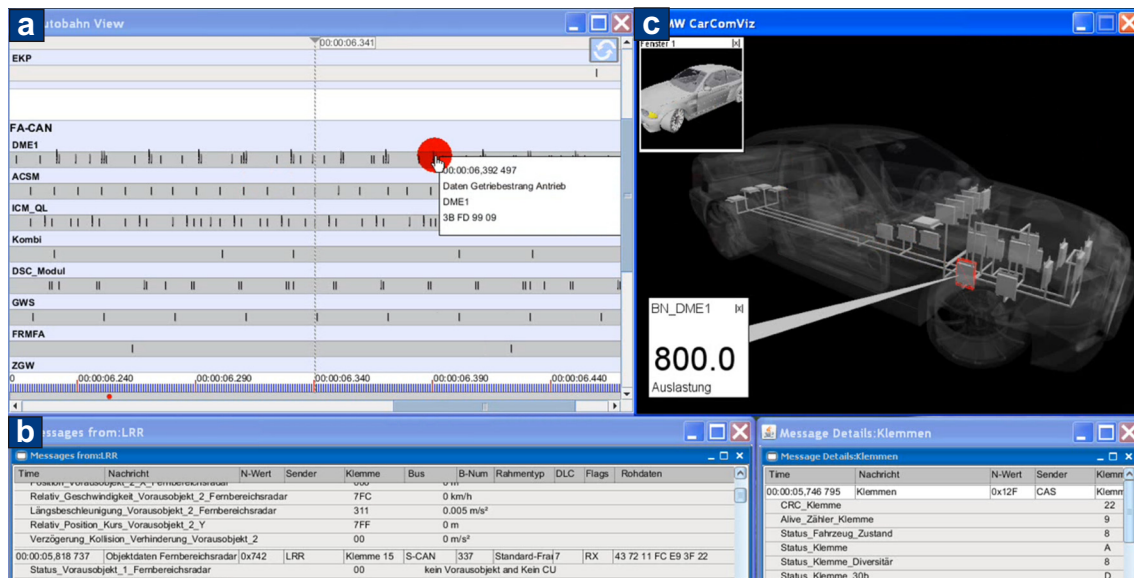


Bild 3-1: Grafische Oberfläche der CarComViz zur Darstellung von Kommunikationsnachrichten: a) Autobahn-Ansicht, b) Listen-Ansicht, c) 3D-Modell-Ansicht [SRH+09].

3D-Modell-Ansicht: Das 3D-Modell stellt das Verhalten des Fahrzeugs in Abhängigkeit der gesendeten Nachrichten über den CAN-Bus dar (Bild 3-1c). Dies kann die Beschleunigung der Räder oder sich bewegende Fenster sein und wird durch Animation dargestellt. Zudem sind die ECUs sowie deren Verbindungen untereinander dargestellt. Wird eine der Nachrichten in der *Autobahn Ansicht* selektiert, wird die entsprechende ECU (Sender) im Fahrzeug farblich hervorgehoben. Auch hier werden Daten, wie z.B. Auslastung, an der ECU annotiert. Eine Navigation durch die Zeitachse in der *Autobahn View* verursacht abhängig vom Nachrichteninhalt über die Zeit Bewegungen des 3D-Modells.

Für die Analyse der Nachrichten werden die Daten mit spezieller Hardware aufgezeichnet und anschließend offline mit CarComViz analysiert. Im Rahmen von Anwendertests konnte nachgewiesen werden, dass die simultane Ansicht eines 3D-Modells und der abstrakten Daten von Vorteil für die Analyse waren; eine Korrelation zwischen versandter Nachricht und entsprechendem Verhalten des Fahrzeugs wurde von den Anwendern direkt erkannt.

Bewertung: Der Ansatz mit den multiplen Ansichten ermöglicht es, den Zusammenhang zwischen abstrakten Daten und dem Fahrzeugverhalten zu erfassen, der Anwender kann jedoch durch die gleichzeitige Darstellung der verschiedenen Ansichten überfor-

dert werden. Das Umfeld des Systems wird nicht untersucht, sondern nur systeminterne Vorgänge. Es werden jedoch zwei mechatronische Ebenen in der 3D-Ansicht dargestellt: das Fahrzeug und die ECUs, die analog zu den Ebenen AMS und MFM gesehen werden können. Die Arbeit fokussiert auf das Visualisierungs-Werkzeug; eine systematische Vorgehensweise zur Entwicklung von Visualisierungen und eines solchen Werkzeugs wird nicht vorgestellt. Insgesamt zeigt die Arbeit, dass die Kombination abstrakter Daten mit einem 3D-Modell sehr hilfreich ist.

3.2 VR-Anwendung zur Überwachung und Steuerung von Drohnen nach BATKIEWICZ et al.

In der Arbeit „Multimodal UAV Ground Control System“ wird eine VR-Anwendung und weitere Visualisierungstechniken zur Überwachung und Steuerung autonomer Flugobjekte eingesetzt. Hier werden alle für den Flugbetrieb notwendigen Daten im Rahmen eines Kampfszenarios dargestellt. Dadurch sollen Piloten viele Drohnen innerhalb eines Kampfszenarios gleichzeitig und von einem weit entfernten Ort steuern können. Die VR-Anwendung dient als innovatives Interface zur Überwachung und Steuerung der Drohnen; multimodale Eingabeschnittstellen, wie Gamepad Controller, Tablet PC oder Spracheingabe ermöglichen die Interaktion mit der Anwendung. Dabei werden zwei unterschiedliche Modi angeboten, ein *strategischer Modus* und ein *Pilotenmodus*. Im strategischen Modus ist ein Überblick über alle Drohnen im Szenario möglich. Im Pilotenmodus erfolgt die Darstellung aus Sicht einer Drohne. Folgende Daten werden in der VR-Anwendung im *strategischen Modus* im Wesentlichen visualisiert; diese sind in Bild 3-2 dargestellt [BDK+06]:

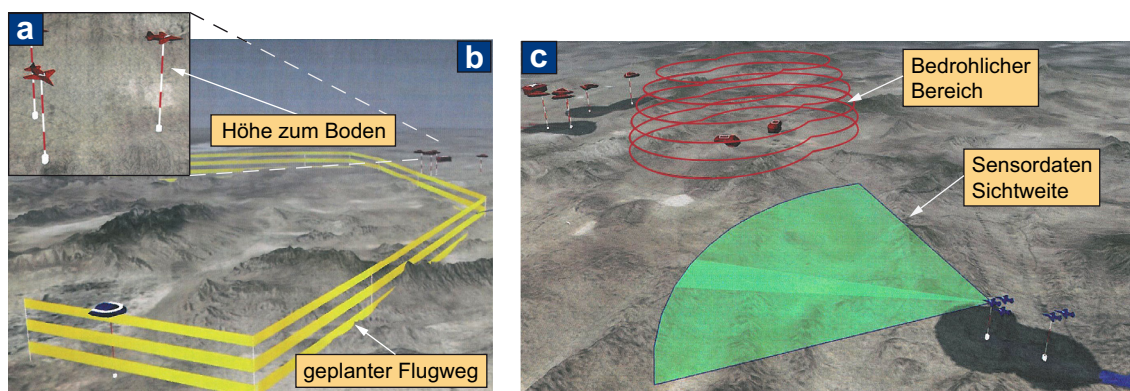


Bild 3-2: Visualisierung von Flugzeugen innerhalb eines Kampfszenarios im strategischen Modus: a) Darstellung der Höhe, b) der geplanten Flugroute und c) der Sensordaten nach [BDK+06].

Eine mehrfarbige Linie dient als Höhendarstellung, um die Höhe des Terrains im 3D-Raum besser abschätzen zu können (Bild 3-2a). Die Farben rot und weiß repräsentieren jeweils 5000 Fuß. Ein kleiner Zylinder erleichtert die Einschätzung der Flughöhe der Drohne über dem Grund sowie die relative Position innerhalb des dargestellten Gebiets.

Der geplante Flugweg einer Drohne wird mit Hilfe mehrerer übereinander angeordneter, in der Farbe alternierender 2D-Balken präsentiert, wobei die Dicke eines Balkens eine Höhe von 5000 Fuß darstellt (Bild 3-2b).

Zudem werden Drohnen-spezifische Daten, wie Position, Verlauf des Kampfes oder Sensordaten dargestellt. Im Bild 3-2c ist die Reichweite eines Sicht-Sensors mit Hilfe eines transparenten Kreissegments dargestellt. Der durch feindliche Raketenwerfer bedrohte Luftraum wird durch konzentrische rote Kreise dargestellt, welche im Abstand von 5000 Fuß übereinander angeordnet sind. Dabei werden mehrere Kreise zu einer Hüllkurve kombiniert, um den bedrohten Luftraum zu visualisieren.

Bewertung: In der VR-Anwendung wird das dynamische Verhalten mechatronischer Systeme sowie relevante abstrakte Daten dargestellt. Es ist sowohl eine ganzheitliche Darstellung des Systems vorhanden (Umfeld und Wechselwirkung zwischen mehreren Drohnen) als auch unterschiedliche mechatronische Ebenen. So werden hier VMS und AMS in einer virtuellen Umgebung präsentiert. Auch diese Arbeit fokussiert auf die VR-Anwendung zur Steuerung und Überwachung von Drohnen. Dabei werden geeignete Visualisierungstechniken verwendet. Eine systematische Vorgehensweise zur Entwicklung von Visualisierungstechniken wird nicht betrachtet.

3.3 Visualisierung von Optimierungsverfahren zur Wegeplanung nach Stöcklein et al.

Der Beitrag „Interaktive Illustration heuristischer Optimierungsverfahren zur Wegeplanung“ zeigt auf, wie unterschiedliche Verfahren zur Wegeplanung visualisiert werden können. Verfahren zur Wegeplanung werden bspw. in den Anwendungsbereichen mobiler Roboter oder Planung von Fertigungssystemen eingesetzt. In dieser Arbeit wird der Ansatz der Wegeplanung innerhalb von Produktionsstraßen mit Fertigungsrobotern und deren Gefahrenbereichen betrachtet. Ziel des Verfahrens ist, für Serviceeinheiten in den Produktionsstraßen einen gefahrlosen kürzesten Weg von einem Startpunkt A zu einem Zielpunkt B zu finden. Während der Entwicklung der Planverfahren erfolgt auch eine Optimierung der Ergebnisse. Für die Optimierung muss eine optimale Parameterbelegung ermittelt werden, die meist durch „Trial and Error“ erfolgt. Die Ergebnisse werden mit Hilfe einer angemessenen Visualisierung dargestellt, sodass die Analyse der Ergebnisse abhängig eingestellter Parameter unterstützt wird. Eine Auswahl solcher Visualisierungen wird im Folgenden dargestellt und im Bild 3-3 veranschaulicht [SBK+10]:

Die Darstellung erfolgt auf zwei im rechten Winkel zueinander angeordneten Bildschirmen mit unterschiedlichen Sichten auf die Daten (siehe Bild 3-3b): einer 2D-Darstellung auf einem Multi-Touch-Display und einer entsprechenden 3D-Darstellung der gleichen Daten auf dem zweiten Bildschirm. Wird auf dem Multi-Touch-Display mit Hilfe physikalischer Objekte mit den Visualisierungstechniken interagiert, verändert sich entsprechend die 2D-Darstellung auf dem ersten Bildschirm als auch die 3D-Darstellung auf dem zweiten Bildschirm.

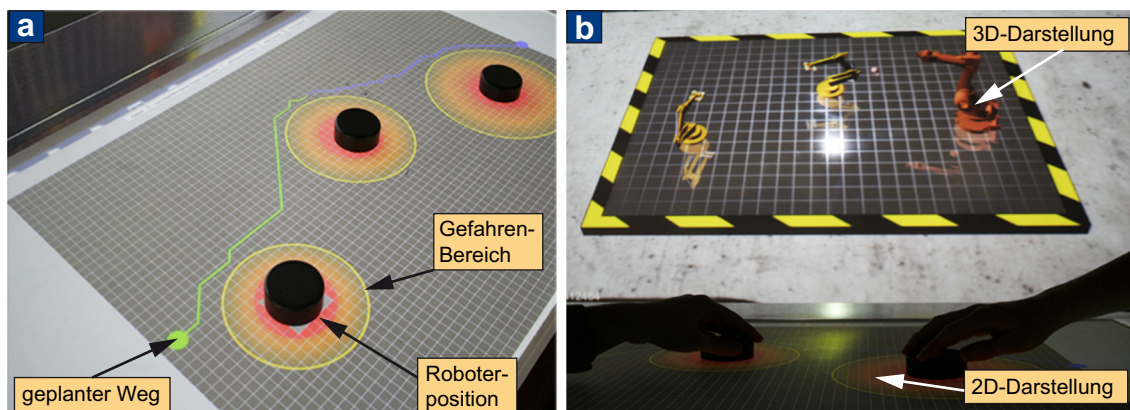


Bild 3-3: Visualisierung von Robotern und geplanten Wegen durch Produktionsstraßen: a) 2D-Darstellung mit Visualisierungstechniken, b) 2D- und 3D-Darstellung auf zwei separaten Bildschirmen nach [SBK+10].

Fertigungsroboter repräsentieren Hindernisse, die bei der Wegeplanung umgangen werden müssen: Der Roboterarm jedes Roboters wird daher als Gefahrenbereich visualisiert. In den Gefahrenbereich können Bauteile des Roboters bei bestimmten Bewegungen hineinragen, so dass eine gefahrlose Durchquerung nicht zu jeder Zeit möglich ist. In der 2D-Darstellung (siehe Bild 3-3a) wird der Bereich mit farbigen Kreisen visualisiert. Die Mitte des Kreises ist rot und repräsentiert die Position des Roboters, der Rand des Kreises grenzt den Gefahrenbereich ab. In der 3D-Darstellung werden 3D-Modelle der Roboter an den entsprechenden Positionen dargestellt (siehe Bild 3-3b).

Eine zweite Visualisierung stellt den berechneten Weg für eine Serviceeinheit durch die Produktionsstraße dar (siehe Bild 3-3a). Der Startpunkt wird mit einem Punkt, der Weg mit einer farbigen Linie dargestellt. Unterschiedliche Farben der Linie kennzeichnen einen bereits zurückgelegten bzw. den noch bevorstehenden Weg an. Die Darstellung des Weges unterstützt den Vergleich von drei unterschiedlichen eingesetzten Planverfahren: dem A*-Algorithmus, der Ant Colony Optimization und der Particle Swarm Optimization. Neben dem berechneten Weg können auch einzelne Parameter der Algorithmen am Bildschirmrand dargestellt und deren Auswirkung auf den berechneten Weg betrachtet werden (siehe [SBK+10]).

Bewertung: Die vorgestellten Visualisierungstechniken für geplante Wege und Gefahrenbereiche werden als 2D-Darstellung visualisiert, sind aber auch auf den 3D-Raum in VR-Anwendungen übertragbar. Die Techniken unterstützen dabei, Planverfahren zu analysieren. Die Analyse- und Visualisierungsaufgaben werden nur indirekt beschrieben; wobei die Notation dem Bereich der Informatik zugeordnet werden kann. Eine ganzheitliche Betrachtung des mechatronischen Systems (Roboter und Serviceeinheiten) erfolgt hier nicht. Z.B. bleibt unklar, ob sich die Roboter während der Simulation bewegen. Auch kann nicht durch unterschiedliche mechatronische Strukturierungsebenen navigiert werden. Eine systematische Vorgehensweise wird auch in dieser Arbeit nicht betrachtet.

3.4 HANNAH – 3D-Visualisierungssystem zur Analyse von Prozessdaten in Kläranlagen nach EINSFELD et al.

Das Visualisierungssystem HANNAH (Here And Now, Near At Hand) entstand im Rahmen des BMBF-Projektes KOMPLETT³⁵, bei dem innovative Systemkomponenten aus Verfahrenstechnik und Informationstechnologie zu einer nachhaltigen Schlüsseltechnologie für Wasser- und Stoffkreisläufe entwickelt und kombiniert werden. HANNAH unterstützt die Analyse komplexer Prozessvorgänge und Prozessdaten in Abwasserentsorgungsanlagen mit Hilfe eines 3D-Visualisierungssystems und weiteren integrierten Visualisierungstechniken. In dem System werden Visualisierungen abstrakter Daten mit der Gestalt der Kläranlage kombiniert. Bild 3-4 zeigt Beispiele dieser Visualisierungen, die im Folgenden erläutert werden [EEW07], [EEW08]:

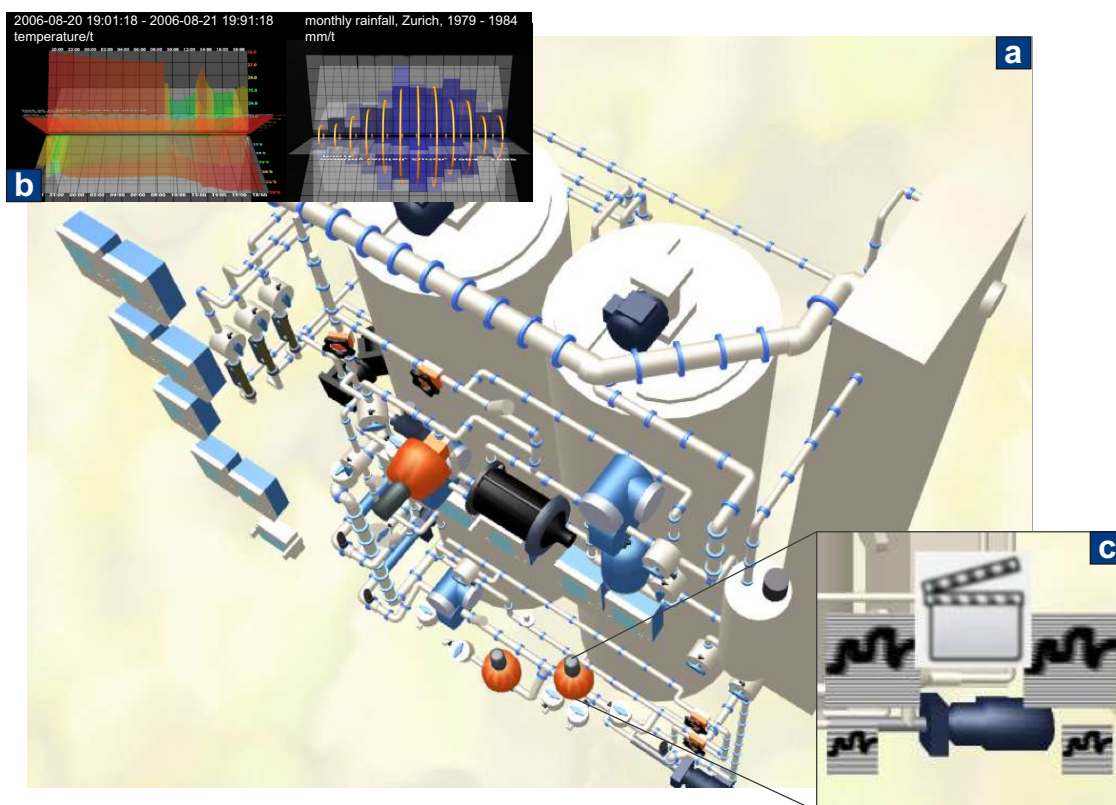


Bild 3-4: Visualisierungstechniken einer Abwasserentsorgungsanlage: a) Gestalt der Anlage, b) 2D-Diagramme zeigen dynamische Prozessdaten und statistische Daten, c) Icons zeigen statische Zustände und Metadaten nach [EEW08].

In Bild 3-4a ist die Gestalt der Kläranlage als 3D-Modell dargestellt. Stoffflüsse zwischen einzelnen Komponenten werden als animierte Linien oder Pfeile an dem 3D-Modell verdeutlicht. In Bild 3-4b sind statistische Daten über die Außentemperatur oder

³⁵ KOMPLETT – Entwicklung und Kombination von innovativen Systemkomponenten aus Verfahrenstechnik, Informationstechnologie und Keramik zu einer nachhaltigen Schlüsseltechnologie für Wasser- und Stoffkreisläufe (2005-2008), gefördert durch: BMBF

der Niederschlagsrate dargestellt. Hierzu wird die Technik Billboard verwendet, auf der die Daten mit Hilfe von Balkendiagrammen präsentiert werden. Die Diagramme sind während der Analyse der Kläranlage permanent sichtbar und werden dynamisch an sich ändernde Daten angepasst. Zudem kann in diesen wie in einem Buch nach Jahreszahlen geblättert werden. In Bild 3-4c sind 2D-Icons dargestellt; diese repräsentieren statische Zustände der Anlage oder aber referenzieren auf weitere Dokumente. Die Icons erscheinen indem ein Anwender interaktiv eine entsprechende Komponente selektiert. Bei Auswahl des Icons werden weitere Informationen auf einem Head-Up-Display angezeigt. Die Bedeutung vieler Icons bleibt in den Veröffentlichungen unklar.

Des Weiteren wird in der Arbeit ein Ansatz beschrieben, um durch zwei verschiedene Ansichten der Kläranlage durchzuschalten; einer Aussenansicht und einer Ansicht innerhalb der Anlage.

Bewertung: Die Arbeit verfolgt den Ansatz, physikalische Komponenten als 3D-Modell darzustellen und alle weiteren abstrakten Daten heterogener Prozesse, in und um das 3D-Modell zu integrieren. Durch die Überlagerung mit den 2D-Diagrammen wird jedoch ein großer Teil der Gestalt verdeckt, was die Immersion in dem 3D-Raum einschränken kann. Zudem wirkt die gesamte Darstellung überladen und unübersichtlich, da alle 2D-Diagramme sehr viele Daten beinhalten und zudem in Bewegung sind. Das Wechseln von Ansichten durch die Systemkomponenten ist sehr sinnvoll. Leider ist dies nur in diskreten Stufen möglich, wodurch ein Anwender den Kontext verlieren kann. Eine Vorgehensweise zur Erstellung und Auswahl geeigneter Visualisierungstechniken für die zu analysierenden Daten wird hier nicht beschrieben.

3.5 Visualisierung von Zuständen in elektrischen Energiesystemen nach LIPIEC et al.

In diesem Beitrag werden Visualisierungstechniken zur Darstellung von Energienetzwerken vorgestellt. Dabei werden Daten der Energienetzwerke in einer virtuellen Umgebung mit Hilfe eines 360° VR-Projektionssystems visualisiert, um kritische Zustände und Parameter in den Netzwerken zu überwachen und zu analysieren. Die Visualisierung soll als Leitsystem für Übertragungs- und Verteilungsnetzbetreiber dienen und den zuverlässigen Betrieb von elektrischen Netzen sicherstellen. In Bild 3-5 sind die folgenden Funktionen und Visualisierungstechniken der VR-Anwendung dargestellt [LGN+11]:

Zunächst werden statische Elemente, wie die Netztopologie inkl. der Leitungen und Transformatoren dargestellt (Bild 3-5a). Zudem werden Spannungsprofile an den Netzknoten sowie Strom- bzw. Leistungsflüsse innerhalb des Netzes visualisiert. Das Bild zeigt die Visualisierung der Spannungsprofile, die mit Hilfe einer 3-dimensionalen farbigen Höhenkarte (Fläche) dargestellt ist. Die Spannung innerhalb des Netzes entspricht der relativen Position in der Höhenkarte. Die Höhenwerte werden zusätzlich durch eine Farbskala verdeutlicht. Hohe Spannungen entsprechen roten Farbtönen, niedrige Span-

nungen blauen Farbtönen usw. Die Darstellung der genauen Spannungswerte erfolgt mit Hilfe einer Farblegende am Rand, in der einzelne Werte den Farben zugeordnet sind. Zur Laufzeit bewegt sich die Höhenkarte, deren Farbverteilung und Höhe die Spannungsprofile des Netzes dynamisch darstellen.

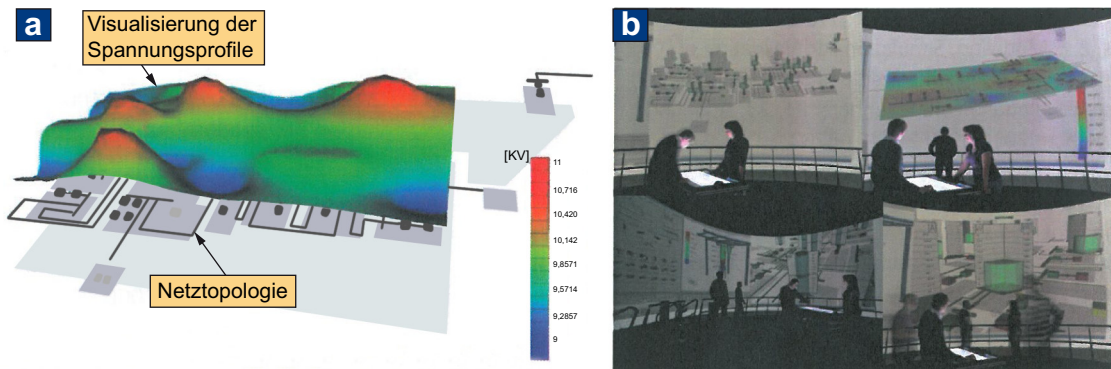


Bild 3-5: a) Visualisierung von Spannungsprofilen in Energienetzwerken, b) Analyse eines Energienetzwerkes im VR-Projektionssystem nach [LGN+11].

Das Bild 3-5b zeigt die visuelle Analyse eines Energienetzwerkes mit Hilfe des VR-Systems. Während der Analyse kann durch die virtuelle Umgebung navigiert, gezoomt und unterschiedliche Detaillierungsgrade der Modelle eingestellt werden.

Bewertung: In der Arbeit wird gezeigt, dass die VR-basierte Analyse für große Energienetzwerke geeignet ist. Ob eine ganzheitliche Analyse des Systems möglich ist, bleibt unklar; das Umfeld der Netzwerke wird nicht betrachtet, sondern nur systeminterne Vorgänge. Es werden jedoch unterschiedliche mechatronische Ebenen in der VR-Anwendung dargestellt. Wie zwischen den Ebenen navigiert werden kann, wird nicht im Detail erläutert. Eine systematische Vorgehensweise zur Entwicklung von Visualisierungen wird nicht betrachtet.

3.6 Integration von Funktionen technischer Systeme in VR und ihre Visualisierung nach KRAPPE

In der Arbeit „Erweiterte virtuelle Umgebungen zur interaktiven, immersiven Verwendung von Funktionsmodellen“ werden Funktionsmodelle technischer Produkte in VR-Anwendungen übertragen, visualisiert und interaktiv nutzbar gemacht. Dabei enthält ein Funktionsmodell die rechnerinterne Repräsentation einer Funktionsstruktur des Produkts. Die Daten der Modelle werden für die VR-Anwendung extrahiert und in der VR-Anwendung mit Hilfe von visuellen Metaphern und Animationen visualisiert. Zur Abbildung der Modelldaten einer Funktion auf den Szenengraphen in der VR-Anwendung wurden Abbildungsregeln und Methoden definiert, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Im Folgenden werden die visuellen Metaphern visualisierter Funktionen aufgezeigt und ihre Nutzung in VR erläutert [Kra09]:

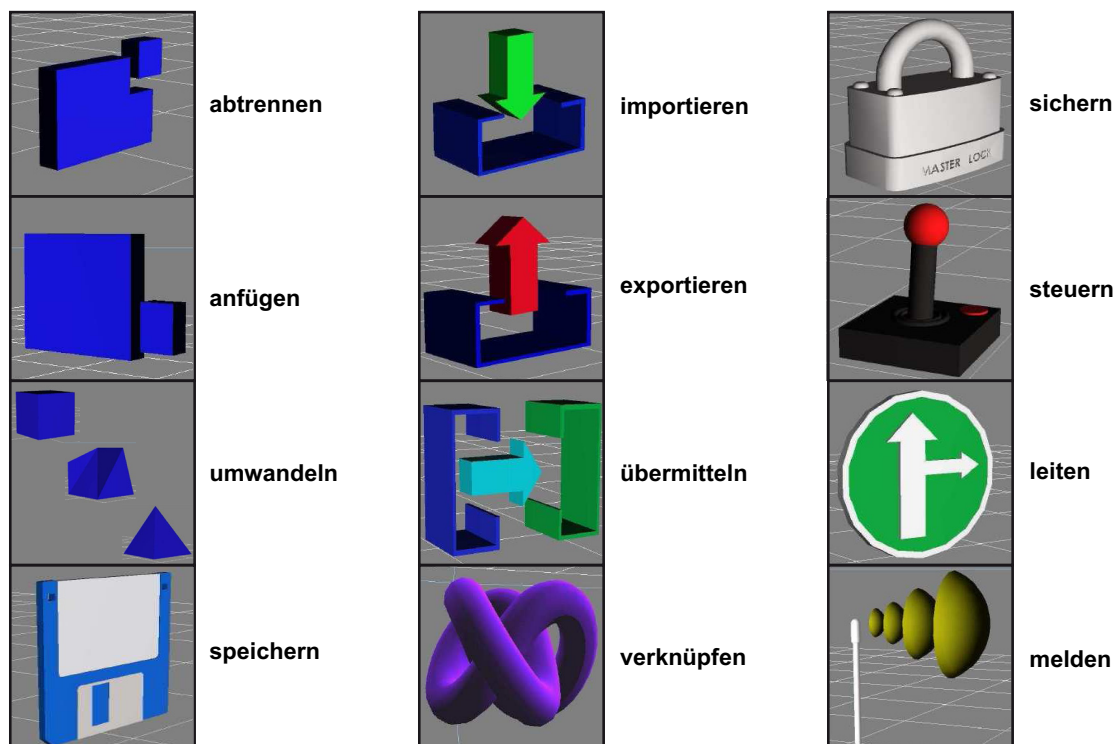


Bild 3-6: Visualisierung von Funktionsverben in VR mittels visueller Metaphern nach [Kra09].

Zur Visualisierung von Funktionen wurde der Ansatz gewählt, lediglich die Funktionsverben zu betrachten und diese in VR darzustellen. Bild 3-6 zeigt die Funktionsverben. Dabei erfolgt die Visualisierung von Funktionsverben durch ihre geometrische Darstellung: einer Funktion wird eine geometrische Form zugeordnet, die i.d.R. eine visuelle Metapher ist. Durch Animation oder Blinken wird ein Anwender auf die Funktion aufmerksam gemacht. Soll zum Beispiel die Funktion *abtrennen* visualisiert werden, wird von einem 3-dimensionalen Quader ein Bruchstück gelöst.

Die Metaphern der Funktionsverben sind so allgemein gehalten, dass sie für unterschiedliche Produkte eingesetzt und kombiniert werden können. Für die Darstellung in VR werden die geometrischen Formen der Funktionsverben und die 3D-Modelle des Produkts in der virtuellen Umgebung so angeordnet, dass sie die Funktionsstruktur des Produkts ergeben. Bild 3-7 zeigt so eine Funktionsstruktur am Beispiel einer Kopfstütze. Hier werden einzelne Bauteile der Kopfstütze und Funktionsverben anhand visueller Metaphern dargestellt, die zusammen die Funktionsstruktur des Produkts ergeben. Hier sei ein Beispiel genannt: Zwischen einer Feder und einem Dämpfer wird eine Kraft geleitet. Die Funktion *Kraft leiten* wird in der virtuellen Umgebung durch das Eingangsobjekt *Feder* und das Ausgangsobjekt *Dämpfer* anhand eines 3D-Modells dargestellt. Die visuelle Metapher für das Funktionsverb *leiten* stellt die Funktion *Kraft leiten* dar.

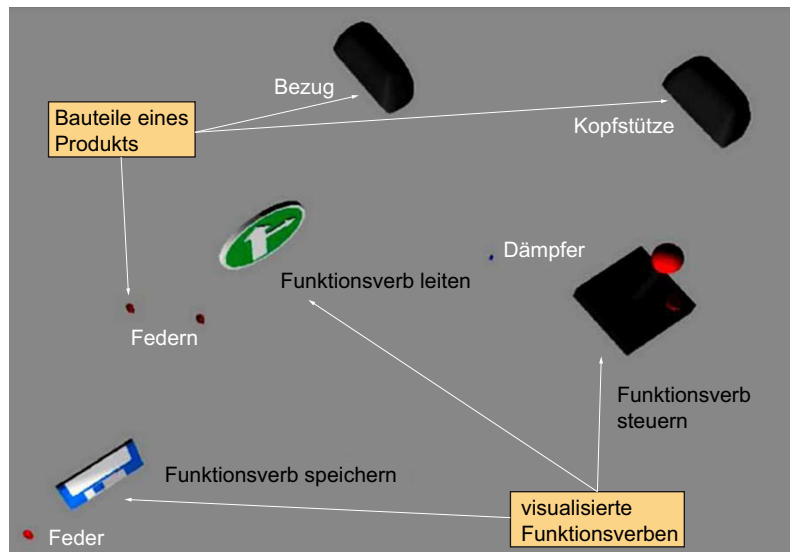


Bild 3-7: Visualisierte Funktionsstruktur: positionierte Funktionsverben und Bauteile des Produkts in einer virtuellen Umgebung nach [Kra09].

Bewertung: Der Ansatz, technische Funktionen mit visuellen Metaphern darzustellen, eignet sich gut zur Analyse technischer Produkte. Die vorgestellten Visualisierungstechniken sind für VR geeignet. In der Arbeit werden zum einen Funktionsverben visualisiert, die rein gestaltbehaftete Komponenten beeinflussen, wie z.B. abtrennen oder anfügen. Zudem werden sehr einfache Funktionen der Informationsverarbeitung, wie z.B. importieren oder speichern visualisiert und im Bezug zum Produkt dargestellt. Folglich werden Gestalt und Funktionen technischer Systeme dargestellt; die ganzheitliche Analyse ist hier zum Teil erfüllt. Problematisch ist jedoch, dass die Gestalt und das Verhalten (Funktionsverben) des Produktes auseinander gezerrt werden, so dass die Zuordnung einzelner Bauteile schwierig ist. Dadurch wird auch das Gesamtverhalten des Produkts schwer nachvollziehbar. Zudem werden nur Funktionsverben dargestellt, das Substantiv wird nicht betrachtet. Der Zusammenhang zwischen Substantiv und Verb wird nicht deutlich. Eine systematische Vorgehensweise wird in der Arbeit nur für die Integration von Funktionsmodellen in VR beschrieben, jedoch nicht wie Visualisierungstechniken entwickelt werden und deren Nutzung in VR erfolgt.

3.7 Klassifizierung von Visualisierungsverfahren für große Netze in der Logistik nach BERNHARD et al.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 559 „Modellierung großer Netze in der Logistik“ werden u.A. Visualisierungstechniken zur Analyse in der Logistik relevanter Daten untersucht und klassifiziert. Dabei werden Visualisierungstechniken im Kontext der Simulation in Produktion und Logistik zur Validierung und Präsentation von Simulationsergebnisdaten eingesetzt. Für den gezielten Einsatz von Visualisierungstechniken wurden in der Arbeit bestehende Techniken aus der Informationsvisualisierung und wissenschaftlicher Visualisierung nach unterschiedlichen für die Logistik relevanten

Kriterien klassifiziert. Hier entstand eine Taxonomie für Visualisierungstechniken, die zum einen die Einordnung aller für das Anwendungsfeld relevanten Visualisierungstechniken und andererseits die Auswahl einer geeigneten Technik aus Anwendersicht beschreibt [BDW03], [BDW05]:

In der Taxonomie erfolgt eine Klassifizierung von Visualisierungstechniken zum einen aus grafischer Sicht (siehe Bild 3-8) und zum anderen aus Informationssicht (siehe Bild 3-9). Für die Klassifizierung aus grafischer Sicht wurden Kriterien der Computergrafik herangezogen, wie z.B. Darstellungsdimension, Darstellungsform, Skalierung usw. Zu jedem Kriterium werden zudem Ausprägungen definiert. Zur Klassifizierung aus Informationssicht wurden Kriterien wie die Primäre Funktion (in dieser Arbeit als Visualisierungsaufgabe bezeichnet) und die darzustellenden Informationen herangezogen.

Kriterium	Ausprägung						
Darstellungsdimension	1-D	2-D	2 ½-D	3-D			
Repräsentation	symbolisch / Zeichen	symbolisch / abstraktes Symbol	ikonisch / stilisierte Abbildung	ikonisch / realitätsnahe Abbildung	fotorealistisch		
Darstellungsform	Schrift	Tabelle	Diagramm	Zeichnung	Bild	Virtuelle Welt	Erweiterte Realität
Skalierung	keine	linear	logarithmisch	exponentiell	kategorisierend		
Planare geometrische Projektion	keine	orthogonal	schief	perspektivisch			
Zeitrepräsentation im graphischen Modell	keine	diskret	kontinuierlich				
Präsentationszeitverhalten	Standbild	nicht proportionales Bewegbild	proportionales Bewegbild / Zeittupe	proportionales Bewegbild / Echtzeit	proportionales Bewegbild / Zeitraffer		
Interaktion	keine	Navigation in der Präsentation	mit dem graphischen Modell	mit dem Datenmodell	in und mit dem Modell (Immersion)		

Bild 3-8: Klassifizierung von Vis.-Techniken aus grafischer Sicht nach [BDW03].

Kriterium	Ausprägung								
Primäre Funktion	Identifikation	Lokalisierung	Korrelation	Assoziation	Vergleich	Struktur und Muster	Gruppierung	Klassifikation	
Art der darzustellenden Information	qualitativ	quantitativ	qualitativ und quantitativ						
Informationsstruktur	unabhängig	relational	kreisförmig	hierarchisch	netzwerkartig				
Informationskodierung	Messniveau	kein	nominal diskret	ordinal diskret	ordinal kontinuierlich	intervallskaliert diskret	intervallskaliert kontinuierl.	verhältnisskaliert diskret	verhältnisskaliert kontinuierl.
	Dimension der abhängigen Variablen	keine	1-D	2-D	3-D	n-D			

Bild 3-9: Klassifizierung von Vis.-Techniken aus Informationssicht nach [BDW03].

In der Arbeit wurden alle für das Gebiet der Logistik relevanten Visualisierungstechniken nach den Kriterien der beiden Klassifizierungen eingeordnet. Dazu wurden klassische Visualisierungstechniken aus der Informationsvisualisierung, wie Diagramme, Tabellen, Karten usw. betrachtet. Einen Überblick über alle eingeordneten Techniken gibt [BDW05]. Ein Anwender nutzt die gleichen Klassifizierungen, um seine Anforderungen bzgl. der Aufgabenstellung oder Zweck der Visualisierung zu formulieren. Durch Abgleich der Kriterien des Anwenders mit der Menge aller Visualisierungstechniken, die diese Kriterien erfüllen, werden dem Anwender automatisch geeignete Techniken vorgeschlagen.

Eine beispielhafte Umsetzung der Visualisierungstechniken ist die Darstellung eines Produktionsbetriebs in VR, bei dem in parallelen Prozessschritten Bauteile gefertigt und montiert werden. Innerhalb der Virtuellen Umgebung werden Informationen über Prozesse und Abläufe sowie qualifikationsrelevante Informationen zur Mitarbeiterschulung auf Head Up Displays in textueller Form dargestellt [ASW11].

Bewertung: Die Klassifizierungen der Visualisierungstechniken aus grafischer Sicht und aus Informationssicht sind für den Anwendungsbereich der Logistik gut geeignet. Daher ist sie aber auch nur für Visualisierungsaufgaben und Visualisierungstechniken einsetzbar, die für diesen Anwendungsbereich relevant sind. In der Arbeit wurden nur klassische, Verfahren aus der Informationsvisualisierung betrachtet und in die Taxonomie eingeordnet. Es werden überwiegend 2-dimensionale Visualisierungstechniken der Informationsvisualisierung betrachtet, ihre Zuordnung zur Gestalt im 3D-Raum wird kaum diskutiert. Bei der Definition der Kriterien, wie z.B. der Visualisierungsaufgaben, sind keine ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen betrachtet worden. Die Taxonomie lässt sich daher nicht ohne weiteres für mechatronische Systeme einsetzen; eine Anpassung der Methode zur Erstellung und Nutzung solch einer Taxonomie ist aber möglich.

3.8 Bewertung des Stands der Forschung und Handlungsbedarf

Die Gegenüberstellung der vorgestellten Ansätze des Stands der Forschung mit den in Kapitel 2.8 definierten Anforderungen führt zu folgender Bewertung, die Bild 3-10 zusammenfasst:

A1 – Durchgängige systematische Vorgehensweise: Lediglich die zwei Arbeiten von KRAPPE und BERNHARD et al. beschreiben eine systematische Vorgehensweise für die Auswahl und Erstellung von Visualisierungstechniken. Sie sind jedoch für mechatronische Systeme nicht ohne weiteres einsetzbar.

A2 – Methoden und Hilfsmittel strukturiert für mechatronische Systeme: Ähnlich der ersten Anforderungen stellen die zwei Arbeiten von KRAPPE und BERNHARD et al. Methoden, wie eine Taxonomie oder eine Beschreibung technischer Funktionen, zur

Strukturierung von Visualisierungsaufgaben und -techniken vor. Auch diese können nicht für mechatronische Systeme übernommen werden.

A3 – Schablone zur Spezifikation des Visualisierungsproblems für mechatronische Systeme: Die Taxonomie nach BERNHARD, WENZEL et al. kann ähnlich einer Schablone eingesetzt werden, in der konkrete Ausprägungen der Kriterien belegt werden und dadurch Visualisierungstechniken spezifiziert werden. Problematisch ist, dass diese Belegung unterschiedliche Techniken adressieren kann, es ist keine 1:1-Abbildung. Eine ähnliche Taxonomie könnte für mechatronische Systeme aufbereitet werden.

A4 - Notation des Maschinenbaus und verwandter Domänen nutzen: Die Arbeiten von SEDLMAIR et al., BATKIEWICZ et al., STÖCKLEIN et al. und KRAPPE beschreiben Analyse- und Visualisierungsaufgaben und Visualisierungstechniken für technische Fragestellungen. Diese werden jedoch nur implizit genannt, eine strukturierte Notation im Rahmen von Analyse- und Visualisierungsaufgaben ist nicht gegeben.

A5 – Visualisierungskonzept für VR-Anwendungen: Die Mehrzahl der untersuchten Arbeiten setzt eine VR- Anwendung als Analyseumgebung ein und beschreibt Funktionen zur geeigneten Darstellung sowie der Interaktion oder Navigation. Meist sind diese Funktionen stark auf die Anwendungen ausgerichtet. Viele der Funktionen können jedoch auch für mechatronische Systeme adaptiert werden. Zum Beispiel eignet sich der Ansatz von EINSFELD, durch unterschiedliche Sichten eines Systems (systemextern, systemintern) umzuschalten sehr gut für mechatronische Systeme.



































































A6 – Unterstützung der ganzheitlichen Analyse mechatronischer Systeme: Die meisten Arbeiten betrachten mehrere Aspekte des technischen Systems, so z.B. abstrakte Daten zusammen mit dem Verhalten des Systems. Dies zeigt, dass die Betrachtung mehrerer Aspekte für das Verständnis des Systems hilfreich ist. In den meisten Ansätzen wird das Umfeld nicht betrachtet. Ein wesentlicher Schwachpunkt ist jedoch, dass häufig der direkte Zusammenhang zwischen abstrakten Daten der Informationsverarbeitung und dem Systemverhalten fehlt, da die Daten nicht direkt an der Gestalt angezeigt werden sondern in einer separaten Ansicht auf einem zweiten Bildschirm oder Ansichtsfenster.

A7 – Unterstützung der Ebenen-übergreifenden Analyse mechatronischer Strukturierungsebenen: Vier der untersuchten Arbeiten beschreiben Ansätze zur ebenen-übergreifenden Darstellung mechatronischer Systeme. BATKIEWICZ und LIPIEC schlagen jeweils zwei Ebenen vor: eine Überblicksdarstellung über das Gesamtsystem und eine Darstellung eines Teilsystems, die durch Heranzoomen erreicht werden kann. Für mechatronische Systeme können diese auf die Ebenen VMS und AMS abgebildet werden. EINSFELD und SEDLMAIR beschreiben eine systemexterne und systeminterne Darstellung, die auf die Ebenen AMS und VMS adaptiert werden können.

A8 – Darstellen von Daten mechatronischer Systeme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten: Vier der Arbeiten zeigen Visualisierungstechniken auf, die sich dy-

namisch mit den Simulationsdaten eines technischen Systems verändern. Die Ansätze können für diese Arbeit übernommen werden.

A9 – Visualisierungstechniken geeignet für VR: In allen Arbeiten werden unterschiedliche Visualisierungstechniken genutzt; ihre Eignung für VR wird oftmals nicht diskutiert. Viele der Ansätze verwenden Visualisierungstechniken aus der Informationsvisualisierung, die für die VR-Umgebung zu unübersichtlich sind und die Immersion und Präsenz beeinflussen könnten. Die Arbeiten von BATKIEWICZ und LIPIEC und KRAPPE nutzen im Wesentlichen 3D-Visualisierungstechniken, die für VR-Anwendungen als sehr gut geeignet gelten. Die Feststellung soll in dieser Arbeit weitestgehend berücksichtigt werden.

Bewertung der untersuchten Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen an eine Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für fortgeschrittene mechatronische Systeme in VR-Anwendungen. Bewertungsskala:  = nicht erfüllt  = teilweise erfüllt  = voll erfüllt	Anforderungen								
	Systematische Vorgehensweise	Methoden u. Hilfsmittel strukturiert für mechatr. Syst.	Schablone zur Spezifikation des Vis.-Problems	Notation des MB und verwandter Branchen	Visualisierungskonzept für VR-Anwendungen	Unterstützung der ganzheitlichen Analyse mechatr. Syst.	Unterstützung ebenen-übergreifender Analyse mechatr. Strukturierungsebenen	Darstellen von Daten mechatr. Systeme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten	Visualisierungstechniken geeignet für VR
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
CarComViz - Vis. von Kommunikationsprozessen in Automobilen nach SEDLMAIR et al.									
VR-Anwendung zur Überwachung von Drohnen nach BATKIEWICZ et al.									
Visualisierung von Optimierungsverfahren zur Wegeplanung nach STÖCKLEIN et al.									
3D-Visualisierungssystem zur Diagnose von Kläranlagen nach EINSFELD et al.									
Visualisierung von Zuständen in elektrischen Energiesystemen nach LIPIEC et al.									
Integration und Visualisierung von Funktionen technischer Systeme in VR nach KRAPPE									
Klassifizierung von Visualisierungsverfahren für GNL nach BERNHARD et al.									

Legende:

mechatr. Syst.: mechatronisches System
 GNL: Große Netze in der Logistik

Vis.-Problem: Visualisierungsproblem
 MB: Maschinenbau

Bild 3-10: Bewertung des untersuchten Stands der Forschung anhand der Anforderungen

Fazit: Keiner der untersuchten Ansätze erfüllt alle Anforderungen in vollem Umfang. Eine wesentliche Schwachstelle der Ansätze ist die Betrachtung isolierter Lösungen zur Visualisierung, die nur für spezifische technische Systeme oder einzelne Aspekte technischer Systeme einsetzbar sind. Eine ganzheitliche und ebenen-übergreifende Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in einer VR-Umgebung wurde nur ansatzweise untersucht. Des Weiteren wurde für keinen der Ansätze eine durchgängige systematische Vorgehensweise erarbeitet. Es wird deutlich, dass es vor allem an einer systematischen Vorgehensweise und strukturierten Methoden und Hilfsmitteln für Visualisierungstechniken für mechatronische Systeme fehlt. Demnach besteht Handlungsbedarf für eine *Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen*.

4 Bestandteile zur Entwicklung von Visualisierungstechniken

Kapitel 4 und Kapitel 5 bilden den Kern der vorliegenden Arbeit (siehe Bild 4-1). Kapitel 4 beschreibt Bestandteile, die zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die interaktive visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme benötigt werden. Ein Vorgehensmodell, das diese Bestandteile aufgreift, um eine konkrete Visualisierungstechnik zu entwickeln, wird in Kapitel 5 vorgestellt.

Dieses Kapitel ist wie folgt strukturiert: In Kapitel 4.1 wird einleitend die Grundidee zur Darstellung aller mechatronischer Strukturierungsebenen in VR-Anwendungen erklärt. Anschließend werden in Kapitel 4.2 Verfahren des RailCab-Systems vorgestellt, an denen die Arbeit ausgerichtet ist. Diese dienen gleichzeitig zur Validierung. Die Kapitel 4.3 bis 4.9 beschreiben die Bestandteile (Bild 4-1). Für den Bestandteil „Spezifikation des Systems“ wird im Rahmen dieser Arbeit eine existierende Spezifikationstechnik genutzt. Die „Designregeln und Wahrnehmungsregeln“ und Ansätze zur „Bewertung von Visualisierungstechniken“ wurden aus bestehender Literatur zusammengetragen. Daher sind die Kästen der drei Bestandteile grau unterlegt und werden in diesem Kapitel nicht näher erläutert.

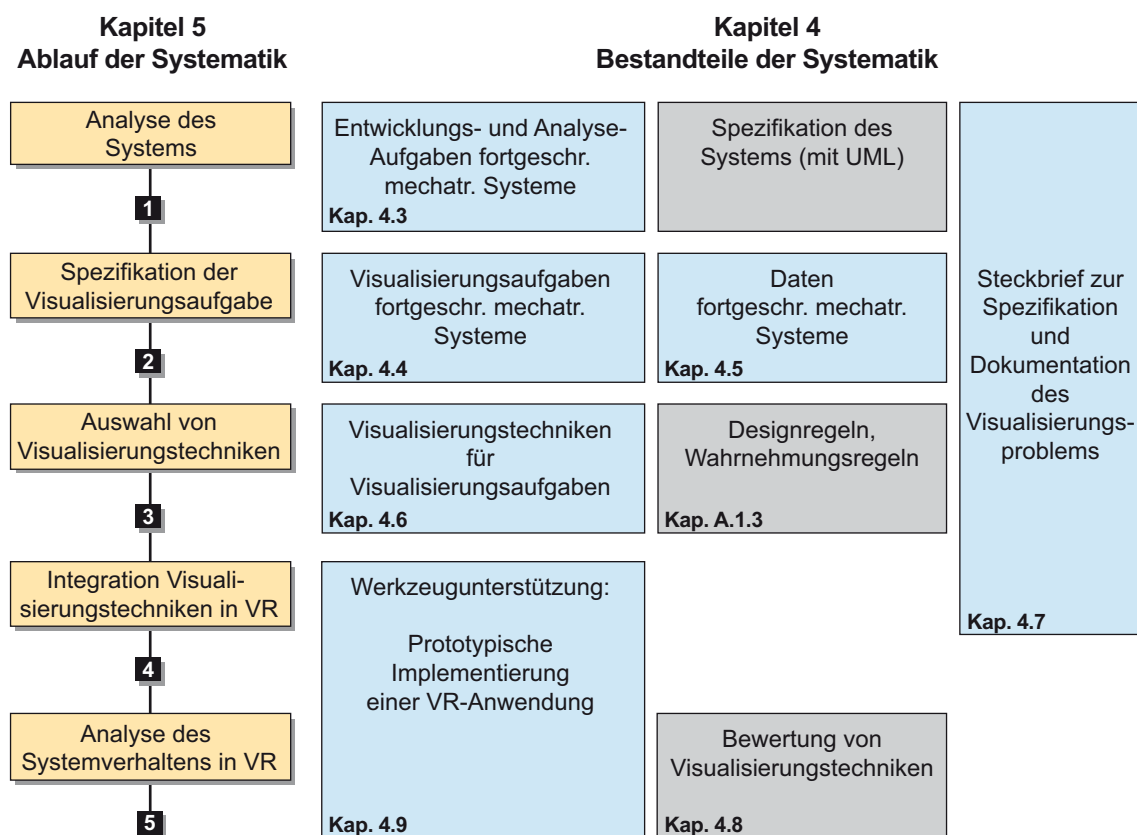


Bild 4-1: Bestandteile der Systematik eingeordnet in Phasen des Vorgehensmodells

In Kapitel 4.3 werden typische Entwicklungs- und Analyseaufgaben aus der Entwicklung fortgeschrittener mechatronischer Systeme vorgestellt. Auf Basis dieser Aufgaben werden typische Visualisierungsaufgaben im Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme ermittelt. Visualisierungsaufgaben und die Daten mechatronischer Systeme bilden den Ausgangspunkt der systematischen Entwicklung von Visualisierungstechniken. In Kapitel 4.4 werden die Visualisierungsaufgaben vorgestellt, in Kapitel 4.5 werden typische Daten fortgeschrittener mechatronischer Systeme beschrieben. Kapitel 4.6 präsentiert geeignete Visualisierungstechniken zur Bearbeitung der Visualisierungsaufgaben. Dazu wird ein wesentliches Basiskonzept vorgeschlagen: Das VR-Kontinuum, das sowohl die Darstellung der Strukturierungsebenen mechatronischer Systeme nach LÜCKEL (Makrostrukturierung), als auch der Mikrostrukturierung (Operator-Controller-Modul) ermöglicht. Kapitel 4.7 stellt ein Steckbriefformat vor, in dem Visualisierungsaufgaben, Daten und Visualisierungstechniken spezifiziert werden. Anschließend werden in Kapitel 4.8 Ansätze zur Bewertung von Visualisierungstechniken beschrieben. Abschließend wird in Kapitel 4.9 eine Software-Architektur für eine VR-Anwendung vorgeschlagen, in die die entwickelten Visualisierungstechniken integriert werden.

4.1 Basiskonzept – Darstellung mechatronischer Strukturierungsebenen in VR-Anwendungen

Das Basiskonzept besteht darin, eine VR-Anwendung als eine VR-Analyseumgebung einzusetzen und die virtuelle Umgebung so zu strukturieren, dass diese den Strukturierungsebenen mechatronischer Systeme entspricht. Dies schafft Ordnung in der virtuellen Umgebung, hilft bei der Analyse und erleichtert den Aufbau von VR-Werkzeugen zur visuellen Analyse. Im Folgenden wird diese Idee erläutert.

Die Annahme ist, dass zur visuellen Analyse alle Ebenen eines mechatronischen Systems in einer virtuellen Umgebung dargestellt werden müssen. Zur Plausibilisierung dieser Annahme wird auf die bewährte Strukturierung nach LÜCKEL zurückgegriffen, der ein mechatronisches System in Mechatronische Funktionsmodule (MFM), Autonome mechatronische Systeme (AMS) und Vernetzte mechatronische Systeme (VMS) gliedert – der Makrostruktur (siehe Kapitel 2.2.3). Jeder der Strukturierungsebenen³⁶ liegt eine eigene regelnde Informationsverarbeitung zugrunde, die wiederum eine eigene Strukturierung aufweist (Mikrostruktur – siehe Operator-Controller-Modul (OCM) in Kapitel 2.3.2). Die Strukturierungsebenen erfüllen – fokussiert auf unterschiedliche Aspekte eines mechatronischen Systems – unterschiedliche Aufgaben. Das VMS dient zur Ausführung übergreifender Aufgaben, wie z.B. Kooperationen oder Logistik. Auf der untersten Ebene (MFM) wird das physikalische Verhalten simuliert. Analog dazu werden vom OCM in der oberen Ebene Verfahren eingesetzt, die das autonome Handeln

³⁶ Im weiteren Verlauf werden die Strukturierungsebenen der Makrostruktur und die Strukturierungsebenen des OCM zusammen vereinfacht durch das Wort Strukturierungsebenen zusammengefasst. Dies dient ausschließlich zur besseren Lesbarkeit.

mechatronischer Systeme ausmachen; die unterste Ebene führt reaktiv Stellbefehle der oberen Ebenen aus. Der permanente Informationsaustausch zwischen den Ebenen der Makrostruktur und des OCM, die durchgehende Beteiligung aller Komponenten eines mechatronischen Systems am Gesamtsystem und die ständige Interaktion der Komponenten sowie mehrerer mechatronischer Systeme untereinander erfordern eine ganzheitliche Betrachtung aller Aspekte in der virtuellen Umgebung.

Bild 4-2 veranschaulicht die Grundidee zur Darstellung aller Ebenen. Der gelbe Balken präsentiert ein **VR-Kontinuum**, das die unterschiedlichen Ansichten auf die Szene verkörpert. Die Grenzen des Kontinuums sind die sogenannte **Überblicksdarstellung** auf die Szene (links) und die sogenannte **Detail-Darstellung** (rechts)³⁷.

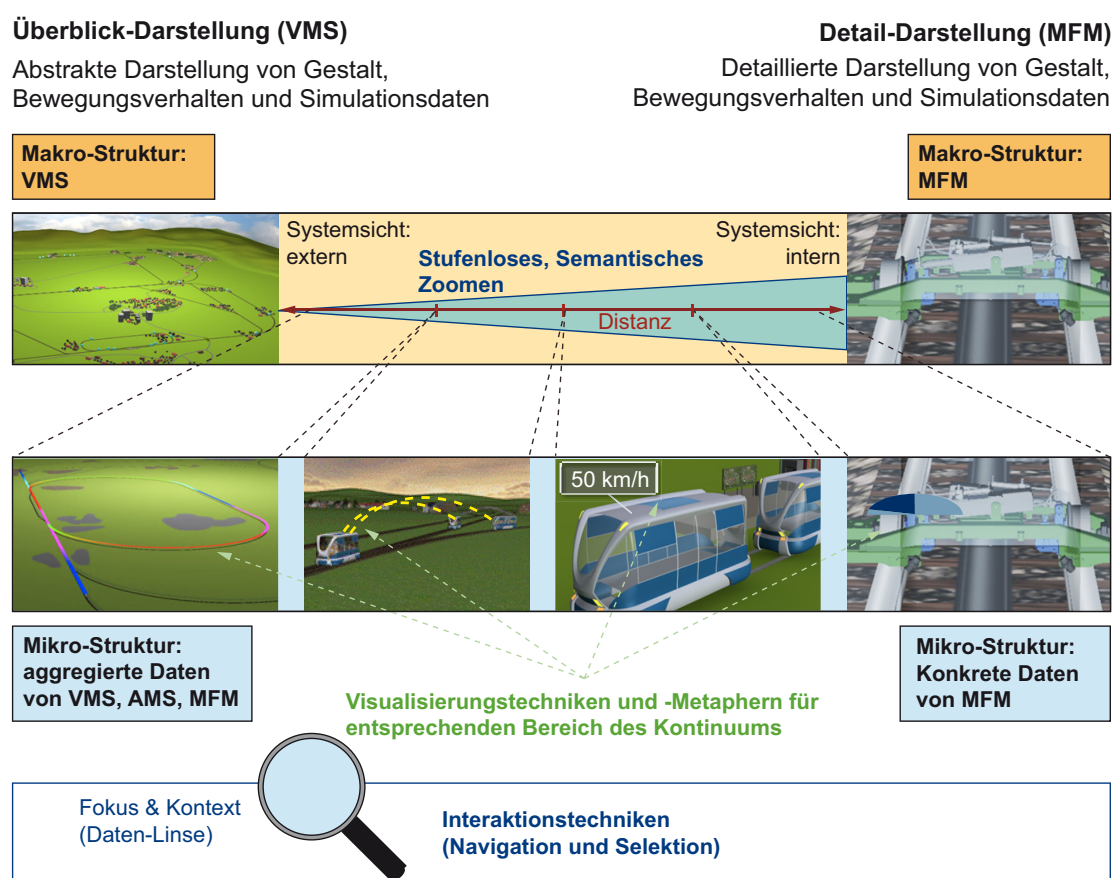


Bild 4-2: VR-Kontinuum zur Darstellung mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen

Innerhalb dieses Kontinuums werden alle relevanten Daten eines mechatronischen Systems präsentiert. Damit dies geordnet erfolgt und eine Überladung der virtuellen Umgebung mit Visualisierungstechniken vermieden wird, erfolgt die Einordnung und Darstellung der Visualisierungstechniken anhand von vier Konzepten:

³⁷ Stellvertretend wird in dieser Arbeit die Überblicks-Darstellung als VMS-Ebene der VR-Anwendung und die Detail-Darstellung als MFM-Ebene der VR-Anwendung bezeichnet.

- 1) Die einzelnen Strukturierungsebenen des mechatronischen Systems werden auf die **Distanz** zwischen der virtuellen Kamera und dem mechatronischen System abgebildet, wodurch Präsentationsebenen entstehen. Die Präsentationsebenen werden in der weiteren Arbeit verkürzt als VMS-Ebene, AMS-Ebene und MFM-Ebene bezeichnet. Durch die Unterteilung in die Ebenen werden Visualisierungstechniken nur dann angezeigt, wenn sie auch vom Anwender wahrgenommen werden können. Es ist z.B. nicht sinnvoll, die Kommunikation zwischen mehreren AMS darzustellen, wenn der Anwender eine Komponente eines MFM betrachtet.
- 2) Den einzelnen Strukturierungsebenen und Präsentationsebenen werden charakteristische **Visualisierungsaufgaben** zugeordnet, für die Visualisierungstechniken vorgeschlagen werden. So wird für alle definierten Visualisierungsaufgaben festgelegt, für welche der Präsentationsebenen (VMS, AMS und MFM) sie relevant sind und zudem, für welche Ebenen des Operator-Controller-Moduls sie relevant sind. Zusammen mit dem Attribut Distanz wird dem Anwender dadurch vorgeschlagen, von welchem Blickpunkt in der virtuellen Umgebung er welche Aufgabe bearbeiten kann.

Die beiden Konzepte verhindern zunächst die ganzheitliche Betrachtung des mechatronischen Systems, weil charakteristische Aufgaben und Präsentationsebenen nur die Analyse eines Ausschnitts bzw. einer Ebene des mechatronischen Systems zulassen. Allerdings lässt sich diese Eigenschaft mit den Mitteln der Computergrafik umgehen.

- 3) Zur Wahrung der ganzheitlichen Betrachtung aller Strukturierungsebenen werden Techniken zur **Aufmerksamkeitslenkung** eingesetzt. Der Anwender wird mit visuellen Mitteln auf Ereignisse aufmerksam gemacht.
- 4) Zur Betrachtung aller Aspekte eines mechatronischen Systems werden **Fokus- und Kontexttechniken** eingesetzt. Denn alle Aspekte lassen sich nur schwerlich gleichzeitig an einem 3D-Modell visualisieren, so dass die ganzheitliche Betrachtung ebenfalls erschwert wird. Fokustechniken erlauben es, ein mechatronisches System von unterschiedlichen Stellen des VR-Kontinuums zu beobachten, die sonst nur in einer Detaildarstellung analysierbar sind und umgekehrt.

Zudem wird zwischen Primär-Visualisierungstechniken und Sekundär-Visualisierungstechniken unterschieden. Die **Primär-Visualisierungstechniken** sind eine Reihe von Darstellungstechniken, deren Einsatz für die Analyse mechatronischer Systeme empfohlen wird. Sie wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und sind für visuelle Analysen gedacht, die das Zusammenspiel von VMS, AMS und MFM adressieren. Dagegen sind die Sekundär-Visualisierungstechniken die aus dem Stand der Technik bekannten Visualisierungen, die sich hauptsächlich auf die Analyse lediglich eines Aspektes eines technischen Systems konzentrieren. Dies können z.B. Pfeile sein, deren Richtung und Länge Kraftvektoren präsentieren, oder typische Farbkodierungen. Sie werden generell zur visuellen Analyse benötigt, sind aber nicht spezifisch für die Analyse fortgeschritte-

ner mechatronischer Systeme. Die Primär-Visualisierungstechniken werden in Kapitel 4.6.1 bis 4.6.6 vorgestellt. Die Sekundär-Visualisierungstechniken werden in Steckbriefen im Anhang dokumentiert (vgl. Kap. A2.5.3).

Insgesamt wird durch dieses Konzept ein Vorschlag für die Strukturierung einer VR-Analyseumgebung und die systematische Entwicklung von anwendungsspezifischen Visualisierungstechniken geschaffen. Die Analyseumgebung enthält eine Reihe von Basistechniken, die Primär-Visualisierungstechniken, die unumgänglich für eine effektive visuelle Analyse mechatronischer Systeme sind. Da die visuelle Analyse vom jeweiligen Produkt „mechatronisches System“ abhängig ist, kommen die Sekundär-Visualisierungstechniken hinzu. Der Entwickler einer VR-Analyseumgebung kann beides zur Erstellung einer VR-Analyseumgebung nutzen. Der Nutzen des Basiskonzeptes ist die Sicherstellung einer effektiven visuellen Analyse in VR.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Bestandteile zur Einhaltung dieser Grundidee erarbeitet. Dies erfolgt am Anwendungsbeispiel RailCab. Daher werden zunächst Kapitel 4.2 Verfahren der Informationsverarbeitung des RailCab-Systems erläutert. Anschließend werden in Kapitel 4.3 die relevanten Analyseaufgaben zusammengefasst, die bei der Entwicklung des RailCabs mit VR bearbeitbar sind. In Kapitel 4.4 werden Visualisierungsaufgaben ermittelt und für diese geeignete Visualisierungstechniken für VR-Anwendungen entwickelt.

4.2 Validierungsbeispiel RailCab

Im Rahmen der Arbeit dient das Schienenverkehrssystem RailCab als Beispiel und als Datenbasis, an der die Entwicklung der Visualisierungstechniken ausgerichtet wird. Daher werden im Folgenden drei Verfahren der Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme am Beispiel des RailCab-Systems vorgestellt. In Kapitel 4.2.1 wird eine Logistiksimulation vorgestellt, in Kapitel 4.2.2 eine Konvoi-Simulation und in Kapitel 4.2.3 die Regelung einer aktiven Spurführung. Die Verfahren adressieren die unterschiedlichen Ebenen des Operator-Controller-Moduls und die Ebenen der Makrostruktur (MFM, AMS, VMS). Tabelle 4-1 zeigt einen Überblick über die Verfahren und ihre Zuordnung zur Verfahrensklasse sowie den entsprechenden mechatronischen Strukturierungsebenen (Spalten 1 bis 4). In der letzten Spalte werden die wesentlichen Funktionen gelistet, die von der Informationsverarbeitung ausgeführt wird (IV-Funktion).

Tabelle 4-1: Überblick über Verfahren des Validierungsbeispiels RailCab und ihre Zuordnung zur Verfahrensklasse, Makro- und Mikrostruktur (OCM)

Verfahren des Validierungsbeispiels	Verfahrensklasse	Ebene der Makrostruktur	Ebene des OCM	KI-Funktion
<i>Logistiksimulation:</i> Graphensuche, Auftrags-Scheduling, Aussagenlogik/ Prädikatenlogik	Verhaltensbasiertes Verfahren	Vernetztes mechatronisches System (VMS), Autonomes mechatronisches System (AMS)	Kognitiver Operator (KO)	Planen, Lernen, Kommunikation, Kooperation, Bewerten
<i>Logistiksimulation mit Planung:</i> Verhaltensplanung, Bayes Netzwerke, Agent	Planverfahren, Bayes Netzwerk (Verhaltensbasierte Verfahren)	Vernetztes mechatronisches System (VMS), Autonomes mechatronisches System (AMS)	Kognitiver Operator (KO), Reflektorischer Operator (RO)	Planen, Lernen, Kommunikation, Kooperation, Bewerten, Schätzen
<i>Konvoiregelung und Kommunikation:</i> Regelung, Umschaltstrategien zwischen Regler-Zuständen, Kaskadenregler, Kommunikationsstrategien	Regelungstechnik (modellbasiert)	Vernetztes mechatronisches System (VMS), Autonomes mechatronisches System (AMS)	Reflektorischer Operator (RO), Controller (CO)	Kommunikation, Kooperation, Bewerten
<i>Sturzvariables Fahrwerk:</i> Umschaltstrategien, Regelung, (Schätzverfahren)	Regelungstechnik (modellbasiert)	Mechatronisches Funktionsmodul (MFM)	Reflektorischer Operator (RO), Controller (CO)	Bewerten, Schätzen

4.2.1 Logistiksimulation

Durch den Wunsch nach individueller Mobilität sind neben den Anforderungen an die Fahrzeuge und die Steuerung aller daran beteiligter Komponenten insbesondere auch die Anforderungen an die *logistische*³⁸ Koordination des RailCab-Systems sehr hoch.

³⁸ „Logistik ist eine anwendungsorientierte Disziplin. Sie analysiert und modelliert arbeitsteilige Wirtschaftssysteme als Flüsse von Objekten (v.a. Güter und Personen) in Netzwerken durch Zeit und Raum und liefert Handlungsempfehlungen zu ihrer Gestaltung und Implementierung. Die primären wissenschaftlichen Fragestellungen der Logistik beziehen sich somit auf die Konfiguration, Organisation, Steuerung oder Regelung dieser Netzwerke und Flüsse mit dem Anspruch, dadurch Fortschritte in der ausgewogenen Erfüllung ökonomischer, ökologischer und sozialer Zielsetzungen zu ermöglichen“ [DDG+10, S. 1]. Dem RailCab-System liegt der Problembereich der Verkehrslogistik zugrunde.

Hauptaufgabe ist der Transport von Personen und Gütern [Fah04, S. 1f.].

Ziel des RailCab-Systems sowie einzelner Fahrzeuge ist eine optimale Erfüllung der Transportaufgabe. Teilziele eines RailCabs während der Abarbeitung von Transportaufträgen sind, möglichst viele Aufträge zu bekommen, möglichst zielrein zu transportieren (kürzeste Fahrtroute), das Umsteigen bzw. Umladen sowie Staus zu vermeiden, die Reisezeit nicht zu überschreiten (Pünktlichkeit) und einen bedarfsorientierten Betrieb sowie hohen Fahrkomfort zu bieten [Trä06, S. 1]; dies alles möglichst energieeffizient. Um diese Ziele zu erreichen, trifft ein RailCab während des Betriebs viele autonome Entscheidungen. Drei relevante sind [Klöß09, S. 1]:

- Ideale Fahrtroute: Es muss seine ideale Fahrtroute berechnen.
- Auftragsannahme: Es muss entscheiden ob ein Auftrag angenommen werden kann.
- Konvoibildung: Es muss entscheiden, ob es sich zum Konvoi zusammenschließt.

Die RailCabs führen diese Entscheidungen eigenständig durch. Summa summarum definiert ein RailCab seine eigene Betriebsstrategie zur Betriebszeit. Zur Entwicklung der dazu benötigten Verfahren ist im Rahmen des Projekts RailCab eine Logistiksimulation entstanden, deren Ziel es ist, verschiedenste Betriebsstrategien zu validieren und ihre optimalen Parameter zu ermitteln. Im Folgenden wird erst die Software und dann deren Anwendung vorgestellt.

Bild 4-3 stellt die Software(SW)-Komponenten vereinfacht dar. Sie besteht aus SW-Komponenten, die statische Systemkomponenten abbilden, wie einen Bahnhof, ein Depot, eine Streckenkontrolle und ein Streckennetz. Daneben sind dynamische Systemkomponenten, wie die RailCabs und Aufträge abgebildet. Zudem werden KI-Verfahren zur Routenplanung und Auftragsverwaltung eingesetzt.

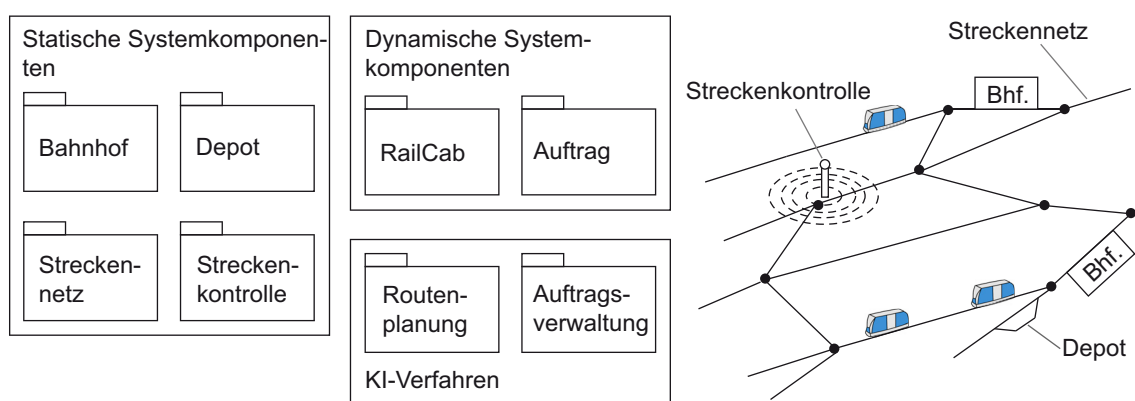


Bild 4-3: SW-Komponenten und beispielhaftes Streckennetz der Logistiksimulation

Die Funktionen der Komponenten und ihre Interaktionen untereinander sind in Kap. A2.1 vereinfacht dargestellt [Fah04, S. 2 ff.]. Das Modell des Streckennetzes besteht aus einer graphischen Präsentation und einer logischen Beschreibung, die die Topologie der Strecke definiert. Die Topologie besteht aus mathematisch beschriebenen Segmen-

ten wie Linien, Bögen und Klothoiden und weiteren Parametern, wie der Fahrtrichtung. Insgesamt bilden die Komponenten ein RailCab-Verkehrssystem samt Fahrzeug, Streckenmodell und Betriebsstrategie ab [Fah04, S. 2].

Zur Validierung der Betriebsstrategien werden große, möglichst realistische Szenarien simuliert. Dabei berücksichtigt eine **Betriebsstrategie** den gesamten Fahrprozess auf der Schiene. Im Rahmen der Logistiksimulation enthält eine Betriebsstrategie Ausprägungen von (dynamischen) Parametern und Merkmalen des simulierten Systems. Im Rahmen der RailCab Logistiksimulation sind dies [Are11]:

- Technische Eigenschaften der Fahrzeuge wie Kapazität und Geschwindigkeit,
- Anzahl eingesetzter Fahrzeuge,
- Möglichkeiten der Vorbestellung von Fahrzeugen,
- Informationsaustausch zwischen Bahnhöfen und Fahrzeugen,
- Fahrzeugverteilung auf Depots,
- Auftragszuweisung an Fahrzeuge,
- Planung von Fahrtrouten und
- Priorisierung von Konvoifahrten.

Die Bewertung einer möglichen Betriebsstrategie erfolgt auf Grundlage simulierter Anwendungsszenarien. **Anwendungsszenarien** sind beispielsweise unterschiedlich ausgeprägte Passagieraufkommen, deren zeitliche Verteilung sowie individuelle Präferenzen und Ziele. Hinzu kommen Rahmenbedingungen, wie zulässige Höchstgeschwindigkeiten oder vorgeschriebene Sicherheitsabstände zwischen Fahrzeugen [Are11].

In der Simulation werden Methoden zur Routen- und Verhaltensplanung eingesetzt. Planen bedeutet das Vorausdenken bzw. ist das Vorausplanen möglicher Zukunftssituationen. Das Vorausplanen wird für die Planung von Fahrtrouten in einem Transportnetzwerk oder für das Verhalten einzelner Module abhängig von der Streckenbeschaffenheit eingesetzt. Dadurch kann ein Fahrzeug flexibel auf unterschiedliche Gegebenheiten reagieren, wie z.B. das Eintreffen neuer Aufträge, Laub auf der Strecke oder Staus aufgrund eines zu hohen Verkehrsaufkommens [Kl09, S. 1].

Die Routen- und Verhaltensplanung basiert auf der so genannten *Planung unter Unsicherheiten* (auch bedingtes oder probabilistisches Planen). Zielsetzung ist es, einen Plan zu erstellen, der für besonders wahrscheinliche alternative Zustände eine Alternative im Plan vorsieht. Basis ist ein Planbaum, der unterschiedliche Routen, je nach Verzweigung im Baum beschreibt. Mehrere Pfade führen zum Ziel. Initial wird ein idealer Pfad und mehrere mögliche Verzweigungen erstellt. Die Verzweigungen besitzen Bedingungen, die angeben, wann eine Verzweigung ausgeführt wird (bedingtes Planen). Die probabilistische Planung ergänzt die Bedingungen um Wahrscheinlichkeiten, durch die

Unsicherheiten abgebildet werden. Zur Modellierung der Unsicherheiten werden *Bayes-Netzwerke* genutzt [Klö09, S. 43ff.]

Der Planungsprozess und die Aktualisierung des Plans erfolgt fortwährend und dynamisch, je nach aktuellem Zustand. Dabei werden bereits vergangene Zustände aus dem Plan gelöscht und zukünftige Zustände und Verzweigungen aktualisiert. Eine detaillierte Beschreibung des Planungsverfahrens befindet sich in [Klö09, S. 43 bis 84].

4.2.2 Konvoiregelung und Kommunikation

Für die Konvoifahrt der RailCabs sind verschiedene Teilaufgaben zu lösen. Zwei relevante sind die Planung der *Kooperation zwischen Fahrzeugen* und die *Konvoibildung*. Die Planung der Kooperation zwischen Fahrzeugen berechnet, wann Konvois gebildet werden können (höhere, logistische Ebene) [Klö09]. Die Regelung der Konvoibildung und -auflösung auf der physikalischen Ebene kontrolliert das Fahrzeug während des Konvoibildungs- und auflösungsprozesses. In diesem Beispiel wird die Regelung zur Konvoibildung und -auflösung betrachtet.

Für die Konvoiregelung ist die Kommunikation der am Konvoi beteiligten Fahrzeuge notwendig, d.h. die Modelle zur Konvoiregelung und der Kommunikation sind stark miteinander verzahnt. Es wurden Simulationsmodelle für die Konvoiregelung sowie Kommunikation entwickelt. Beide werden hier vorgestellt.

Ein Konvoi besteht aus einem Konvoi-Führungsfahrzeug und mehreren Folgefahrzeugen. Das Führungsfahrzeug legt die Fahrtroute und weitere Parameter fest, wie z.B. die Geschwindigkeit, und sendet diese an alle Folgefahrzeuge. Zur Modellierung der Konvoibildung wird ein Zustandsautomat eingesetzt, der die drei Zustände *Bildung*, *Auflösung* und *Folgefahrt* (Konvoi, mit kleinem Abstand) enthält (Bild 4-4) [HTS+08].

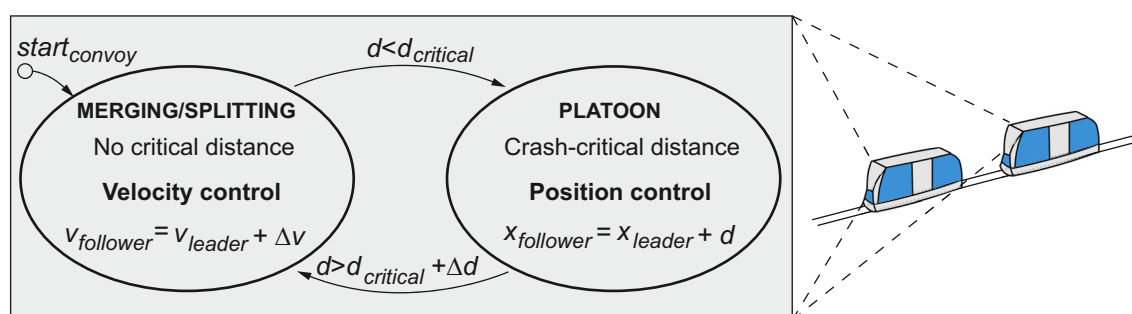


Bild 4-4: Zustände der Konvoiregelung (in Anlehnung an [HWK+12] und [HTS+08])

Die Konvoiregelung arbeitet wie folgt: Der Regler für die Vorwärtsfahrt verfügt über zwei Reglermodi – einer Geschwindigkeitsregelung und einer Positionsregelung – zwischen denen umgeschaltet werden kann. Im Konvoi-Bildungsprozess sind alle Folgefahrzeuge geschwindigkeitsgeregelt, bis ein kritischer Abstand zum vorderen Fahrzeug unterschritten ist. Während des Konvoimanövers wird die Distanz zwischen allen Teilnehmern mit Abstandssensoren gemessen und zudem Position und Geschwindigkeit an

das direkt folgende RailCab kommuniziert. Ist der kritische Abstand erreicht, dann wird umgeschaltet, die Folgefahrt erfolgt positionsgeregelt. Die gewünschte Position des Folgefahrzeugs addiert sich aus der Position des aktuellen Führungsfahrzeuges und der gewünschten Distanz.

Der Prozess der Konvoibildung, der Konvoifahrt sowie der Konvoiauflösung ist hochdynamisch und sicherheitskritisch, weil die Fahrzeuge mit sehr kleinem Abstand hintereinander fahren. Eine sichere Kommunikation ist dafür Grundvoraussetzung. Dies wird über Kommunikationsprotokolle³⁹ gewährleistet. Sie sorgen dafür, dass der gesamte Konvoiprozess zuverlässig läuft, indem z.B. maximale Abbremsungs-/Verzögerungsgrenzen eines Fahrzeugs im Konvoi an alle Teilnehmer kommuniziert werden (Broadcast). Diese Organisation aller Teilnehmer ist für den kollisionsfreien Konvoiprozess entscheidend [HWK+12].

Ähnlich der Konvoifahrt des RailCab-Systems bilden andere fortgeschrittene mechatronische Systeme Schwärme, sog. „Gemeinschaften“ und gehen Kooperationen ein. Auch hier müssen die einzelnen Systeme kommunizieren, um neue Teilnehmer in ihre Gemeinschaft aufzunehmen.

4.2.3 Simulation der aktiven Spurführung am sturzvariablen Fahrwerk

Die eigenständige, sichere und komfortable Spurführung eines RailCabs über passive Weichen wird durch eine aktive Spurführung des sogenannten Sturzvariablen Fahrwerks realisiert. Dieses enthält zum einen aktiv lenkbare Räder, die für eine sichere und komfortable Spurführung im Gleis sorgen. Zum anderen ermöglicht eine aktive Sturzverstellung der Räder eine sichere Fahrt über Schienen bei mangelnder Reibung, weil durch den Sturz der Räder die Abhängigkeit der Spurführungskräfte von der Reibung zwischen Rad und Schiene entkoppelt wird. Insbesondere in Kurven und in Weichenbereichen wird so die sichere Fahrt gewährleistet [BTG+09, S. 327ff.].

Die Auslegung und Erprobung von Regelstrategien des Sturzvariablen Fahrwerks erfolgt an einem realen Prüfstand im Maßstab 1:2,5. Der Prüfstand entspricht einem vollständigen elektrischen Fahrwerk, das folgende Eigenschaften besitzt: Einzelrad-Elektro-Lenkung und Einzelrad-Elektro-Sturzverstellung. Hierfür sind vier Aktoren notwendig, da jedes Rad unabhängig regelbar ist. Lenk- und Sturzwinkel werden separat ermittelt und geregelt.

³⁹ Ein Protokoll ist eine Vereinbarung zwischen kommunizierenden Systemkomponenten über den Ablauf der Kommunikation. Es wird mit Hilfe von Regeln und Konventionen beschrieben [Tan02, S. 42].

Ziel ist, die Position des Fahrwerks in der Spur zu regeln⁴⁰. Allerdings wird eine intelligente Regelung eingesetzt, die die Regelstrategie selbst festlegt. Regelstrategie bedeutet hier: soll die Spurführung mit dem sturzvariablen Fahrwerk aktiv geregelt werden oder nicht? Aus Gründen der Energieeffizienz ist es nicht immer erforderlich, die Sturzverstellung zu aktivieren. Diese soll nur situationsbedingt eingestellt werden, um die Lenkung bei mangelnder Reibung zu unterstützen. Hierfür wurde eine hierarchische Regelstruktur entwickelt, die eine übergeordnete Regelung und eine lokale Regelung enthält (Bild 4-5) [BT11].

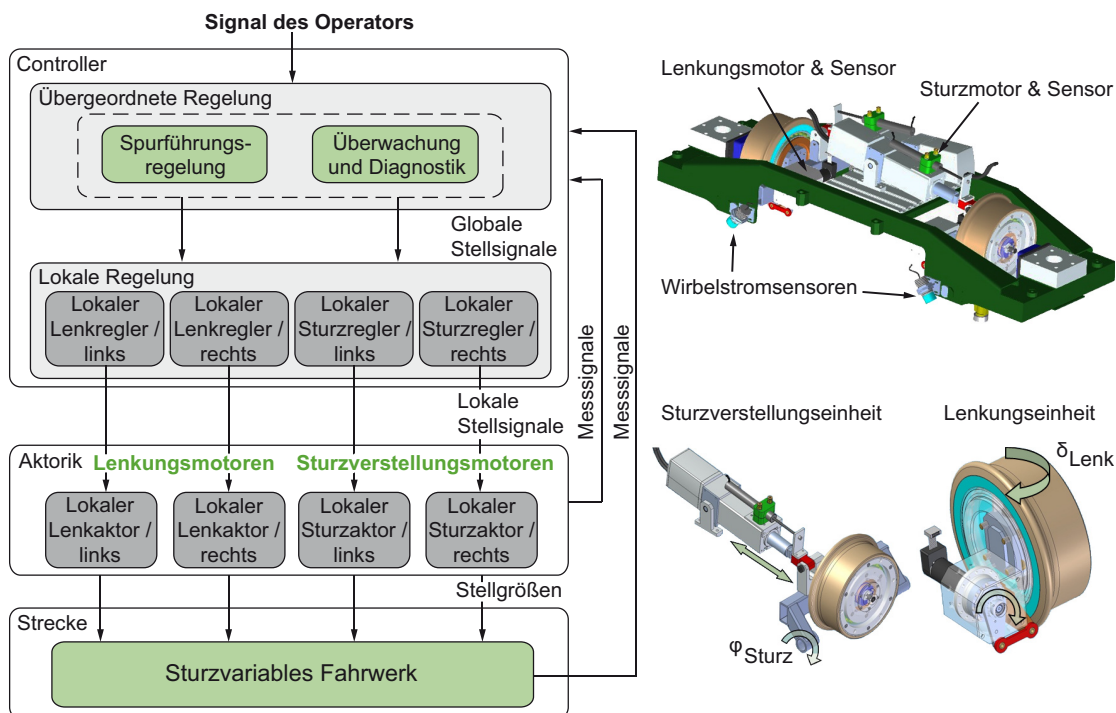


Bild 4-5: Hierarchische Struktur der Regelung des Sturzvariablen Fahrwerks (links), CAD-Modell des Fahrwerks und Prinzip der Lenk- und Sturzverstellung (rechts) [BT11].

Die übergeordnete Regelung ist dem reflektorischen Operator (RO) des Operator-Controller-Moduls zuzuordnen. Sie besteht aus einer *Spurführungsregelung* und einer *Überwachungs- und Diagnostik-Einheit* und gibt globale Steuersignale an die lokale Regelung. Die Spurführungsregelung gibt Konfigurationen von Reglermodellen der lokalen Regelung vor. Die Regelung des Lenkwinkels erfolgt kontinuierlich; die Regelung der Sturzverstellung wird jedoch abhängig unterschiedlicher Umgebungssituationen aktiviert: zur Vorsteuerung bei der Kurvenfahrt, beim Verlassen einer Sicherheits-

⁴⁰ Vor und hinter jedem Rad ist je ein Wirbelstromsensor angebracht, der über ein induziertes Wechselfeld den Abstand zum Gleiskopf misst. Damit ist es möglich sowohl das aktuelle Spurspiel als auch die Querlage der Achse im Gleis (Referenz über die Mittellinie zwischen den beiden Schienen) zu bestimmen.

Zone⁴¹ (hohe Querverschiebung), bei Ausfall der Lenkaktorik oder bei instabilem Verhalten. Zum Aktivieren des Sturzes werden zwei unterschiedliche Strategien verfolgt: Bei der ersten Strategie wird die Querverschiebung (Sicherheitszone) des Rads durch den Sensor gemessen. Wird ein Schwellwert überschritten, wird der Rad-Sturz aktiviert. Bei der zweiten Strategie wird der maximale Reibungswert in Querrichtung geschätzt⁴². Wird die Reibung zu klein, wird ebenfalls der Rad-Sturz aktiviert. Beide Strategien können kombiniert werden, dann werden sowohl Reibungswert als auch Querverschiebung für die Aktivierung des Sturzwinkels berücksichtigt.

Die Überwachungs- und Diagnoseeinheit beobachtet die Fahrwerks-Position und -Verhalten auf der Schiene. So fängt sie Fehlfunktionen oder Ausfall der Sensoren ab und veranlasst eine neue Berechnung zur Messgrößenaufbereitung (fehlertolerante Regelung). Fallen alle Sensoren oder Aktoren aus, wird ein Nothalt des Fahrzeugs erzwungen. Die lokale Regelung enthält den Kaskaden-Regelkreis für jeden Aktor (siehe Bild 4-6).

Der lokale Regler des Fahrwerks enthält vier Einzelregler, mit denen die elektrische Spurführungs-Aktorik des Fahrwerks geregelt ist. Ein Regler, bzw. dessen Simulationsmodell, ist als Beispiel in Bild 4-6 dargestellt. Dieser besteht aus einem Kaskaden-Regelkreis sowie der elektrischen Spurführungs-Aktorik und einem mechanischen Teil. Der elektrische und mechanische Teil repräsentieren das reale Fahrwerk. Der Regler gibt entsprechende (lokale) Stellgrößen für die Aktoren vor. Jeder der Aktoren hat die gleiche Kaskaden-Struktur [BTG+09, S. 327ff.].

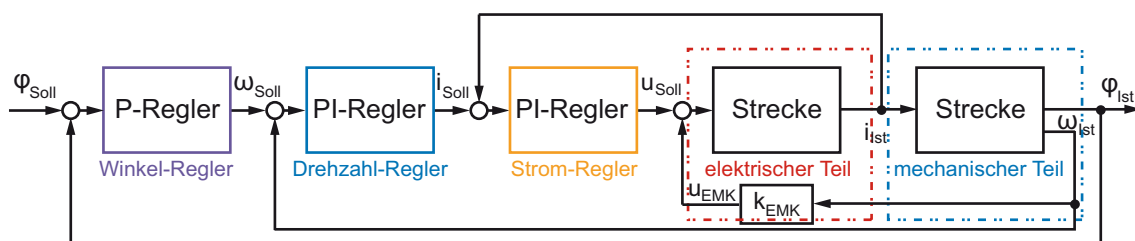


Bild 4-6: Regler-Modell der Aktorik im sturzvariablen Fahrwerk mit Kaskaden-Regelkreisen (Gleichstrommotor)

⁴¹ Sicherheitszone des Fahrwerks: Die Sicherheitszone ist durch die Querverschiebung des Rads auf dem Gleis definiert. Bei zu hoher Querverschiebung wird die Sicherheitszone verlassen. Der Bereich der Sicherheitszone wird durch die obere Ebene (KO) des Operator-Controller-Moduls vorgegeben. Er sollte nicht zu klein sein, das dies nicht energieeffizient ist (Optimierungsproblem) [GT09], [GSS+10].

⁴² Der Reibwert kann nicht gemessen werden, hierzu werden Schätzverfahren verwendet, auf die nicht näher eingegangen wird. Eine VR-Umgebung kann jedoch Informationen zur Überprüfung des geschätzten Wertes liefern, da sie den Schienenverlauf enthält und in dieser Umgebungseinflüsse (wie z.B. Wind) abgebildet werden können.

4.3 Analyseaufgaben mechatronischer Systeme

In diesem Kapitel werden Analyseaufgaben beschrieben, die bei der Entwicklung mechatronischer Systeme bearbeitet werden und die die Grundlage für die weitere Entwicklung der Visualisierungstechniken bilden. Zunächst werden konkrete Analyseaufgaben beschrieben, die an den Validierungsbeispielen des RailCabs Systems ermittelt wurden. Sie wurden durch Befragung der beteiligten Entwickler erarbeitet. Aus Platzgründen befinden sich die Analyseaufgaben der Beispiele in Kapitel A2.2. Aus diesen werden dann allgemeingültige Analyseaufgaben abgeleitet, die für ähnliche Problemstellungen in fortgeschrittenen mechatronischen Systemen gelten (Kapitel 4.3.1). Abschließend werden die Analyseaufgaben den mechatronischen Ebenen MFM, AMS und VMS zugeordnet (Kapitel 4.3.2.).

Die grundlegende Analyseaufgabe für alle Ebenen und eingesetzten KI-Verfahren eines fortgeschrittenen mechatronischen Systems ist im Rahmen dieser Arbeit die *ganzheitliche Analyse des Verhaltens, der Struktur und der Parameter* während der Simulation. Denn alle Modelle, ihre Strukturen und Parameter haben während des Betriebs Einfluss auf das Verhalten des Systems.

4.3.1 Zusammenfassung der Analyseaufgaben für fortgeschrittene mechatronische Systeme

Aus den konkreten Analyseaufgaben der beschriebenen Validierungsbeispiele aus Kapitel A2.2 werden allgemeine Analyseaufgaben für fortgeschrittene mechatronische Systeme abgeleitet und verallgemeinert formuliert, so dass sie auf andere Problemstellungen übertragbar sind. Die Analyseaufgaben sind Aufgaben aus technischer Sicht.

Bei den Analyseaufgaben wird zwischen solchen Aufgaben unterschieden, bei denen das Zeitverhalten keine Rolle spielt und Aufgaben, die insbesondere zeit-orientierte Daten berücksichtigen. Zeit-orientierte Aufgaben werden betrachtet, weil fortgeschrittene mechatronische Systeme hochdynamische Systeme sind und zeitliche Abläufe und Zusammenhänge das Systemverhalten stark beeinflussen. Die Analyseaufgaben sind:

- *Analyseaufgaben für mechatronische Systeme* (siehe Tabelle 4-2) und
- *Analyseaufgaben für zeit-abhängige Daten mechatronischer Systeme* (siehe Tabelle 4-3)

In den Tabellen folgt jeweils in der ersten Spalte eine Benennung der Analyseaufgabe – formuliert als Substantiv. Beim Lesen wird jedem der Substantive das Verb „analysieren“ angestellt; zum Beispiel *Funktion analysieren*. In der zweiten Spalte folgt eine kurze Erläuterung der Analyseaufgabe. In Anlehnung an BESHERS et al. und MCEACHREN ist jede Analyseaufgabe in Form einer Fragestellung formuliert, die ein Anwender mit Hilfe einer Visualisierung beantworten kann [BF92], [McE95].

Die ersten drei Analyseaufgaben *Korrelation/Kontext*, *Übersicht und Detail* und *Anwendungsszenario* sind Basis-Analyseaufgaben; sie treten i.d.R. bei der Analyse eines jeden mechatronischen Systems auf.

Tabelle 4-2: Analyseaufgaben fortgeschrittener mechatronischer Systeme für die interaktive, visuelle Analyse

Analyseaufgabe	Beschreibung
Korrelation/ Kontext	<p>Überprüfen von technischen / physikalischen Größen sowie abstrakten Daten in Bezug auf das Verhalten von physikalischen Systemkomponenten. Dies ist eine Basis-Analyseaufgabe, die generell für alle Aufgaben gilt. Sie erfordert die Darstellung abstrakter Daten im Bezug zum Systemverhalten.</p> <p><i>Haben Systemgrößen einen Zusammenhang bzw. Kontext zum Grundsystem und folglich seinem Verhalten? Wie ist z.B. der Zusammenhang zwischen Anregung und Verhalten?</i></p>
Übersicht und Detail	<p>Hier soll sowohl ein Überblick über das Gesamtverhalten aller vernetzten Systeme, wie z.B. ihre Wirkweise, aber auch nach Bedarf detailliertes Verhalten einzelner Systemkomponenten untersucht werden. Auch dies ist eine Basis-Analyseaufgabe.</p> <p><i>Wie stehen Teilsysteme eines Gesamtsystems in Bezug zueinander? Wie verhalten sich einzelne Systeme?</i></p>
Anwendungs- szenario	<p>Simulationen werden anhand von Anwendungsszenarien verifiziert. Bei dieser Aufgabe wird untersucht, ob die Simulation ein Anwendungsszenario erfüllen kann. Mit Hilfe der Visualisierung soll ein Anwendungsszenario einfacher verifiziert werden.</p> <p><i>Ist ein mechatronisches System in der Lage, autonom im Anwendungsszenario zu agieren und sich an Umgebungsbedingungen anzupassen?</i></p>
Bewegungsver- halten / Verhal- tensanpassung	<p>Analysiert werden das Verhalten sowie die Verhaltensanpassung von gestaltbehafteten Systemkomponenten oder Systemkomponenten aus der Informationsverarbeitung während der Simulation des Systems.</p> <p><i>Wann tritt eine Verhaltensanpassung ein und wie wird diese durchgeführt?</i></p>
Kontinuierliche Messwerte	<p>Es sollen kontinuierlich Messwerte, Parameter und Systemgrößen analysiert werden, die sich über die Zeit verändern. Dazu soll das Abrufen von dynamischen Werten einer Systemkomponente während der Simulation ermöglicht werden. Es geht darum zu sehen, ob Attributwerte eine Eigenschaft erfüllt haben, wie z.B. das Einhalten oder Überschreiten von Akzeptanzkriterien oder Schwellwerten.</p> <p><i>Welchen Wert haben Systemgrößen bzw. Systemkomponenten?</i></p>
Wirkbeziehung / Wirkstruktur / Flüsse	<p>Die Wirkstruktur ist eine bekannte, vorab modellierte (formale) Beziehung; diese wird mittels konfirmativer Analyse überprüft. Nicht vorab bekannte Wirkbeziehungen werden hingegen explorativ ermittelt, weil sie nicht bekannt bzw. modelliert sind und unerwartet auftreten können.</p> <p>Es werden die Wirkbeziehungen zwischen Systemkomponenten festge-</p>

	<p>stellt und analysiert. Dabei werden die Verbindungen zwischen Komponenten identifiziert, die nicht unmittelbar oder offensichtlich in Verbindung stehen, z.B. ein gemeinsames Ziel oder das Teilen der gleichen Energiequelle. Die Wirkbeziehungen können zwischen gestaltbehaftete Systemkomponenten aber auch zwischen denen der Informationsverarbeitung bestehen.</p> <p><i>Gibt es eine Art von Wirkbeziehung zwischen bestimmten Systemkomponenten?</i></p>
<p>Kommunikation (systemintern oder systemextern)</p>	<p>Es wird die systeminterne oder systemexterne Kommunikation zwischen Systemkomponenten oder ganzen Systemen analysiert. Sie ist eine bestimmte Art der Wirkbeziehung und hat eine Hin- sowie Rückrichtung der Wirkbeziehung zwischen Sender und Empfänger.</p> <p><i>Welche Systemkomponenten kommunizieren miteinander? Welche Daten werden kommuniziert?</i></p>
<p>Kooperation</p>	<p>Es soll der Vorgang einer Kooperation analysiert werden. Hierzu gehören bspw. die Teilnehmer einer Kooperation, ihre Rollen sowie der Gegenstand der Kooperation (z.B. die Vorfahrt eines RailCabs an einer Weiche).</p> <p><i>Was kooperieren die Systemkomponenten? Was ist Ergebnis der Kooperation?</i></p>
<p>System-Ziele (örtlich, zeitlich, intern, extern) Zweck</p>	<p>Es werden die von einem System verfolgten Ziele identifiziert und überprüft. Dabei können die Ziele örtlich, oder zeitlich aber auch systemintern oder extern sein. Mit den Zielen geht der Zweck des Systems einher und soll untersucht werden. Dies kann z.B. der Transport von Passagieren sein.</p> <p><i>Was ist das aktuelle Ziel der Systemkomponente? Welchen Zweck bzw. Aufgabe erfüllt sie?</i></p>
<p>Funktionen der Informationsverarbeitung</p>	<p>Es wird eine Funktion untersucht, die von bestimmten Systemkomponenten ausgeführt wird, mit dem Ziel die Funktion oder die Zusammenarbeit mehrerer Funktionen zu testen.</p> <p><i>Welche Funktion führt eine Systemkomponente aus und was sind ihre Eingabe- und Ausgabegrößen?</i></p>
<p>Planen</p>	<p>Hier wird der Vorgang des Planens (Aktivitäten) sowie dessen Ergebnis (Zustände) analysiert. Dies kann ein geplanter Weg eines Fahrzeugs sein.</p> <p><i>Welche Aktivitäten führt ein Planverfahren aus? Was ist Ergebnis des Planens?</i></p>
<p>Lernen</p>	<p>Hier werden der Vorgang sowie Ergebnisse des Lernens analysiert.</p> <p><i>Wann lernt ein System? Was lernt es und weshalb?</i></p>
<p>Zustände</p>	<p>Hier werden diskrete Zustände von Systemkomponenten untersucht. Dies können Zustände von abstrakten, informationsverarbeitenden Systemkomponenten sein (z.B. Zustand eines Software-Agenten) oder gestaltbehafteter Komponenten (z.B. aktiver/inaktiver Aktor) sein. Auch Zustandsübergänge und Zustandsfolgen sollen untersucht werden können.</p> <p><i>In welchem Zustand befindet sich aktuell eine Systemkomponente?</i></p>
<p>Aktivitäten</p>	<p>Die Aktivitäten und Aktionen des Systems werden analysiert. Dies können</p>

	<p>Aktivitäten der abstrakten, informationsverarbeitenden Softwarekomponenten sein (z.B. Regleraktivität) aber auch Aktivitäten gestaltbehaffeter Komponenten.</p> <p><i>Welche Aktivitäten führt das System aktuell aus?</i></p>
Störgrößen (Umgebung)	<p>Die auf das System einwirkende Größen (z.B. Störgrößen) aus der Umgebung sowie die demensprechende Reaktion des Systems auf diese Größen werden untersucht.</p> <p><i>Welche Störgrößen wirken auf das System ein? Wie wirken sie auf das System ein?</i></p>
Bewertung der Umfeldanalyse	<p>Es ist zu untersuchen, ob das System bzw. deren Informationsverarbeitung die aktuelle Situation erfassen und daraus Rückschlüsse für das weitere Handeln ziehen kann.</p> <p><i>Ist das System in der Lage aufgrund von äußeren Einflüssen geeignet zu handeln?</i></p>
Ressourcen	<p>Die Ressourcen des Systems sollen überprüft werden können. Dies kann der aktuelle Energieverbrauch und die zur Verfügung stehende Speicher- menge sein.</p> <p><i>Welchen Stand oder Wert hat eine Ressource?</i></p>
Statistik (Verteilung/ Streuung)	<p>Es sollen statistische Daten (wie z.B. die Verteilung) des Systems analysiert werden. Dies kann z.B. die Verteilung aller RaiCabs eines Anwendungsszenarios auf der Schienenstrecke sein. So sollen Ausreißer oder Extrema in Daten identifiziert werden können. Auch historische Daten über die Simulationszeit eines Szenarios hinweg sollen untersucht werden können, z.B. auf welchen Streckensegmenten war das System in einem bestimmten Zustand.</p> <p><i>Wo liegen Extremwerte und Ausreißer? Lassen sich Muster bzw. Trends in den Werten erkennen?</i></p>
Bewertung der Diagnose	<p>Es ist zu untersuchen, inwieweit die Informationsverarbeitung seine Diagnostizität und damit eine selbstständige Bewertung seiner Situation durchführen kann.</p>

Tabelle 4-3: Analyseaufgaben zeit-orientierter Daten mechatronischer Systeme für die interaktive, visuelle Analyse (in Anlehnung an [McE95])

Analyseaufgabe	Beschreibung
Identifikation (temporal) / Existenz	<p><i>Existenz eines Datenelementes:</i> Gesucht wird nach einem Datenwert zu einem Zeitpunkt.</p> <p><i>Existiert ein Datenelement zu einer bestimmten Zeit?</i></p> <p>Beispiel: Wurde zum Zeitpunkt x ein Auftrag angenommen/vergeben?</p>
Lokalisierung (temporal)	<p>Gesucht wird nach einem Zeitpunkt, an dem bestimmte Datenwerte existieren.</p> <p><i>Wann existiert ein Datenelement?</i></p> <p>Beispiel: zu welchem Zeitpunkt startete das System oder passierte ein Ereignis?</p>

Zeitintervall	Gesucht wird nach der Dauer, die ein Datenwert existiert oder zur Berechnung braucht. <i>Wie lang ist die Zeitspanne von Anfang bis Ende eines Datenelementes?</i> Beispiel: Wie lange war die Berechnungszeit zur Planung einer neuen Fahrtroute?
Zeitmuster	Gesucht wird nach der Frequenz von Datenelementen innerhalb einer bestimmten Zeitspanne, basierend darauf sollen Muster identifiziert werden. <i>Wie oft erscheint ein Datenelement?</i>
Änderungsrate	Gesucht wird nach der Größe bzw. dem Umfang der Änderung eines Datenwerts über die Zeit. <i>Wie häufig wechselt ein Datenelement, oder wie viel Unterschied besteht von Datenelement zu Datenelement über die Zeit?</i> Beispiel: Wie variierte der Durchsatz der Fahrzeuge in der letzten Stunde?
Sequenz	Gesucht wird nach der zeitlichen Reihenfolge/Ordnung von Datenwerten oder Eigenschaften. <i>In welcher Reihenfolge erscheinen die Datenelemente?</i> Beispiel: Passierte die Kollision vor oder nach dem Umschalten eines Konvoizustands? Hatte ein Ereignis oder eine andere Systemkomponente Einfluss auf das Verhalten einer bestimmten Systemkomponente?
Synchronisation	Gesucht wird nach Auftreten von Datenwerten, Ereignissen zum selben Zeitpunkt oder Intervall. <i>Existieren Datenelemente zur gleichen Zeit?</i> Beispiel: Plant ein RailCab seine Route um, wenn es einen neuen Auftrag reinbekommt?
System-Ziele (temporal)	Untersucht werden die aktuellen Ziele, die das System verfolgt und die Gründe, die zur diesem Ziel geführt haben. <i>Welches zeitliche Ziel verfolgt eine Systemkomponente?</i> Beispiel: Wann soll ein Fahrgast sein Ziel erreichen?

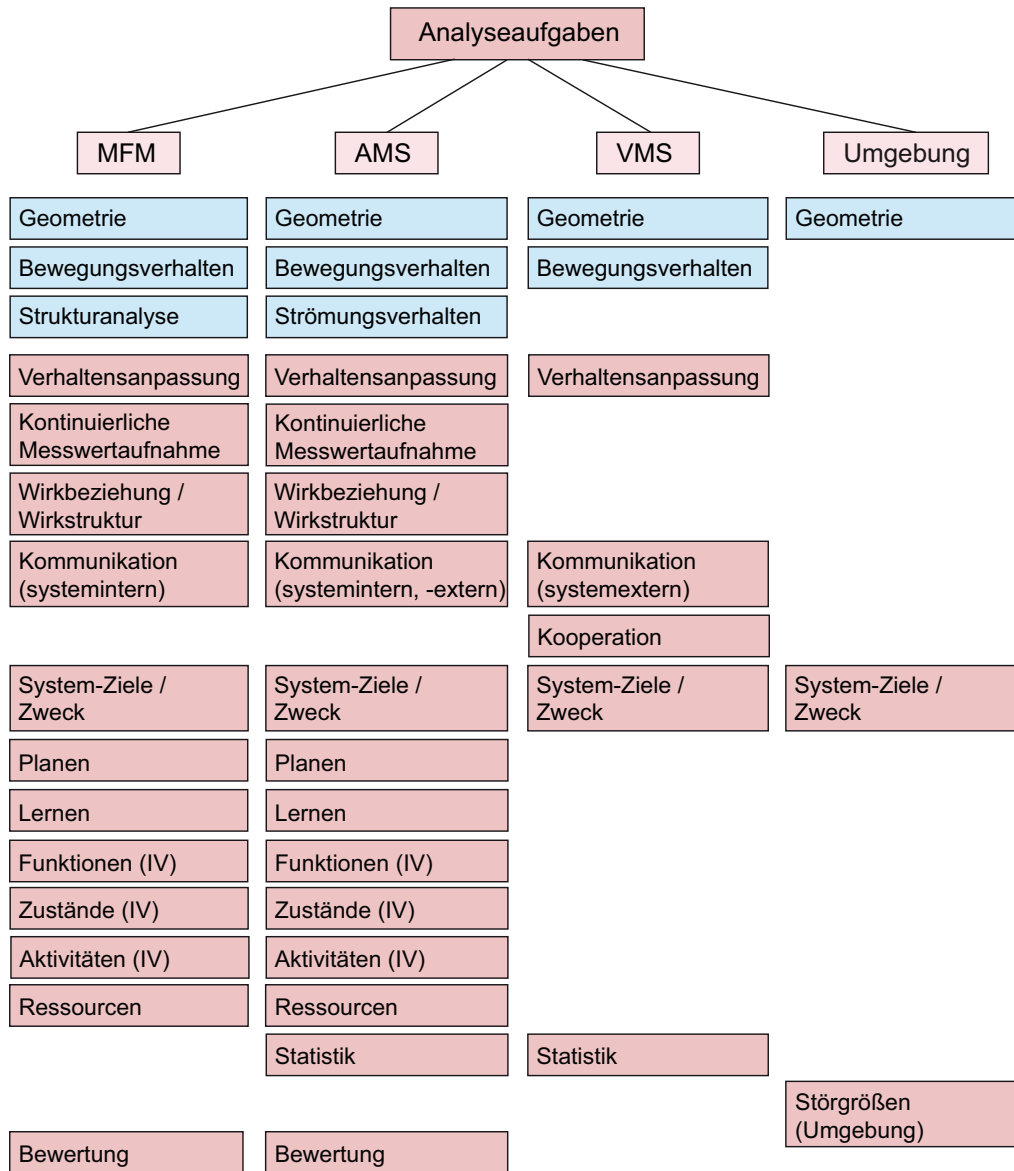
Die definierten Aufgaben sind von der Entwicklungsfragestellung und dem Verfahren bzw. seinen Simulationsdaten abhängig. Diese sind für jedes Visualisierungssystem von einem Entwickler genau zu spezifizieren. Die Analyseaufgaben können für einzelne Systemkomponenten gelten (z.B. einzelne Attributwerte von Systemkomponenten) oder aber mehrere Systemkomponenten gleichzeitig betreffen.

4.3.2 Einordnung der Analyseaufgaben in Ebenen der Makrostruktur

Dieser Abschnitt stellt eine Einordnung der Analyseaufgaben aus Tabelle 4-2 anhand der mechatronischen Ebenen MFM, AMS und VMS vor. In Bild 4-7 ist eine Taxonomie⁴³ für Analyseaufgaben aufgezeigt, die die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Analyse-

⁴³ Taxonomie: Eine Taxonomie ist ein Mittel zur Einordnung von Daten, Kategorien oder Fehler in Klassen, wobei für jede Klasse eindeutige Zuordnungsregeln existieren.

aufgaben zusammenfasst und diese entsprechend der mechatronischen Ebenen einordnet. Auf der ersten Ebene ist die Taxonomie in die Makroebenen mechatronischer Systeme eingeteilt: MFM, AMS und VMS sowie der Systemumgebung. Damit ist die Taxonomie angelehnt an den Ansatz aus der wissenschaftlichen Visualisierung, Aufgaben nach PUNKT, LOKAL und GLOBAL zu unterteilen (siehe Kap. 2.6.2.2).



Legende:

- Neue Analyseaufgaben für fortgeschr. mechatr. Systeme
- Konventionelle Analyseaufgaben
- IV: Informationsverarbeitung

Bild 4-7: Analyseaufgaben mechatronischer Systeme dargestellt als Taxonomie

4.4 Visualisierungsaufgaben mechatronischer Systeme

In diesem Abschnitt wird eine Taxonomie von Visualisierungsaufgaben (VA) zur Analyse des Verhaltens fortgeschrittener mechatronischer Systeme erarbeitet. Die Visualisierungsaufgaben beschreiben, welche Aspekte eines Systems visualisiert werden sollen und liefern funktionale Anforderungen an Visualisierungstechniken. Die Visualisierungsaufgaben wurden im Rahmen dieser Arbeit aus den identifizierten Analyseaufgaben aus Kapitel 4.3 abgeleitet und an den Demonstratoren des RailCab-Systems erprobt.

4.4.1 Taxonomie an Visualisierungsaufgaben

In Bild 4-8 sind die Visualisierungsaufgaben (VA) für mechatronische Systeme – in eine Taxonomie eingeordnet – dargestellt. Sie unterteilt Visualisierungen in Abhängigkeit vom Gegenstand der Aufgabe und dem Zweck der Visualisierung. Die Taxonomie ermöglicht im weiteren Verlauf eine Verfeinerung der Aufgabenklassen, abhängig der anwendungs-bezogenen Anforderungen [AMS+11, S.74].

Auf der ersten Hierarchieebenen der Taxonomie unterteilen sich die Aufgaben in folgende drei sog. Visualisierungsaufgaben-Klassen (VA-Klassen):

- Darstellung *gestaltbehafteter Systemkomponenten*: Diese umfasst die Visualisierung von Bauteilen und Baugruppen – insgesamt der Geometriedaten des mechatronischen Grundsystems inkl. der Aktorik. In diese Klasse fallen alle VA, die geometrische Daten enthalten.
- Darstellung von *Wirkbeziehungen und Flüssen* zwischen den Systemkomponenten: Diese umfasst die Visualisierung aller Wirkbeziehungen zwischen physikalischen Systemkomponenten. In diese Klasse fallen alle VA, die eine beliebige Art der Relation darstellen.
- Darstellung der abstrakten Daten der *Informationsverarbeitung*: Diese umfasst alle Daten, die grundsätzlich über keine intrinsische Gestalt verfügen, wie z.B. Regleralgorithmen, Gütemaße und systeminterne Zustände.

Des Weiteren sind Aufgaben definiert, die auf allen Hierarchieebenen und Klassen der Taxonomie relevant sind und sich mehreren Klassen zuordnen lassen. Sie werden als *Klassen-übergreifende VA* bezeichnet und werden als Hilfs-Aufgaben betrachtet. Im Bild sind sie rechts im separaten Kasten dargestellt.

Ein weiteres Kriterium ist der *Zweck* einer Visualisierung, der die Wahrnehmung des Anwenders berücksichtigt. So kann der Zweck einer Visualisierung z.B. die Aufmerksamkeitslenkung oder das Informieren sein. Im Bild werden sie rechts im separaten Kasten dargestellt.

Auf der zweiten Hierarchieebene sind die beschriebenen Visualisierungsaufgaben in die drei Sichten

- Gestalt
- Struktur
- Verhalten

unterteilt. Da für die VA-Klassen *Wirkbeziehung/Flüsse* und *Informationsverarbeitung* primär Daten ohne intrinsische Gestalt betrachtet werden, wird die Gestalt für diese Aufgaben nicht betrachtet; an der Gestalt werden eher die Auswirkungen der Daten dargestellt. Gesondert betrachtet wird die Verhaltensanpassung, da fortgeschrittene mechatronische Systeme ihr Verhalten zur Laufzeit anpassen. Dies kann eine Struktur oder Parameteranpassung sein. Sie lässt sich nicht eindeutig als Struktur oder Verhalten definieren und wird daher als eigene Aufgabe betrachtet.

Auf der dritten Ebene werden die Aufgaben weiter bzgl. der Gestalt, Struktur und Verhalten konkretisiert (gelbe Kästen). Die Aufgaben auf dieser Ebene werden in den folgenden Abschnitten für die Klassen *Wirkbeziehung/Flüsse* und *Informationsverarbeitung* näher erläutert. Da die Aufgaben der Klasse Gestaltbehaftete Systemkomponenten bewährte Aufgaben sind, werden sie nicht weiter erläutert. Sie sind in der Taxonomie der Vollständigkeit halber gelistet.

Auf der vierten Ebene befinden sich Beispiele oder unterschiedliche Ausprägungen einer VA.

Jede der Aufgaben ist als Kasten im Bild dargestellt und als Substantiv formuliert. Beim Lesen wird das Verb „visualisieren“ bzw. „darstellen“ zugefügt; z.B. *Informationsfluss visualisieren*. Jede der Aufgaben kann eine unterschiedliche Ausprägung haben, je nachdem auf welcher mechatronischen Ebene sie dargestellt wird. (Beispiele solcher Ausprägungen befinden sich in Steckbriefen in Kap. A2.5.2 bis A2.5.5). Die Ausprägungen sind für die Visualisierung insofern von Bedeutung, als dass eine Visualisierungstechnik innerhalb der VR-Anwendung bei der Überblicks-Darstellung (VMS) eine andere Erscheinung annehmen kann als bei der Detail-Darstellung (MFM).

Jeder der Visualisierungsaufgaben liegen zudem unterschiedliche Daten und Zeitverhalten zugrunde. Z.B. liegen der Klasse gestaltbehaftete Systemkomponenten im Wesentlichen Positions- und Orientierungsdaten der zugehörigen Gestalt zugrunde. Abstrakte Daten der Informationsverarbeitung können unterschiedlichste Datenstrukturen und Datentypen enthalten. Zudem beinhaltet jede Aufgabe auch einen zeitlichen Aspekt bzw. repräsentiert zeit-orientiertes Verhalten. Charakteristische Daten fortgeschrittener mechatronischer Systeme werden in Kapitel 4.5 näher erläutert.

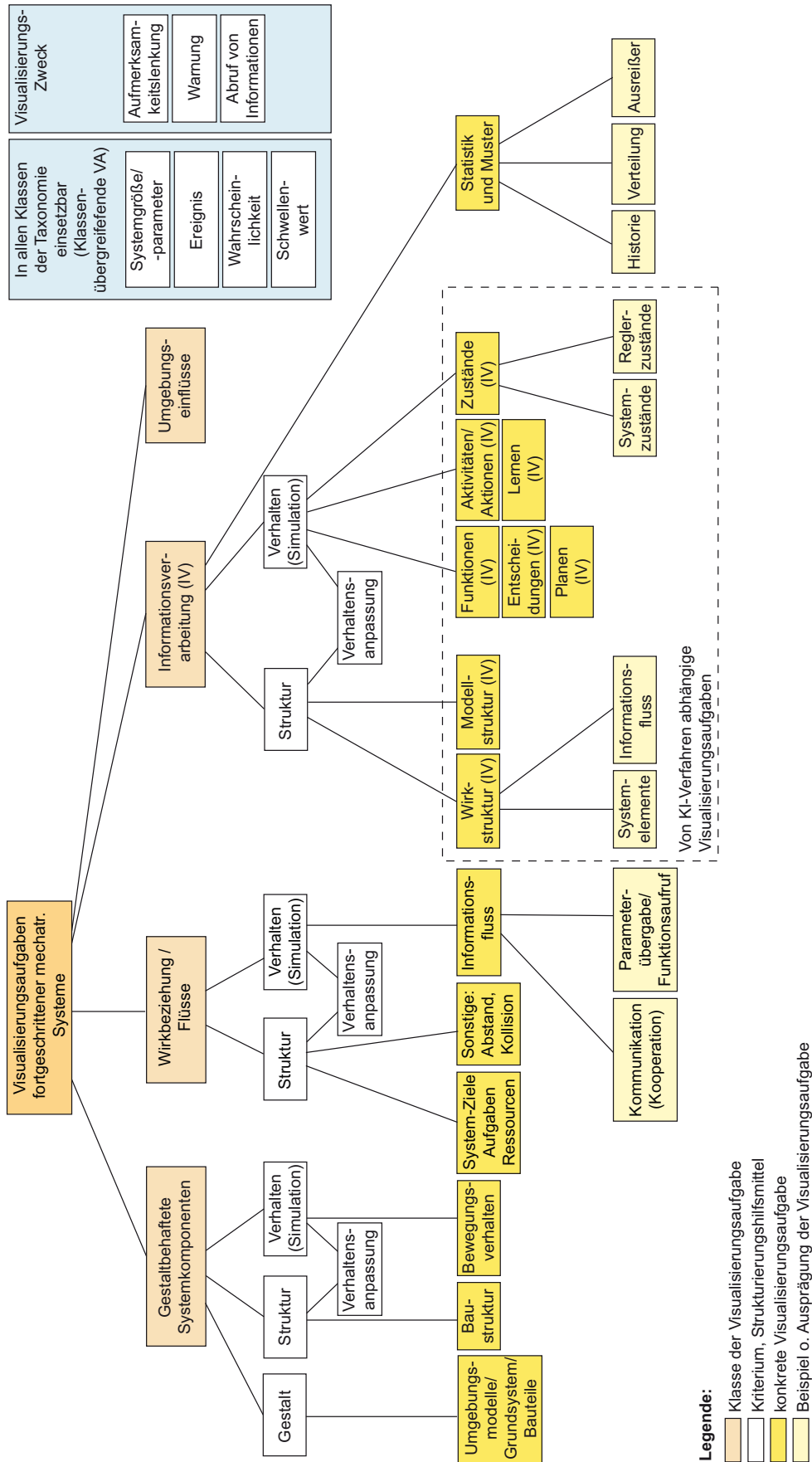


Bild 4-8: Visualisierungsaufgaben mechatr. Systeme dargestellt als Taxonomie

4.4.2 Visualisierungsaufgaben für Wirkbeziehungen / Flüsse

Die Interaktionen zwischen Systemkomponenten wird mit den Flüssen Stoff-, Energie- und Information beschrieben, wodurch deren Wirkweise im Gesamtsystem deutlich wird. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Informationsflüsse behandelt. Zudem werden weitere Aufgaben betrachtet, die die Analyse der Wirkbeziehung betreffen:

VA (gemeinsame) System-Ziele / Aufgaben / Ressourcen: Bei dieser Aufgabe werden Ziele des Systems dargestellt. Dies sind z.B. Zielstationen des RailCab-Systems (örtliche Ziele) und die Ankunftszeit (zeitliche Ziele). Dadurch besteht eine Wirkbeziehung zwischen einem RailCab und einer Station. Zudem besteht auch eine indirekte Wirkbeziehung zwischen den RailCabs, die alle das gleiche Ziel verfolgen. Ähnliches gilt für gemeinsam genutzte Ressourcen von Teilsystemen und eine gemeinsam verfolgte Aufgabe (z.B. Transport eines Passagiers).

VA Sonstige Wirkbeziehungen: Dies umfasst alle indirekten Wirkbeziehungen, die implizit im Betrieb auftreten und das Verhalten des Systems beeinflussen. Dies sind z.B. der Abstand oder eine Kollision zwischen zwei oder mehreren AMS. Sie werden weder als Stoff-, Energie-, noch Informationsfluss modelliert, dennoch sind es wichtige Informationen, die der Anwender bei der Analyse benötigt.

VA Informationsfluss: Informationsflüsse erfolgen zwischen Informationsverarbeitenden(IV)-Einheiten oder innerhalb der IV-Einheiten. Sie dienen im Wesentlichen der Kommunikation und der Kooperation zwischen Systemkomponenten, zur Steuerung oder Regelung oder zur Parameterübergabe. Ein Informationsfluss erfolgt immer mindestens zwischen zwei Elementen, d.h. es sind immer Sender und Empfänger sowie die ausgetauschten Daten darzustellen.

4.4.3 Visualisierungsaufgaben der Informationsverarbeitung

Im Folgenden werden lösungsneutrale Visualisierungsaufgaben auf Basis der Aufgaben bzw. Funktionen der Informationsverarbeitung betrachtet. Die Visualisierungsaufgaben ergeben sich aus der Analyse der Anwendungsbeispiele.

Zwei Anforderungen, die jede der nachfolgenden Visualisierungsaufgaben (VA) erfüllen muss, sind die ganzheitliche und ebenen-übergreifende Visualisierung der Informationsverarbeitung und deren Daten. Ganzheitlich meint hier, es sind alle relevanten Disziplinen in Betracht zu ziehen, die in direkter und indirekter Interaktion mit der Informationsverarbeitung stehen. Ebenen-übergreifend bedeutet, dass die Struktur und das Verhalten der Informationsverarbeitung über alle Ebenen hinweg (MFM, AMS, VMS) deutlich werden muss.

VA Wirkstruktur / Wirkbeziehungen: Dies umfasst die Darstellung der Systemkomponenten der Informationsverarbeitung (IV-Systemkomponenten), welche die KI-

Verfahren realisieren, sowie deren Auswirkung auf das Verhalten des mechatronischen Systems und den Grund dafür. Ziel ist es, dem Entwickler zu verdeutlichen, auf was das System reagiert (Identifizieren der Eingangsdaten), wie die IV-Systemkomponente verändert wird (z.B. aktiv/inaktiv) und den dadurch bewirkten Effekt.

VA Modellstruktur: Bei dieser Visualisierungsaufgabe wird die Modellstruktur, ggf. in Verbindung mit weiteren Parametern, dargestellt. Ziel ist, fehlerhaftes Verhalten, auf die Modellstruktur zurückzuführen.

VA Funktionen: Die Funktionen der Informationsverarbeitung, ihre Eingabe und Ausgabe werden visualisiert. Ziel dieser Aufgabe ist es, zum einen darzustellen welche Funktion ausgeführt wird, zum anderen die wesentlichen Auswirkungen der Funktion zu verdeutlichen.

VA Aktivitäten: Es werden die relevanten Aktivitäten der SW-Komponenten bzw. Systemkomponenten dargestellt. Ziel dieser Aufgabe ist, dass relevante Aktivitäten der Systemkomponenten erkennbar werden sowie die Abfolge der Aktivitäten aufgrund von Umgebungseinflüssen analysierbar wird. Die Aktivitäten spezifizieren, in welcher Reihenfolge eine Systemkomponente seine Funktionen ausführt [GFD+08, S. 94].

VA Zustände: Hier werden Zustände und Zustandsänderungen bzw. Zustandsübergänge visualisiert. Ziel der Aufgabe ist es, darzustellen, welcher Zustand aktuell aktiv ist sowie die Zustandswechsel anzuzeigen. Denn Zustände beschreiben in der Regel aktuelle Konfigurationen eines Systems; die Zustandsübergänge die Bedingungen für den Wechsel des Zustands. Letztere werden durch das autonome Verhalten ausgelöst. Durch die VA werden z.B. häufige und alterierende Zustandswechsel erkannt, die nicht den Erwartungen der Entwickler entsprechen [GFD+08, S. 94].

VA Entscheidungen: Die Aufgabe für eine Visualisierung ist es, die Entscheidungen der Informationsverarbeitung anzuzeigen und vor allem, die Gründe für die getroffene Entscheidung zu verdeutlichen. Entscheidungsvorgänge sind z.B.: *Umschaltstrategien* zwischen Reglerzuständen, das *Feuern einer Regeln* aufgrund von erfüllten Wahrheitswerten oder anderen Entscheidungsgrößen (Schwellenwerte). Entscheidungsvorgänge können demnach wiederum andere Aufgaben beinhalten, wie z.B. Schwellenwertüberschreitungen oder andere Kriterien anhand derer Entscheidungen getroffen werden.

VA Lernen: Eine lernende Informationsverarbeitung passt ihre Struktur und/oder Parameter aufgrund der vorhandenen Umgebungsbedingungen an. Aufgabe ist es, erstens, den Lernprozess aufzuzeigen, zweitens, die Gründe und die Auswirkungen des Lernprozesses zu verdeutlichen.

VA Planen: Beim Planen wird das Verhalten des Systems in Zukunftssituationen mit Hilfe von Aktivitäten und Zustände modelliert. Aufgabe hier ist es, einen im Plan berechneten zukünftigen Zustand des Systems im Vergleich zu dem aktuellen Zustand darzustellen. Dadurch kann das Planungsverfahren im Voraus bewertet werden.

VA Statistik (Statistische Kennzahlen): Ziel ist es, einen Überblick über statistische Daten eines Systems oder vieler Systeme zu erhalten, so dass eine Bewertung des Langzeitverhaltens möglich wird (deskriptive Statistik). Zudem wird durch die Visualisierung statistischer Daten die Aufmerksamkeit auf bestimmte Ereignisse gelenkt. Beispiele für statistische Werte oder Eigenschaften sind z.B.: Auslastung von Streckensegmenten, zusammengefasste Messwerte, Durchsätze der Fahrzeuge, relative Geschwindigkeiten usw. Auch zurückliegende Ereignisse, wie das Eintreten eines bestimmten Systemzustandes auf dem zuletzt gefahrenen Streckensegment, gelten als statistische Aufgabe.

VA Muster: Aufgabe der Visualisierung ist es, Muster im Verhalten des mechatronischen System erkennbar zu machen. Mechatronische Systeme adaptieren sich automatisch, um ihr Verhalten und die Struktur an veränderte Bedingungen anzupassen. Weil diese Prozesse durch deterministische Programme ausgeführt werden, entstehen im Lauf der Zeit „Verhaltensmuster“, die gewünscht aber auch unerwartet sein können (z.B. Bremsen eines Bahnfahrzeuges vor jeder Steigung). Die Visualisierung muss dies erkennen lassen.

4.4.4 Klassen-übergreifende Visualisierungsaufgaben

Klassen-übergreifende können in allen bisher genannten Visualisierungsaufgaben enthalten sein aber auch in Kombination untereinander auftreten. So kann z.B. die Systemgröße Geschwindigkeit durch das Bewegungsverhalten einer gestaltbehafteten Komponente repräsentiert werden oder aber zwischen zwei Komponenten als Regelparameter ausgetauscht werden. Im Folgenden werden typische Klassen-übergreifende Visualisierungsaufgaben genannt:

Systemgrößen (auch: Prozessvariablen⁴⁴): Aufgabe ist es, die Beobachtung bzw. Überwachung von Systemgrößen zu ermöglichen. „...*Wenn im Prozess eine interessierende Größe x, y, \dots von den unabhängigen Parametern Zeit t und Ort r abhängen, werden diese Größen als Prozessvariablen (hier auch: Systemgröße) $x(t, r)$, $y(t, r)$, ... bezeichnet.*“ [KN98, S. 1]. Beispiele sind: resultierende Kräfte, Geschwindigkeit oder Winkel einer Systemkomponente bzw. eines Aktors. Systemgrößen sind in der Regel abhängige Größen (zeitlich-räumlich änderbar).

Systemparameter: Aufgabe ist es, die Systemparameter (auch: Prozessvariablen bzw. Systemgrößen mit unabhängigen Größen) eines technischen Systems für die Analyse darzustellen. Dabei werden unter dem Begriff Systemparameter alle Kenngrößen oder Kennzahlen zusammengefasst (z.B. Regelparameter), oder nicht beeinflussbare Einflussfaktoren, die von außen auf eine Systemkomponente einwirken. Im Gegensatz zur

⁴⁴ Nach Kramer et al. ist der Begriff Prozess wie folgt definiert: „Jedes Phänomen, das zeitlich-räumlichen Veränderungen unterworfen ist, kann als ein Prozess aufgefasst werden, der dadurch gekennzeichnet ist, dass es eine oder mehrere Größen gibt, die sich mit voranschreitender Zeit und/oder in Abhängigkeit vom Ort verändern [...]“ [KN98, S. 1].

Systemgröße sind Systemparameter nicht oder nur vernachlässigbar zeitlich-räumlich änderbar (unabhängige Größe) [KN98, S. 2].

Ereignisse: Mit dem Begriff Ereignisse sind an dieser Stelle alle Entscheidungen, Ausgangsdaten und Signale gemeint, die durch die Informationsverarbeitung des Systems entstehen. Dies können Aufträge, Signale, wechselnde Umwelteinflüsse oder Schwellwert-Überschreitungen sein. Aufgabe ist es, die Aufmerksamkeit des Anwenders auf diese Größen zu lenken. Ereignisse weisen ein zeit-diskretes Verhalten auf.

Unsicherheit/Wahrscheinlichkeit: Aufgabe ist es, dem Anwender die Verlässlichkeit von Daten mitzuteilen oder bei unsicheren Daten keine Sicherheit zu suggerieren. Unsicherheiten entstehen durch viele Einflüsse, wie z.B. Messtoleranzen, Varianzen des Untersuchungsgegenstandes und Stichproben. Sie werden in der Informationsverarbeitung als Wahrscheinlichkeiten modelliert.

Schwellenwerte/-bereiche: Schwellenwerte, wie z.B. Grenzwerte von Signalen oder Kriterien von Algorithmen zur Klassifikation, beeinflussen das Verhalten eines Systems zielgerichtet. Sie beeinflussen Entscheidungsvorgänge oder sind für das Feuern von Regeln verantwortlich. Aufgabe ist es, sie entsprechend dazustellen.

4.4.5 Visualisierungs-Zweck

Jede der Visualisierungsaufgaben kann je nach Zweck unterschiedliche Ausprägungen annehmen. Grundsätzlicher Zweck ist zwar die Analyse von Daten, allerdings existieren in virtuellen Umgebungen eine Reihe weiterer Gründe für eine Visualisierung. Im Folgenden werden die relevanten Einsatzzwecke aufgeführt.

Aufmerksamkeitslenkung: Ziel ist es, den Anwender auf Ereignisse und Bereiche in der virtuellen Umgebung zu lenken. Denn die Analyse eines mechatronischen Systems in VR bedingt, dass der Anwender sich in einer virtuellen Umgebung befindet, von der er immer nur einen Ausschnitt betrachten kann. So kann er z.B. bei der Analyse des Schienenverkehrssystems RailCab ein Ereignis nicht sehen, dass sich in einer virtuellen Stadt B ereignet, während er sich in der virtuellen Stadt A aufhält. Hier muss der Anwender auf das Ereignis aufmerksam gemacht werden.

Warnungen: Aufgabe ist es, Warnungen und Hinweise automatisch von der VR-Anwendung anzeigen zu lassen. Diese können die Gestalt betreffen (z.B. Kollision) oder die Informationsverarbeitung (z.B. unerlaubter Zustand). Hinweise und Warnungen müssen sich von anderen Visualisierungstechniken abheben, so dass der Anwender nur diese schnellstmöglich zur Kenntnis nimmt.

Abruf von Informationen über Systemgrößen oder Parameter: Ein Anwender soll jederzeit zu einer von ihm gewünschten Systemkomponente zusätzliche Informationen abrufen können. Die Informationen geben einem Anwender Auskunft über Parameter oder Attribute einer Systemkomponente, wie zum Beispiel dem Namen oder der aktuel-

len Geschwindigkeit. Hierzu ist gleichzeitig die Interaktion (Selektion) eines Anwenders erforderlich.

4.5 Daten mechatronischer Systeme

Zu einer Visualisierungsaufgabe existiert in der Regel eine Menge an Daten und Attributen, die immer wieder bei der Bearbeitung der Visualisierungsaufgabe auftreten. Die Datenmenge ist typisch für diese Aufgabe bzw. eine Funktion und unterstützt einen Entwickler einer Visualisierungsanwendung bei der Auswahl der benötigten Visualisierungen und dem Aufbau geeigneter Datenstrukturen. Dabei präsentieren die Visualisierungen die Daten; die Datenstrukturen repräsentieren sie rechnerintern.

Tabelle 4-4 listet Datenklassen und deren Beschreibung auf, die im Allgemeinen bei der Bearbeitung einer Visualisierungsaufgabe anfallen. Die Datenklassen verallgemeinern die konkreten Daten eines konkreten Systems. Sie werden an dieser Stelle angegeben, weil sie a) von der Visualisierungsaufgabe anhängig sind, und b) sich herausgestellt hat, dass sie im direkten Zusammenhang einer Funktion fortgeschrittener mechatronischer Systeme (IV-Funktion) zuzuordnen sind. Die Tabelle stellt die Visualisierungsaufgabe und die IV-Funktion in Bezug zur Datenklasse. Die Datenbeschreibung erläutert diese.

Die Angaben in der Tabelle beschränken sich auf die Datenklassen der Informationsverarbeitung fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Daten und Datenklassen von z.B. der Mechanik (Kraft, Dimension, Geschwindigkeit, etc.) wurden an dieser Stelle vernachlässigt. Solche sind in der einschlägigen Literatur zu Genüge fachbezogen analysiert und systematisch erfasst worden (z.B. in [BDW03]). Geschwindigkeit und Abstand, etc. werden an dieser Stelle lediglich als Datum der Informationsverarbeitung aufgefasst.

Tabelle 4-4: Visualisierungsaufgaben und die dazugehörigen Datenklassen.

Visualisierungsaufgabe (VA)	IV-Funktion	Datenklasse	Datenbeschreibung
VA Wirkbeziehung	anpassen bestimmen erzeugen kommunizieren	Mehrere Systemkomponenten (Objekt), Relationen zwischen den Systemkomponenten (Verknüpfung), Attribute der Systemkomponenten (Menge)	Zur Analyse der Wirkungsweise werden zwei oder mehrere Systemkomponenten rechnerintern abgebildet sowie die Relation zwischen diesen. Die Relation wird zudem mit Attributen der Systemkomponente ergänzt, die die Art der Relation angeben.
VA Modellstruktur		Komponenten (Objekt), Relationen (Verknüpfung)	Eine Modellstruktur ist ein Datenkonstrukt, das aus Modellkomponenten und aus Relationen zwischen diesen

			gebildet wird.
VA Funktionen	identifizieren	Substantiv (Menge), Verb (Menge), Eingangsgrößen (Verknüpfung), Ausgangsgrößen (Verknüpfung)	Eine Funktion wird durch ein Substantiv und ein Verb beschrieben, die in der Regel aus einem festen Vokabular gewählt werden. Zudem sind die Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen mit vor- und nachgeschalteten Objekten verknüpft, auf die sie wirken.
VA Aktivitäten		Aktion (Funktion), vorgeschaltete Aktivität (Verknüpfung), nachgeschaltete Aktivität (Verknüpfung)	Aktivitäten werden durch eine Reihe von miteinander verknüpften Funktionen dargestellt.
VA Zustände	klassifizieren	Zustand (Menge), Relation (Verknüpfung), Auslösefunktion (Funktion)	Ein Zustand wird aus einer vordefinierten Menge an Zuständen ausgewählt.
VA Entscheidungen	optimieren gewichten bewerten	Eingangsdatum (Objekt), Wahrscheinlichkeit (Intervall), Funktion Entscheidung (Menge)	Eine Entscheidung wird stets durch ein Eingangsdatum, einen Wahrscheinlichkeitswert und eine Entscheidung beschrieben, wobei die Funktion das Eingangsdatum in die Entscheidung überführt.
VA Lernen	verstehen	Aktuelles Datum (Objekt), vorheriges Datum (Objekt), Zeitspanne (Intervall), Ursache (Verknüpfung)	Durch Lernen wird ein aktuelles Datum in ein neues Datum überführt. Beide sind rechnerintern abzubilden. Zudem ist eine Zeitspanne festzuhalten, die für den Lernprozess benötigt wurde sowie die Ursache, die den Lernprozess angestoßen hat.
VA Planen	planen	Aktuelles Verhalten oder Zustand eines Systems (Objekt), Zukünftiges Verhalten oder Zustand eines Systems (Objekt) Zeithorizont (Intervall)	Planen bedeutet die Situation in der Zukunft zu extrapolieren. Für die visuelle Analyse sind die Objekte im aktuellen Zustand, in zukünftigen Zuständen sowie der Zeithorizont der Planung zu hinterlegen.
VA Statistik	aufzeichnen beobachten	Daten (Zeit), Zeitspanne (Intervall)	Es werden über eine Zeitspannen Daten aufgezeichnet und statistisch ausgewertet (z.B. Durchschnitt, Verteilung)
VA Muster	analysieren optimieren	Datum (Objekt), Ort (Menge), Zeit (Zeit), Bezug (Verknüpfung)	Ein Muster entsteht durch mehrere Datensätze. Ein Datum ist ein Objekt mit Bezug zu einem Ort und einer Zeit.

Die Daten werden durch folgende Begriffe beschrieben:

- **Objekt:** Dies ist ein konkretes, von der realisierten IV-Systemkomponente abhängiges Datum, das Gegenstand der Verarbeitung ist, wie z.B. ein Kommunikationspaket oder ein Abstand.
- **Verknüpfung:** Hierbei handelt es sich um eine Referenz auf ein Objekt eines anderen, mit der IV-Systemkomponente in Bezug stehenden Systemkomponente.
- **Menge:** Hierbei handelt es sich um einen feststehenden Begriff, Vokabel oder ein Objekt, das aus einer diskreten Menge von vordefinierten Objekten gewählt wird. Dies ist z.B. die Auswahl eines Zustands aus mehreren Zuständen oder einer Klasse aus mehreren Klassen.
- **Intervall:** Hierbei handelt es sich um einen Wert, der aus einem vordefinierten Wertespektrum gewählt wird. Im Unterschied zur Menge ist das Spektrum quasi-kontinuierlich.
- **Funktion:** Die Funktion im IV-System ist das mathematische Verfahren, das zur Bearbeitung der Eingangsdaten und zur Erzeugung der Ausgangsdaten benötigt wird. Dabei kann es sich um komplexe Verfahren handeln, die zur visuellen Präsentation allerdings nur als Abbildungsregel $y:=f(a,b,...)$ festgehalten werden.
- **Zeit:** Dies meint einen Zeitpunkt auf einer definierten Zeitskala.

4.6 Visualisierungstechniken mechatronischer Systeme

In diesem Abschnitt werden die Visualisierungstechniken zu den Visualisierungsaufgaben beschrieben. In Analogie zur Entwicklungsmethodik im Maschinenbau können sie als Lösungsmuster für die Visualisierungsaufgaben betrachtet werden. Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut: Zuerst verschafft Bild 4-9 einen Überblick über die unterschiedlichen Primär-Visualisierungstechniken. Anschließend werden diese der Reihe nach vorgestellt. Nach den Primär-Visualisierungstechniken wird angegeben, welche Sekundär-Visualisierungstechniken innerhalb der Primär-Techniken enthalten sind.

Die Visualisierungstechniken werden in zwei Klassen unterteilt: die sogenannten Primär-Visualisierungstechniken und den Sekundär-Visualisierungstechniken. Als **Primär-Visualisierungstechniken** werden die Darstellungstechniken bezeichnet, die eine interaktive visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme unter Berücksichtigung der Informationsverarbeitung erlauben. Sie lassen sich systemunabhängig einsetzen und werden zur Realisierung der wesentlichen Visualisierungsaufgaben zur Informationsverarbeitung vorgeschlagen. Die Analyse der Anwendungsbeispiele hat ergeben, dass die Analyse der Informationsverarbeitung

- ganzheitlich und
- ebenen-übergreifend

zu erfolgen hat. Zudem hat sich herausgestellt, dass die Visualisierungsaufgaben

- Wirkweisen verdeutlichen,
- Entscheidungen nachvollziehbar demonstrieren und
- Muster erkennen lassen

wesentlich für die visuelle Analyse der Informationsverarbeitung sind. Die Primär-Visualisierungstechniken adressieren diese Aufgaben; folgende Techniken wurden erarbeitet:

- VR-Kontinuum zur ebenen-übergreifenden visuellen Analyse,
- Visuelle Netzwerke zur Darstellung von Wirkweisen,
- Semantisches Zoomen und
- Fokus und Kontexttechniken für die ganzheitliche visuelle Analyse,
- Farbkarten für statistische Daten und die visuelle Mustererkennung und
- Struktur- und Verhaltensdiagramme für die Darstellung von Wirkstrukturen, Zuständen, Aktivitäten oder Entscheidungen

Die **Sekundär-Visualisierungstechniken** sind eine Reihe von Darstellungsformen, die zur Analyse einzelner Aspekte mechatronischer Systeme wesentlich sind, die jedoch Strukturierungsebenen übergreifende Analyse und die Analyse der Informationsverarbeitung nicht primär unterstützen. Unter diese Techniken fallen die klassischen Visualisierungen für mechatronische Systeme, wie z.B. das 3D-Modell zur Darstellung der Gestalt, Pfeile zur Darstellung von Kräften, Linien zur Darstellung von Strömungen, Skalendisplays und vieles mehr (siehe Kap. 2.4). Eine Auswahl dieser Techniken ist in Kapitel A2.5.3 anhand von Steckbriefen aufgezeigt.

Bild 4-9 gibt einen Überblick über die Primär-Visualisierungstechniken. Dabei wird die Taxonomie der Visualisierungsaufgaben mechatronischer Systeme aus Bild 4-8 aufgegriffen; jede der verschiedenen Klassen an Visualisierungsaufgaben ist mit einem Kreis umrandet und mit einer Primär-Visualisierungstechnik versehen. Die Primär-Visualisierungstechniken sind Lösungen für die Klassen der Visualisierungsaufgaben. Die Visualisierungstechnik für *3D-Modelle* und ihre unterschiedlichen Ausprägungen werden in dieser Arbeit nicht näher erläutert, da hier konventionelle Techniken wie *Level-of-Detail* Techniken der Computergrafik verwendet werden können und die Visualisierung gestaltbehafteter Daten nicht Kern dieser Arbeit ist. 3D-Modelle werden generell zur Darstellung der Gestalt des mechatronischen Grundsystems verwendet. Alle anderen Primär-Visualisierungstechniken werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Die Primär-Visualisierungstechniken werden weitestgehend nach folgendem Schema vorgestellt:

- **Definition/Beschreibung der Technik:** Zunächst wird die Technik definiert, kurz beschrieben und ihre Herkunft aus der wissenschaftlichen Visualisierung erläutert.
- **Erfüllung der Visualisierungsaufgabe:** Es folgt eine Erläuterung, inwiefern die Visualisierungsaufgabe erfüllt wird und was mit Hilfe der Technik analysiert werden kann.
- **Prinzip der Technik:** Anschließend wird das Grundprinzip der Technik beschrieben, d.h. aus welchen visuellen Variablen und Elementen sie besteht. Dies kann z.B. die Form und Orientierung der Technik sein.
- **Abbildung der Daten auf visuelle Variable:** Darauf wird die Abbildung von Daten mechatronischer Systeme, die sich für die entsprechende Visualisierungsaufgabe ergibt, auf visuelle Variablen und visuelle Elemente der Technik skizziert.
- **Zuordnung zum VR-Kontinuum:** Es wird kurz erläutert, wie die Technik auf den Grenzen des VR-Kontinuums dargestellt wird.
- **Präsentation der Technik in VR:** Hierzu wird das dynamische Verhalten der Visualisierungstechnik, ihre Erscheinung, ihre Positionierung und Darstellung in der VR-Umgebung, sowie die Interaktion mit dieser beschrieben.
- **Designregeln:** Die Designregeln zur Technik werden referenziert oder erläutert.

4.6.1 Primär-Visualisierungstechnik: VR-Kontinuum

Das Basiskonzept dieser Arbeit, alle mechatronischen Ebenen in einer VR-Umgebung darzustellen wird durch die Primär-Visualisierungstechnik *VR-Kontinuum* bedient (siehe Kap. 4.1). Es deckt alle Visualisierungsaufgaben der Taxonomie ab, da es als Basiskonzept fungiert. Es wird im Folgenden näher erläutert.

Definition: Das *VR-Kontinuum* präsentiert mechatronische Strukturierungsebenen in unterschiedlichen Detaillierungsstufen in einer VR-Umgebung. Zur Darstellung des mechatronischen Grundsystems erfolgt ein möglichst kontinuierlicher Übergang von der Ansicht eines VMS zur Ansicht eines MFM. Aus Darstellungssicht gibt es keine scharfe Trennung zwischen den mechatronischen Ebenen, sondern einen kontinuierlichen Übergang.

Erfüllung der Visualisierungsaufgabe: Das VR-Kontinuum ist ein Ordnungsschema zur stufenlosen Abbildung der Strukturierungsebenen MFM, AMS und VMS innerhalb der virtuellen Umgebung. Entlang des Kontinuums werden Visualisierungen bereitgestellt, wobei die Ordnungsgröße der Abstand zwischen Anwender und dem Gegenstand der Analyse ist. Es unterstützt die ganzheitliche Analyse aller ebenen-übergreifenden Aspekte eines mechatronischen Systems.

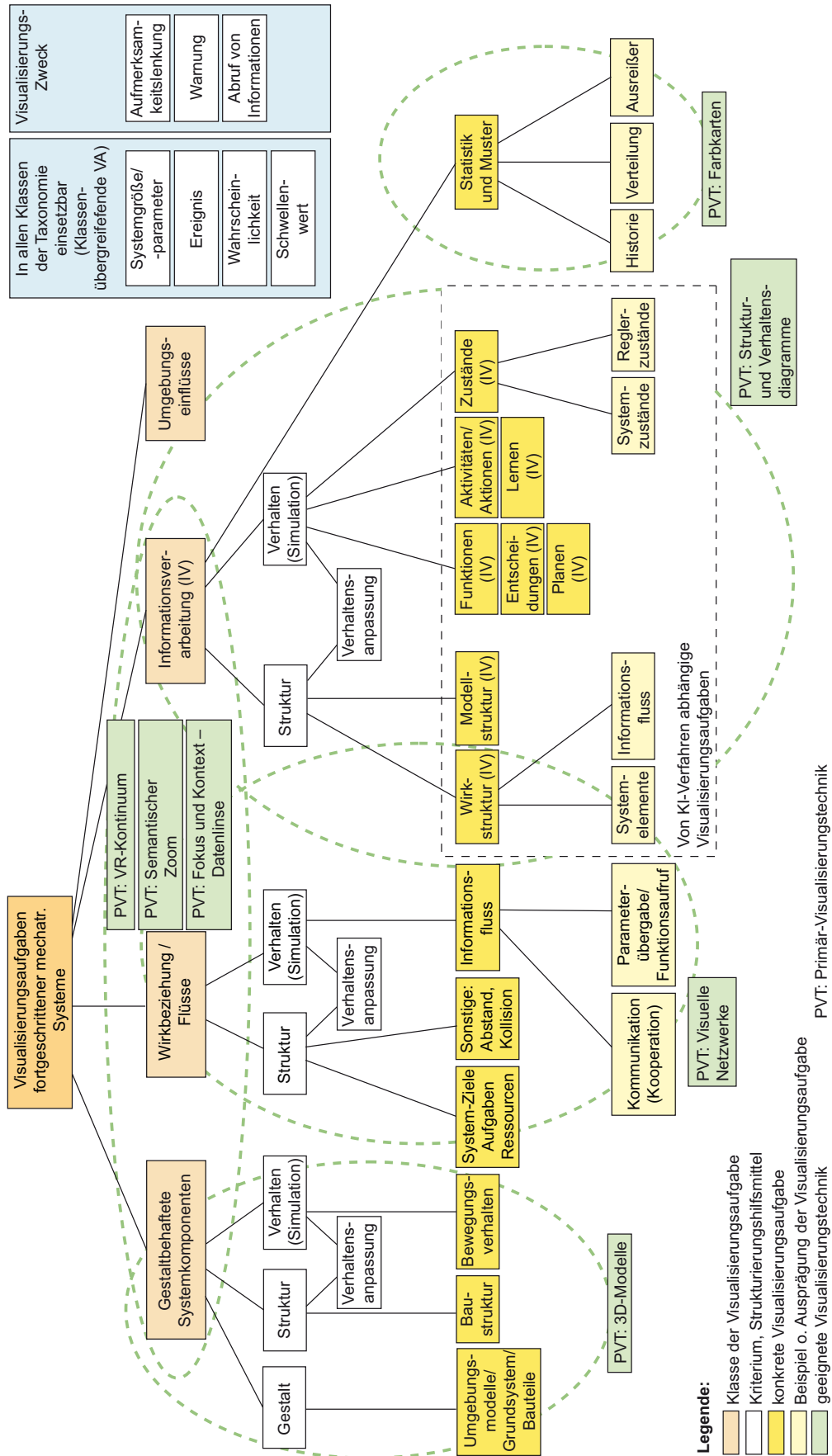


Bild 4-9: Visualisierungstechniken für Visualisierungsaufgaben

Prinzip der Technik: Das Kontinuum ist durch den Abstand zwischen Anwender und Gegenstand der Analyse definiert. Jeder Punkt entlang des Kontinuums bietet eine andere Sicht auf die virtuelle Umgebung. Das Prinzip ist, Visualisierungstechniken entlang des Kontinuums anzuordnen, und zwar auf eine Art und Weise, dass sie Nutzen stiften. Die Technik, bzw. deren Umsetzung in der virtuellen Umgebung ermöglicht es dem Anwender nur Techniken anzuzeigen, die vom aktuellen Beobachtungspunkt in der virtuellen Umgebung sinnvoll zu nutzen sind.

Die **Überblicks-Darstellung** gibt einen Überblick über das Vernetzte Mechatronische System (VMS), also alle autonomen Systeme (AMS). Sie repräsentiert das Bewegungsverhalten der autonomen Systeme während der Simulation und Daten der Informationsverarbeitung auf der VMS-Ebene. Hier wird ersichtlich, welche Elemente am Gesamtsystem beteiligt sind, welche Vernetzungen zwischen den Systemen vorhanden sind sowie wann und welche Vorgaben an untere Ebenen erfolgen. Werden statistische Auswertungen des Systems vorgenommen, werden auch diese hier veranschaulicht. Dies kann eine Auswertung oder Zusammenfassung von Messgrößen oder Kennzahlen von unteren Ebenen sein. Solche Kennzahlen sind auf der Überblicksebene aggregiert/zusammengefasst zu betrachten, da Kennzahlen einzelner AMS oder MFM unübersichtlich werden. Die Präsentation des Systemverhaltens und den abstrakten Daten der Informationsverarbeitung (Ebenen des OCM) erfolgt auf dieser Ebene auf abstrakte Weise. Konkrete Kennzahlen und Größen bleiben unberücksichtigt.

Die **Detail-Darstellung** stellt das Verhalten des Systems detailliert dar. Zum einen wird das Bewegungsverhalten von AMS sowie der MFM möglichst realitätsnah und physikalisch korrekt abgebildet. Zum anderen werden abstrakte Daten aus der Informationsverarbeitung der AMS- und MFM-Ebene dargestellt, die eine unmittelbare oder wenig verzögerte Auswirkung auf das Bewegungsverhalten haben. Da solche Daten in der Regel keinen intrinsischen physikalischen Bezug besitzen, sind sie möglichst kontextsensitiv an der Gestalt des Systems anzuzeigen. Des Weiteren werden Informationsflüsse dargestellt. Zum Beispiel werden die Vorgaben der oberen an die unteren Ebenen verdeutlicht (z.B. von VMS an AMS). Im Gegensatz zur Überblicks-Darstellung sind hier konkrete Kennzahlen und Größen relevant.

Funktionalitäten zur Navigation und Selektion entlang des VR-Kontinuums ermöglichen eine interaktive Bewegung zwischen den Grenzen des Kontinuums und die Auswahl und Darstellung von zusätzlichen Visualisierungstechniken. Um einen stufenlosen Wechseln zwischen den Darstellungen und eine durchgängige Navigation entlang des Kontinuums zu ermöglichen, werden das sogenannte stufenlose semantische Zoomen (Kap. 4.6.4) und Fokus und Kontexttechnik – Datenlinse (Kap. 4.6.5) vorgeschlagen.

Die entlang des Kontinuums eingeblendeten Visualisierungstechniken selbst werden in den folgenden Abschnitten und in Steckbriefen im Anhang beschrieben.

4.6.2 Primär-Visualisierungstechnik: Visuelles Netzwerk

Definition und Erfüllung der VA: Für die Klasse der Visualisierungsaufgabe Wirkbeziehungen/Flüsse wird die Visualisierungstechnik visuelles Netzwerk vorgeschlagen. Visuelle Netzwerke ermöglichen die Darstellung von Wirkbeziehungen zwischen Modulen oder Systemkomponenten auf MFM- und AMS-Ebene sowie zwischen den Systemen auf VMS-Ebene. Ziel ist es, die Wirkbeziehungen/Wirkweisen so zu visualisieren, dass die Auswirkungen der Informationstechnik auf die einzelnen AMS deutlich werden, die Struktur aller Beziehungen erkennbar wird, so das z.B. Muster im Verhalten erkannt werden. Zudem sind weitere Aussagen über das Verhalten einzelner dargestellter Systemkomponenten (Knoten) und ihre Wirkbeziehung (Relationen) möglich⁴⁵.

Prinzip der Technik: Das Grundprinzip der Visualisierungstechnik ist in Bild 4-10 dargestellt. Visuelle Netzwerke bestehen aus Knoten und Kanten. Knoten repräsentieren Systemkomponenten, Kanten die Wirkbeziehung zwischen diesen Komponenten. Auch ist es möglich mehrere Knoten zu einer Gruppe zusammenzufügen, um z.B. die Interaktion zwischen verschiedenen Gruppen zu beobachten. Kanten werden durch Linien zwischen den Knoten präsentiert, die über der Gestalt der einzelnen Systeme angeordnet sind.

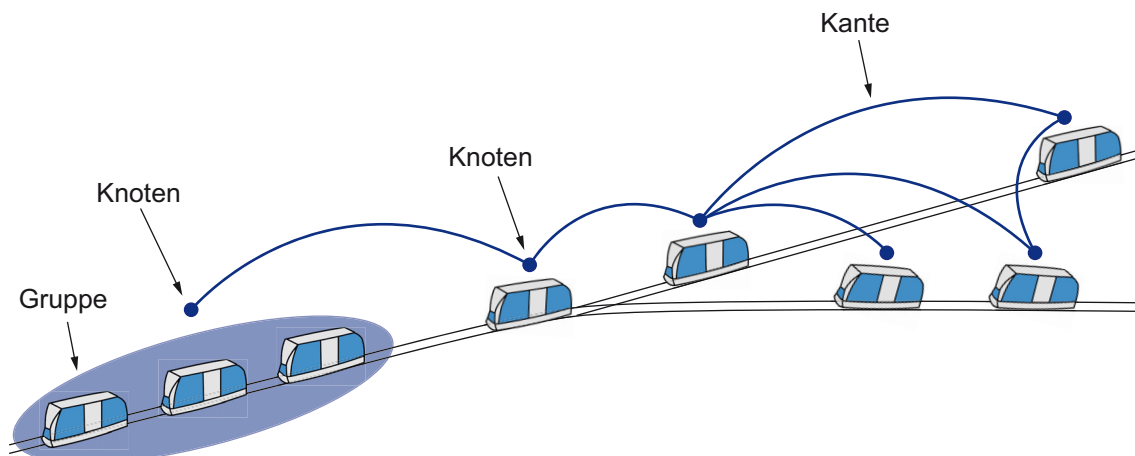


Bild 4-10: Grundprinzip des Visuelle Netzwerkes im 3-dimensionalem Raum

Durch unterschiedliche grafische Attribute der Knoten und Kanten können visuelle Netzwerke für unterschiedlichste Aufgaben eingesetzt werden. So kann z.B. die Farbe einer Linie auf einen Informationsaustausch hindeuten. Im RailCab Konvoi werden diese z.B. eingesetzt, um die Kommunikation darzustellen oder deutlich zu machen, wenn

⁴⁵ In der Informationsvisualisierung werden Netzwerke mit Hilfe von Graphen repräsentiert, die den allgemeinsten Typ relationaler Daten darstellen. Sie werden als Node-Link-Diagramme bzw. -Techniken bezeichnet und werden hauptsächlich zur Darstellung von Relationen zwischen Informations-Objekten eingesetzt. Häufige Anwendungen sind soziale Netzwerke oder semantische Netzwerke, bei denen Benutzer und deren mögliche Beziehungen mit Hilfe von visuellen Netzwerken dargestellt werden.

ein RailCab aufgrund eines anderen RailCabs bremsen muss (Sensorkontakt). Im Bild A-8 befindet sich eine visuelle Grammatik für visuelle Netzwerke. Sie beschreibt auf einer eher abstrakten Ebene, wie grafische Merkmale für mechatronische Systeme verwendet werden können.

Abbildung der Daten auf visuelle Variable: Die Abbildung der Daten eines mechatronischen Systems auf die visuellen Variablen eines visuellen Netzwerks ist in Tabelle 4-5 zusammengefasst.

Tabelle 4-5: Abbildung der Daten auf Visuelle Variablen und Elemente von Visuellen Netzwerken

Daten	Visuelle Variable
Position der Systemkomponente	Position des Knotens (2D o. 3D-Form)
Systemkomponente (Art/Typ)	(geometrische) Form des Knotens, geschlossene Kontur
Attribute der Systemkomponente	Form, Farbe, Annotation des Knotens
Ausprägung der Attribute	Größe des Knotens
Gruppen / eingeschlossene Systemkomponenten	Knoten umschlossen von Form (z.B. Kreis), Farbe pro Gruppe
Wirkbeziehung/Flüsse	Verbindende Kanten zwischen Systemkomponenten (Knoten)
Art/Typ der Wirkbeziehung	Beschaffenheit (Form) der Linie/Kante (gestrichelt)
Stärke der Wirkbeziehung (hoch, niedrig)	Dicke der Linie/Kante (dünn, dick)
Verhalten des Systems	Verhalten des Netzwerks
Kontaktaufnahme (Kommunikationsstart), Flussgeschwindigkeit	Blinken bei Kontaktaufnahme (Kommunikationsstart), Veränderung der Farben bei Fluss und bewegende Linien

Zuordnung zum VR-Kontinuum: Für die Grenzen des VR-Kontinuums ergibt sich jeweils eine unterschiedliche Ausprägung eines visuellen Netzwerks. Bild 4-10 zeigt mögliche Ausprägungen für die Überblicks-Darstellung. Hier werden z.B. Gruppen von Systemkomponenten (links) oder einzelne Systeme als Knoten repräsentiert. Die Verbindungen dazwischen zeigen die Wirkbeziehung abstrakt. Sie zeigen die Information, dass eine Wirkbeziehung vorhanden ist, geben aber keine Details zu dieser.

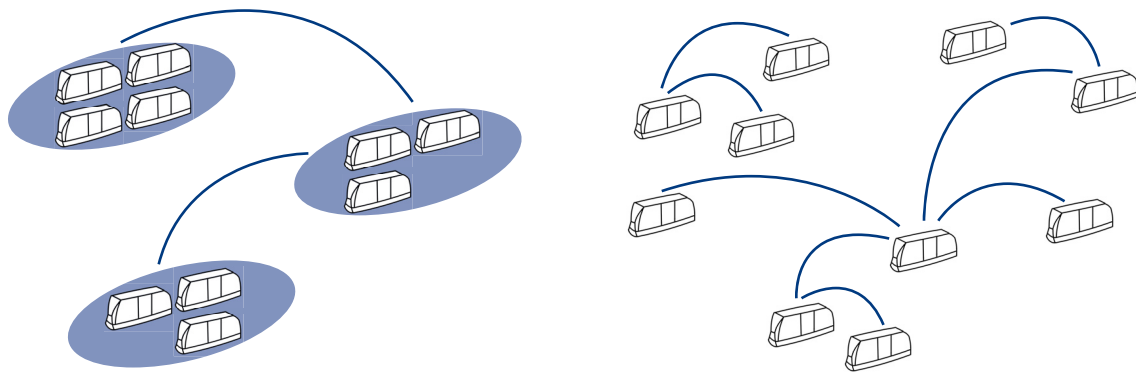


Bild 4-11: Visuelles Netzwerk in der Überblicks-Darstellung – links: Gruppen von Systemen, rechts: einzelne System-Komponenten

Bild 4-12 stellt visuelle Netzwerke in der Detaildarstellung dar. Die zentrale Systemkomponente ist Gegenstand der Analyse. Von dieser Komponente aus verlaufen Kanten zu denjenigen Komponenten, die eine Wirkbeziehung mit dem zu untersuchenden Objekt aufweisen. Sind diese zu weit entfernt und dadurch in VR nicht sichtbar, dann steht der Name der entsprechenden Komponenten als Annotation auf der Kante. Ein Pfeil in Richtung der Komponenten deutet zudem die Position der Komponenten an. Auch hier sind visuelle Gruppierungen möglich, indem z.B. umschließende Bereiche farblich kodiert werden [PD10, S. 488]. Insbesondere bei der Detaildarstellung ist die Beschaffenheit der Kanten relevant, weil sie unterschiedliche Arten von Wirkbeziehungen darstellen. In Bild 4-9 befindet sich eine Auflistung von Kanten zur Darstellung unterschiedlicher Wirkbeziehungen.

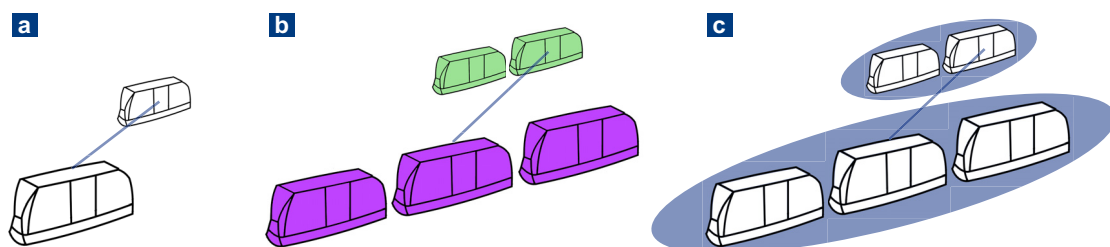


Bild 4-12: Visuelles Netzwerk in der Detaildarstellung – links: ausgehende Kanten einzelner RailCabs, rechts: ausgehende Kanten von Gruppen von RailCabs

Präsentation in VR: Ein visuelles Netzwerk wird räumlich getrennt von der Darstellung der Gestalt präsentiert, um die Informationen möglichst unabhängig von der Kameraposition und der Navigation des Anwenders bereitzustellen. In einer VR-Anwendung zur Analyse von RailCab-Konvois und der Logistik werden die Netzwerke in einer Ebene über der simulierten Verkehrsinfrastruktur präsentiert.

Designregeln: Bei der Anwendung der visuellen Netzwerke sind folgende Regeln zu beachten (angelehnt an [PD10, S. 488]):

- **Layout und Skalierbarkeit:** Die Netzwerkverbindungen müssen klar erkennbar sein. Werden zu viele Linien zwischen den einzelnen Komponenten dargestellt,

so sind diese zu Bündeln zusammenzufassen. Ggf. lassen sich Teile des Netzwerkers automatisch verbergen.

- Performance: Für die Interaktion ist eine Verarbeitung in Echtzeit zu gewährleisten. Bei zu vielen Verknüpfungen ist ein Mitteilungssystem einzusetzen, das dem Anwender auf relevante Ereignisse aufmerksam macht.

Weitere ästhetische Prinzipien für visuelle Netzwerke und Heuristiken zeigen [BRS07], [Sug02] und [HMM00].

4.6.3 Primär-Visualisierungstechnik: Farbkarte

Definition u. Beschreibung: Eine Farbkarte stellt statistische Werte mit einer Farbkodierung dar und verknüpft diese Information gleichzeitig mit einem Ort. Die Primär-Visualisierungstechnik Farbkarte wird für die Aufgaben-Klasse *Statistik und Muster* eingesetzt. Ziel der Technik ist, die Aufmerksamkeit eines Anwenders auf relevante Daten zu lenken und die visuelle Analyse von Mustern in Daten zu vereinfachen.

Erfüllung der Visualisierungsaufgabe: Statistische Daten sind dadurch gekennzeichnet, dass eine Sammlung vieler Daten erfolgt und Muster in den Daten erkannt werden sollen. In der virtuellen Umgebung soll der Anwender einen Überblick über statistische Daten erhalten, die im VMS entstanden sind. Dies erlaubt es, das Verhalten aller am VMS beteiligten AMS zu untersuchen. Durch den Einsatz der Farbe zur Repräsentation von Daten in Bezug zu einem Ort, können Verhaltensmuster schnell erfasst werden.

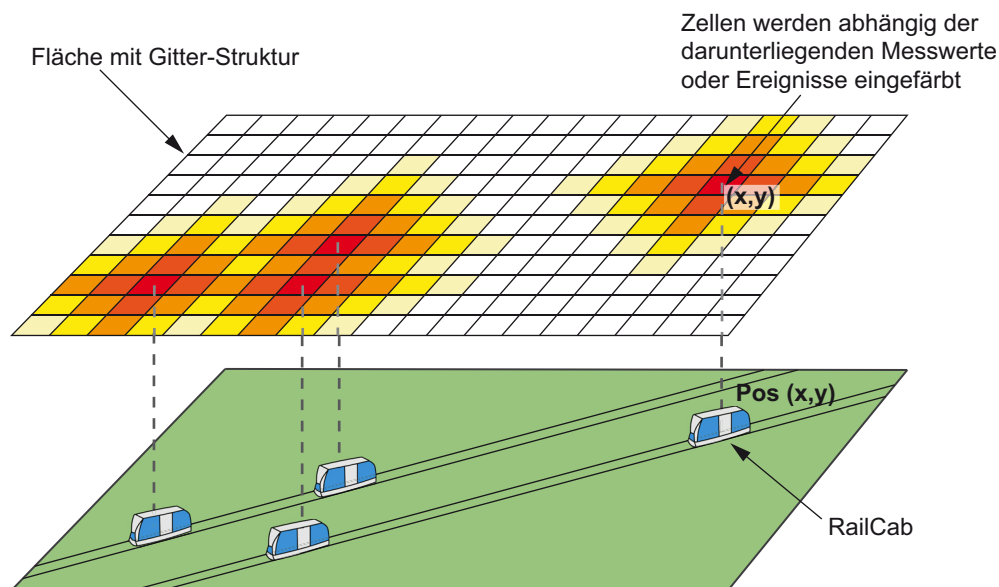


Bild 4-13: Grundprinzip der Visualisierungstechnik Farbkarte

Prinzip der Technik: Das Grundprinzip einer Farbkarte ist in Bild 4-13 dargestellt. Eine Farbkarte ist eine Visualisierung, die als 2-dimensionale Ebene oder 3-dimensionales Volumen der Gestalt des mechatronischen Systems oder der Landschaftstopologie über-

lagert wird. Beispiele befinden sich in [SM07, S. 136], [WR12]. Sie besteht aus gleichmäßig eingeteilten Gitter-Zellen, die abhängig eines bestimmten Ereignisses oder Schwellenwerts eines mechatronischen Systems eingefärbt werden.

Die Farbkarte wird – ähnlich dem visuellen Netzwerk – als Overlay über die mechatronischen Systeme gelegt. In diesem Fall repräsentieren die Farbwerte Systemgrößen, Ereignisse oder Entscheidungen der darunterliegenden Fahrzeuge. Im Anwendungsbeispiel RailCab kann die Farbkarte auch explizit auf die befahrene Strecke gelegt werden. Dann zeigt sie die Bereiche an, die von den Systemen stark befahren werden (z.B. Auslastungen einer Strecke). Zur Färbung der entsprechend richtigen Gitter-Zellen ist eine Zuordnung von der Position eines mechatronischen Systems zur Position der Gitter-Zellen notwendig. Dies erfolgt in Abhängigkeit von dem untersuchten System und der Umgebung, in der das System agiert.

Je nach Analyseaufgabe, kann die Farbkarte unterschiedliche statistische Daten repräsentieren. Ein Farbwert kann zum Beispiel einen aktuellen Zustand, Systemgrößen oder bestimmte Ereignisse des Systems zeigen. Hierzu sind zum einen geeignete Farben zur Repräsentation der Datenwerte sowie Transferfunktionen zur Abbildung vom Datenwert auf eine Farbe festzulegen (vgl. [AMS+11], [Tel08]).

Abbildung der Daten auf visuelle Variable: Die Attribute des mechatronischen Systems werden anwendungsabhängig durch die visuelle Variable *Farbe* präsentiert. Die visuelle Variable *Position* repräsentiert grundsätzlich die Position des mechatronischen Systems, dessen statistische Daten untersucht werden sollen. Zusammengenommen verknüpft die Farbkarte diese Variablen mit der Topologie der Umgebung. Die Abbildung von Daten eines mechatronischen Systems auf Daten einer Farbkarte ist in Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Tabelle 4-6: Abbildung von Daten auf Visuelle Variablen und Elemente von Farbkarten

Daten	Visuelle Variable	Bemerkung
Position einer Systemkomponente	Position der eingefärbten Gitter-Zelle	Gitter-Zelle repräsentiert Position der Systemkomponente
Art der Berechnung/ Entscheidung/ Ereignis	Farbton der Zelle	Farbe repräsentiert bestimmtes Verhalten (abstrakte Daten) der IV
Stärke der Berechnung/ Entscheidung/ Ereignis (Gewichtung)	Sättigung der Farbe	Optional kann durch die Sättigung der Farbe eine Gewichtung der Daten repräsentiert werden
Verhalten des Systems	Verhalten der Farbkarte	
Bewegung der autonomen Systeme	Zellen der Farbkarte werden abhängig der Position permanent umgefärbt	

Zuordnung zum VR-Kontinuum: Farbkarten sind für die VMS-Ebene bzw. in der Überblicks-Darstellung geeignet, da sie Hinweise über eine Reihe von Daten geben, die mit fortschreitender Zeit entstehen. Durch Heranzoomen an eine bestimmte Systemkomponente wird die Farbkarte ausgeblendet.

Designregeln: Folgende Designregeln sind bei der Erstellung einer Farbkarte zu beachten:

- Die Farbkarte sollte als Ebene über den Systemen dargestellt werden, wenn die Daten im Kontext der gesamten virtuellen Umgebung zu betrachten sind. Dies gilt z.B. für autonome Roboter, die auf einem Spielfeld fahren. Sie können grundsätzlich das gesamte Spielfeld nutzen. Die Relation zwischen Farbkarte und Spielfeld ist eindeutig (siehe [WR12]).
- Die Farbkarte ist auf die Gestalt eines Untersuchungsgegenstandes zu übertragen, wenn nur dedizierte Bereiche für die Analyse relevant sind. Im Anwendungsbeispiel RailCab ist die Farbkarte auf den Verlauf der Schienenstrecke anzupassen, weil sich die Fahrzeuge auf Schienen bewegen (siehe z.B. Bild 6-2).

4.6.4 Primär-Visualisierungstechnik: Semantisches Zoomen

Definition u. Beschreibung: Das stufenlose semantische Zoomen ist eine Zoomtechnik, die eine kontinuierliche Navigation zwischen verschiedenen Ebenen eines mechatronischen Systems in der VR-Anwendung ermöglicht. Denn mechatronische Systeme müssen in VR ganzheitlich betrachtet werden, was den Wechsel zwischen den Strukturierungsebenen, erfordert. Der Zoom ermöglicht diese Navigation, wobei der klassische Zoom als geometrischer Zoom bezeichnet wird. Allerdings können auf allen Ebenen vielzählige Visualisierungstechniken zum Einsatz kommen, wodurch die Präsentation überladen wird. Das Attribut „semantisch“ verleiht dem Zoom die Eigenschaft, dem Anwender nur die Visualisierungen präsentieren zu können, die in den Kontext der aktuellen Aufgabenstellung gehören. Ein zugrundeliegendes Regelsystem ermöglicht die wissensbasierte Auswahl von Visualisierungen (siehe [WR12]). Dies ermöglicht, abstrakte Daten mechatronischer Systeme auf allen Strukturierungsebenen automatisch anzeigen zu lassen.

Prinzip der Technik: Bild 4-14 zeigt das Prinzip und die Zoomstufen des semantischen Zooms für mechatronische Systeme. Auf der linken Seite des Bildes ist eine Sicht auf ein mechatronisches System in einer VR-Umgebung dargestellt; dies ist eine Draufsicht auf ein Anwendungsszenario mit einer Fläche von etwa 16 km². In dieses Szenario soll in der VR-Anwendung herein- oder herausgezoomt werden.

Zuordnung zum VR-Kontinuum: Die Funktion Zoom ist generell stufenlos. Für die einzelnen Visualisierungstechniken haben sich *Zoomstufen* als Ordnungselement etabliert: Eine Zoomstufe ist ein festgelegter Abstand zwischen Umgebung und Anwender. Jeder Zoomstufe ist mit einem Set aus Visualisierungen assoziiert, die auf der zugeordneten Zoomstufe effektiv eingesetzt werden können. Dies hat praktische Zwecke, denn es macht z.B. keinen Sinn einen Kraftpfeil an einem Rad darzustellen, wenn ein Anwender im Moment die Streckenauslastung auf der obersten Ebene (Stufe 1) analysiert. Alle Visualisierungen stets darzustellen ist ebenfalls hinderlich, da die VR-Anwendung dann zu viele Darstellungen gleichzeitig präsentiert.

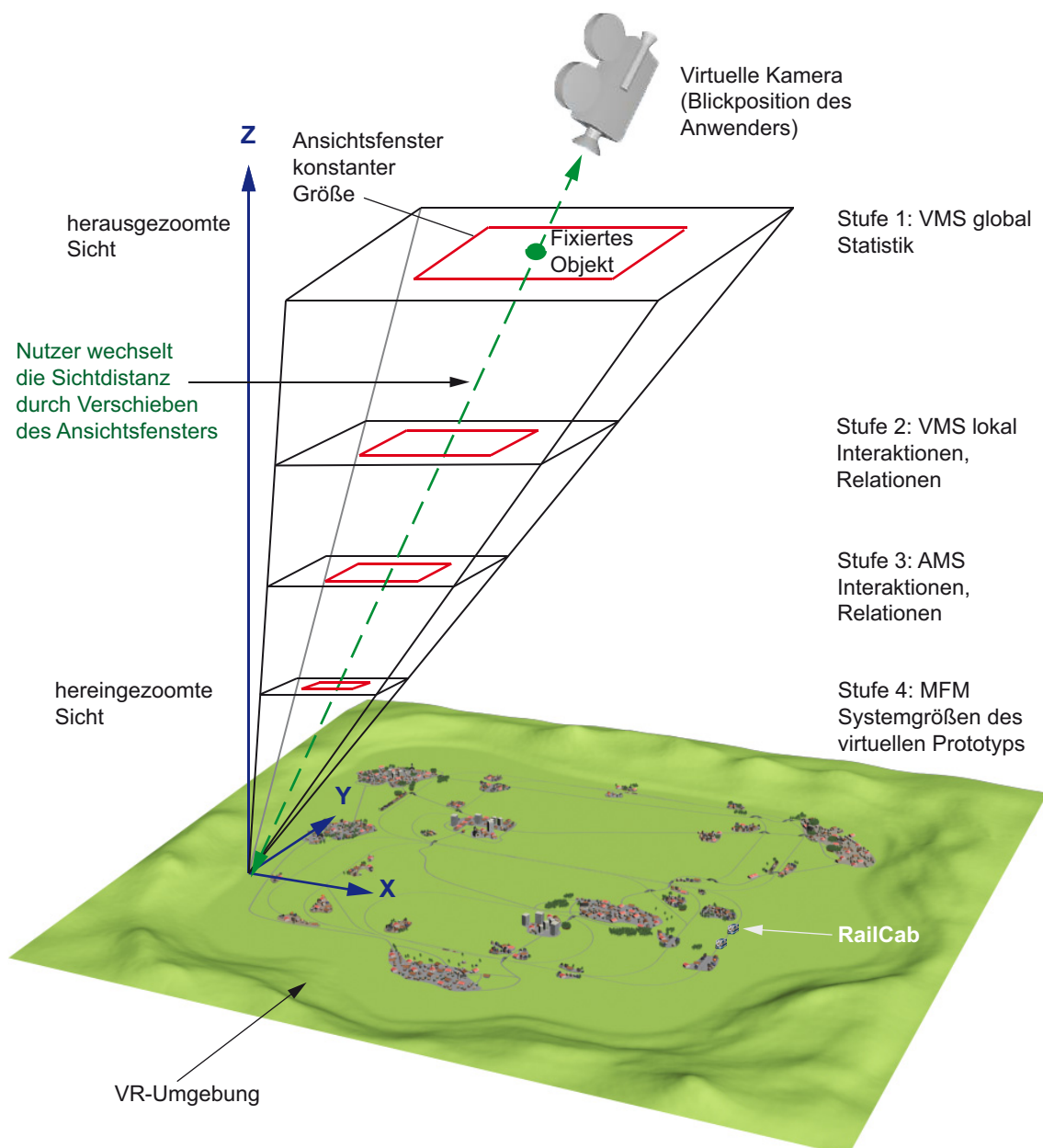


Bild 4-14: Grundprinzip des semantischen Zoomens und möglichen Zoomstufen für fortgeschrittene mechatronische Systeme (in Anlehnung an [FZ98]).

Für mechatronische Systeme muss es mindestens für jede Makroebene des Systems eine Zoomstufe geben:

- Stufe 1, VMS global: Auf dieser Stufe hat der Anwender den größten Abstand zur Umgebung. Dieser Stufe sind Visualisierungen statistischer Daten, wie z.B. die Streckenauslastung per Farbkarte zugeordnet.
- Stufe 2, VMS lokal: Dieser Stufe sind Wechselwirkungen zwischen einzelnen Systemkomponenten zugeordnet, die Gegenstand der visuellen Analyse sind. Im Fall des Anwendungsbeispiels sind dies die RailCabs und deren Interaktion.
- Stufe 3, AMS: Auf dieser Zoomstufe steht ein einzelnes AMS im Fokus sowie dessen Verhalten und Informationsverarbeitung. Kern sind die Relationen zwischen dem AMS und der Umgebung sowie das Verhalten des AMS. Zudem werden Relationen zu weiteren AMS präsentiert werden; d.h. ein einzelnes AMS wird im Kontext der Umgebung analysiert. Ein Beispiel ist ein RailCab, das eine passive Weiche überquert.
- Stufe 4, MFM: Auf dieser Zoomstufe werden MFM analysiert. Untersuchungsgegenstand sind die Relationen zwischen mehreren MFM sowie das Verhalten der MFM selbst.

Das Zoomen erfolgt entlang einer Achse des Koordinatensystems: In einem kartesischen Koordinatensystem spannen die Achsen X und Y die Ebene XY auf, die die dargestellte VR-Umgebung des Szenarios repräsentiert. Die Achse Z repräsentiert die Entfernung zur Ebene. Der Zoom wird über den Parameter Distanz definiert: Je kleiner Z wird, desto näher wird an das mechatronische System herangezoomt. Der rote Rahmen ist der aktuell sichtbare Ausschnitt der VR-Umgebung (Ansichtsfenster). Der Rahmen hat bei jeder Zoomstufe die gleiche Größe, weil dieser das Ausgabegerät (z.B. Monitor) repräsentiert. Ist ein Objekt fixiert worden, so wird entlang des entsprechenden Zoomstrahls aus dem Ursprung des Koordinatensystems (der im entsprechenden Winkel zu Z verläuft) gezoomt. Da mechatronische Systeme sich bewegen muss dem selektierten Objekt automatisch gefolgt werden, da es ansonsten aus dem Ansichtsfenster hinaus gelangt.

Beim Wechsel zwischen den Zoomstufen wird rechnerintern überprüft, welche Informationen auf der Stufe visualisiert werden sollen. Diese Informationen werden durch geeignete Visualisierungstechniken präsentiert; die restlichen vorhandenen Informationen werden ausgeblendet. Die für eine Zoomstufe interessanten und zu analysierenden Daten hängen von der Entwicklungs- bzw. Visualisierungsaufgabe ab. Die Visualisierungstechniken auf den einzelnen Zoomstufen werden am Beispiel der Konvoifahrt und Kommunikation in Kapitel 6.1.3 erläutert; sie wurden im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt.

4.6.5 Primär-Visualisierungstechnik: Fokus und Kontext – Datenlinse

Definition und Beschreibung: Die Datenlinse⁴⁶ gehört zur Klasse der sogenannten Fokus- und Kontexttechniken [PD10, S. 542]. Sie ermöglicht eine detaillierte Ansicht (der Fokus) eines Untersuchungsgegenstandes und des restlichen Informationsraums (der Kontext) simultan im selben Ansichtsbereich. Der Übergang zwischen den beiden Ansichten ist nahtlos. Klassischerweise wird eine Linse zur Vergrößerung eingesetzt. Werden Detailinformationen dargestellt, die sonst nicht sichtbar sind, wird sie als Datenlinse bezeichnet. In der medizinischen Visualisierung bspw. dient sie zur Darstellung verdeckter Informationen, wie verschiedene Schichten des menschlichen Körpers. Im Maschinenbau werden nicht sichtbare Produkteigenschaften (z.B. Simulationsdaten von Struktur- und Strömungsmechanik) dargestellt [PD10, S. 554ff.], [LBB+11, S. 162f.].

Prinzip der Technik: Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Konzept für die Mechatronik erweitert und zur Darstellung abstrakter Daten über die Strukturierungsebenen hinweg eingesetzt. Die Technik dient daher zur Auflösung des Ebenen-Konzepts und zur Visualisierung abstrakter Daten im Kontext ihres Untersuchungsgegenstandes. Ziel dabei ist, die ganzheitliche Exploration mechatronischer Systeme in einer VR-Umgebung zu gewährleisten. Die Datenlinse erfüllt dabei zwei Funktionen:

- Vergrößerung von Details über die Strukturierungsebenen hinweg und
- Visualisierung abstrakter Daten

In Bild 4-15 wird die Funktion *Vergrößerung* am mechatronischen System in VR erläutert. Links im Bild ist eine virtuelle Umgebung dargestellt, die den Kontext der visuellen Analyse des RailCabs präsentiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Anwender sich z.B. auf Stufe 1 im vorgestellten Stufenmodell des semantischen Zooms befindet. Die Linse kann zur Vergrößerung eingesetzt werden, um über die Strukturierungsebenen hinweg ein RailCab zu beobachten. Gleichzeitig kann der Anwender weitere Konvois beobachten.

Im Bild rechts ist zudem die Darstellung von Details skizziert. Die Linse wird eingesetzt, um z.B. bei Betrachtung eines RailCabs gleichzeitig ein im RailCab enthaltenes Modul zu beobachten. Ein Heranzoomen und anschließendes Herauszoomen wird dem Anwender erspart, weil das MFM in der Linse bereits vergrößert dargestellt wird.

⁴⁶ Datenlinse: in der Informationsvisualisierung wird diese häufig als *magische Linse* bezeichnet [PD10, S. 541]. In dieser Arbeit erfolgt ausschließlich die Bezeichnung Datenlinse.

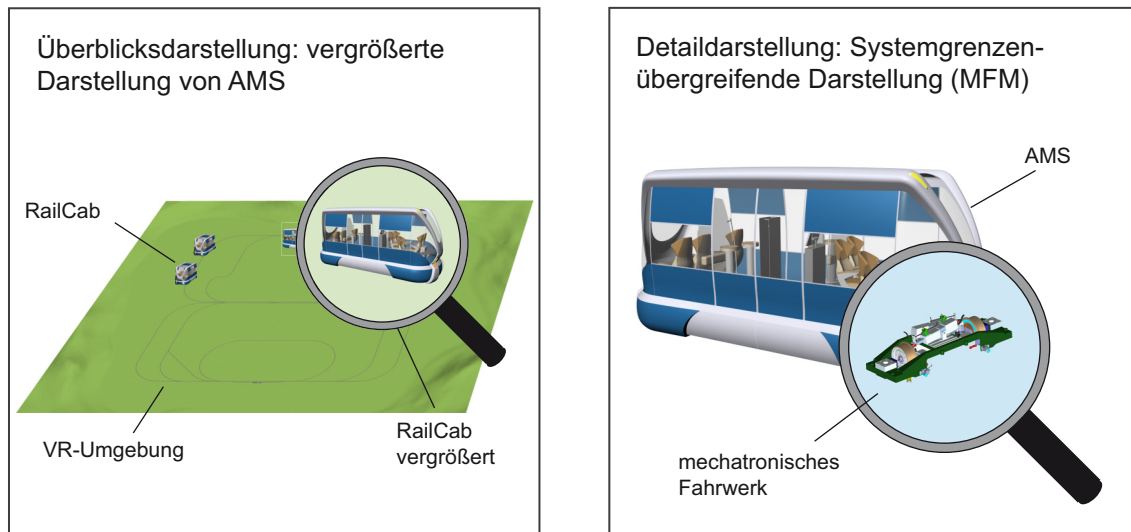


Bild 4-15: Einsatz der Datenlinse zur Vergrößerung gestaltbehaltener Systemkomponenten fortgeschrittener mechatronischer Systeme

In Bild 4-16 wird die Funktion Visualisierung abstrakter Daten verdeutlicht. Abstrakte Daten werden i.d.R. mit imaginativen Visualisierungstechniken präsentiert, die dem Anwender die Zuordnung zwischen Visualisierung und deren Information erleichtern. Im linken Bild ist die Darstellung abstrakter Daten dargestellt. Hier ist die virtuelle Umgebung mit RailCabs als Untersuchungsgegenstand zu sehen. Richtet der Anwender die Linse interaktiv auf ein RailCab, so werden zusätzliche Informationen zum RailCab angezeigt. Die Linse dient dabei als Instrument zur Selektion: Dem Anwender werden nur die Daten gezeigt, die er begutachten möchte.

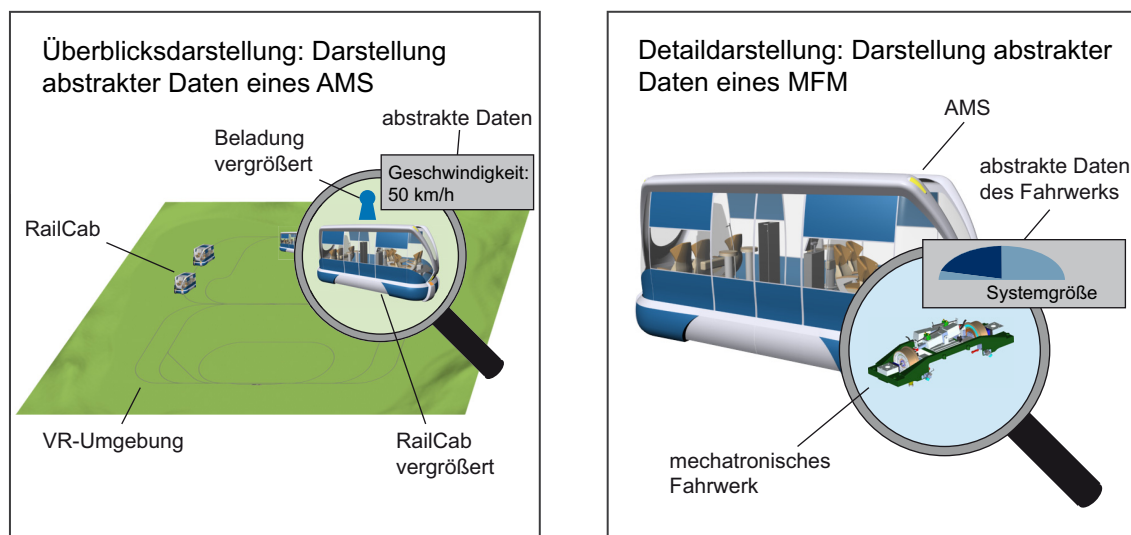


Bild 4-16: Einsatz der Datenlinse zur Visualisierung abstrakter Daten fortgeschrittener mechatronischer Systeme

Im Bild rechts ist eine weitere Funktion veranschaulicht. Mit der Linse lassen sich zusätzliche Daten der Informationsverarbeitung von verdeckten Bauteilen aufrufen. Hier

erhält der Anwender bspw. Sicht auf ein sonst verdecktes Fahrwerk eines RailCabs und kann zusätzlich Informationen der Informationsverarbeitung abrufen, wie z.B. die Geschwindigkeit, den Energieverbrauch, oder den Neigewinkel eines Rads.

Funktionsweise/Verhalten der Linse: Die Linse kann interaktiv aktiviert und deaktiviert werden. Die Technik wird in Kombination mit dem semantischen Zoom verwendet, so dass dieser die semantischen Stufen des Systems bekannt sind. Dadurch können in der Linse, je nach Konfiguration, Daten der nächsten semantischen Stufe oder aber direkt Daten der untersten Stufe eingeblendet werden.

Präsentation in VR: Zusätzliche Informationen sollen möglichst wenig von der virtuellen Umgebung verdecken. Daher werden nur die aktuell zu analysierenden Daten dargestellt. Da die mechatronischen Systeme sich bewegen, muss auch die Ansicht in der Linse der Bewegung folgen. Dazu sind Funktionen notwendig, die die Komponente fixieren und deren Position „verfolgen“.

4.6.6 Primär-Visualisierungstechniken: Struktur- und Verhaltensdiagramme

Die Informationsverarbeitung (IV) arbeitet mit Daten und generiert Daten, die im Kontext der adressierten KI-Verfahren keinen direkten Bezug zur Gestalt eines Systems haben, deren Ausgangsgrößen jedoch das mechanische System direkt oder indirekt beeinflussen. Solche Aufgaben werden durch 2-dimensionale Struktur- und Verhaltensdiagramme dargestellt.

Die Analyse der Anwendungsbeispiele hat gezeigt, dass eine relevante Visualisierungsaufgabe die Darstellung der Informationsverarbeitung, bzw. deren Verhalten ist. Die entsprechenden KI-Verfahren in der Informationsverarbeitung erfüllen in der Regel Aufgaben, wie Lernen, Planen oder Entscheiden. Für die Entwickler ist hier entscheidend, dass durch die Analyse folgende Aspekte erkannt werden können:

- Die Informationsverarbeitung ist aktiv oder inaktiv und es erfolgt z.B. ein Zustandswechsel.
- Das Ergebnis einer Entscheidung.
- Auf Basis welcher Beobachtungen eine Entscheidung getroffen worden ist.

Diese Punkte werden bei der Visualisierung aufgegriffen.

Prinzip der Technik: Grundsätzlich werden Entscheidungen der Informationsverarbeitung durch *Komponentendiagramme*, *Zustandsdiagramme* und *Aktivitätsdiagramme* dargestellt. In Kombination mit visuellen Netzwerken machen sie eine Entscheidung deutlich, die visuellen Netzwerke verknüpfen die Entscheidung mit deren Ursache und deren Auswirkung in der virtuellen Umgebung. Damit wird auf eine bewehrte Technik zurückgegriffen. Dies hat folgenden Grund: Damit die virtuelle Umgebung nicht über-

laden wirkt und die Analyse erschwert, werden nur Daten mit einem Bezug zu gestaltbehafteten Daten/Objekten als 3D-Modelle visualisiert. Das Verhalten von KI-Verfahren wird durch **2D-Darstellungstechniken** erklärt. GAUSEMEIER et al. haben festgestellt, dass für die Visualisierung der Informationsverarbeitung neben der VR-Umgebung grundsätzlich eine zweite 2D-Darstellung notwendig ist, die auf einem weiteren Ausgabegerät angezeigt wird. Die Beziehung zwischen den Ansichten muss der Anwender interaktiv abfragen. Indem er ein Datum auf einem Ausgabegerät selektiert, wird ihm das dazugehörige Objekt / Datum im zweiten Ausgabegerät angezeigt [GBR+04b], [SGB+05]. Dieses Konzept wurde im Rahmen der Arbeit aufgegriffen und weiterentwickelt, so dass kein zweites Ausgabegerät mehr notwendig ist. Aufgrund moderner hochauflöser Display-Technologien können die zusätzlichen Visualisierungstechniken auf dem gleichen Ausgabegerät erfolgen, wie die 3D-Modelle der VR-Anwendung.

Zudem wurde durch die Analyse der Anwendungsbeispiele festgestellt, dass die Struktur eines KI-Verfahrens (ein Bayes Netzwerk entspricht einem Netzwerk, ein Planbaum einem Baum) während der Analyse und der Verifizierung der Funktionsfähigkeit, nur eine untergeordnete Rolle spielen. Bedeutender sind die Auswirkungen und die Gründe von Entscheidungen, um bewerten zu können, ob das beobachtete Verhalten den Erwartungen entspricht.

Zur Präsentation der Zustands- und Aktivitätsdiagramme wird auf zwei Computergrafik-Techniken zurückgegriffen:

- **Billboard-Technik:** Billboards sind virtuelle Wände, die immer auf den Anwender ausgerichtet sind. Sie können zusätzliche 2D-Darstellungen aufnehmen. Deren Einsatz erfordert hochauflösende Darstellungssysteme, da die Darstellung ansonsten unleserlich ist.
- **Head-Up-Display (HUD):** HUDs sind i.d.R. transparente 2-dimensionale Flächen, die auf dem Bildschirm platziert werden und Informationen in textueller Form darstellen. Meist enthalten sie Meta-Informationen über eine VR-Anwendung oder der darin befindlichen 3D-Modelle.

Beispielhafte Darstellungen und nähere Erläuterung der Techniken befinden sich in Kapitel A1.4.

Designregel: Der wesentliche Unterschied zwischen einem Billboard und einem HUD ist, dass das Billboard direkt an einer gestaltbehafteten mechatronischen Systemkomponente ausgerichtet ist und sich mit dieser mitbewegt. Ein HUD dagegen ist stets an der gleichen Stelle des Bildschirms platziert. Aus diesem Grund ist es zu vermeiden, diejenigen Daten auf einem Billboard darzustellen, die zur Laufzeit dynamisch aktualisiert werden. Durch die Bewegung der mechatronischen Systemkomponente und der zusätzlichen Bewegung der Daten auf dem Billboard kann ein Anwender die Übersicht verlieren. In diesem Fall wird die Verwendung eines HUDs empfohlen.

Zuordnung zum VR-Kontinuum: Die Darstellung der Struktur- und Verhaltensdiagramme ist lediglich für die Detaildarstellung eines MFM oder AMS geeignet.

Im Folgenden werden die Struktur- und Verhaltensdiagramme kurz erläutert.

VT Systemkomponenten-Diagramm: Zur Darstellung von abstrakten Systemkomponenten und ihren Wirkbeziehungen untereinander (Wirkstruktur) werden sog. Systemkomponenten-Diagramme vorgeschlagen. Sie lehnen sich an Komponentendiagramme der UML an, sind jedoch für die Darstellung in VR stark vereinfacht und werden zudem animiert um Verhalten zu repräsentieren. Bild 4-17 zeigt ein Systemkomponenten-Diagramm am Beispiel der probabilistischen Planung.

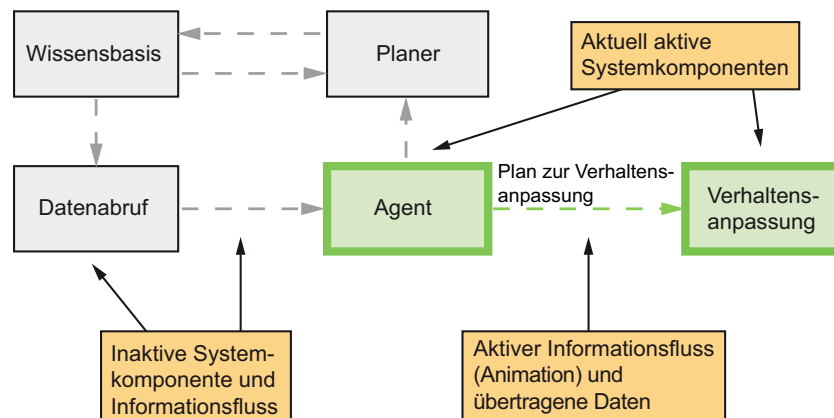


Bild 4-17: Prinzip der Visualisierungstechnik Systemkomponenten-Diagramm zur Darstellung einer Wirkbeziehung/Wirkstruktur der Informationsverarbeitung

Das Beispiel dieser Wirkstruktur ist der Arbeit [Dum11, S. 142] entnommen und wurde für den Zweck dieser Arbeit angepasst und stark vereinfacht. Für die Systemkomponenten werden einfache Rechtecke verwendet, für die Informationsflüsse gestrichelte Linien mit Pfeilen, die die Flussrichtung angeben. Zusätzlich wird eine Animation verwendet, die zur Laufzeit aktive Komponenten und aktuelle Informationsflüsse hervorhebt. Zur Hervorhebung wird eine markante Farbe empfohlen (hier: grün). Ausgefallene Komponenten können dann rot markiert werden.

VT Aktivitätsdiagramm: Ein Aktivitätsdiagramm zeigt eine Reihe von Aktivitäten, die über Entscheidungen und Objekten zu einem Programmablauf eines KI-Verfahrens zusammengeschlossen werden (siehe Bild 4-18). Es ist eine Standard-Technik aus der UML. Im Kontext eines mechatronischen Systems zeigen Aktivitäten die einzelnen Schritte, die ein KI-Verfahren durchläuft, um zu einer Entscheidung zu gelangen.

Die Darstellung wird durch Animationen und Fokustechniken ergänzt, die dem Betrachter den jeweils aktiven Schritt anzeigen. Das Beispiel im Bild ist der Arbeit [Dum11, S. 143] entnommen und wurde für den Zweck dieser Arbeit stark vereinfacht.

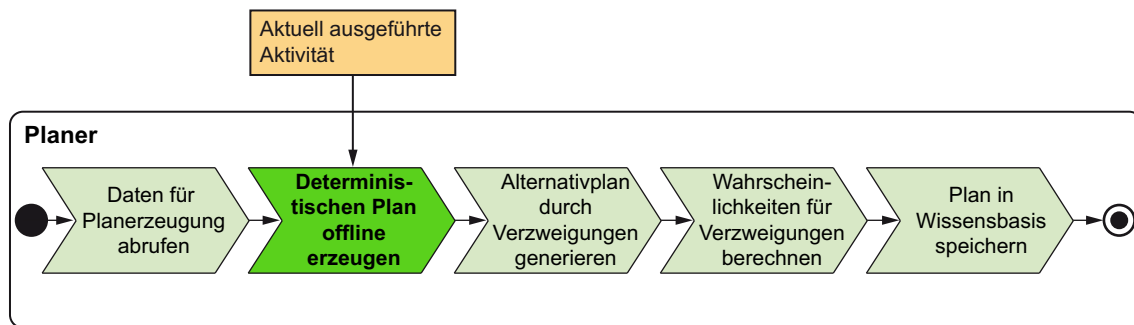


Bild 4-18: Prinzip der Visualisierungstechnik Aktivitätsdiagramm zur Darstellung von Aktivitäten der Informationsverarbeitung des Systems

VT Zustandsdiagramm: Ein Zustandsdiagramm ist ein graphisches Netzwerk, dessen Kästen einzelne Zustände eines Systems darstellen, und die Kanten die möglichen Transitionen. Die Transitionen sind mit Bedingungen verknüpft, die einen Zustandswechsel auslösen.

Im Kontext der KI-Verfahren zeigen sie den aktuellen Zustand z.B. eines Reglers an (Bild 4-19). Hinter jedem Zustand verbirgt sich in der Regel eine andere Rechenvorschrift. Durch Animationen und Kontexttechniken wird dem Betrachter der jeweils aktive Zustand gezeigt. Soll zudem angedeutet werden von welchem Zustand aus der aktuelle Zustand aktiviert wird, so wird die Zustandsfolge aktiver Zustände durch teilweise Abschwächung der Hervorhebung markiert (Bild rechts). Ein vorhergehender Zustand hat eine geringere Farbsättigung als ein aktuell aktiver Zustand.

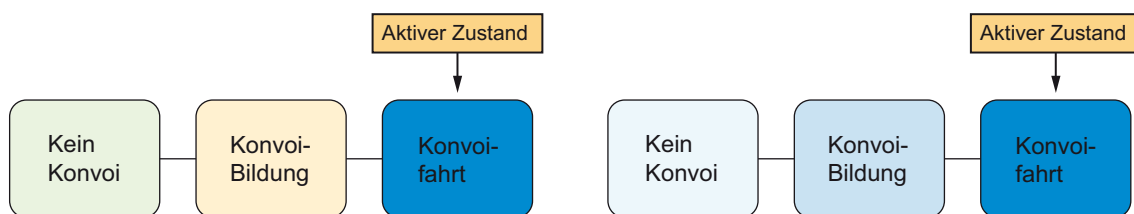


Bild 4-19: Visualisierungstechniken zur Darstellung von Zuständen – links: aktueller Zustand markiert, rechts: Zustandsfolge mit markiertem aktuellem Zustand

Mit Hilfe des Zustandsdiagramms kann z.B. ein unerwarteter Zustandswechsel oder alternierende Zustandswechsel beobachtet werden. Zudem wird, zusammen mit einem visuellen Netzwerk, der Grund für einen Zustandswechsel deutlich.

Diese Darstellung von Zuständen ist für die Detaildarstellung geeignet. Alternativ können die 3D-Modelle der Systemkomponenten je nach aktuellem Zustand eingefärbt werden (Beispiel siehe Bild 6-6).

4.6.7 Enthaltene Sekundär-Visualisierungstechniken innerhalb der Primär-Visualisierungstechniken

Die Primär-Visualisierungstechniken werden i.d.R. in Kombination mit den Sekundär-Visualisierungstechniken verwendet. Die Sekundär-Visualisierungstechniken ergänzen in dem Fall die Primär-Visualisierungstechniken um zusätzliche Informationen. Bild 4-20 stellt mit Hilfe einer Matrix einen Überblick über verwendete Sekundär-Visualisierungstechniken innerhalb der Primär-Visualisierungstechniken dar.

Dabei geben die Zeilen die Primär-Visualisierungstechniken an, die Spalten die unterschiedlichen Sekundär-Visualisierungstechniken. Wird eine bestimmte Sekundär-Technik innerhalb einer Primär-Technik genutzt wird die entsprechende Zelle der Matrix mit einem blau gefüllten Kreis versehen. Diese Kombination der Techniken ist obligatorisch. Falls eine Sekundär-Visualisierungstechnik eingesetzt werden kann, jedoch nicht unbedingt notwendig ist, wird die Zelle mit einem nicht gefüllten Kreis versehen. Diese Kombination ist nur in besonderen Fällen geeignet, z.B. ist die Sekundär-Visualisierungstechnik *Kurven* innerhalb der Primär-Technik *3D-Modelle* mit einem nicht gefüllten Kreis versehen; Kurven sind im Anwendungsbeispiel RailCab z.B. für den Verlauf der Schienenstrecke notwendig. Sie sind aber nicht Bestandteil eines jeden mechatronischen Systems.

Die Techniken *Semantisches Zoomen* und *Fokus und Kontext – Datenlinse* nehmen eine besondere Rolle ein. Da diese "nicht sichtbare" Techniken sind und die Darstellung aller anderen Visualisierungstechniken eher unterstützen (z.B. ein- und ausblenden, vergrößern). Sie können immer nur in Kombination mit weiteren Visualisierungstechniken verwendet werden. Dies können beliebige Primär- oder Sekundär-Visualisierungstechniken sein. Für die beiden Techniken werden in der Matrix nur obligatorische Felder angekreuzt, die jeweils rechnerinterne Attribute der Techniken beinhalten.

Die Sekundär-Technik *Info-HUD* kann bei allen Primär-Techniken als Information für den Anwender verwendet werden, die anzeigt ob die entsprechende Technik aktuell aktiviert/deaktiviert ist. Auch kann sie übergreifende Informationen zum Anwendungsszenario darstellen, wie z.B. aktuelle Anzahl an Fahrzeugen usw.

4.6.8 Überblick über Sekundär-Visualisierungstechniken

Im Folgenden wird ein Überblick über alle in dieser Arbeit verwendeten oder entwickelten Sekundär-Visualisierungstechniken gegeben (Tabelle 4-7). In Kapitel A2.5.3 werden sie anhand von Steckbriefen im Detail erläutert. Die Sekundär-Visualisierungstechniken sind systemabhängige, auf spezielle Anwendungen fokussierte, Visualisierungstechniken, die nicht ausschließlich auf die visuelle Analyse von KI-Verfahren ausgerichtet sind. Sie eignen sich i.d.R. für die Klassen-übergreifenden Visualisierungsaufgaben bzw. zur Erfüllung des Visualisierungszwecks (Kap. 4.4.4 und Kap. 4.4.5).

Tabelle 4-7: Überblick über die Sekundär-Visualisierungstechniken

Visualisierungsaufgabe	Konkrete Vis.-Aufgabe	Visualisierungstechnik	Steckbrief-Nr.:
Klassen-übergreifende VA			
Systemgrößen/	<ul style="list-style-type: none"> • Kraft • Geschwindigkeit • Winkel 	<ul style="list-style-type: none"> • Glyph, Text, Animation • Geschwindigkeitsanzeige, Animation • Fläche, Farbe, Animation, überhöhte Darstellung 	<ul style="list-style-type: none"> • Bild A-19 • Bild A-20 • Bild A-21
Systemparameter (Kennzahlen)	<ul style="list-style-type: none"> • Rollen v. RailCabs • Stabilität 	<ul style="list-style-type: none"> • Glyph, Metapher • Text, Info-HUD, Farbe 	<ul style="list-style-type: none"> • Bild A-22 • Bild A-24
Ereignisse	<ul style="list-style-type: none"> • Eingegangener Auftrag eines RailCabs 	<ul style="list-style-type: none"> • Metapher, Glyph, Effekt, Animation 	<ul style="list-style-type: none"> • Bild A-23
Schwellenwerte	<ul style="list-style-type: none"> • Regelgüte 	<ul style="list-style-type: none"> • Balkendiagramm, Farbe, Animation 	<ul style="list-style-type: none"> • Bild A-25
Entscheidungsvorgänge	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidung für alternative Route 	<ul style="list-style-type: none"> • Linien 	<ul style="list-style-type: none"> • Bild A-15
Visualisierungszweck:			
Aufmerksamkeitslenkung	<ul style="list-style-type: none"> • Auf Bereiche • Auf Ereignisse (Konvois) 	<ul style="list-style-type: none"> • Farbton, Form, Hervorhebung, Gruppierung • Kleine Datenlinse 	<ul style="list-style-type: none"> • Bild A-26 • Bild A-27
Hinweise /Warnungen	<ul style="list-style-type: none"> • Ausfall eines Aktors 	<ul style="list-style-type: none"> • Text, Info-HUD, Farbe 	<ul style="list-style-type: none"> • Bild A-28
Abruf von Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • (statistische) Informationen eines RailCabs o. Passagiers 	<ul style="list-style-type: none"> • Text, Info-HUD 	<ul style="list-style-type: none"> • Bild A-29

4.7 Steckbrief zur Beschreibung von Visualisierungstechniken

Die Analyse des Stands der Technik hat gezeigt, dass es bisher an Schablonen, Spezifikationstechniken oder Schemata fehlt, die dabei unterstützen, das Visualisierungsproblem (Kap. 2.6.2) für mechatronische Systeme zu spezifizieren und zu dokumentieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Schablone für einen Steckbrief entworfen.

Der Steckbrief⁴⁷ dient zur Spezifikation des Visualisierungsproblems für mechatronische Systeme, das insbesondere Analyseaufgaben, Visualisierungsaufgaben inkl. ihrer Daten und geeignete Visualisierungstechniken enthält. Er wird als Austauschdokument bzw. Schnittstellenspezifikation zwischen unterschiedlichen Fachdisziplinen eingesetzt, die das mechatronische System entwickeln und Daten für die Visualisierung bereitstellen.

Die Schablone wird in Bild 4-21 vorgestellt. Diese ist in fünf Bereiche unterteilt, die sich an die Spezifikation des Visualisierungsproblems und an die Phasen des Vorgehens in dieser Arbeit anlehnen. Dies sind die Bereiche Analyseaufgabe, Visualisierungsaufgabe, Daten, Visualisierungstechnik und Präsentation der Visualisierungstechnik. Für jeden der Bereiche sind mehrere Felder vorgesehen, die während der Spezifikation des Visualisierungsproblems auszufüllen sind.

Die für diese Arbeit maßgeblichen Steckbriefe befinden sich in den Kapiteln A2.5.2 bis A2.5.5. Die Realisierung der Steckbriefe erfolgt im Rahmen der prototypischen Umsetzung und wird in Kapitel 6 beschrieben.

⁴⁷ Die Ausführungen in diesem Abschnitt basieren auf der von mir betreuten Bachelorarbeit „Visualisierungstechniken zur Analyse der Logistiksimulation des Schienenverkehrssystems RailCab“ von B.Sc. Peter Arend.

1 Bezeichnung der Visualisierung - Steckbrief Nr.				
2 Entwicklungsaufgabe		3 KI-Verfahren, mechatronische Ebenen		
Beschreibung:		Beschreibung des Verfahrens: MFM: CO: AMS: RO: VMS: KO:		
4 Analyseaufgabe		5 Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen		
Beschreibung:		MFM: CO: AMS: RO: VMS: KO:		
6 Visualisierungsaufgabe (VA)		7 Klasse der VA und mechatr. Ebenen		
Beschreibung:		VA - Klasse: MFM: CO: AMS: RO: VMS: KO:		
8 Daten				
a	b	c	d	e
Nr.	Datum / Systemgröße	Attributtyp / Datentyp	Beschreibung	Zeitverhalten
9 Visualisierungstechnik		10 Klasse der Visualisierungstechnik		
11 Erfüllung der Visualisierungsaufgabe				
12 Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik				
a	b	c	d	
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregel	Darstellungsdimension	
13 Prinzipskizze der Visualisierungstechnik:				
14 Ausprägungen für Bereiche des Kontinuums				
MFM:	AMS:	VMS:		
15 Präsentation der Visualisierungstechnik in VR				
a Erscheinung:		b Verhalten:		c Interaktion:
d Implementierungsaufwand:		e Sonstige Bemerkungen:		
Erstellungsdatum: TT.MM.JJJJ Letzte Aktualisierung: TT.MM.JJJJ Bearbeiter: Name, Vorname				

Bild 4-21: Schablone für Steckbrief zur Spezifikation des Visualisierungsproblems

Erläuterung der Schablone für den Steckbrief:

- 1) In diesem Feld wird ein prägnanter Name für den Steckbrief eingetragen.
- 2) Hier wird die Entwicklungsaufgabe beschrieben. Beispiele befinden sich in Kapitel A2.2. Die Entwicklungsaufgabe ist vom KI-Verfahren und der Arbeitsweise des Entwicklers abhängig.
- 3) Es wird angegeben, welches KI-Verfahren entwickelt wird und von welcher der mechatronischen Ebenen es berechnet wird.
- 4) In diesem Feld wird die Analyseaufgabe beschrieben. Eine Auswahl möglicher Analyseaufgaben befindet sich in Kapitel A2.2
- 5) Es werden Analyseaufgaben den mechatronischen Ebenen zugeordnet. Einen Überblick an zugeordneten Aufgaben gibt die Taxonomie in 4.3.2.
- 6) In diesem Feld wird der Name der Visualisierungsaufgabe eingetragen und kurz beschrieben. Dazu wird eine Aufgabe aus der Taxonomie ausgewählt (Kap. 4.4).
- 7) Hier wird die Klasse der Visualisierungsaufgabe (siehe Klassen der Taxonomie in Kap. 4.4.1) angegeben. Dies vereinfacht die Auswahl einer Visualisierungstechnik. Zudem wird angegeben, für welche Bereiche des Kontinuums die Visualisierungsaufgabe erforderlich ist und was in diesen Bereichen dargestellt werden soll. Dadurch werden die Visualisierungsaufgaben für die Zoomstufen des semantischen Zooms (Kap. 4.6.4) definiert.
- 8) In diesem Feld werden die Daten des zu analysierenden KI-Verfahrens angegeben. Folgende Felder sind dazu auszufüllen:
 - a) Jedes Datenelement erhält einen Index. Durch den Index ist das eindeutige Referenzieren des Datenelements aus anderen Tabellenfeldern des Steckbriefs möglich.
 - b) In dem Feld erfolgt die Datenbezeichnung. Dazu wird aus den Bezeichnungen in Kapitel 4.5 und/oder Kapitel A1.1 ausgewählt.
 - c) Jedem Datum wird der entsprechende Attributtyp / Datentyp und falls notwendig die Datenstruktur und Dimension zugewiesen. Dies können folgende Attributtypen sein: *quantitativ*, *qualitativ (nominal, ordinal)*. Datentypen können sein: *Punkt*, *Skalar*, *Vektor*. Eine vollständige Auflistung und Erläuterung der möglichen Daten befindet sich in Kapitel A1.1 (Tabelle A-1).
 - d) Das Datum wird kurz erläutert; optional wird die Bedeutung der Attributwerte beschrieben.

- e) Das Zeitverhalten des Datenelements wird spezifiziert. Zur Auswahl stehen: *statisch*, *dynamisch*, *quasi-kontinuierlich*, *diskret*, *zyklisch* und ggf. *weiche* oder *harte Echtzeit*. Die Daten sind in Tabelle A-2 erläutert.
- 9) In diesem Feld wird ein prägnanter Name der Visualisierungstechnik angegeben.
- 10) Hier wird die Klasse der Visualisierungstechnik festgehalten; in dieser Arbeit ist es i.d.R. eine der Primär- oder Sekundär-Visualisierungstechniken.
- 11) In diesem Feld wird verbal formuliert, inwiefern die Visualisierungstechnik die Visualisierungsaufgabe erfüllt. Dies können Fragestellungen sein, wie: Was erkennt ein Entwickler mit der VT?
- 12) In diesem Bereich des Steckbriefs erfolgt die Dokumentation der Abbildung (Mapping) der Daten auf Visuelle Variable bzw. Elemente der VT. Dazu werden folgende Felder ausgefüllt:
- a) Daten-Nummer: Referenz auf bereits definiertes Datum in Feldern 8a u. 8b
 - b) Die Visuelle Variable, auf die das Datum abgebildet wird. (Hierbei sind die Kriterien Expressivität und Effektivität zu beachten, sowie Design- bzw. Wahrnehmungsregeln (siehe 21c)).
 - c) Designregel bzw. Wahrnehmungsregel, die bei dieser Abbildung beachtet wird. Hier wird die Nummer und Name der Regel eingetragen. Eine Auflistung der Regeln und ihre Erläuterung befinden sich in Kapitel A1.3 (Tabelle A-3).
 - d) Es wird die Darstellungsdimension angegeben. Zur Auswahl stehen eine 2-dimensionale Darstellung (auf einem HUD oder Billboard, siehe Kap. A1.4) und eine 3-dimensionale Darstellung (3d-Modell und 3d-Animation).
- 13) In diesem Feld wird mit Hilfe einer Skizze die Visualisierungstechnik dokumentiert; eine Skizze ist für alle Fachdisziplinen einfach zu verstehen.
- 14) Falls erforderlich, werden hier die Ausprägungen der Visualisierungstechnik für Bereiche des Kontinuums zur Darstellung von MFM, AMS oder VMS genannt.
- 15) In diesem Bereich des Steckbriefs wird die Präsentation der Technik dokumentiert:
- a) Erscheinung: Es wird dokumentiert, zu welchem Zeitpunkt die Visualisierungstechnik erscheint (z.B.: automatisch, wenn ein bestimmtes Ereignis eintritt oder durch Selektion eines Elements durch den Anwender).
 - b) Verhalten: Hier wird dokumentiert, wie sich die Visualisierungstechnik – abhängig von den Simulationsdaten – dynamisch verändert. Möglichkeiten der Verhaltensänderung sind: Ändern der Farbe, Position, Orientierung, Detailgrad oder die Form der Technik selbst.

- c) Interaktion mit der Technik: Hier wird beschrieben, welche Interaktionen mit der Technik möglich sind. Dies kann eine Selektion für weitere Informationen, Einblenden/Ausblenden, Navigation und Zoomen und Ansichten oder Szenen wechseln sein.
- d) Implementierungsaufwand: Hierunter fällt der abgeschätzte Implementierungsaufwand für die Visualisierungstechnik (z.B. *gering, mittel, hoch*). Dieser ist wichtig bei der Entscheidung für eine Visualisierungstechnik, falls mehrere Visualisierungstechniken für eine Visualisierungsaufgabe geeignet sind (siehe Kriterium *Angemessenheit* in Kapitel 2.6.1).
- e) Sonstige Bemerkungen: Hier kann optional eine Ergänzung eingefügt werden, die über die definierten Felder hinausgeht, wie z.B.: Abhängigkeiten von anderen Visualisierungsaufgaben, Voraussetzungen, usw.

Die Schablone ist sehr generisch und kann für verschiedenste Analyseaufgaben oder Ausprägungen von Aufgaben eingesetzt werden. Es sind nicht notwendigerweise stets alle Felder des Steckbriefs auszufüllen.

4.8 Bewertung von Visualisierungstechniken

Dieser Abschnitt skizziert die wesentlichen Ansätze zum Testen und Bewerten von Visualisierungstechniken und -Systemen.

Weil eine Visualisierung von der Wahrnehmung des Menschen abhängt, werden verlässliche Aussagen über deren Eignung lediglich mit umfangreichen Nutzertests erzielt. Folgende Methoden gibt es zur Evaluation: Heuristische Evaluation, Fokusgruppen, Interviews, Beobachtungen, Empirische Experimente oder Feldstudien. Vor- und Nachteile der Methoden werden beschrieben in [KKU+07, S. 60ff.].

Wichtige Bewertungsfaktoren für die Visualisierungstechniken sind dabei die Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung eines Nutzers. Effektivität und Effizienz sind quantitative Faktoren, die anhand einer erfolgreichen Bearbeitung einer Aufgabe, z.B. Dauer zur Erfüllung einer Aufgabe ermittelt werden. Die Zufriedenstellung ist eine qualitative Größe, die durch Befragungen und Beobachtungen von mehreren unterschiedlichen Gruppen abgeschätzt wird [KKU+07, S. 61ff.].

4.9 Werkzeugunterstützung: Architektur der VR-Anwendung

Im Folgenden wird eine Architektur für VR-Anwendungen zur Analyse mechatronischer Systeme vorgeschlagen. Diese ist im Rahmen des RailCab-Projekts entstanden und hat sich für die visuelle Analyse mechatronischer Systeme bewährt. Ähnliche Architekturen für Visualisierungssysteme sind dokumentiert in [Mar07], [GEK01, S. 506ff.], [AMS+11, S. 264].

Bild 4-22 stellt die Architektur der VR-Anwendung dar. Links im Bild ist ein virtueller Prototyp eines zu untersuchenden mechatronischen Systems symbolisiert. Rechts ist die Architektur der VR-Anwendung dargestellt. Die Architektur ist an den Software Design-Ansatz Model-View-Controller angelehnt. Dieser besteht zum einen aus einer Datenkomponente (Model), die eine Datenbasis mit Datenmodellen der Simulationsdaten und Metadaten über die Daten enthält. Eine funktionale Steuerungskomponente verarbeitet die Logik der Anwendung (Controller). Eine Rendering Komponente (View) ist für die grafische Ausgabe zuständig [AMS+11, S. 264], [Bri09]. Ergänzend sind weitere Komponenten für die VR-basierte Analyse mechatronischer Systeme notwendig. Sie sind in die Basis-Komponenten eingeordnet und werden im Folgenden beschrieben:

Komponente Modell:

Datenmodell des mechatronischen Systems: Dies ist die Repräsentation des mechatronischen Systems. Das Datenmodell enthält diejenigen Daten und Funktionen des virtuellen Prototyps, die für die Darstellung in VR benötigt werden. Dies sind Geometriedaten, Funktionen zur Berechnung des Bewegungsverhaltens, die Repräsentation der KI-Verfahren sowie eine Wirkstruktur dieser Komponenten.

Komponente Controller:

Daten-Filter und Datenaufbereitung: In dieser Komponente werden die empfangenen bzw. gespeicherten Daten des mechatronischen Systems verarbeitet und der VR-Anwendung zur Verfügung gestellt. Hierzu gehört das Filtern oder Interpolieren von Daten sowie notwendige Berechnungen auf den Daten, wie z.B. das Vorsortieren der Daten für eine anschließend effiziente Verarbeitung.

Synchronisation: In der Komponente werden eingehende Daten synchronisiert. Dies sind z.B. Eingangsdaten von unterschiedlichen AMS. Auch werden Daten bzw. Prozesse der VR-Anwendung synchronisiert. Bspw. wird das Bewegungsverhalten schneller berechnet als der Szenengraphen traversiert und einzelne Bilder berechnet werden. Dies gilt es hier auszugleichen.

Anwendungslogik und Datenmanagement: Die Anwendungslogik ist für das Verhalten der Anwendung zuständig. Die Hauptfunktionen sind die Simulationsdaten des VP zu überwachen, die Eingaben des Anwenders (Navigation, Selektion) zu verarbeiten und die entsprechend geeigneten Visualisierungstechniken darzustellen.

Interaktion: Die Interaktionskomponente bietet Interaktionsmöglichkeiten des Anwenders mit den Daten. In dieser werden Eingaben des Anwenders, wie das Selektieren von Modellen, das Navigieren aber auch das interaktive Ein- und Ausschalten von Visualisierungen verarbeitet.

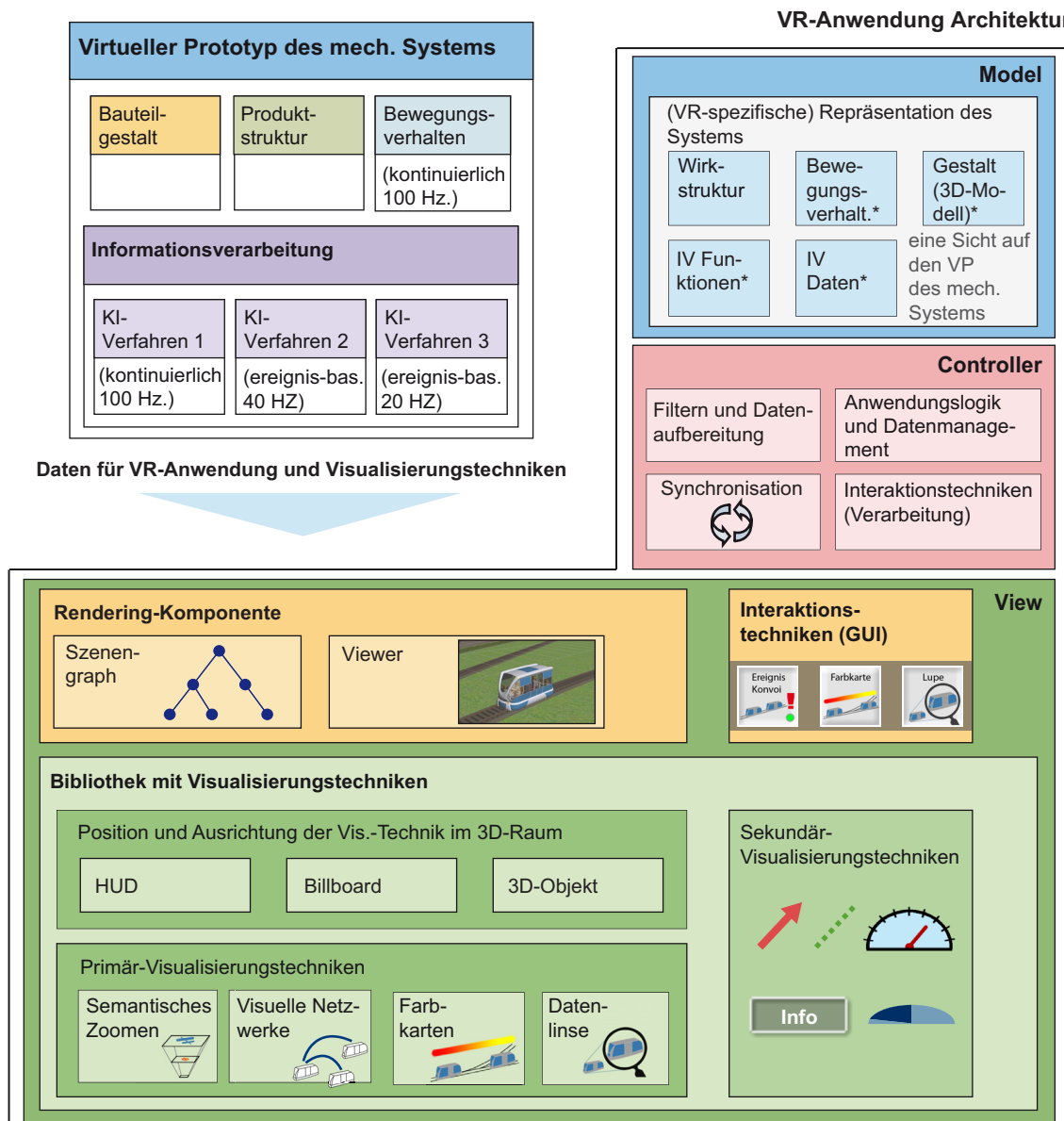


Bild 4-22: Architektur der VR-Anwendung: Virtueller Prototyp eines mechatronischen Systems (links), VR-Anwendung zur Visualisierung des Prototyps (rechts)

Komponente View:

Rendering-Komponente: Diese Komponente ist für das Ausgeben der einzelnen Bilder zuständig. Sie besteht aus einem Szenengraphen und einem Viewer. Der Szenengraph enthält alle darzustellenden Daten des Systems und organisiert diese in einer hierarchischen Baumstruktur. Dies sind Geometriedaten für 3D-Modelle (Polygonmodelle) sowie Geometriedaten für die zusätzlichen Visualisierungstechniken für abstrakte Daten (Diagramme, geometrische Beschreibungen). Der Viewer ist die Schnittstelle zum Anwender. Dieser stellt ausgewählte Daten bzw. Knoten des Szenengraphen abhängig der Position der virtuellen Kamera dar.

Bibliothek an Visualisierungstechniken: Die Visualisierungstechniken sind in einer separaten Bibliothek als Klassen implementiert und können dem Szenengraphen angefügt werden. In dieser Bibliothek sind sowohl die Primär- als auch die Sekundär-Visualisierungstechniken enthalten. Für die Ausrichtung der Visualisierungstechniken als HUD oder Billboard sind zudem generische Klassen vorhanden, die Aussehen und Platzierung des HUDs / Billboards definieren. Durch Ableitung der entsprechenden Klasse wird die Visualisierungstechnik auf ein Billboard oder auf ein HUD platziert.

Die Simulationsdaten lassen sich auf zwei unterschiedliche Weisen verarbeiten: Mit einem *interaktiven Postprocessing* oder einer *Online-Visualisierung* [SM00, S. 22ff.]. Das interaktive Postprocessing ist in Bild 4-23 skizziert:

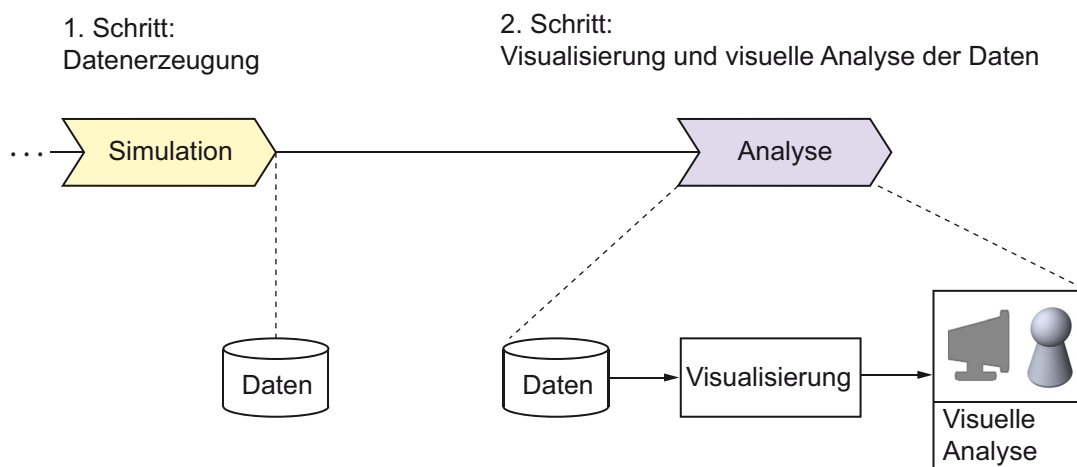


Bild 4-23: Interaktives Postprocessing und Analyse nach [SM00, S. 24]

Beim interaktiven Postprocessing ist der Visualisierungsprozess von den Prozessen der Datenerzeugung, Modellbildung und Simulation entkoppelt. Die Simulationsdaten werden aufgezeichnet und anschließend in einem zweiten Schritt analysiert. Aus Sicht der visuellen Analyse bedeutet dies, dass die Daten während der Analyse nicht mehr verändert werden können. Der Visualisierungsprozess selbst kann jedoch interaktiv gesteuert werden, sodass sich verschiedene visuelle Repräsentationen der gleichen Datenmenge erzeugen lassen. Auch können während der Datenaufbereitung zusätzliche Berechnungen durchgeführt werden. Ein interaktives Eingreifen auf die Simulationsdaten ist hier jedoch nicht möglich [SM00, S. 24].

Diese Art der Visualisierungssitzung eignet sich für sehr schnelle Berechnung von Simulationsdaten. Es wird empfohlen sie zur Analyse von Verfahren des RO und CO des OCM einzusetzen, da ein Datensatz verlangsamt abgespielt und dargestellt werden kann.

In Bild 4-24 ist die Online-Visualisierung aufgezeigt. Hierbei ist die Analyse direkt an die Simulation gebunden. Die Daten werden nahezu zeitgleich nach der Berechnung im Visualisierungsprozess verarbeitet und zur Analyse dargestellt. Eine interaktive Bear-

beitung oder Eingreifen in die Simulationsdaten oder -modell sind nicht möglich [SM00, S. 23].

Die Art der Visualisierungssitzung eignet sich bei der Analyse mechatronischer Systeme für Verfahren, die im KO oder RO des OCM berechnet werden und weniger hohe Zeitanforderungen haben. Insbesondere eignet sich diese Darstellung für die Plausibilitätskontrolle eines Modells oder Simulation.

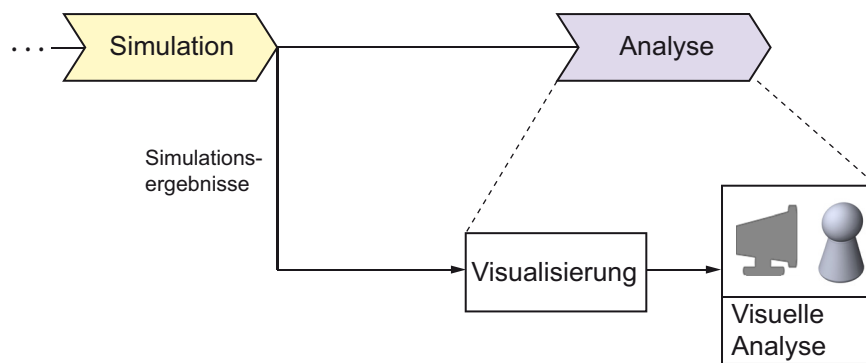


Bild 4-24: Online-Visualisierung und Analyse nach [SM00, S. 23]

5 Vorgehensmodell zur Entwicklung von Visualisierungstechniken

Dieses Kapitel beschreibt das Vorgehensmodell zur Entwicklung von Visualisierungstechniken zur interaktiven visuellen Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen. Das Vorgehensmodell strukturiert den Entwicklungsablauf und begleitet den Entwickler eines mechatronischen Systems und den Entwickler der VR-Anwendung während der Erstellung von Visualisierungstechniken. Innerhalb des Vorgehensmodells werden die in Kapitel 4 beschriebenen Bestandteile angewandt.

Bild 5-1 zeigt das Vorgehen in Form eines Phasen-Meilenstein-Diagramms. Es beschreibt die Reihenfolge der Bearbeitung der Aufgaben als Phasen und die Resultate als Meilensteine.

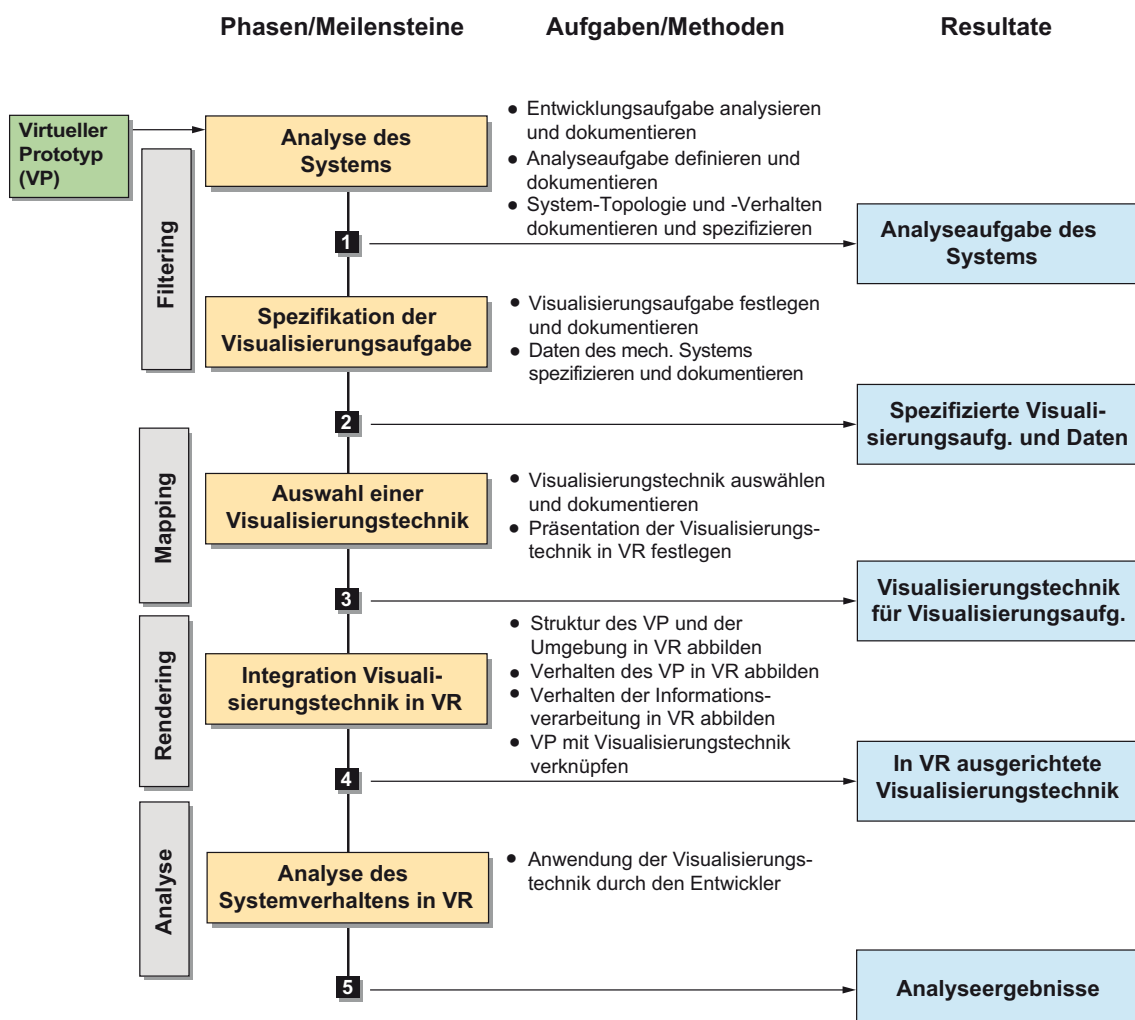


Bild 5-1: Vorgehensmodell zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatr. Systeme in VR-Anwendungen

Die einzelnen Phasen beschreiben eine sequentielle und idealisierte Darstellung, deren Anwendung ermöglicht jedoch Iterationen und Rücksprünge in alle Phasen. Innerhalb der Phasen sind Tätigkeiten unter Verwendung der beschriebenen Bestandteile auszuführen.

Ausgangspunkt für das Vorgehensmodell ist ein virtueller Prototyp eines fortgeschrittenen mechatronischen Systems. Modelle, wie das Bewegungsverhalten und die Gestalt bzw. erste Versionen der Modelle liegen bereits vor; zum Zeitpunkt des VR-Einsatzes wird das System noch entwickelt. Die Informationsverarbeitung, Regler oder Optimierungsverfahren müssen ebenfalls in einer ersten testbaren Version vorhanden sein. Das Ergebnis ist eine VR-Anwendung, deren Visualisierungstechniken die visuelle Analyse des in Entwicklung befindlichen fortgeschrittenen mechatronischen Systems erlauben.

Die Phasen und ihre Aufgaben werden in den Kapiteln 5.1 bis 5.5 erläutert. Zum besseren Verständnis wird das Validierungsbeispiel der RailCab-Kommunikation aus Kap. 4.2.2 herangezogen.

Die ersten beiden Phasen entsprechen dem *Filtering*-Schritt, die dritte Phase dem *Mapping*-Schritt, die vierte Phase dem *Rendering*-Schritt und die letzte Phase dem *Analyse*-Schritt der Visualisierungspipeline aus Kapitel 2.6.3

5.1 Phase 1: Analyse des Systems

In der ersten Phase erfolgt die Analyse des mechatronischen Systems. Der Fokus liegt dabei auf dem zu analysierenden KI-Verfahren. Hier wird die Frage beantwortet: *Warum und was soll visualisiert werden?* Die Phase umfasst die Aufgaben *Entwicklungsaufgabe analysieren und dokumentieren*, *Analyseaufgabe definieren und dokumentieren* sowie *System-Topologie und -Verhalten dokumentieren*. Das Resultat der Phase sind Analyseaufgaben und spezifizierte Systemkomponenten, die in der VR-Anwendung abgebildet und analysiert werden sollen.

Folgende Bestandteile werden in dieser Phase verwendet:

- Taxonomie an **Analyseaufgaben** fortgeschrittener mechatronischer Systeme (vgl. Kap. 4.3.2)
- **Steckbrief** zur Spezifikation des Visualisierungsproblems (vgl. Kap. 4.7)
- Spezifikationsprache UML

Die Resultate werden im Steckbrief und mittels UML-Diagrammen dokumentiert.

5.1.1 Entwicklungsaufgabe analysieren und dokumentieren

Als erstes wird der Entwicklungsgegenstand analysiert. Hierzu wird untersucht, welches KI-Verfahren bzw. fortgeschrittene Regelung entwickelt wird. Dies schafft Problemverständnis bei den beteiligten Entwicklern.

Zudem wird definiert, ob ein VMS, AMS oder MFM entwickelt und untersucht werden soll oder alle der mechatronischen Strukturierungsebenen. Zur Analyse von KI-Verfahren ist eine Zuordnung zur Ebene des OCM durchzuführen. Dadurch wird die Verarbeitungsgeschwindigkeit (Zeitverhalten) der anfallenden Daten festgestellt. Die Entwicklungsaufgabe wird – wie in Tabelle A-5 bis Tabelle A-7 festgehalten - verbal formuliert und in den Steckbrief eingetragen (siehe Bild 5-2).

Entwicklungsaufgabe	KI-Verfahren, mechatronische Ebenen
Beschreibung: Kommunikation zwischen RailCabs entwickeln, Kommunikationsprotokolle und -kanäle auslegen	Beschreibung des Verfahrens: Autonome Kommunikation MFM: - CO: - AMS: Komm. zw. einzelnen Fahrzeugen simulieren RO: Komm. wird im RO berechnet VMS: Komm. zw. Konvois simulieren KO: -
Analyseaufgabe	Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen

Bild 5-2: Entwicklungsaufgabe analysieren und im Steckbrief dokumentieren

5.1.2 Analyseaufgabe definieren und dokumentieren

Als nächstes wird die Analyseaufgabe der Entwickler festgelegt. Hier wird erfasst, welche konkreten Fragestellungen ein Entwickler bzgl. der Analyse des Reglers und KI-Verfahrens hat. Bei der Definition der Analyseaufgabe ist die entwickelte Taxonomie der Analyseaufgaben zu nutzen.

Die Entwickler haben gemeinsam mit dem VR-Experten festzulegen, welche Analyseaufgabe der Frage der Entwickler entspricht. Zudem werden die mechatronischen Strukturierungsebenen festgelegt, auf denen die Analyseaufgaben anfallen. Im Beispiel (Bild 5-3) wird die Analyseaufgabe „Kommunikation“ ausgewählt. Sie soll auf den beiden mechatronischen Ebenen VMS und AMS analysiert werden.

Die Analyseaufgabe wird anschließend in den Steckbrief in den Bereich „Analyseaufgabe“ eingetragen. Bild 5-4 zeigt den entsprechenden Ausschnitt des Steckbriefs. Ergänzend wird ein Text formuliert, der weitere Details der Aufgabe skizziert (links im Steckbrief). Zudem wird die Analyseaufgabe für die einzelnen mechatronischen Ebenen konkretisiert (rechts). In der Regel ergeben sich unterschiedliche Analyseaspekte für die einzelnen Ebenen. So sollen für das RailCab-Beispiel auf VMS-Ebene Kommunikationswege zwischen RailCab-Konvois analysiert werden, auf der AMS-Ebene hingegen die Kommunikation zwischen einzelnen Fahrzeugen sowie die Kommunikationsrichtung, die Übertragungsgeschwindigkeit oder der Ausfall der Kommunikation.

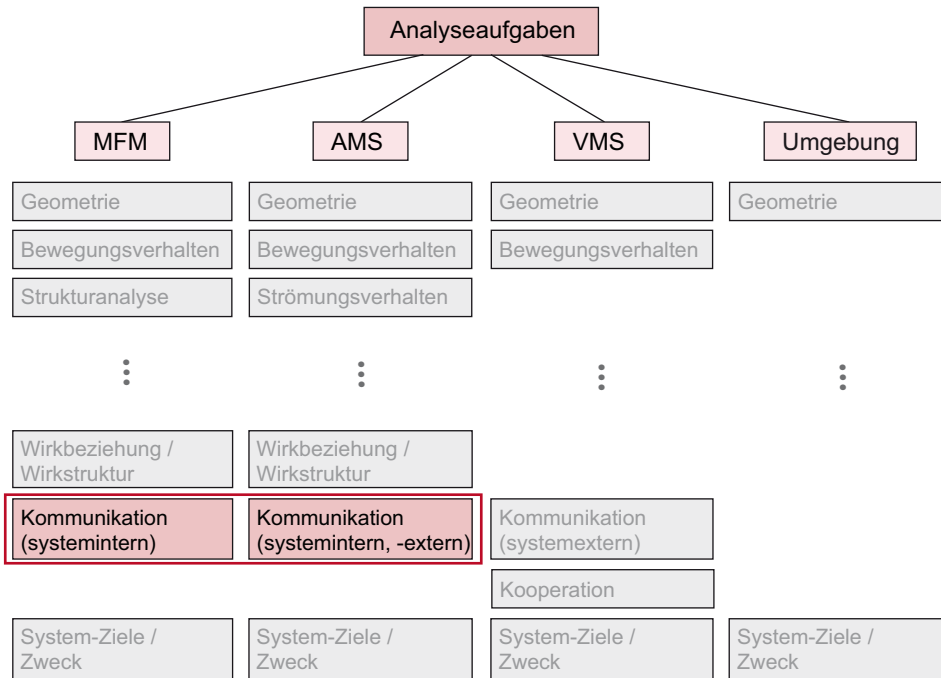


Bild 5-3: Analyseaufgabe aus der Taxonomie der Analyseaufgaben auswählen

Analyseaufgabe	Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen
Beschreibung: <i>Kommunikations-Struktur und Verhalten analysieren (systemextern)</i> Welche Systeme komm. miteinander; wann kommunizieren sie? Wird die Komm frühzeitig eingeleitet? Fallen ggf. Nachrichten aus?	MFM: - AMS: Komm. zw. einzelnen Fahrzeugen analysieren (Sender, Empfänger, Übertragungsgeschw.) VMS: Komm. zw. Konvois analysieren RO: Abarbeitung der Nachrichtenfolge analysieren KO: Vorgaben vom KO analysieren
Visualisierungsaufgabe (VA)	Klasse der VA und mechatr. Ebenen

Bild 5-4: Analyseaufgabe im Steckbrief dokumentieren

5.1.3 System-Topologie und -Verhalten dokumentieren und spezifizieren

In diesem Schritt wird die System-Gestalt, ihre Topologie und das Verhalten dokumentiert. Ziel ist es, die Genauigkeit und die Anzahl der Details festzustellen, mit der die Gestalt und das Verhalten des Untersuchungsgegenstands in der virtuellen Umgebung abgebildet werden sollen. Insbesondere gilt dies für die Aspekte Gestalt und Verhalten, wobei Verhalten an dieser Stelle vorrangig das Bewegungsverhalten meint. Diese lassen sich in unterschiedlicher Genauigkeit in VR darstellen. Zum Beispiel ist für das Beispiel RailCab-Konvoifahrt zu klären, ob auch das Fahrwerk im RailCab betrachtet werden soll, und ob das Fahrwerk zudem Schrauben als 3D-Modelle enthalten soll. Das Bewegungsverhalten kann ebenfalls mit unterschiedlicher Genauigkeit nachempfunden werden. Zum Beispiel kann das Bewegungsverhalten einer RailCab-Tür simuliert oder mit Mitteln der Computergrafik animiert (interpoliert) werden.

Zur Spezifikation der Systemkomponenten für die VR-Anwendung wird ein UML-Klassendiagramm eingesetzt [Oes05], [ISO19501]. Bild 5-5a verdeutlicht eine stark vereinfachte Spezifikation des RailCab-Systems für die VR-Anwendung.

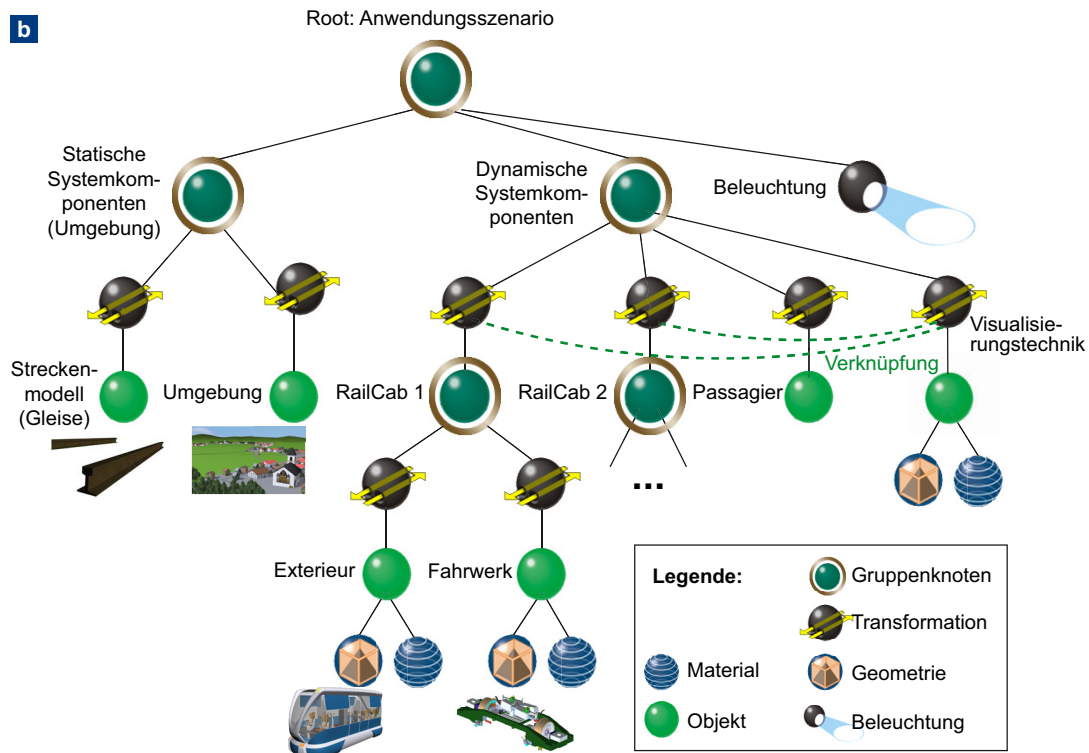
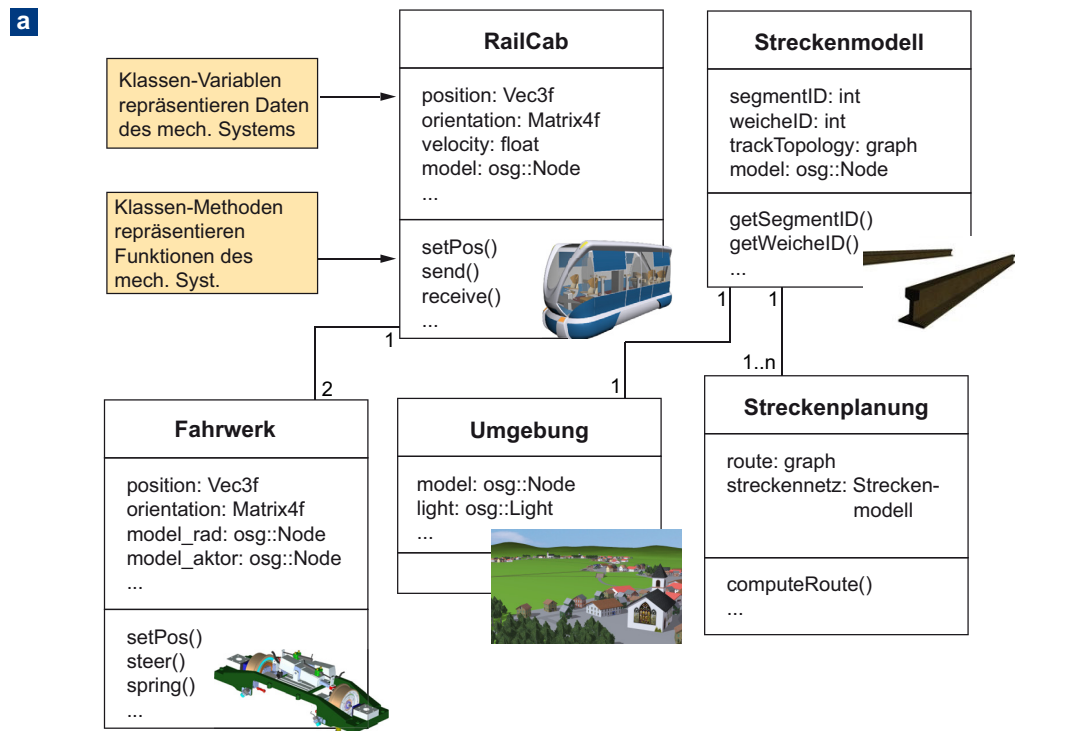


Bild 5-5: a) Komponenten des RailCab-Systems und b) den Szenengraphen für die VR-Anwendung spezifizieren

Alle Komponenten des RailCab-Systems werden als Klassendiagramme modelliert. Die Daten werden als Klassen-Variablen definiert, das Verhalten der Komponenten wird in den Methoden (auch: Funktionen) der Klassen abgebildet. Durch Beziehungen zwischen den Klassen wird die Beziehung zwischen den Systemkomponenten abgebildet, so dass die gesamte Struktur des Klassendiagramms die Wirkstruktur des Systems repräsentiert. Die Klassen-Methoden repräsentieren die Funktionen des mechatronischen Systems. So bildet z.B. die Funktion *setPosition()* der Klasse *RailCab* das Bewegungsverhalten des RailCabs ab. In dieser Funktion werden Positions- und Orientierungsdaten zur Laufzeit fortwährend aktualisiert, sodass sich eine Bewegung des RailCabs ergibt.

Mit dem UML-Diagramm erhalten der VR-Experte und die Entwickler des mechatronischen Systems ein gemeinsames Verständnis von der Szene, von den enthaltenen 3D-Modellen und den zu integrierenden Simulationen. Die Benennung einzelner Funktionen macht den Beteiligten zudem deutlich, welche Schnittstellen aufgebaut und welche Daten ausgetauscht werden müssen.

Des Weiteren ist vom VR-Experten ein Szenengraph zu spezifizieren (siehe Bild 5-5b). Mit dem Szenengraph erhält der VR-Experte frühzeitig eine Vorstellung von der Komplexität der VR-Szene. Dabei ist ein Szenengraph eine rechnerinterne Repräsentation und Organisation der virtuellen Szene und ist als ein Baum beschrieben. Die Knoten repräsentieren entweder 3D-Modelle oder Funktionen (z.B. eine Transformation). Die Kanten beschreiben die Topologie der Szene. Bei der Spezifikation ist zwischen dynamischen und statischen Objekten zu unterscheiden. Die statischen Komponenten des Szenengraphen (z.B. Umgebungsmodelle, Bahnhöfe, Depots) werden ein einziges Mal in die VR-Anwendung geladen. Alle dynamischen Komponenten werden zur Laufzeit fortwährend verändert (z.B. das Bewegungsverhalten des Grundsystems). Diese Einteilung ermöglicht eine effiziente Verarbeitung des Szenengraphen zur Laufzeit. Zur Unterscheidung ist ein Gruppenknoten auf der zweiten Hierarchieebene des Szenengraphen einzusetzen.

Zudem werden die System-Topologie (Baustuktur) von Systemkomponenten und deren kinematisches Verhalten, wie z.B. die Kinematik des Fahrwerks inkl. der Aktoren und Räder, im Szenengraphen abgebildet. Dazu wird die kinematische Kette mit Hilfe von Transformationsknoten und deren Verkettung im Szenengraphen spezifiziert. Das Verhalten des mechatronischen Systems in VR ergibt sich durch die Ankopplung der Simulationsdaten an die VR-spezifischen Daten und Funktionen des Systems.

5.2 Phase 2: Spezifikation der Visualisierungsaufgabe

In der zweiten Phase werden die Visualisierungsaufgaben definiert. Es wird geklärt, was eine Visualisierung darstellen soll. Dazu werden die Schritte *Visualisierungsaufgabe festlegen und dokumentieren* und *Daten des mechatronischen Systems spezifizieren und dokumentieren* durchgeführt. Das Resultat der zweiten Phase sind eine spezifizierte Vi-

sualisierungsaufgabe sowie die Daten, die visualisiert werden sollen. Beide werden im Steckbrief festgehalten.

Folgende Bestandteile werden in dieser Phase verwendet:

- Taxonomie an **Visualisierungsaufgaben** (vgl. Kap. 4.4)
- Charakteristische **Daten** fortgeschrittener mechatronischer Systeme (vgl. Kap. 4.5)
- **Steckbrief** zur Spezifikation des Visualisierungsproblems (vgl. Kap. 4.7)

5.2.1 Visualisierungsaufgabe festlegen und dokumentieren

In diesem Schritt wird die Visualisierungsaufgabe für das mechatronische System festgelegt. Sie wird aus der Analyseaufgabe abgeleitet, indem mehrere Kriterien überprüft werden. Bild 5-6 zeigt das Prinzip. Zur Definition der Visualisierungsaufgabe wird die Taxonomie der Visualisierungsaufgaben herangezogen. Zunächst wird die geeignete VA-Klasse, passend zur Analyseaufgabe aus der Taxonomie gewählt. Dazu werden auf der ersten Hierarchieebene der Taxonomie folgende Kriterien überprüft: *gestaltbehaftete Daten bzw. Systemkomponenten, Wirkbeziehungen/Relationen von Daten bzw. Systemkomponenten und abstrakte Daten bzw. Systemkomponenten*. Anschließend werden die Kriterien der nächsten Hierarchieebene in der Taxonomie kontrolliert. Die Kriterien sind: *Gestalt, Struktur und Verhalten*. Bei einer Visualisierungsaufgabe können mehrere Kriterien zutreffen, z.B. wenn sowohl Gestalt als auch Verhalten analysiert werden. Die Kriterien auf den nächsten Hierarchieebenen entsprechen den Visualisierungsaufgaben in den Kästen selbst. Letztendlich wird die Visualisierungsaufgabe ermittelt.

Das Bild 5-6 zeigt beispielhaft die Ermittlung der Visualisierungsaufgabe Kommunikation und den entsprechend gewählten Pfad in der Taxonomie der Visualisierungsaufgaben. Eine direkte Zuordnung von den in dieser Arbeit definierten Analyseaufgaben zu möglichen Visualisierungsaufgaben der Taxonomie befindet sich in Tabelle A-11.

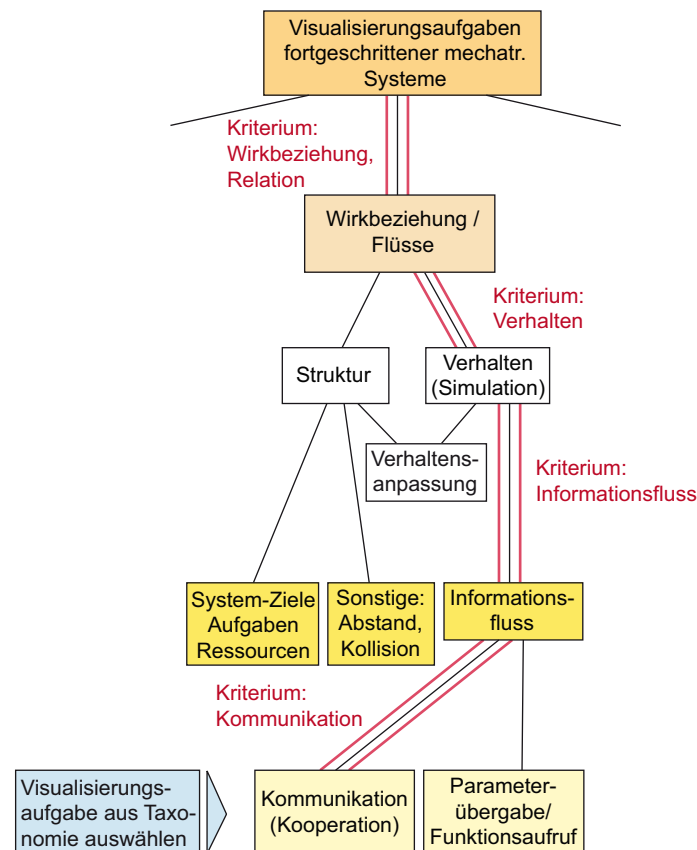


Bild 5-6: Die Auswahl einer Visualisierungsaufgabe aus der Taxonomie für Visualisierungsaufgaben erfolgt durch Überprüfung einer Reihe von Kriterien

Die Visualisierungsaufgabe wird für jede der mechatronischen Strukturierungsebenen definiert, weil sich für die verschiedenen Ebenen in der Regel unterschiedliche Ausprägungen der Aufgabe ergeben.

Anschließend wird die Visualisierungsaufgabe im Steckbrief dokumentiert. Dazu wird die Aufgabe und ihre Ausprägungen für die mechatronischen Ebenen als Text beschrieben bzw. erläutert, was sie auf den einzelnen Ebenen darstellen soll (siehe Ausschnitt in Bild 5-7).

Visualisierungsaufgabe (VA)	Klasse der VA und mechatr. Ebenen
Kommunikationsstruktur und Kommunikation visualisieren. Es müssen Sender, Empfänger, die Übertragungsgeschwindigkeit sowie Fehler dargestellt werden. Änderung der Kommunikationsstruktur zur Laufzeit muss sichtbar sein.	VA - Klasse: Wirkweise/Flüsse - Informationsflüsse zur Kommunikation MFM: - AMS: Komm. zw. RailCabs visualis. VMS: Komm zw. Konvois visualisieren RO: Eingabe/Ausgabe des Komm.-Moduls KO: Vorgaben vom KO
Daten	

Bild 5-7: Visualisierungsaufgabe im Steckbrief dokumentieren

5.2.2 Daten des mechatronischen Systems spezifizieren und dokumentieren

Durch die Analyse- und Visualisierungsaufgaben wurden die zu visualisierenden Daten bereits eingegrenzt. In diesem Schritt werden die Daten ermittelt und die Datentypen festgelegt. Als Hilfestellung wird das Schema für charakteristische Daten fortgeschrittener mechatronischer Systeme aus Kapitel 4.5 und Erläuterung der Datenkategorien aus Kapitel A1.1 eingesetzt.

Bild 5-8 zeigt einen Ausschnitt der Daten für das Validierungsbeispiel der RailCab-Kommunikation. Die Daten werden in den dafür vorgesehenen Bereich „Daten“ des Steckbriefs eingetragen. Die vollständige Datenspezifikation des Beispiels befindet sich in Tabelle A-9.

Daten				
Nr.	Datum / Systemgröße	Attributtyp / Datentyp	Beschreibung	Zeitverhalten
1	Zustand „state_pos“	nominal / Integer	Zustand Positionsübertragung. Besteht aus zwei parallelen Zuständen: state [0] sendet Position, state [1] empfängt Position [0]=1: Keine Datenübertragung [0]=2: Eigene Position wird gesendet [1]=1: Keine Datenübertragung [1]=2: Positionsdaten werden empfangen	dynamisch, diskret
2	„queue_sending_ratio“	quantitativ / skalar	Füllstand des Zwischenspeichers für ausgehende Nachrichten	quasi-kontinuierlich
Visualisierungstechnik (VT)			Klasse der Visualisierungstechnik	

Bild 5-8: Eintrag der ermittelten Daten und Datentypen in den Steckbrief

5.3 Phase 3: Auswahl von Visualisierungstechniken

In der dritten Phase werden Visualisierungstechniken für die definierte Visualisierungsaufgabe und ihre Daten ausgewählt (*Wie wird visualisiert?*). Dazu werden die in dieser Arbeit entwickelten Visualisierungstechniken – unter Beachtung bestehender Erkenntnisse von Design- und Wahrnehmungsregeln – genutzt. Die Phase enthält die Aufgaben *Visualisierungstechnik auswählen und dokumentieren* und *Präsentation der Visualisierungstechnik in VR festlegen und dokumentieren*. Das Resultat der dritten Phase sind geeignete Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse der spezifizierten Analyseaufgabe.

Folgende Bestandteile werden hier verwendet:

- **Primär- und Sekundär-Visualisierungstechniken** (Kap. 4.6)
- **Designregeln und Wahrnehmungsregeln** zur Gestaltung von Visualisierungstechniken (siehe Kapitel A1.3)

Der Schritt, die Primär-Visualisierungstechniken mit Visualisierungsaufgaben zu verknüpfen, dient vorrangig der Vollständigkeit und der Ausgrenzung: Kann eine Analyseaufgabe bereits mit einer Primär-Visualisierung analysiert werden, muss für diese keine Sekundärvisualisierung mehr ausgewählt werden.

Anschließend wird die Visualisierungstechnik in den Steckbrief eingetragen (Bild 5-10). Dazu werden der Name der Technik sowie die Klasse der Visualisierungstechnik angegeben. Anschließend wird die Abbildung der spezifizierten Daten auf visuelle Variable bzw. Elemente festgehalten sowie die Darstellungsdimension der Technik und ihre Platzierung/Orientierung im 3D-Raum. Eine Prinzip-Skizze verdeutlicht die Technik. In dieser muss deutlich werden wie die Technik im 3D-Raum ausgerichtet wird. Bei Bedarf erfolgt eine kurze Beschreibung der Skizze. Abschließend wird die Ausprägung der Visualisierungstechnik für die Ebenen VMS, AMS und MFM festgehalten.

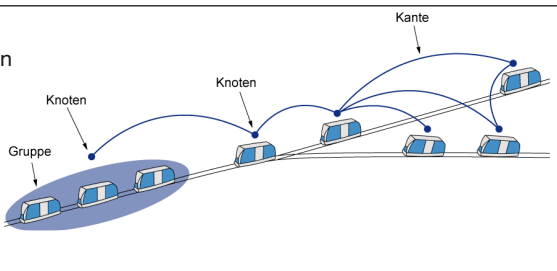
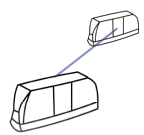
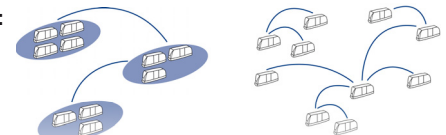
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Visuelle Netzwerke, Kommunikationslinien		Primär-VT: Visuelle Netzwerke	
Erfüllung der VA: Verbindungslinien zeigen Kommunikationswege, die Knoten die kommunizierenden Komponente			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregel	Darstellungsdimension
1	Datenübertragung: auf Linie Sender/Empfänger: auf Position	Regel Nr.: 6, 10, 21, 30, 32	3-dimensional, Linie im 3D-Raum
<p>Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Das visuelle Netzwerk beschreibt die Wirkweise zwischen vernetzten Systemkomponenten oder Verbänden. Die Kanten zeigen die Kommunikation (Relation), die Knoten die kommunizierenden Komponenten. Gruppen von Komponenten werden zusätzlich hervorgehoben. Werden die Kanten durch gestrichelte Linien animiert, zeigen sie das Verhalten (Kommunikation zur Laufzeit) an. Nicht animierte Linien zeigen die Kommunikations-Struktur an.</p> 			
Ausprägungen für Bereiche des Kontinuums			
MFM: nicht relevant	AMS: 	VMS: 	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			

Bild 5-10: Visualisierungstechnik im Steckbrief dokumentieren

Als nächstes werden alle restlichen Visualisierungsaufgaben und Daten mit Sekundär-Visualisierungstechniken verknüpft. Sie sind vom System und dem eingesetzten KI-Verfahren abhängig. Dies sind z.B. auftretende Kräfte – dargestellt durch Kraftpfeile – oder Reglerparameter – dargestellt mittels Text. Deren Ermittlung erfolgt analog zur Ermittlung der Primär-Visualisierungstechniken: Sie werden aus der Auswahlmatrix

und mit Hilfe der Steckbriefe ausgewählt. Dies erfolgt so lange, bis alle Visualisierungsaufgaben erfüllt sind.

Dieser Schritt ist durch VR-Experten und Entwickler des mechatronischen Systems gemeinsam zu bearbeiten. Dadurch wird den Entwicklern frühzeitig deutlich, was sie bei der Darstellung in VR erwartet. Erst in diesem Schritt kann sich z.B. herausstellen, dass den Entwicklern in der ersten Phase eine relevante Analyseaufgabe entgangen ist. Dies kann an dieser Stelle korrigiert werden.

5.3.2 Präsentation der Visualisierungstechnik in VR festlegen

In diesem Arbeitsschritt wird die Präsentation der Visualisierungstechnik in VR festgelegt. Das gesamte Erscheinungsbild der VR-Anwendung, mit allen ihren 3D-Modellen und 2D-Visualisierungstechniken wird arrangiert. Hierzu sind die Erscheinung und das Verhalten einer Visualisierungstechnik sowie die Interaktion mit derselben festzulegen. Zur Festlegung der Präsentationsart wird die Klassifikation aus Kap. 4.7 eingesetzt. Der VR-Experte muss den Entwicklern des mechatronischen Systems einen Vorschlag erarbeiten, weil dieser über das notwendige Fachwissen für diese Aufgabe verfügt.

Die Präsentation der Visualisierung wird im Steckbrief dokumentiert (Bild 5-11).

Präsentation der Visualisierungstechnik in VR		
<p>Erscheinung: Die Kanten zwischen den Systemkomponenten erscheinen automatisch, wenn eine Komm. eingeleitet wird. Sie wird bei Beendigung der Komm. ausgeblendet.</p>	<p>Verhalten: Die Geschwindigkeit und Richtung der Kommunikation wird durch animierte gestrichelte Linien dargestellt. Bei Unterbrechung der Komm. bleibt die Animation stehen. Zur Verdeutlichung eines Fehlers werden die Linien zudem rot gefärbt.</p>	<p>Interaktion: Durch Selektion einer Kante können weitere Informationen zur Komm. abgerufen werden. Dies kann die Anzahl und Art der Nachrichten sein. Diese werden dann in einem zusätzlichen HUD dargestellt.</p>
<p>Implementierungsaufwand: hoch</p>	<p>Sonstige Bemerkungen: Die Beschaffenheit der Kanten repräsentiert unterschiedliche Daten / Arten der Kommunikation. Dazu sei auf die visuelle Grammatik visueller Netzwerke verwiesen (Kap. 5.6.2).</p>	

Bild 5-11: Präsentation der Visualisierungstechnik dokumentieren

5.4 Phase 4: Implementierung und Integration der Visualisierungstechnik in eine VR-Anwendung

In der vierten Phase erfolgt die Umsetzung und Integration der Visualisierungstechniken in die VR-Anwendung⁴⁸. Die VR-Anwendung wird vorbereitet, die Visualisierungstechniken integriert und konfiguriert. Zudem sind die *Struktur und das Verhalten des virtuellen Prototyp in VR* abzubilden, das *Verhalten der Informationstechnik abzubilden* sowie der *virtuelle Prototyp mit der Visualisierungstechnik zu verknüpfen*. Das Resultat dieser Phase ist eine prototypisch implementierte VR-Anwendung, die das

⁴⁸ Voraussetzung für diese Phase ist, dass eine Basis-VR-Anwendung mit einer Architektur – wie in Kapitel 4.9 vorgeschlagen – zur Verfügung steht. Auf die Erläuterung zur Implementierung von Basisfunktionen einer VR-Anwendung wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Verhalten des mechatronischen Systems darstellt und in der die entwickelten Visualisierungstechniken integriert sind.

Folgender Bestandteil wird in dieser Phase benötigt:

- **VR-Anwendung (Werkzeugunterstützung)** inkl. Schnittstellen zur Integration von Visualisierungstechniken und deren Kopplung mit Simulationsdaten (Kap. 4.9)

5.4.1 Struktur des virtuellen Prototypen und der Umgebung in VR abbilden

In diesem Schritt wird die virtuelle Umgebung mit 3D-Modellen ausgestattet, die die Gestalt und Umgebung des mechatronischen Systems präsentieren. Hierzu erfolgt die Umsetzung des in Phase 2 spezifizierten Szenengraphen, wofür 3D-Modellierwerkzeuge sowie VR-Frameworks einzusetzen sind. Als Basis wird die Architektur für VR-Anwendungen genutzt, die einem VR-Framework als Vorlage dient. Es wird empfohlen, erst alle statischen Modelle und anschließend die dynamischen Modelle anzulegen, wobei statisch und dynamisch hier bedeutet, dass die Modelle zur Laufzeit des Programms nicht verändert bzw. verändert werden. Das Resultat ist eine VR-Umgebung.

Zur Darstellung der Visualisierungstechniken in der VR-Anwendung werden auch diese an den Szenengraphen geknüpft. Sie werden an letzter Stelle des Szenengraphen gehangen, da sie als letztes Grafikobjekt in der VR-Umgebung gezeichnet werden müssen. So wird sichergestellt, dass sie sich nicht hinter den gestaltbehafteten Modellen verbergen.

5.4.2 Verhalten des virtuellen Prototypen in VR abbilden

Hier werden Simulationsdaten des virtuellen Prototyps, die das Bewegungsverhalten des Grundsystems repräsentieren, mit der VR-Anwendung verknüpft. Dazu werden die Simulationsdaten mit den entsprechenden Daten und 3D-Modellen in der VR-Anwendung gekoppelt. Hier wird im Wesentlichen die SW-Komponente *Repräsentation des mechatronischen Systems* implementiert (siehe Kap. 4.9). Bild 5-12 stellt beispielhaft die Simulation und entsprechende Abbildung des Bewegungsverhaltens in der VR-Anwendung dar.

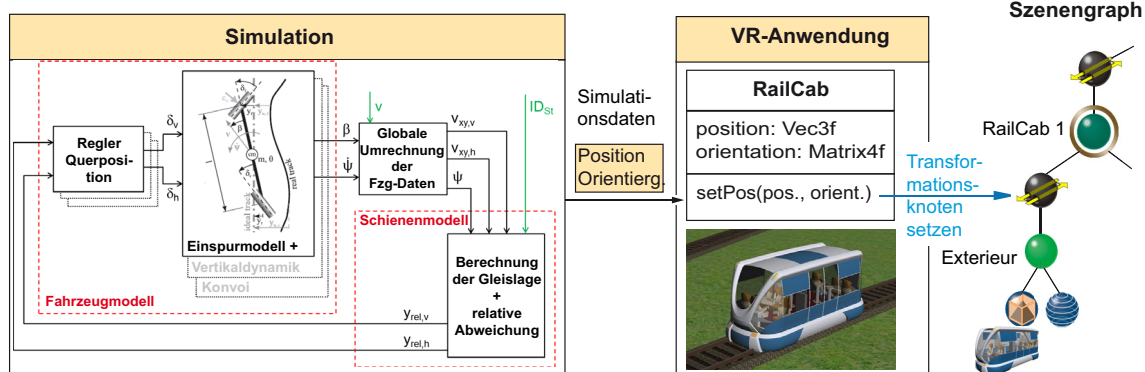


Bild 5-12: Simulationsdaten der Simulation (links) an die VR-Anwendung übertragen und Verhalten des VP in VR abbilden (rechts)

Links im Bild ist eine abstrahierte Darstellung eines Schienen- und Fahrzeugmodells als Blockdiagramm aufgezeigt. Rechts im Bild sind eine VR-Visualisierung und der Szenengraph dargestellt. Die Simulationsdaten werden von der Simulation an die VR-Anwendung übertragen⁴⁹. In der VR-Anwendung werden die Klassenvariablen der Systemkomponenten, die die Bewegung repräsentieren, auf die Werte der Simulationsdaten gesetzt. Die Klassenvariablen werden wiederum im Szenengraphen verwendet, um den Transformationsknoten des entsprechenden 3D-Modells zu berechnen. Ein Transformationsknoten beeinflusst folglich das Bewegungsverhalten des 3D-Modells in der VR-Anwendung. Die Übertragung der Simulationsdaten an die VR-Anwendung muss mindestens mit 25 Hz erfolgen, sodass ein flüssiges Bewegungsverhalten vermittelt wird.

5.4.3 Verhalten der Informationsverarbeitung abbilden

In diesem Schritt werden Simulationsdaten der Informationstechnik, der KI-Verfahren, mit den eingesetzten Visualisierungstechniken verknüpft. Bild 5-13 zeigt dies schematisch am Beispiel der Visualisierung der Kommunikation zwischen RailCabs.

Links ist eine vereinfachte Darstellung der Kommunikation zu sehen (vgl. Kap. 4.2.2). Umgesetzt wird diese durch ein Softwareprogramm. Rechts im Bild ist beispielhaft die Klasse der Visualisierungstechnik *Linie* vereinfacht dargestellt. Sie enthält die generische Definition der zur Darstellung einer Linie erforderlichen Daten. Das Kommunikations-Programm überträgt Daten an die VR-Anwendung. In der VR-Anwendung werden sie mit den entsprechenden Attributen bzw. Funktionen der Visualisierungstechnik verknüpft. Dieser Schritt wird als Mapping bezeichnet.

Des Weiteren wird die Visualisierungstechnik konfiguriert und ihr Verhalten bestimmt. Visualisierungsspezifische Parameter, wie die Farbe, Größe, etc. werden entsprechend den Daten des mechatronischen Systems angeglichen. Zum Beispiel wird das Kommu-

⁴⁹ Zur Übertragung der Daten sind unterschiedliche Methoden geeignet. Dazu kann bspw. eine TCP/IP Verbindung oder CAN Verbindung verwendet werden.

nikationsaufkommen der RailCabs durch eine Animation gestrichelter Linien und auf visuelle Variable Farbe abgebildet. Hier muss die Farbskala dem Kommunikationsaufkommen angepasst und z.B. Schwellwerte eingestellt werden.

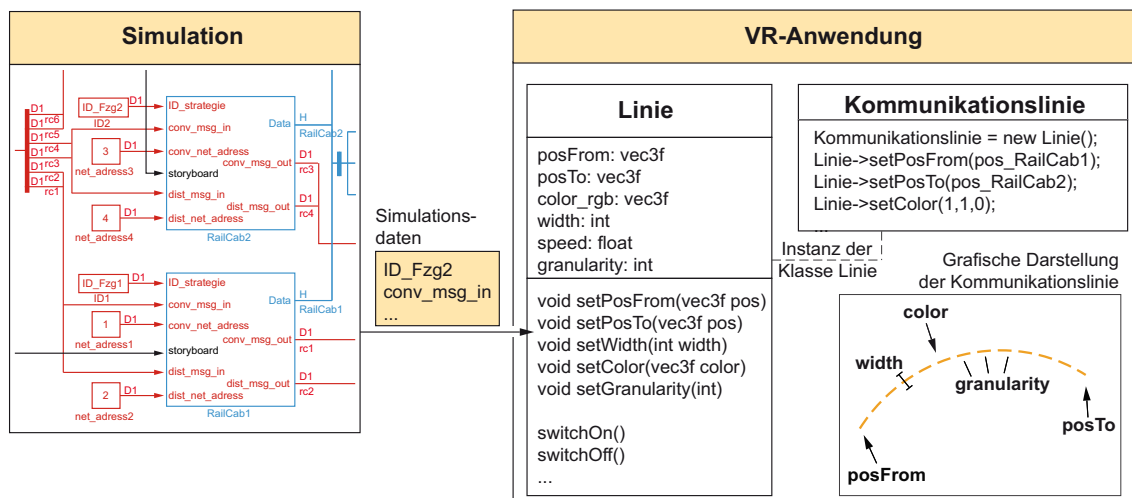


Bild 5-13: Visualisierungstechnik mit Simulationsdaten verknüpfen, konfigurieren und Verhalten definieren

Das Verhalten der Visualisierungstechnik wird dynamisch und fortwährend mit den Simulationsdaten verändert; dazu wird intern eine sogenannte Callback-Funktion genutzt und an den Szenengraphen gebunden. Die Callback-Funktion wird in jedem Rendering-Schritt bei der Traversierung des Szenengraphen aufgerufen.

5.4.4 Virtuellen Prototypen mit der Visualisierungstechnik verknüpfen

An dieser Stelle erfolgt die Verknüpfung zwischen dem 3D-Modell einer mechatronischen Komponente und der Visualisierungstechnik; Bild 5-14 stellt dies dar. Links ist der Szenengraph der virtuellen Umgebung dargestellt, rechts ein Ausschnitt aus der VR-Umgebung. In diesem Beispiel wird eine Linie, die die Kommunikation präsentiert, zwischen zwei RailCabs gesetzt. Die Visualisierungstechnik befindet sich rechts im Szenengraphen, die beiden RailCabs links. Um die Darstellung zu ermöglichen muss die Visualisierungstechnik die Position der RailCabs kennen. Dazu ist eine Verknüpfung zwischen deren Transformationsknoten – diese beschreiben die Position der RailCabs in der Szene – und dem Transformationsknoten der Visualisierung herzustellen.

Als grundlegendes Prinzip gilt, die Position einer Visualisierung stets an die Gestalt eines mechatronischen System und deren Repräsentation im Szenengraph zu knüpfen. Die Gestalt eignet sich, weil diese am anschaulichsten ist. Die Position der RailCabs wird von einer Simulation erzeugt und der VR-Anwendung bereitgestellt. Der VR-Experte kann diese Position ebenfalls nutzen, um die Visualisierung in der virtuellen Umgebung zu platzieren. Es hat sich aber herausgestellt, dass dieses Vorgehen die

Komplexität und den Arbeitsaufwand erhöht. Denn Simulationsprogramme ändern sich im Laufe der Produktentwicklung; neue Eigenschaften kommen hinzu, Fehler werden korrigiert. Daher ändern sich auch die Daten bzw. die Datenkanäle. Werden alle Objekte im Szenegraphen, die die Position eines RailCabs benötigen, mit der Simulation direkt verknüpft, so sind vom VR-Experten alle internen Verknüpfungen anzupassen. Wird stattdessen nur die Gestalt und deren Szenengraphen-Knoten mit der Simulation verknüpft, so muss der VR-Experte nur eine Verbindung ändern. Alle weiteren bleiben erhalten.

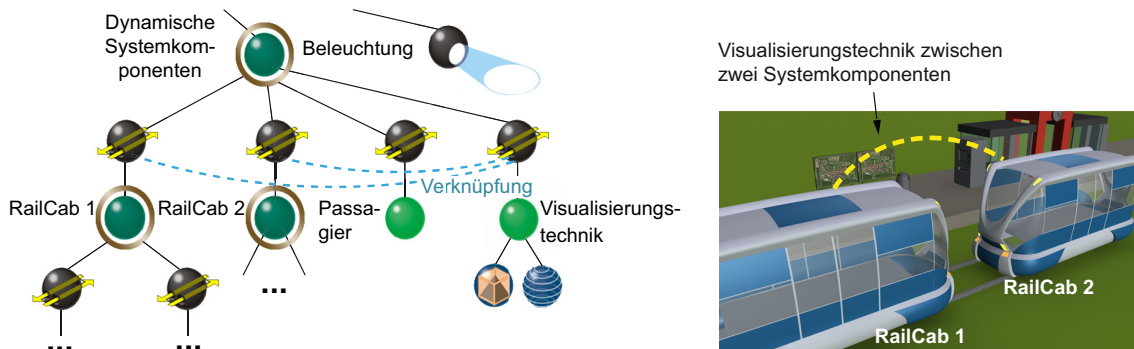


Bild 5-14: links: Visualisierungstechnik mit dem virtuellen Prototypen verknüpfen, rechts: dargestellte Visualisierungstechnik in VR

5.5 Phase 5: Analyse des Systemverhaltens

In der letzten Phase erfolgt die Analyse des mechatronischen Systems. Hier erfolgt die Nutzung der entwickelten Visualisierungstechniken und Navigations- und Selektionstechniken in der VR-Anwendung, die eine explorative Analyse des Systems unterstützen. Das Resultat dieser Phase sind Erkenntnisse, die über das Verhalten des mechatronischen Systems erschlossen werden.

Folgende Bestandteile und Hilfsmittel werden in dieser Phase verwendet:

- **VR-Anwendung (Werkzeugunterstützung)** (vgl. Kap. 4.9)
- Anwendung der **Primär-Visualisierungstechniken** (vgl. Kap. 4.6.1 bis 4.6.5) und **Sekundär-Visualisierungstechniken** (vgl. Kap.4.6.8)
- Bewertung von Visualisierungs- und Interaktionstechniken (vgl. Kap. 4.8)

Die Analyse eines implementierten KI-Verfahrens oder einzelne eingestellte Parameter kann als iterativer Prozess angesehen werden; Im Wesentlichen wird ein Parameter geändert und anschließend visualisiert, um zu überprüfen ob das gewünschte Verhalten erreicht wird. Während einer Visualisierungs- und Analyse Sitzung kann die Methode des *interaktiven Postprocessing* oder die der *Online-Visualisierung* eingesetzt werden (vgl. Kap. 4.9).

Die Techniken zur Bearbeitung der einzelnen Analyseaufgaben entstammen den Methoden der Ingenieurwissenschaften. Die Ingenieure bzw. das gesamte Entwicklerteam hat in der Regel ein Experiment vorbereitet, das am virtuellen Prototyp ausgeführt wird. Die Vorbereitung des Experiments, die Erstellung eines Testplans, dessen Implementierung und die Umsetzung am virtuellen Prototypen wird vom Entwicklerteam vorbereitet und durchgeführt.

Die Entwickler werden an dieser Stelle durch die VR-Anwendung und Navigations- und Selektionstechniken unterstützt. Diese ermöglichen es ihnen, die relevanten Daten auszuwählen sowie die explorative Analyse von Mustern, Wirkweisen und insgesamt des Verhaltens des fortgeschrittenen mechatronischen Systems durchzuführen.

6 Prototypische Umsetzung und Validierung

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Methode zur Entwicklung von Visualisierungstechniken vorgestellt wurde, wird in diesem Kapitel die prototypische Implementierung der VR-Anwendung für die RailCab Beispiele an ausgewählten Visualisierungstechniken beschrieben. Die VR-Anwendung und die enthaltenen Visualisierungstechniken wurden anhand des vorgestellten Vorgehensmodells entwickelt. Folglich dient das Kapitel gleichzeitig zur Validierung der Methode. In Kapitel 6.1 werden die Primär-Visualisierungstechniken an ausgewählten Beispielen vorgestellt. In Kapitel 6.2 werden die relevanten Ergebnisse der Beispiele vorgestellt. Kapitel 6.3 demonstriert den Einsatz der VR-Anwendung an einem hochauflösenden VR-Projektionssystem. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung der Anforderungen dieser Arbeit ab.

6.1 Umsetzung der Primär-Visualisierungstechniken

Zur Validierung der Visualisierungstechniken wurde ein fiktives Anwendungsszenario für die RailCab-Simulation umgesetzt. Dieses umfasst eine virtuelle Umgebung mit einer Größe von 16 km². Sie enthält einen fiktiven Verlauf einer Schienenstrecke (ca. 22 km lang), zwei Bahnhöfe, zwölf Haltepunkte, zwei unterschiedliche Depots und weitere Umgebungsmodelle wie Straßen, Häuser usw.

Mit der VR-Anwendung werden ausgewählte Analyse- und Visualisierungsaufgaben der RailCab Validierungsbeispiele aus dem Kapitel A2.2 bearbeitet. Die Aufgaben sind in Tabelle A-5 bis Tabelle A-7 aufgelistet. Für jede in diesem Kapitel vorgestellte Visualisierungstechnik wird die entsprechend bearbeitete Visualisierungsaufgabe kurz genannt.

6.1.1 Visuelles Netzwerk

Bild 6-1 zeigt die implementierte Primär-Visualisierungstechnik visuelles Netzwerk. In diesem Beispiel verdeutlicht das Netzwerk die örtlichen Ziele von RailCabs. In dem Bild ist ein Überblick des Anwendungsszenarios dargestellt. Zu sehen sind mehrere Häuser und Dörfer, die per Bahnstrecken (braune Linien) miteinander verbunden sind. Die Punkte auf den Linien sind RailCabs; die Vergrößerung zeigt diese im Detail. Die Gesamtheit aller blauen Pfeile bildet das visuelle Netzwerk, wobei eine Linie von einem RailCab aus auf seine Zielstation zeigt. Das Netzwerk erfüllt hier die Visualisierungsaufgabe „Aktuelle Ziele aller RailCabs darstellen“ aus Tabelle A-5.

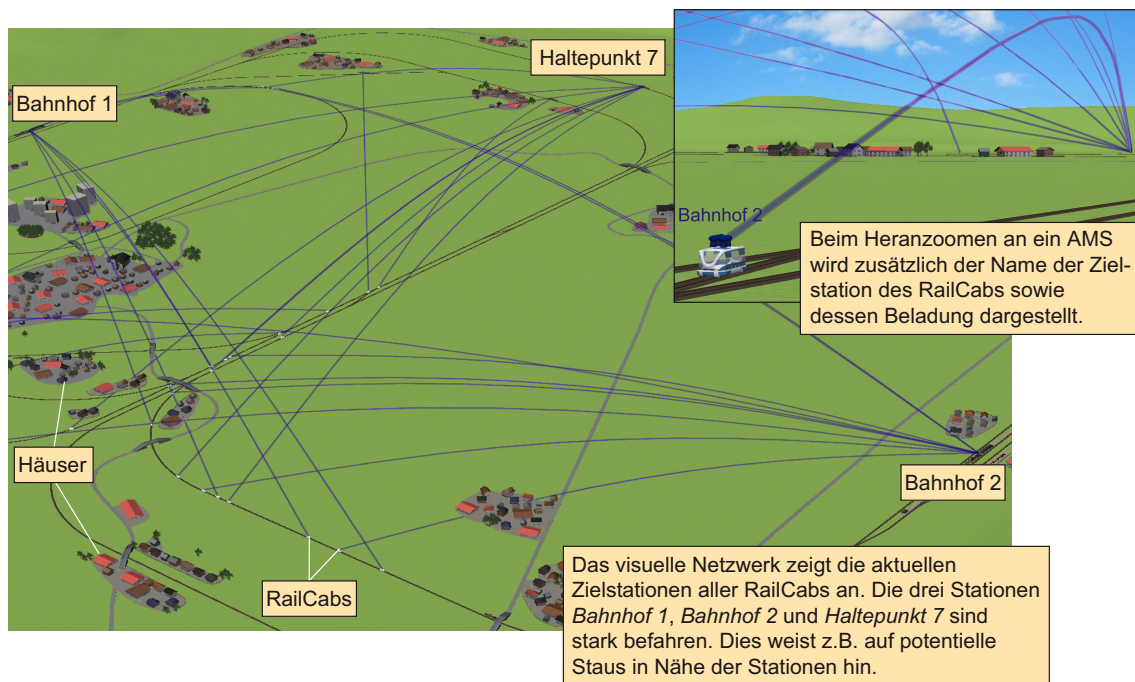


Bild 6-1: Visuelles Netzwerk – Darstellung aktueller Zielstationen aller Fahrzeuge

Das visuelle Netzwerk zeigt den Anwendern, wo sich die RailCabs befinden, wo sie hinfahren und wie weit sie von ihrem Ziel entfernt sind. In dem vermitteln zum Beispiel die vielzähligen, an den Stationen *Bahnhof 1*, *Bahnhof 2* und *Haltepunkt 7* eintreffenden Linien, dass diese Stationen im Moment besonders häufig angefahren werden, allerdings von RailCabs, die auf derselben Strecke unterwegs sind. Daraus lässt sich schließen, dass die Planung nicht optimal verläuft, da ansonsten wenige RailCabs auf einer Strecke alle Passagiere und die Fracht einladen könnten. Ein Stau auf der Strecke, der vor dem Bahnhof auftritt, hätte vermieden werden können.

Zusätzlich ist über einem Pfeil eine Annotation angebracht, die den Namen der Zielstation darstellt. Beim Herauszoomen nimmt die Stärke der Pfeile zu, so dass sie auch aus großer Entfernung sichtbar sind. Zudem können durch die Färbung der Netzwerk-Linien mit verschiedenen Farben die Ziele nach Ankunftszeit kategorisiert werden.

Insgesamt hat der Anwender mit Hilfe des visuellen Netzwerks Überblick über alle aktuell geplanten Ziele der RailCabs. Er kann Rückschlüsse auf das Planverfahren zur Routenplanung sowie die aktuell eingesetzte logistische Betriebsstrategie ziehen. Fahren z.B. alle RailCabs zur gleichen Zielstation, kann dies Staus an den Stationen verursachen. Das System muss solche Staus selbstständig umgehen können.

6.1.2 Farbkarte

Bild 6-2 stellt einen Überblick über das Szenario und die Primär-Visualisierungstechnik Farbkarte dar. Die Farbkarte wird in diesem Anwendungsszenario durch Flächen bzw. Farbbalken dargestellt, die der Form der Schienenstrecke entsprechen. Die Farbkarte repräsentiert unterschiedliche statistische Daten. Im dargestellten Beispiel repräsentiert die Farbkarte die Beladung der RailCabs mit Passagieren.

In dem Beispiel wird der Frage nachgegangen, ob alle RailCabs gleichmäßig mit Aufträgen ausgelastet sind. Es wird die Visualisierungsaufgabe „Überblick über Auslastung aller RailCabs darstellen“ (vgl. Tabelle A-5) adressiert. Die Farbe rot stellt RailCabs dar, die mehr als fünf Passagiere transportieren. Mit gelb werden RailCabs mit zwei bis fünf Passagieren dargestellt, grün kennzeichnet Fahrzeuge mit einem oder keinem Passagier. Die Farbkarte ist rechnerintern als Folge von Gitter-Zellen gespeichert. Zur Darstellung werden auf der Farbkarte für jedes RailCab mehrere Zellen eingefärbt, wobei eine Zelle die Länge von drei Metern aufweist. Während der Fahrt eines RailCabs wird die Zelle über dem RailCab gefärbt, sowie fünf weitere Zellen hinter dem RailCab. Dadurch wird sichergestellt, dass der markierte Bereich der Farbkarte für einen Anwender aus der Entfernung gut sichtbar ist.

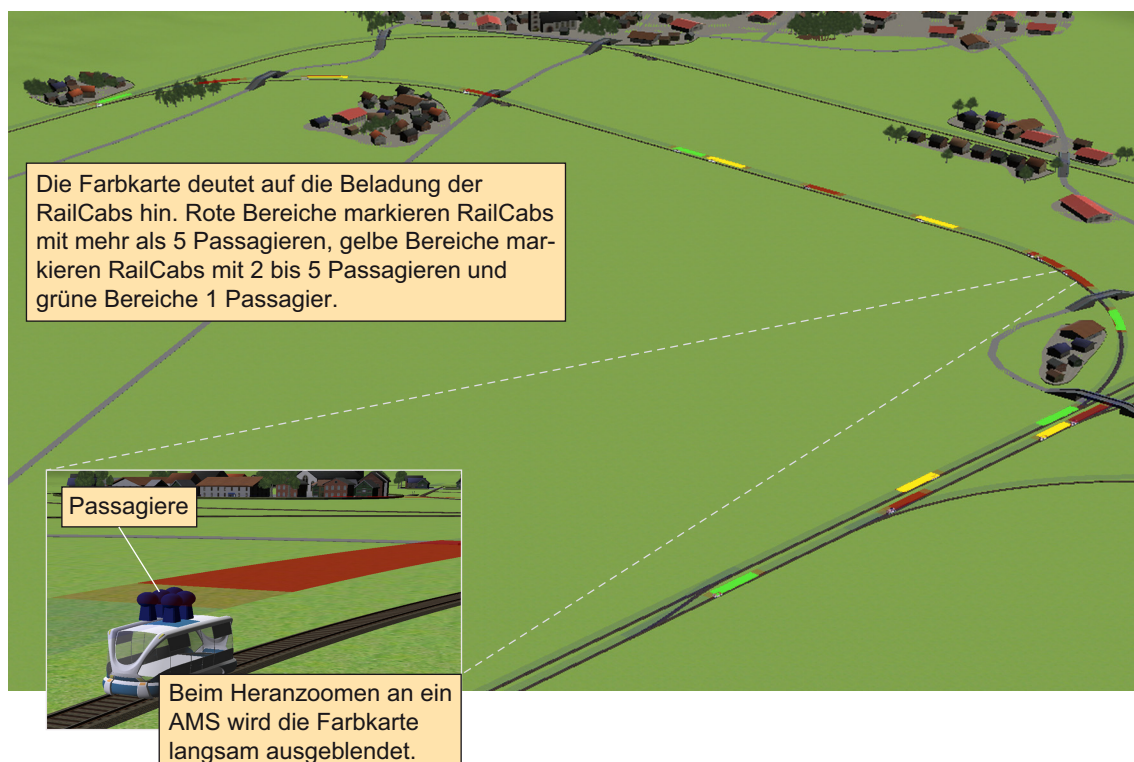


Bild 6-2: Farbkarte – Überblick: Visualisierung statistischer Daten, wie der aktuellen Beladung von RailCabs. Detail: Ausblenden der Farbkarte beim Heranzoomen.

Der vergrößerte Bildausschnitt (unten links) zeigt, wie die Farbkarte ausgeblendet wird, wenn an ein RailCab herangezoomt wird. Die zu analysierenden Daten, wie die Beladung des RailCabs, wird hier durch eine Passagier-Metapher dargestellt.

Mit Hilfe der Farbkarte wird die Aufmerksamkeit des Anwenders auf Streckenabschnitte eines Anwendungsszenarios gelenkt, auf denen viele Passagiere und viel Fracht transportiert werden. Dadurch werden Muster in der Planung deutlich. So kann es z.B. vorkommen, dass die Planungsalgorithmen nach einer Weile konvergieren, wodurch eine einmal eingestellte interne Strategie ständig weiterverfolgt wird. An dieser Stelle ist der Entwickler gefragt. Er muss entscheiden, ob die eingeprägte Planungsstrategie genutzt werden kann oder ob der Planungsalgorithmus weiter optimiert werden muss. Das Beispiel ist auf andere Anwendungsbeispiele übertragbar, in denen ebenfalls Muster erkannt werden sollen.

6.1.3 Semantisches Zoomen

Die Umsetzung der Primär-Visualisierungstechnik semantisches Zoomen wird am Beispiel der Konvoiregelung und -Kommunikation validiert. Abhängig der Zoomstufe werden diejenigen Daten bzw. Informationen dargestellt, die auf der Zoomstufe zu analysieren sind. Das semantische Zoomen bietet Regeln und Funktionalitäten, die für eine Zoomstufe eine geeignete Visualisierungstechnik auswählen und darstellen. Zur Darstellung der Daten werden Primär- und Sekundär-Visualisierungstechniken eingesetzt. Im Folgenden werden die Zoomstufen und die Visualisierungstechniken für das Beispiel vorgestellt. Dazu werden die in Tabelle A-6 aus Kap. A2.2.2 definierten Analyse- und Visualisierungsaufgaben für die Konvoifahrt und Kommunikation aufgegriffen, den vier Zoomstufen zugeordnet und die zu visualisierenden Simulationsdaten definiert. Aus Platzgründen befinden sich die Daten in Tabelle A-9 in Kapitel A2.3.2.

Zoomstufe 1 - VMS global:

Das Bild 6-3 zeigt die erste Zoomstufe. Auf dieser Stufe werden folgende Visualisierungsaufgaben erfüllt: „RailCab-Konvois darstellen“, „Konvoilänge darstellen“, „Potential zur Konvoibildung darstellen“. Zum Überblick der Konvois wird hier die Primär-Visualisierungstechnik Farbkarte (vgl. Kap. 5.6.3) eingesetzt. Diese wird für die Analyse der Konvoifahrt so konfiguriert, dass sie lediglich die Fahrzeug-Positionen des Konvois repräsentiert. Hierbei wird die Farbe blau zur Repräsentation einer RailCab-Position verwendet. Befinden sich viele RailCabs hintereinander, erzeugt dies einen langen blau markierten Bereich auf der Schienenstrecke.

Mit Hilfe dieser Darstellung sieht ein Anwender, wo sich aktuell Konvois bilden könnten: Bei langen Markierungen weiß der Betrachter, dass jetzt ein Konvoi gebildet werden kann. An dieser Stelle ist der Entwickler gefragt, der über das Verhalten der RailCabs urteilen muss. Bilden diese einen Konvoi, so kann das an dieser Stelle gewünscht sein. Allerdings kann dies ebenso nicht gewünscht sein, wenn sich die

RailCabs z.B. direkt vor einem Bahnhof befinden und ein RailCab den Konvoi in Kürze wieder verlassen wird.

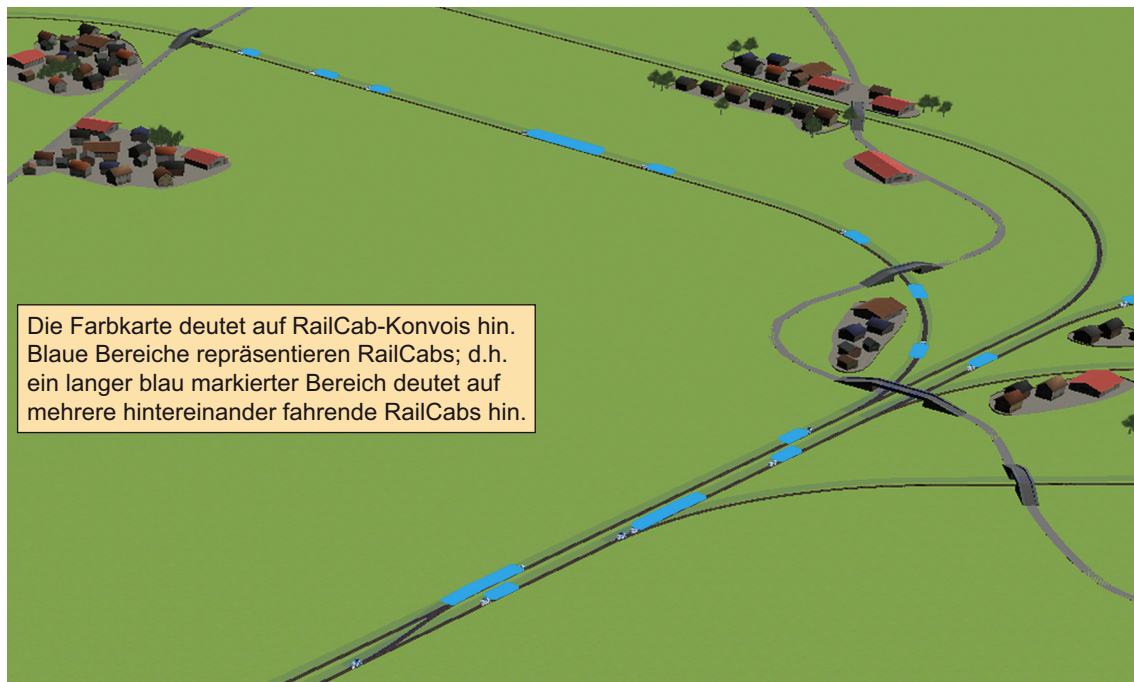


Bild 6-3: Zoomstufe 1, VMS global: Farbkarte gibt Aufschluss über aktuelle Konvoi-Position und ihre Länge. Die Farbe der Farbkarte erzeugt eine Aufmerksamkeitslenkung auf Streckensegmente mit Konvois.

Insgesamt werden mit Hilfe der Farbkarte auf der ersten Zoomstufe auf Anrieb Konvois erfasst bzw. mögliche Konvois identifiziert. Konvois in einem großen Szenario zu erkennen hat folgenden Vorteil: Werden z.B. verschiedene Betriebsstrategien für die Logistik oder Planungs-Verfahren entwickelt, so wird auf Anrieb festgestellt, ob mit der entsprechenden Strategie Konvois gebildet werden und wie häufig diese vorkommen.

Für weitere Informationen zu einem potentiellen Konvoi zoomt ein Anwender auf die nächste Zoomstufe. Die Farbkarte wird ausgeblendet und die Visualisierungstechniken der nächsten Stufe automatisch eingeblendet.

Zoomstufe 2 – VMS lokal:

Die Stufe VMS lokal (mehrere Konvois) gibt Überblick über einen ausgewählten Bereich eines Szenarios. Die Visualisierungsaufgaben auf dieser Stufe sind: „Konvois darstellen“, „Anzahl der Fahrzeuge im Konvoi darstellen“, „Konvoibildungs- und Auflösungsprozess darstellen“, „Entscheidung eines Fahrzeugs darstellen, sich einem Konvoi anzuschließen“ und „Wirkbeziehungen zwischen Konvois und Fahrzeugen darstellen“.

Das Bild 6-4 zeigt einen Konvoi und ein weiteres Fahrzeug hinter diesem. Fahrzeuge, die sich im Konvoi befinden (die Zustände Konvoi-Bildung, Konvoi-Auflösung oder Konvoifahrt haben), werden mit einem Oval eingerahmt, das ähnlich der Farbkarte auf der ersten Zoomstufe (VMS global) die Farbe blau hat. Auf diese Weise bleibt der Be-

zug zur vorherigen Stufe bestehen. Sind mehrere Konvois in der Ansicht vorhanden, so sind diese durch das blaue Oval identifizierbar. Hinter dem Konvoi befindet sich ein Fahrzeug, das sich potentiell an den Konvoi anschließen kann. Der Abstand wird durch eine gelbe Linie dargestellt. Die Linie an sich heißt, dass ein notwendiger Abstand zur Einleitung der Konvoibildung unterschritten ist. Um sich jedoch dem Konvoi anzuschließen, muss das Fahrzeug den Konvoi darüber informieren: Es kommuniziert dazu mit dem Konvoi-Führungsfahrzeug. Das Führungsfahrzeug ist mit der visuellen Metapher eines 3D-Hütchens gekennzeichnet. Die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen wird durch eine gestrichelte, animierte Linie dargestellt. Die Bewegungsrichtung der animierten Linie zeigt die Kommunikationsrichtung an, d.h. die Daten werden von Sender zu Empfänger übertragen. Sobald in die nächste Stufe gezoomt wird, wird das blaue Oval ausgeblendet.

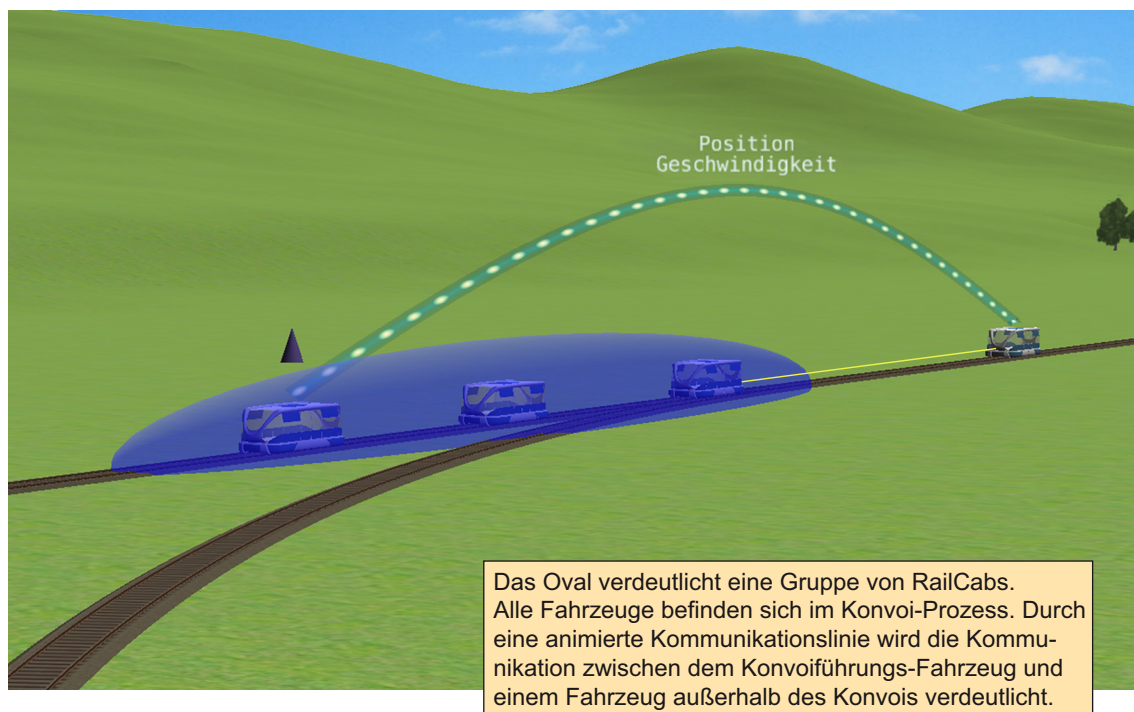


Bild 6-4: Zoomstufe 2, VMS lokal (mehrere Konvois): Visualisierungstechniken geben Aufschluss über aktuelle(n) Konvoi(s) (Verbund von Fahrzeugen), Potentielle Konvois oder Kommunikation zwischen Fahrzeugen o. Konvois.

Durch die Darstellung im Beispiel erkennt ein Anwender, ob ein folgendes RailCab das erwartete Verhalten aufzeigt: Schließt es sich an oder nicht? Was richtig bzw. erwartet ist, muss der Entwickler entscheiden. Die Visualisierung zeigt diesem, ob – angenommen das folgende RailCab soll sich dem Konvoi anschließen – die dafür notwendigen Voraussetzungen (Folgeabstand, Kommunikation) erfüllt werden.

Da ab dieser Stufe bereits nur ein Ausschnitt des Szenarios sichtbar ist, kann es vorkommen, dass die Konvoimanöver und andere Ereignisse außerhalb des aktuellen Ansichtsfensters versäumt werden. Um diesem entgegenzuwirken, wird mit Hilfe sogenannter

nannter kleiner Datenlinsen am Bildschirmrand über alle aktuellen Konvois informiert. Die Technik dient dem Hinweis und Aufmerksamkeitslenkung auf Ereignisse. Sie wird im Steckbrief in Bild A-27 näher erläutert.

Zoomstufe 3 - AMS (Wirkbeziehungen in einem Konvoi):

Auf dieser Stufe werden einzelne RailCabs eines Konvois dargestellt. Dadurch wird der Konvoi-Bildungsprozess, die Konvoifahrt oder der Auflöseprozess beobachtbar. Zudem werden die kommunizierten Daten zwischen den am Konvoi beteiligten Fahrzeugen angezeigt. Folgende Visualisierungsaufgaben werden hier erfüllt: „Bewegungsverhalten der Fahrzeuge darstellen“, „Prozess der Konvoibildung darstellen“, „Abstand (Wirkbeziehung) zwischen Fahrzeugen darstellen“, „Kommunikationsaufbau und -daten darstellen“, „Wirkbeziehung zwischen Fahrzeugen darstellen“ und „Zustände des Konvoi-Prozesses darstellen“ (vgl. Tabelle A-6).

Das Bild 6-5 stellt ein Beispiel mit drei Fahrzeugen dar, die einen Konvoi bilden. Zur Darstellung des Abstands zwischen den Fahrzeugen werden Linien eingeblendet. Die Einfärbung der Linien gibt Aufschluss darüber, ob die RailCabs einen kritischen Sicherheitsabstand einhalten. Ein kritischer Abstand wird als rote, ein unkritischer Abstand als grüne Linie dargestellt. Die Kommunikation wird mit Hilfe einer gestrichelten, animierten Linie angezeigt. Eine Annotation an dieser Linie verdeutlicht, welche Art von Daten übertragen wird.



Bild 6-5: Zoomstufe 3, AMS (ein Konvoi): Visualisierungstechniken geben Aufschluss über Informationen, die innerhalb eines Konvois ausgetauscht werden: Abstände, Position und Geschwindigkeit

Durch die Darstellung wird erkennbar, ob ein Konvoi stabil ist, d.h. ob der Abstand zwischen den RailCabs (beinahe) konstant bleibt, oder ob dieser z.B. zwischen kritisch und unkritisch alterniert. Ein Grund hierfür kann eine gestörte Kommunikation sein. Die Kommunikation bzw. die dafür notwendigen Kapazitäten werden zwischenzeitlich auch von anderen Komponenten eines RailCabs genutzt. Führt z.B. eine weitere Kommunikationslinie, die zwischenzeitlich auftritt, zu einem kritischen Abstand, dann hat der Entwickler ein Problem identifiziert.

Auf derselben Zoomstufe kann nach Wunsch des Anwenders der Zustand des Konvois einblendend werden. Der Konvoi kann die drei Zustände Bildung, Folgefahrt und Auflösung einnehmen (vgl. Bild 6-7). Sie werden durch Einfärbung der Fahrzeuge angezeigt. Blau symbolisiert Fahrzeuge im Zustand Konvoifahrt. Orange kennzeichnet Fahrzeuge, die gerade einen Konvoi bilden und grün repräsentiert Fahrzeuge, die sich vom Konvoi lösen. Die Farbe ist als visuelle Variable geeignet, da Zustände vom Datentyp *Kategorie* sind. Eine Legende am Bildschirmrand erläutert die Bedeutung der Farben.

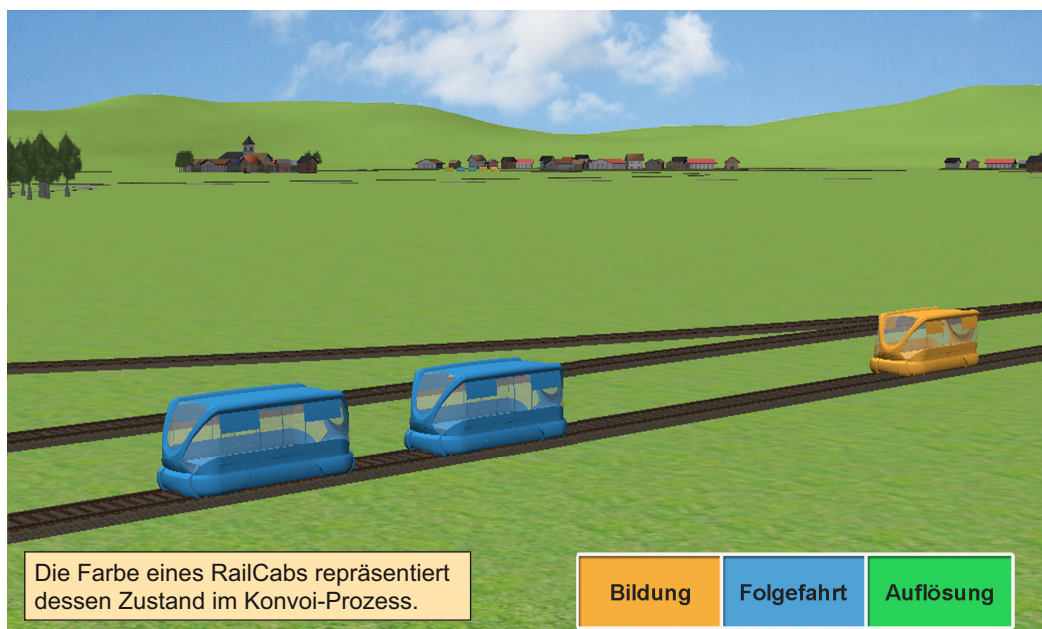


Bild 6-6: Zoomstufe 3, VMS lokal (ein Konvoi): Konvoizustände einzelner Fahrzeuge

Durch die Darstellung kann ein Anwender die Zustände einzelner Fahrzeuge zur Laufzeit schnell erfassen und den Konvoibildungs-Prozess auf Korrektheit und die Güte überprüfen. Wechselt z.B. ein Fahrzeug fortlaufend seine Farbe zwischen orange und blau, deutet dies auf eine instabile Abstandsregelung hin. Der Anwender muss in diesem Fall dem Grund nachgehen und Regelparameter anpassen.

Zoomstufe 4 - AMS/MFM (ein Fahrzeug):

Auf dieser Stufe werden Daten und Entscheidungsfindungen eines einzelnen Fahrzeuges dargestellt. Hier werden folgende Visualisierungsaufgaben bearbeitet: „Bewegungs-

verhalten eines Fahrzeugs darstellen“, „Konvoi-Zustände eines Fahrzeugs darstellen“ und „Systemgrößen (z.B. Geschwindigkeit) darstellen“.

Bild 6-7 zeigt ein RailCab und weitere Informationen auf einem Head-Up-Display an. Dazu wird auf dieser Stufe bei Bedarf ein Fahrzeug selektiert, woraufhin zu diesem nähere Informationen angezeigt werden:



Bild 6-7: Zoomstufe 4, AMS/MFM: Konvoizustände einzelner Fahrzeuge und (optional) zusätzliche Informationen bei Selektion

Die Informationen sind zum einen Systemparameter oder Systemgrößen wie z.B. die SOLL- und IST-Geschwindigkeit. Zum anderen werden die Konvoi-Zustände des Fahrzeugs dargestellt. Auf dieser Stufe werden sie mit Hilfe eines Zustandsdiagramms präsentiert, weil nur ein RailCab betrachtet wird. Der aktuell aktive Zustand wird in dem Zustandsdiagramm hervorgehoben. Im Bild befindet sich das RailCab zur Zeit im Zustand „kein Konvoi“. Die Darstellung der Zustände mit Hilfe eines Zustandsdiagramms ist für einen Ingenieur geeignet, da sie für diesen gewohnt ist. Sie ist allerdings nur auf der Ebene AMS/MFM einzusetzen, da sie auf den anderen Ebenen bei Darstellung mehrerer Fahrzeuge unübersichtlich wird.

Der semantische Zoom ist mit Hilfe der Level-of-Detail(LOD)-Technik (siehe NH04, S. 306ff.) umgesetzt. Anstelle auf den einzelnen Zoomstufen unterschiedliche Detaillierungsgrade von 3D-Modellen zu präsentieren, wird von Zoomstufe zu Zoomstufe zwischen Visualisierungstechniken gewechselt, die für den jeweiligen Zoom aufbereitet sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die LOD-Technik zudem durch ein regel-basiertes Entscheidungssystem erweitert, das die Wichtigkeit eines Ereignisses bewertet und folglich eine geeignete Visualisierungstechnik auswählt. Der Ansatz wird am Beispiel des am Heinz Nixdorf Institut entwickelten Miniroboters BeBot beschrieben in [WR12].

6.1.4 Fokus und Kontext – Datenlinse

In diesem Abschnitt wird die Primär-Visualisierungstechnik Fokus und Kontext - Datenlinse anhand zwei verschiedener Einsatzmöglichkeiten vorgestellt. Die Datenlinse dient zur Unterstützung der ebenen-übergreifenden Analyse: Der Anwender kann aus einer weit entfernten Zoomstufe auf Daten einzelner Fahrzeuge zugreifen. Der Vorteil der Linse ist, dass der Überblick über das aktuell zu analysierende Szenario behalten wird. In Bild 6-8 wird die Vergrößerungs-Funktion der Datenlinse genutzt. Zu sehen sind mehrere RailCabs, die auf eine Weiche zufahren. Ohne die Datenlinse sind die Fahrzeuge kaum erkennbar. Durch die Linse kann jedoch ein einzelnes RailCab analysiert werden. Sollte es beim Einfädeln in einen Konvoi mit einem weiteren RailCab kollidieren, ist dies mit Hilfe der Linse erkennbar.

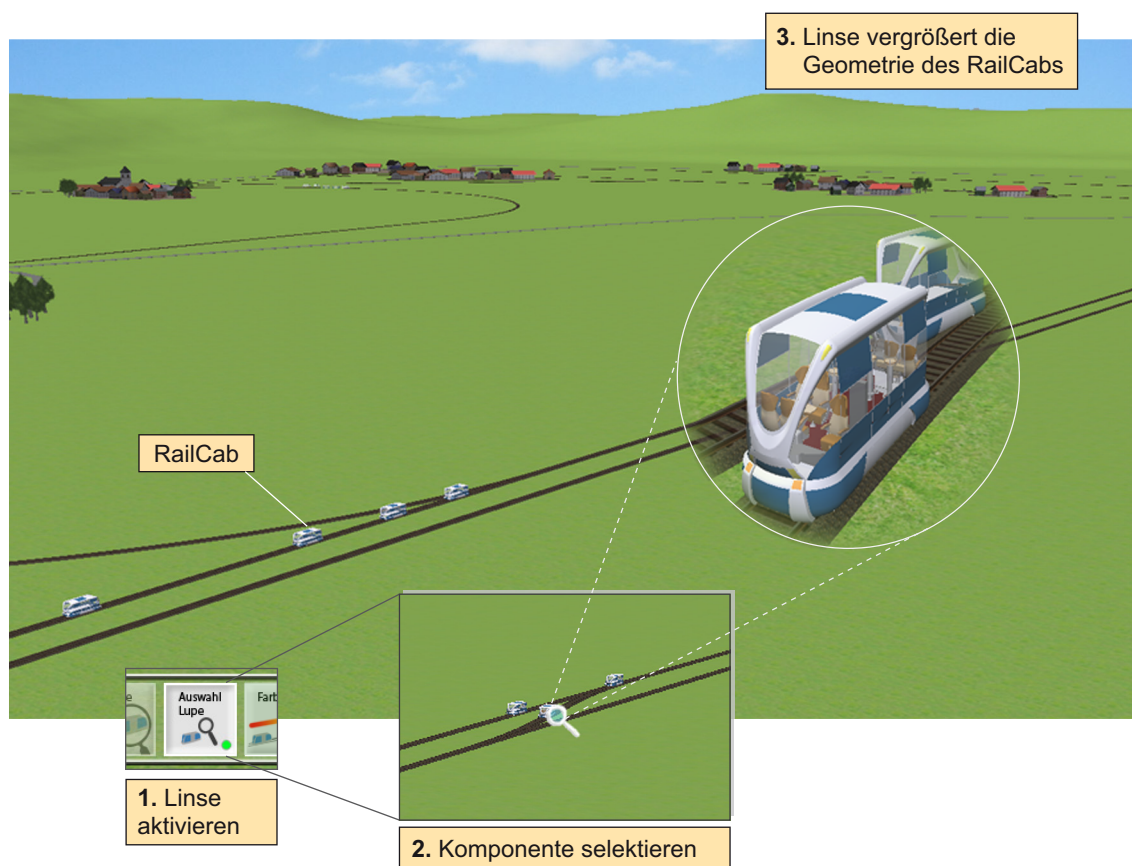


Bild 6-8: Fokus und Kontext – Datenlinse: Vergrößerung eines sich bewegenden RailCabs

Die Linse kann nur für aktive Modelle (bzw. Systemkomponenten) angewandt werden. Aktive Modelle repräsentieren am Gesamtsystem beteiligte Systemkomponenten, die ein Verhalten aufweisen, wie z.B. das Bewegungsverhalten oder das Erfüllen informationsverarbeitender Funktionen. Dies sind Komponenten, wie Depots, Bahnhöfe oder RailCabs (vgl. Kap. 4.2.1). Passive Modelle sind dagegen Bäume oder Häuser. Durch Vergrößerung von aktiven Modellen bzw. Systemkomponenten wird verhindert, dass eine zu analysierende Komponente durch störende Umgebungsmodelle verdeckt wird.

Wird eine Systemkomponente zur Vergrößerung selektiert, wird deren Position von der Vergrößerungslinse „verfolgt“, so dass die Komponente stets in der Linse sichtbar bleibt⁵⁰.

Das Bild 6-9 zeigt den Einsatz der Datenlinse zur Vergrößerung und zusätzlich dem Einblenden von zu analysierenden Systemgrößen (abstrakte Daten). Im vorliegenden Beispiel sind es die Beladung des RailCabs mit Passagieren und die aktuelle Geschwindigkeit. Der Anwender kann während der Analyse des gesamten Szenarios bei Bedarf solche Systemgrößen überwachen.

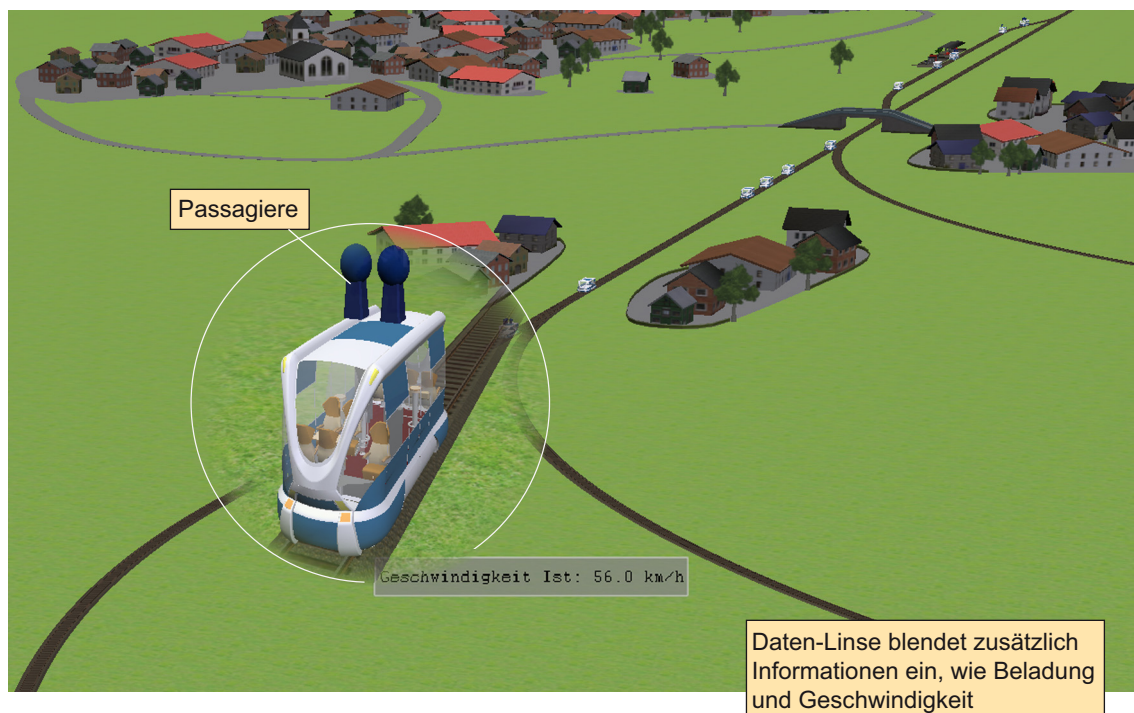


Bild 6-9: Datenlinse: Vergrößerung des RailCabs und zusätzliches Einblenden von Systemgrößen

6.2 Umsetzung der Validierungsbeispiele

Im Folgenden wird eine Auswahl der realisierten Visualisierungstechniken vorgestellt, die die Analyse- und Visualisierungsaufgaben der vorgestellten Validierungsbeispiele unterstützen. In allen Beispielen werden sowohl die Primär- als auch Sekundär-Visualisierungstechniken in unterschiedlichem Umfang und unterschiedlichen Ausprägungen eingesetzt. Zu jedem Validierungsbeispiel werden die implementierten Visualisierungstechniken an einer Auswahl Screenshots erläutert. Es wird erklärt wie diese bei

⁵⁰ Hierzu muss der Knoten im Szenengraphen, der die vergrößerte Darstellung (Linse) repräsentiert, als sogenannte *Follower-Node* definiert werden. Dieser bietet die Funktion zur Verfolgung eines beliebigen definierten Knotens. Zur Laufzeit wird das selektierte zu vergrößernde Objekt als zu verfolgender Knoten definiert [Ope-ol].

der Analyse eines entsprechenden KI-Verfahrens und des Systemverhaltens behilflich ist.

Alle Visualisierungstechniken sind als Software-Bibliothek in einer VR-Anwendung realisiert. Auf diese wird in Abhängigkeit vom Validierungsbeispiel zurückgegriffen.

Bei der Umsetzung der Validierungsbeispiele wurde ebenfalls das in Kapitel 6.1 beschriebene Anwendungsszenario eingesetzt.

6.2.1 Logistiksimulation

In diesem Abschnitt wird die Darstellung der Logistiksimulation⁵¹ in der VR-Anwendung und die damit erzielten Ergebnisse vorgestellt. Es werden die entwickelten Visualisierungstechniken für die Analyse- und Visualisierungsaufgaben aus Tabelle A-5 beschrieben. Eine Auflistung der Simulationsdaten befindet sich in Tabelle A-8 des Kapitels A2.3.1. In diesem Beispiel werden die Primär-Visualisierungstechniken visuelles Netzwerk und Farbkarte und die Sekundär-Visualisierungstechniken für Systemgrößen, Systemparameter, Ereignisse, Entscheidungsvorgänge, Aufmerksamkeitslenkung und interaktives Abrufen von Informationen genutzt.

Eine grundlegende Frage bei der Auslegung der Logistiksimulation ist: Welche Auswirkung hat die Infrastruktur der Schienenstrecke auf die Güte des Transports? Durch die Infrastruktur wird eine optimale Verteilung von Bahnhöfen, Depots und der Anzahl der Fahrzeuge für ein Anwendungsszenario bestimmt. Das Bewegungsverhalten der RailCabs in der VR-Anwendung wird anhand der Daten aus der Logistiksimulation gesteuert.

In Bild 6-10 und Bild 6-11 sind Visualisierungstechniken dargestellt, mit denen untersucht wird, wann und wo Ereignisse bzw. Vorgaben einer höheren Ebene eintreten, die Auswirkung auf das Systemverhalten haben. Dies erfolgt am Beispiel der Auftragsvergabe; sie gehört zur Visualisierungsaufgabe „Vorgaben/Ereignisse darstellen“. Eine wesentliche Aufgabe der Logistiksimulation ist die Verwaltung und Vergabe von Aufträgen an die RailCabs. Diese erfolgt durch ein Auftragsverwaltungssystem im kognitiven Operator des OCM. Zu Anfang eines Simulationslaufs befinden sich alle RailCabs im Depot. Sobald Passagiere am Bahnhof eingetroffen sind, werden vom Bahnhof RailCabs im Depot kontaktiert und die eingetroffenen Aufträge an diese verteilt (Disposition), wobei ein Auftrag mit einem oder mehreren Passagieren assoziiert ist. Im Bild ist dargestellt, wie ein Bahnhof mit den im Depot wartenden RailCabs und RailCabs in Nähe des Bahnhofs kommuniziert.

⁵¹ Die Implementierung der VR-Anwendung zur Darstellung der Logistiksimulation erfolgte im Rahmen der von mir betreuten Bachelorarbeit „Visualisierungstechniken zur Analyse der Logistiksimulation des Schienenverkehrssystems RailCab“ von B.Sc. P. Arend [Are11].

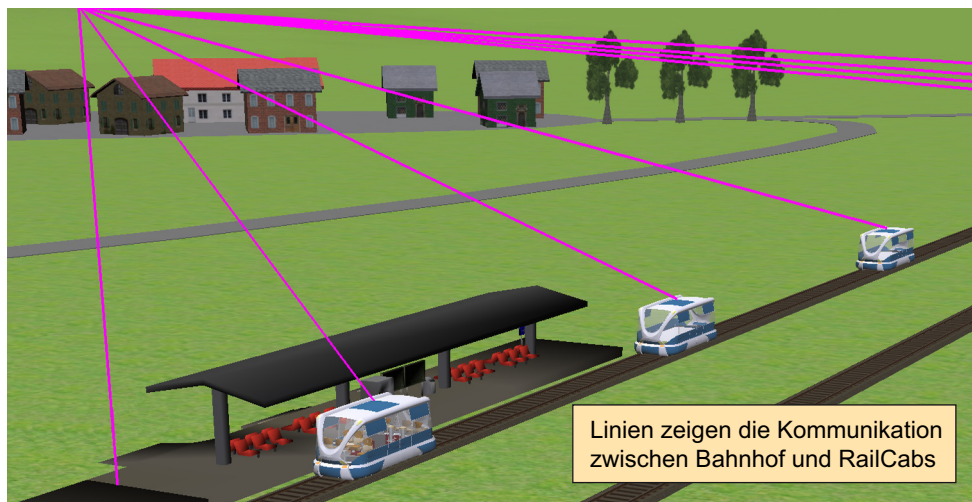


Bild 6-10: Kommunikation zwischen Bahnhof und RailCabs zur Auftragsvergabe

Bei Zustimmung eines RailCabs zum Auftrag wird der Auftrag dem RailCab zugewiesen. Bild 6-11 verdeutlicht dies. Ein Passagier wird durch ein vereinfachtes blaues Männchen (visuelle Metapher) dargestellt, das als 3D-Objekt über dem RailCab platziert ist. Um den Anwender auch aus weiter Entfernung auf den Eingang eines Auftrags aufmerksam zu machen, wird ein visueller Effekt verwendet, der das 3D-Modell des Passagiers kurzzeitig vergrößert darstellt und dann auf das RailCab platziert. Die Bildfolge von links nach rechts stellt den Effekt dar.



Bild 6-11: Zuweisung eines Auftrags an ein RailCab.

Bild 6-12 stellt die Beladung der RailCabs mit Passagieren während ihrer Fahrt dar. Hier wird die aktuelle Beladung eines RailCabs untersucht. Die Anzahl der 3D-Objekte repräsentiert die Anzahl der Passagiere eines RailCabs. Wird von einem RailCab weiter rausgezoomt, werden die Passagiere skaliert sodass sie auch vom Weiten zu erkennen sind. Ein Überblick auf der Ebene VMS über die Beladung aller RailCabs im Szenario wurde bereits in Bild 6-2 mit Hilfe der Farbkarte dargestellt.

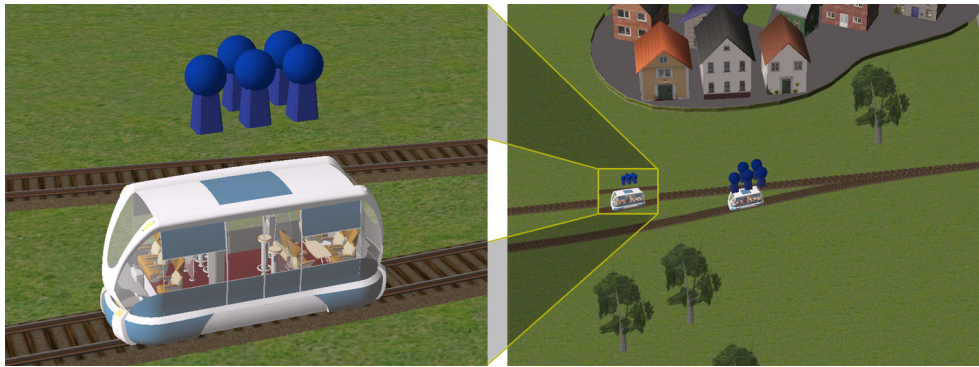


Bild 6-12: Passagiere (Auftrag) eines RailCabs

Durch die Darstellung der Passagiere ist ein Anwender in der Lage, den Transport während des gesamten Simulationslaufs zu beobachten und nachzuvollziehen.

Bild 6-13 stellt die Wartezeiten einzelner Passagiere am Bahnhof dar. Die Farbe entspricht der Wartezeit und wird abhängig von dieser verändert: Dabei repräsentiert grün eine kurze Wartezeit und rot eine lange Wartezeit. Der Anwender wird über eine Farblegende am Bildschirmrand über die Bedeutung der Farben informiert.

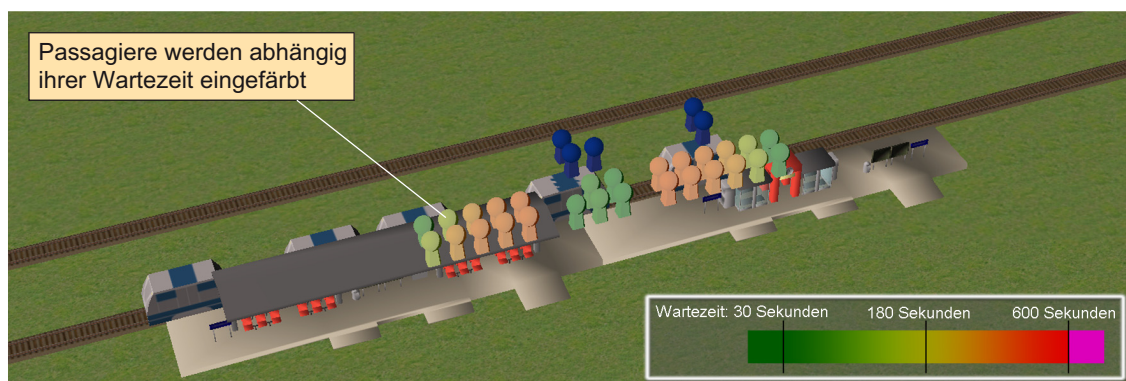


Bild 6-13: Wartende und neu eintreffende Passagiere am Bahnhof; abhängig der Wartezeit werden die Passagiere eingefärbt

Durch die Darstellung der Wartezeit kann ein Anwender entscheiden, ob das aktuell eingesetzte Verfahren zur Auftragsvergabe die Aufträge erwartungsgemäß vergeben kann. Auch kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob genügend Fahrzeuge im aktuellen Szenario eingesetzt werden. Wartet z.B. die Mehrheit aller Passagiere länger als eine definierte Frist, empfiehlt es sich, die Auftragsverwaltung oder die Anzahl der Fahrzeuge anzupassen.

Zu jedem der RailCabs und der Passagiere können zudem während der Fahrt statistische Informationen abgerufen werden. Hier werden die Visualisierungsaufgaben „Informationen eines RailCabs/Passagiers darstellen“ und „statistische Auswertungen eines RailCabs/Passagiers darstellen“ bearbeitet. Bild 6-14 verdeutlicht die Darstellung von Informationen und statistischer Daten eines Passagiers (links) und eines RailCabs (rechts).

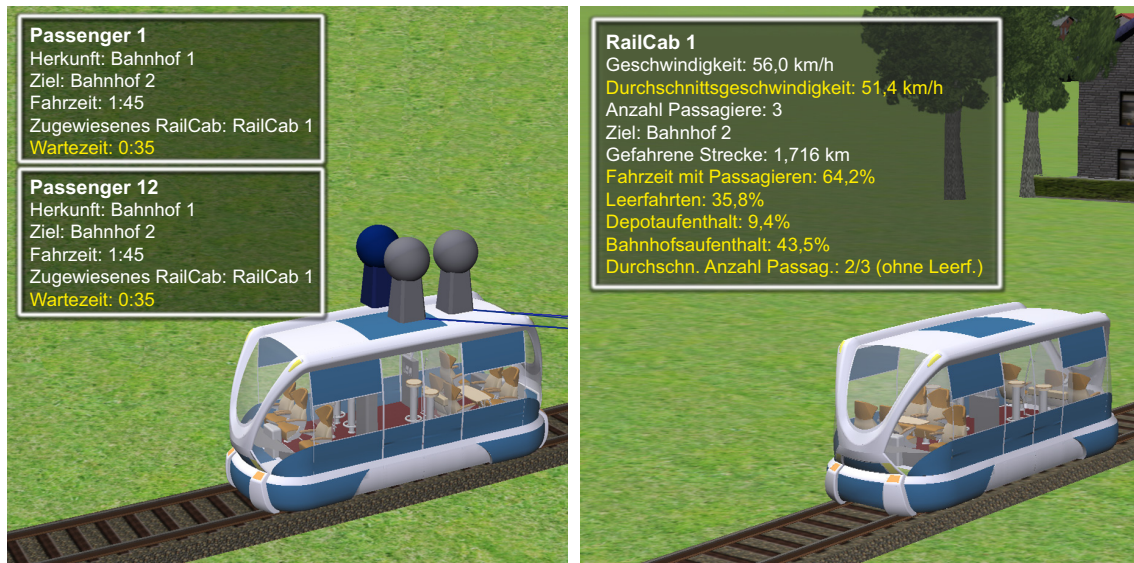


Bild 6-14: Informationen zu Passagieren und RailCabs werden bei Selektion eines Passagiers bzw. RailCabs eingeblendet

Die Daten werden auf einem Head-Up-Display (HUD) dargestellt. Die Informationen auf dem HUD eines Passagiers geben Aufschluss über dessen Start-Station, die Ziel-Station und durchschnittliche Fahr- und Wartezeit. Informationen des RailCabs sind die Geschwindigkeit und Durchschnittsgeschwindigkeit, Anzahl aktuell transportierter Passagiere, die Ziel-Station, bisher gefahrene Streckenlänge, der Anteil von Leerfahrten, die Wartezeit im Depot oder die durchschnittliche Fahrzeit mit transportierten Passagieren. Die gelb eingefärbten Texte repräsentieren Daten, die über den gesamten Simulationslauf betrachtet werden. Die Darstellung der statistischen Daten eines RailCabs ermöglicht eine permanente Überwachung interner Simulationsparameter zur Laufzeit; sie beziehen sich hier auf die gesamte Simulationsdauer⁵². So kann eine erste Einschätzung der simulierten Betriebsstrategie erfolgen und ggf. Ursachen für Leerfahrten ermittelt werden.

Geeignete Visualisierungstechniken zu den Visualisierungsaufgaben „Auslastung der Schienenstrecke darstellen“, „geplante Route (Weg) darstellen“ und „Entscheidung zwischen zwei möglichen Routen darstellen“ befinden sich in Steckbriefen in Bild A-14, Bild A-15 und Bild A-16.

Fazit: Mit den entwickelten Visualisierungstechniken sind die Entwickler in der Lage die Ergebnisse der Logistiksimulation zu analysieren und zu bewerten. Fehler der Simulation, wie z.B. eine fehlerhafte Modellierung der Schienenstrecke oder des Routing-

⁵² Bei der Analyse einer Logistiksimulation macht es i.d.R. Sinn statistische Durchschnittswerte aus dem gesamten Simulationslauf zu berücksichtigen. Je länger eine betrachtete Zeitspanne ist, desto höher ist die Aussagekraft statistischer Daten. So kann z.B. direkt nach dem Starten der VR-Anwendung der Anteil von Leerfahrten eines Fahrzeugs überprüft werden, um Fahrzeuge mit einem hohen Leerfahrts-Anteil anschließend über die gesamte Simulationsdauer zu beobachten. So kann ggf. die Ursache für die Leerfahrt ermittelt werden.

Algorithmen können eingängiger nachvollzogen werden, als bei der konventionellen Analyse der Simulationsdaten. Die Parameterwahl der logistischen Betriebsstrategien kann während eines Simulationslaufs beobachtet, verifiziert und validiert werden. Das Systemverhalten wird dadurch insgesamt schneller verständlich, auch für ein domänenübergreifendes Team.

6.2.2 Sturzvariables Fahrwerk

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zur Visualisierung eines Prüfstands des sturzvariablen Fahrwerks in der VR-Anwendung vorgestellt. Dies umfasst die entwickelten Visualisierungstechniken zur Bearbeitung der Analyse- und Visualisierungsaufgaben aus Tabelle A-7 des Kapitels A2.3.1. Eine Auflistung der Simulationsdaten befindet sich in Tabelle A-10. In diesem Beispiel werden im Wesentlichen die Primär-Visualisierungstechniken Struktur- und Verhaltensdiagramme genutzt sowie Sekundär-Visualisierungstechniken für Systemgrößen und Kennzahlen.

Ziel der VR-Anwendung ist es, die Analyse des Systemverhaltens bei der Reglerauslegung des Prüfstands zu verbessern. Da das System in Entwicklung ist, existiert keine reale Schienenstrecke, auf der der Prüfstand getestet werden kann. Die VR-Anwendung ermöglicht eine schnelle Zuordnung des Verhaltens des Fahrwerks zu einem Streckenverlauf, da sie ein 3D-Modell einer Schienenstrecke und ein 3D-Modell des Fahrwerks darstellt, sodass der Zusammenhang zwischen Anregung und Systemverhalten deutlich wird. Bild 6-15 gibt einen Überblick über die Komponenten des Gesamtsystems. Es besteht aus einem 3D-Streckenmodell, einem Prüfstand und einem Fahrwerks-Modell. Das besondere dieser Anwendung ist, dass anstelle einer Prüfstands-Simulation ein echter Prüfstand integriert ist. Die VR-Anwendung bezieht Daten online vom Prüfstand. Auf diese Weise entsprechen z.B. Lenk- und Sturzwinkel des virtuellen Fahrwerkmodells denen des realen Prüfstands. Die virtuelle Strecke stellt für den Prüfstand das Streckenmodell dar, das den Streckenverlauf und die Anregung für die Regelung des Fahrwerks liefert (Steigung, Weichen). Das reale Fahrwerk passt Lenk- und Sturzwinkel entsprechend den Vorgaben des Streckenverlaufs an. Das virtuelle Modell des Fahrwerks stellt die aktuellen Winkel ebenfalls ein. Dabei fährt es über die virtuelle Strecke und verdeutlicht das Verhalten des Prüfstands im Kontext des jeweiligen Streckenabschnitts.

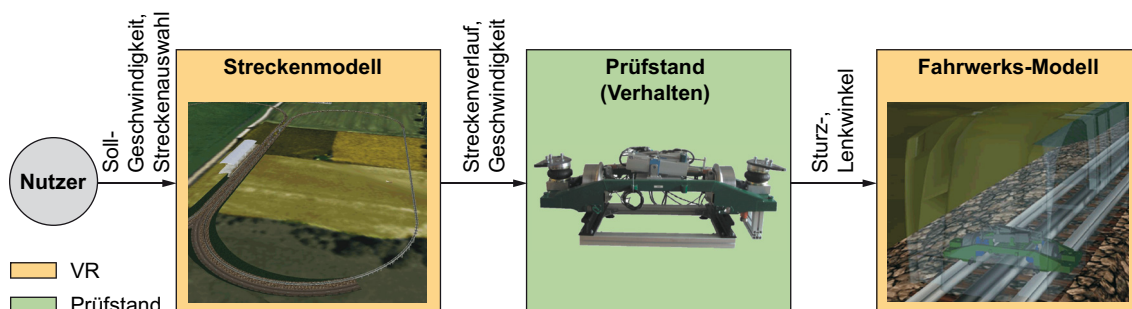


Bild 6-15: Überblick über den Zusammenhang zwischen dem realen Prüfstand und der VR-Anwendung

Im Folgenden werden Visualisierungstechniken vorgestellt, die abstrakte Daten des Reglers im Zusammenhang mit dem Fahrwerksverhalten erklären. Die Beispiele in Bild 6-16 bis Bild 6-18 stellen unterschiedliche Untersuchungsgegenstände des Fahrwerks dar. Haupt-Untersuchungsgegenstand sind die Stabilität des Fahrwerks und die Regelgüte der Spurführungsregelung (siehe Kap. A2.2.3). Sie sollen fortwährend in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter und des Reglerzustands untersucht werden. Folgende Visualisierungsaufgaben werden in den drei Beispielen behandelt: „Regler-Zustand darstellen“, „Wirkweise und Systemparameter für Sturzverstellung darstellen“, „Status der Überwachung darstellen“, „Lenkwinkel- und Sturzwinkel darstellen“, „Querver-schiebung darstellen“.

Übergeordnete Regelung im Zusammenhang mit der lokalen Regelung:

Bild 6-16 stellt die Ausgangssituation dar. Zu sehen ist das Fahrwerk auf einer Schienenstrecke, das während der Fahrt animiert wird. Unten links sind die Stabilität und Regelgüte dargestellt. Für die Stabilität werden Zustands-Anzeigen mit den Zuständen stabil oder instabil verwendet. Die Färbung eines Zustands verdeutlicht den Status (rot: instabil, grün: stabil). Die Regelgüte wird mit Hilfe eines animierten Balkendiagramms dargestellt. Die Länge des Balkens ändert sich mit Änderung der SOLL/IST-Abweichung.

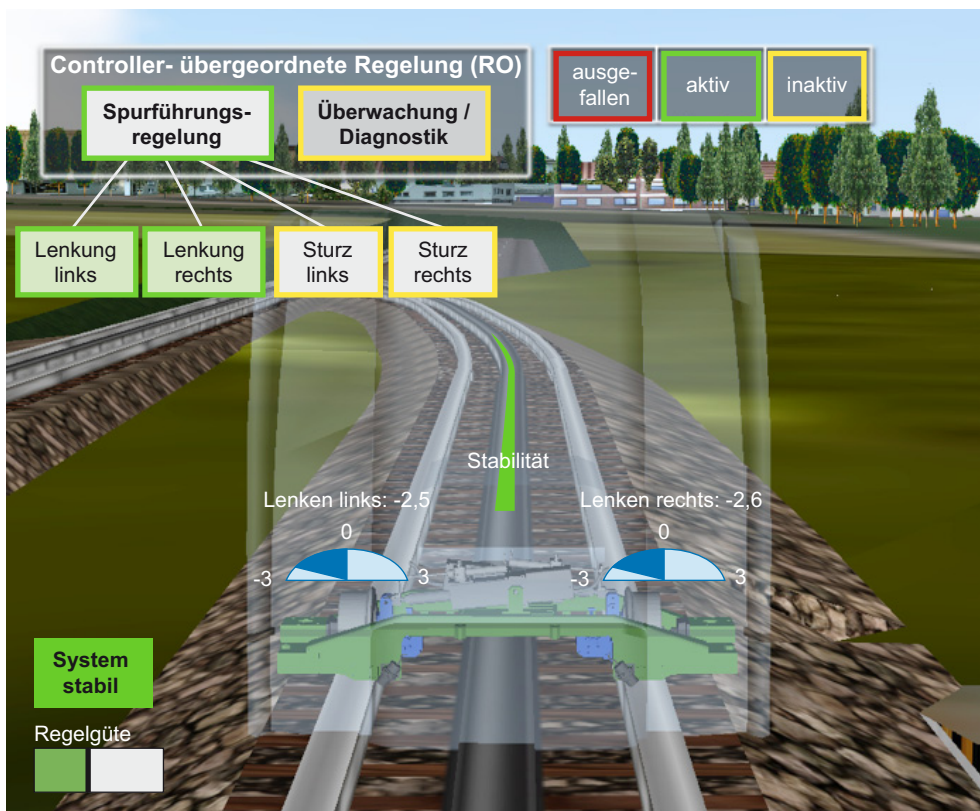


Bild 6-16: Visualisierungen zur Analyse der übergeordneten Regelung und der Lenkwinkel der Aktorik (IST)

Wird die Differenz zwischen SOLL und IST zu groß (Ausschlag des Balkens), wird der Balken rot gefärbt. Oben links sind als HUD die Systemkomponenten der übergreifenden Regelung dargestellt: die Spurführungsregelung und die Überwachungs- und Diagnostik.

Zudem sind die Komponenten der lokalen Regelung dargestellt: Lenkung links, Lenkung rechts, Sturz links und Sturz rechts. Jede der Komponenten kann den Status aktiv, inaktiv oder ausgefallen annehmen, welcher durch einen farbigen Rahmen angezeigt wird. Im Bild sind aktuell beide Regler zur Lenkung aktiv (grün), die zum Stürzen inaktiv. Auch die Aktorik zur Lenkung ist aktiv. Dies ist zum einen durch die Bewegung der Räder deutlich, zum anderen wird sie durch die zusätzliche Visualisierung des Lenkwinkels verdeutlicht.

Die Visualisierungstechnik eines Lenkwinkels ist ein Halbkreis, der eine Skala von einem Datenwert zwischen -3° und 3° darstellt. Der Datenwert repräsentiert einen Winkel. Aufgrund der kleinen Größe wird er überhöht dargestellt. Dadurch erkennt der Anwender die Bewegung erst. Die aktuelle Größe des Lenkwinkels wird kenntlich gemacht, indem der entsprechende Anteil des Halbkreises eingefärbt wird (siehe dunkelblaues Kreissegment). Die Färbung wird laufend an die Daten der Simulation angeglichen. Mit Hilfe der VR-Anwendung und den Visualisierungstechniken kann ein Entwickler seinen Regler zur Lenkung überprüfen. Der Vorteil ist, dass er interne Parameter und Systemgrößen der Regler sowie den Status der übergeordneten Regelung sieht und der Zusammenhang zwischen Umgebung und Verhalten sofort ersichtlich ist. Am realen Prüfstand ist dieser Zusammenhang nicht direkt sichtbar.

Bild 6-17 zeigt ein Fahrwerk, das den Sicherheitsbereich verlassen hat (zu hohe Querverschiebung). Dies wirkt sich auf die Regelgüte aus, da eine hohe Abweichung zwischen SOLL und IST besteht.

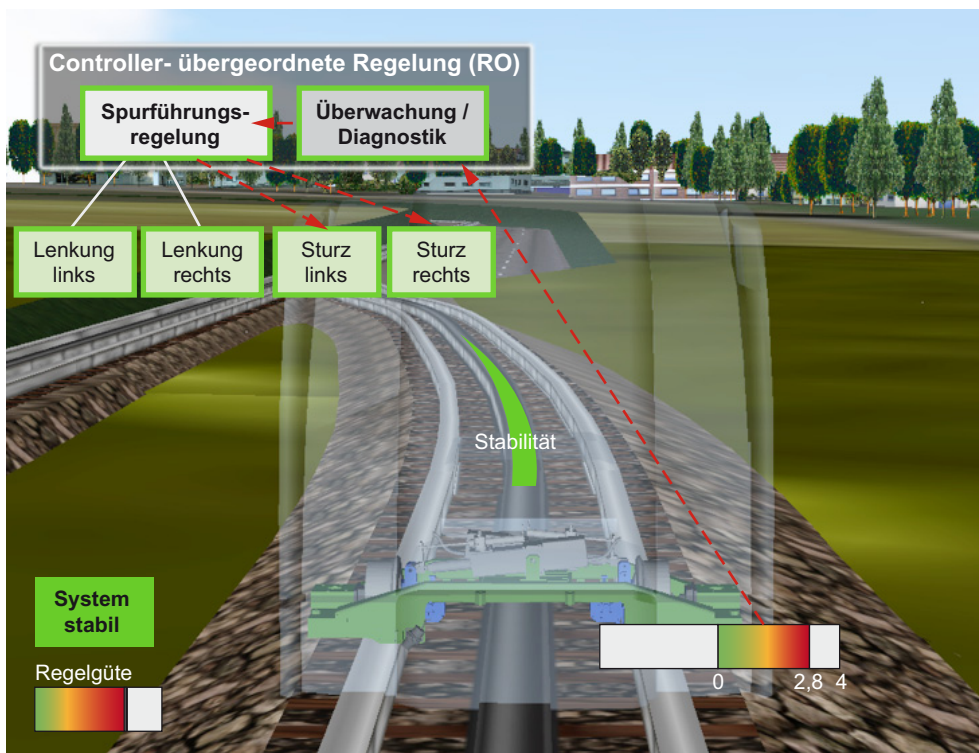


Bild 6-17: Visualisierungen zur visuellen Analyse der Regelgüte und des Zusammenhangs zwischen der übergeordneten Regelung und Aktivierung der Regler zur Sturzverstellung

Aufgrund der zu hohen Querverschiebung des Fahrwerks auf dem Gleis wird die Entgleisungsgefahr erhöht. Hier erfolgt eine zusätzliche Visualisierung der Querverschiebung. Dazu wird ein Balken am Fahrwerk-Rad platziert. Die Länge des Balkens bewegt sich mit der Größe der Querverschiebung.

Der Balken stellt die Querverschiebung aufgrund sehr kleiner Zahlenwerte überhöht dar. Eine Visualisierung am 3D-Modell im Maßstab 1:1 bliebe unerkannt. Ein Farbverlauf von grün nach rot signalisiert zusätzlich das Gefahrenpotential. Die Farben repräsentieren die Grenzwerte der Sicherheitszone. Bei Überschreitung eines Schwellwerts wird der Balken rot. Bei Überhöhung eines Schwellenwerts (hier > 2) erhält die Überwachung- und Diagnostik das Signal der Querverschiebung und aktiviert für jedes Rad den Regler zur Sturzverstellung (1. Regel-Strategie, siehe Kap. 4.2.3). Dieser Zusammenhang ist durch eine gestrichelte Linie vom entsprechenden Rad zur abstrakten Systemkomponente Überwachung und Diagnostik dargestellt.

Der Regler zur Sturzverstellung veranlasst die Sturz-Aktorik, den Sturzwinkel jedes Rads einzustellen. In Bild 6-18 sind die berechneten Sturzwinkel direkt an jedem Rad des Fahrwerks dargestellt. Die Darstellung entspricht der Darstellung des Lenkwinkels. Während der Analyse der Sturzverstellung werden die Visualisierungstechniken zur Analyse der Lenkwinkel ausgeblendet.

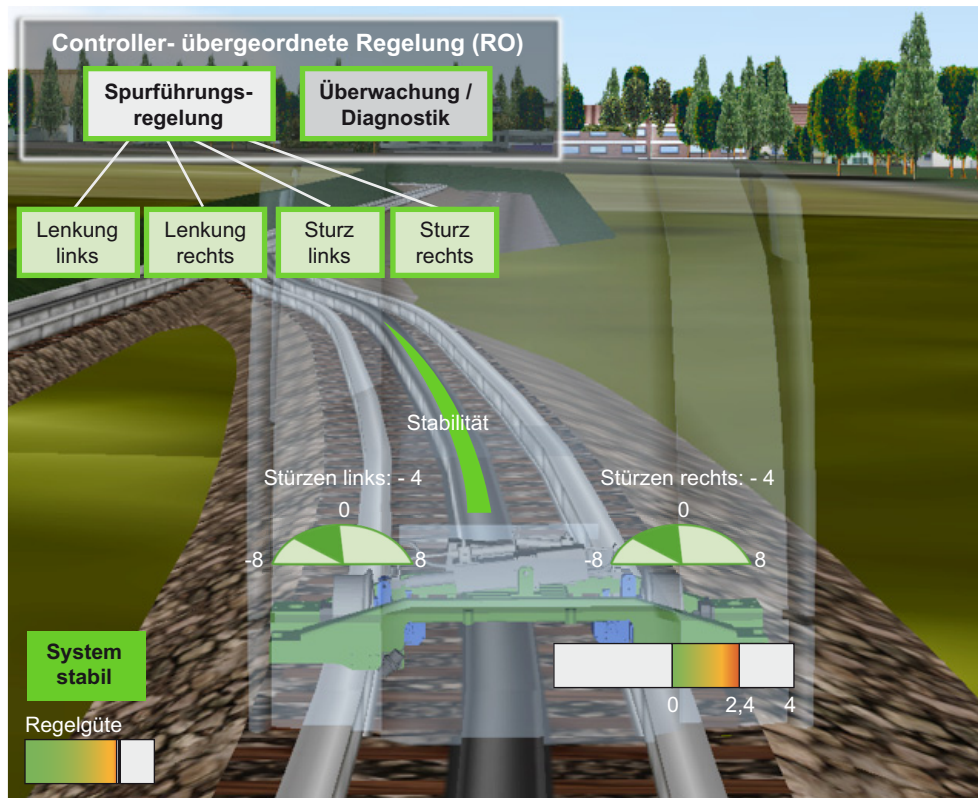


Bild 6-18: Darstellungen zur visuellen Analyse der Regelgüte. Das Bild zeigt eine ungünstige Güte aufgrund zu hoher Querverschiebung

Der Sturz bleibt solange aktiv, wie die Querverschiebung über einem definierten Schwellenwert liegt. Wird die Querverschiebung wieder geringer, wird der Sturz deaktiviert; in der VR-Anwendung werden wieder die Lenkwinkel visualisiert.

Mit Hilfe der Visualisierung kann ein Entwickler den Zusammenhang zwischen Daten des Reglers und dem Fahrwerksverhalten beobachten: Er sieht die Querposition des Fahrwerks, den Informationsfluss zwischen Überwachung und Spurführungsregelung sowie die berechneten und gestellten Größen der Regler. Ähnlich kann die Berechnung des Reglers untersucht werden, wenn ein maximaler Reibungswert in Querrichtung erreicht ist (2. Regel-Strategie, siehe Kap. 4.2.3) oder aber wenn z.B. die Lenk-Aktorik ausfällt. Aus Platzgründen werden beide Fälle in den Steckbriefen in Bild A-17 und in Bild A-18 dargestellt.

6.3 Visuelle Analyse auf einer hochauflösenden Großprojektion

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte VR-Anwendung ermöglicht eine visuelle Analyse des RailCab-Systems an einer hochauflösenden Großprojektion (Powerwall). Die folgenden Bilder geben einen Eindruck zweier ausgewählter Szenarien des RailCab-Systems. Hier können die Vorteile eines VR-Systems wie folgt genutzt werden: Die unterschiedlichen Ebenen des mechatronischen Systems können realitätsnah (und immersiv) analysiert werden.

Durch die Größe der Powerwall und die hohe Auflösung können sehr große Anwendungsszenarien überblickt werden. Bild 6-19 zeigt einen Überblick über das RailCab-System anhand des in Kapitel 6.2 beschriebenen Anwendungsszenarios. Abgebildet ist die VMS-Ebene des mechatronischen Systems. Zudem wird die Primär-Visualisierungstechnik Farbkarte dargestellt. Sie stellt hier die Auslastung (Beladung) einzelner RailCabs dar (Erläuterung siehe 6.1.2). Die Entwickler sehen Zusammenhänge des Systems – wie z.B. hier die logistischen Vorgänge – und können mit Hilfe der großen, realitätsnahen Darstellung gemeinsam das System analysieren.

Bild 6-20 stellt eine visuelle Analyse des Systems auf der AMS-Ebene dar. Einzelne Fahrzeuge des Systems werden realitätsnah und in der Größe 1:1 abgebildet. Insbesondere werden die Vorgänge der Informationsverarbeitung der Fahrzeuge präsentiert. Hier werden die Kommunikation zwischen zwei RailCabs und die Daten dargestellt, die bei dieser übertragen werden. Zusammen mit dem Bewegungsverhalten des Systems kann eine ganzheitliche Analyse des Systems erfolgen.

Selbstredend kann die Darstellung auf der Großprojektion auch für Präsentationszwecke eingesetzt werden, um die Komplexität des RailCab-Systems zu vermitteln und potentielle Kunden von diesem zu überzeugen.

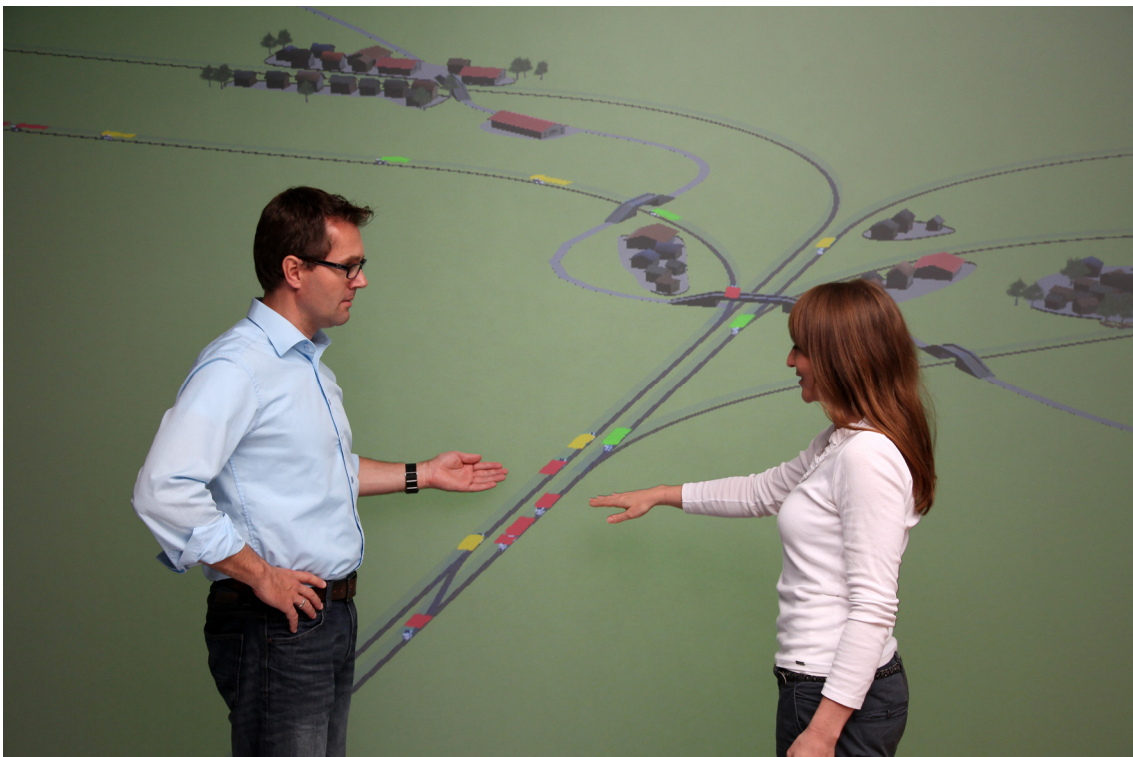


Bild 6-19: Visuelle Analyse eines großen Anwendungsszenarios des RailCab-Systems an einem hochauflösenden Projektionssystem



Bild 6-20: Visuelle Analyse der Kommunikation einzelner Fahrzeuge des RailCab-Systems

6.4 Bewertung der Arbeit an den Anforderungen

Die entwickelte Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen wird abschließend anhand der aufgestellten Anforderungen aus Kapitel 2.8 bewertet. Für jede Anforderung wird erläutert, inwiefern sie durch die Systematik erfüllt wird.

A1 – Durchgängige systematische Vorgehensweise: Das Vorgehensmodell der Systematik ermöglicht eine systematische Entwicklung von Visualisierungstechniken für eine VR-Analyseumgebung. Dazu beschreibt es, wie notwendige Bestandteile systematisch bei dem Vorgehen ausgewählt und in ein VR-Framework integriert werden (vgl. Kap. 5). Das Vorgehensmodell ist in fünf wesentliche Phasen unterteilt: Analyse des Systems, Spezifikation der Visualisierungsaufgabe, Auswahl von Visualisierungstechniken, Integration der Visualisierungstechniken in VR und Analyse des Systemverhaltens. Die Anwendbarkeit des Vorgehensmodells wurde anhand zahlreicher Beispiele zur Visualisierung von Daten des RailCab-Systems belegt (vgl. Kap. 6.1 und 6.2).

A2 – Methoden und Hilfsmittel strukturiert für mechatronische Systeme: Die entwickelten Bestandteile zur Auswahl von Visualisierungstechniken wurden anhand von Anwendungsbeispielen aus der Mechatronik (RailCab-System) identifiziert. Die Aufgaben und die zugehörigen Daten entsprechen den Vorlagen aus den Fachgebieten. Sie sind für die Begriffswelt und die vorkommenden Daten strukturiert und können daher

mühe los eingesetzt werden. Deren Anwendung bei der Erstellung der Demonstratoren für die Logistiksimulation, der Konvoiregelung und Kommunikation sowie das sturzvariable Fahrwerk zeigten, dass alle Daten und Aufgaben mit den Bestandteilen abgebildet werden konnten.

A3 – Generische Schablone zur Spezifikation des Visualisierungsproblems für mechatronische Systeme: Als Spezifikations- und Dokumentationsinstrument ist eine generische Schablone für einen Steckbrief entwickelt worden. Diese umfasst Felder für alle Arbeitsschritte des Vorgehensmodells zur Spezifikation einer Analyseaufgabe, Visualisierungsaufgabe, Daten und Visualisierungstechniken für mechatronische Systeme. Zahlreiche Beispiele und entwickelte Visualisierungstechniken wurden mit Hilfe des Steckbriefs dokumentiert. Die Anforderung gilt als erfüllt.

A4 – Notation des Maschinenbaus und verwandter Branchen: Die verständliche Beschreibung von Analyse- und Visualisierungsaufgaben für den Maschinenbau ist eine Herausforderung. Die Notation der Forschungsgebiete der wissenschaftlichen Visualisierung ist für die technischen Domänen nicht geeignet. In dieser Arbeit wurden sowohl die Analyse- als auch Visualisierungsaufgaben für fortgeschrittene mechatronische Systeme identifiziert, strukturiert und durch das Fachvokabular (z.B. Planen, Lernen, Kommunikation, Kooperation, Funktion, usw.) technischer Domänen beschrieben (Kap. 4.3 und 4.4). Hierdurch wurde erstmalig eine fachliche Aufgabenbeschreibung von informationsverarbeitenden Verfahren fortgeschrittener mechatronischer Systeme systematisch mit Visualisierungstechniken verknüpft. Die Arbeit an den Anwendungsbeispielen zeigte, dass diese bei der Auswahl der Techniken und der Kommunikation mit den Fachexperten behilflich ist.

A5 – Visualisierungskonzept für VR-Anwendung: Die virtuelle Umgebung einer VR-Anwendung entspricht einer realen Umgebung, die mit den Mitteln der Computergrafik erstellt ist. Der Anwender überblickt diese nicht zwangsläufig sondern betrachtet die Objekte im Maßstab 1:1, wie echte Objekte. Eine Skalierung der virtuellen Umgebung und der Wechsel der Ansicht ist dennoch möglich. Damit der Anwender die Übersicht über die Daten, Ereignisse und das Geschehen behält, sind Techniken zur Aufmerksamkeitslenkung und ein Hinweissystem eingesetzt worden. Zudem sind redundante Techniken entstanden, die dieselben Daten, allerdings auf unterschiedlichen Ebenen anzeigen. Die Praxistests des VR-Analysewerkzeugs haben gezeigt, dass die Techniken die Analyse eines mechatronischen Systems in VR unterstützen.

A6 – Unterstützung der ganzheitlichen Analyse mechatronischer Systeme: Zur ganzheitlichen Betrachtung eines mechatronischen Systems gehört die disziplinübergreifende Untersuchung systeminterner und systemexterner Komponenten sowie die Analyse der abstrakten Daten der informationsverarbeitenden Verfahren. Durch die Grundidee dieser Arbeit, alle mechatronischen Strukturierungsebenen mit Hilfe des sogenannten VR-Kontinuums (vgl. Kap. 4.1 und 4.6.1) in einer VR-Umgebung darzustellen, wird eine solche Analyse gewährleistet.

A7 – Ebenen-übergreifende Analyse mechatronischer Strukturierungsebenen: Das VR-Kontinuum und die Anordnung der Visualisierungstechniken auf Basis der Entfernung von virtueller Kamera zum Untersuchungsgegenstand ist Voraussetzung für die ebenen-übergreifende Analyse. Alle Strukturierungsebenen mechatronischer Systeme können in der entwickelten VR-Anwendung dargestellt und untersucht werden. Mit der Primär-Visualisierungstechnik Fokus und Kontext – Datenlinse kann die Analyse unterschiedlicher Ebenen gleichzeitig erfolgen (vgl. Kap. 4.6.5). Mit dem semantischen Zoomen werden Visualisierungstechniken automatisch ein- oder ausgeblendet, die für eine aktuell dargestellte Ebene relevant sind (vgl. Kap. 4.6.4). Zudem wurde durch die Taxonomie an Analyse- und Visualisierungsaufgaben eine methodische Grundlage geschaffen, solche Aufgaben zu strukturieren oder Aufgaben für neue Anwendungsfälle dort einzuordnen.

A8 – Darstellen von Daten mechatronischer Systeme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten: Die VR-Anwendung stellt das Bewegungsverhalten mechatronischer Systeme als animierte 3D-Modelle dar. Die Bewegung eines mechatronischen Systems wird für einen Betrachter realistisch wiedergegeben, wie z.B. die Fahrt eines RailCabs auf der Schiene oder aber die Kinematik des sturzvariablen Fahrwerks. Zudem werden zu analysierende Simulationsdaten durch die entwickelten Visualisierungstechniken dargestellt. Die Visualisierungstechniken passen ihre Position und Verhalten wie Erscheinung, Farben, usw. an die sich ändernden Simulationsdaten automatisch an. Erfolgen Berechnungen so schnell, dass sie für das menschliche Auge auch mit Hilfe einer Visualisierungstechnik zu schnell erscheinen, werden die Daten interpoliert. Ihre Darstellung erfolgt nachvollziehbar.

A9 – Visualisierungstechniken geeignet für VR: Die in dieser Arbeit entwickelten und genutzten Visualisierungstechniken beeinflussen die Immersion und Präsenz in VR-Umgebungen nicht negativ. Es wurden – sofern möglich – 3-dimensionale Visualisierungstechniken eingesetzt. Aufgrund der für einen Menschen gewohnten Darstellung werden solche als nicht störend empfunden. 3-dimensionale Visualisierungstechniken konnten zur Darstellung derjenigen Daten verwendet werden, die einen physikalischen Bezug zum Grundsystem haben, wie z.B. die Kommunikation von Systemkomponente zu Systemkomponente. Abstrakte Daten, die einer Systemkomponente zugeordnet werden können, aber nicht als 3d-Objekt darstellbar sind, werden mit der Billboard-Technik dargestellt. Abstrakte Daten der Informationsverarbeitung, die sich in keinsten Weise an einer räumlichen Komponente ausrichten lassen, werden als Head-Up-Display am Bildschirmrand dargestellt. Dies sind z.B. SW-Komponenten und ihre Aktivitäten oder Zustände.

Die vorgestellte Systematik erfüllt alle an sie gestellten Anforderungen. Sie wurde mit Erfolg an vielzähligen Anwendungsbeispielen des RailCab-Systems validiert; die prototypische Implementierung zeigt ihre Anwendbarkeit.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Fortgeschrittene mechatronische Systeme kennzeichnen sich dadurch aus, dass sie sich effektiv in ihre Umgebung einbinden und bestmöglich ihre Systemziele erfüllen. Sie sind flexibler, autonomer und sind besser auf den Benutzer abgestimmt, als herkömmliche mechatronische Systeme. Ein wesentlicher Stellhebel für fortgeschrittenes Verhalten ist die Informations- und Kommunikationstechnik. In ihr werden komplexe KI-Verfahren berechnet, die mechatronischen Systemen eine „inhärente Teilintelligenz“ verleihen.

Zur Entwicklung derartiger Systeme werden virtuelle Prototypen eingesetzt, mit Hilfe derer komplexe KI-Verfahren modelliert, simuliert und analysiert werden. Durch die verstärkte Interdisziplinarität und die steigende Komplexität der Systeme bleibt die Entwicklung eine Herausforderung. Daher stellt die Analyse eine bedeutende Phase des Virtual Prototypings dar, da in dieser die Funktionalität des Systems getestet und optimiert wird. Eine Art der Analyse ist die interaktive, visuelle Analyse. Hier wird die ausgeprägte visuelle Fähigkeit und präattentive Wahrnehmung des Menschen genutzt, um komplexe informationsverarbeitende Vorgänge nachvollziehen zu können. Durch High-end-VR Systeme werden herausragende Potentiale für die interaktive, visuelle Analyse geboten. Insbesondere können durch die Darstellung abstrakter Daten der Informationsverarbeitung mit Hilfe von zusätzlichen Visualisierungstechniken interne Berechnungsvorgänge vermittelt werden. Die Auswahl und Implementierung solcher Visualisierungstechniken ist bisher aufwendig, da sie für jeden Anwendungsfall neu entwickelt werden. Hier fehlt es an Hilfsmitteln und systematischen Vorgehen, die die Entwicklung solcher Techniken für mechatronische Systeme unterstützen und beschleunigen.

Um die Entwicklung von Visualisierungstechniken für VR-Anwendungen zu unterstützen, wird eine methodische Grundlage benötigt, die ein systematisches Vorgehen sowie Hilfsmittel zur Spezifikation des Visualisierungsproblems für fortgeschrittene mechatronische Systeme bietet. Des Weiteren bedarf es an einer VR-Anwendung und Interaktionstechniken, die eine interaktive visuelle Analyse mechatronischer Systeme gewährleisten. Nach Möglichkeit soll ein mechatronisches System ganzheitlich analysiert werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine *Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen* erarbeitet. Dazu wurden zunächst existierende Ansätze im Stand der Forschung zur Visualisierung mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen untersucht. Diese liefern jedoch nur Visualisierungslösungen für vereinzelte Aspekte mechatronischer Systeme, eine ganzheitliche Betrachtung solcher Systeme über mehrere mechatronische Ebenen hinweg erfolgte bisher nicht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden bestehende Erkenntnisse und Methoden zur Entwicklung von Visualisierungen aus den wissen-

schaftlichen Disziplinen der Wissenschaftlichen Visualisierung und Informationsvisualisierung untersucht und für fortgeschrittene mechatronische Systeme adaptiert.

Das **Resultat** ist eine Systematik, die im Kern folgende Komponenten umfasst:

- Notwendige **Bestandteile und Hilfsmittel zur Spezifikation des Visualisierungsproblems** für fortgeschrittene mechatronische Systeme: Hauptaugenmerk liegt auf den Daten der Informationsverarbeitung. Diese umfasst eine Taxonomie an Analyseaufgaben, eine Taxonomie an Visualisierungsaufgaben, charakteristische Daten mechatronischer Systeme, geeignete Visualisierungstechniken für die Visualisierungsaufgaben sowie eine Schablone für einen Steckbrief. Bei den Visualisierungstechniken wurde zwischen allgemein für fortgeschrittene mechatronische Systeme geeigneten Visualisierungstechniken (Primär-Visualisierungstechniken) sowie weiteren systemabhängigen Hilfstechniken unterschieden, die in Kombination mit den Primär-Visualisierungstechniken eingesetzt werden (Sekundär-Visualisierungstechniken).
- Eine prototypisch umgesetzte **VR-Anwendung** (Werkzeugunterstützung) für die interaktive, visuelle Analyse von virtuellen Prototypen mechatronischer Systeme: Ein wesentliches Konzept ist, alle Strukturierungsebenen (Mikro- und Makrostruktur) mechatronischer Systeme in einer VR-Umgebung darstellen zu können. Vielzahl der entwickelten Visualisierungstechniken sind in der VR-Anwendung integriert und stehen für die interaktive Analyse zur Verfügung.
- Ein strukturiertes **Vorgehensmodell**, das alle Bestandteile und Hilfsmittel in ein systematisches Vorgehen integriert und alle durchzuführenden Tätigkeiten in fünf Phasen einteilt.

Die Validierung der Methode wurde anhand von Validierungsbeispielen des RailCab-Systems durchgeführt. Die Beispiele dienten zum einen als Datenbasis zur Identifikation von Analyse- und Visualisierungsaufgaben für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Auch wurden für die Aufgaben geeignete Visualisierungstechniken vorgeschlagen. Die Beispiele enthalten KI-Verfahren aus unterschiedlichen mechatronischen Strukturierungsebenen und liefern eine breite Datenbasis für die Systematik. Das entwickelte Vorgehen wurde anhand der Beispiele jeweils durchlaufen und die entwickelten Bestandteile angewandt.

Die prototypische Implementierung der entwickelten Visualisierungstechniken zeigt, dass die Vorgehensweise funktioniert und die Umsetzung der Visualisierungstechniken in VR möglich ist. Zudem belegt sie dass die zusätzlichen Visualisierungstechniken zur Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme geeignet sind. Entwickler werden in die Lage versetzt, das Systemverhalten einfacher zu analysieren. Alle Resultate wurden in Kapitel 6 oder in Form von Steckbriefen im Anhang vorgestellt.

Durch die implementierten Techniken und der VR-Anwendung konnte im Rahmen des RailCab Projekts folgender Nutzen nachgewiesen werden:

Es wurden Fehler bei den Simulationen erkannt, die mit der konventionellen Analyse nicht auf Anhieb sichtbar sind. Die Fehler konnten sowohl bei der Analyse einzelner Modelle als auch bei Integration mehrerer Modelle identifiziert werden. Ein Beispiel ist das Streckenmodell der Logistiksimulation: hier wurden fehlerhafte Fahrtrichtungen auf der Strecke definiert, was zu einer starken Verzögerung des Transports führte.

Zudem wurde durch die Integration verschiedener Aspektmodelle zum Gesamtsystem die Kommunikation zwischen den Entwicklern gefördert. Zum Beispiel wurde festgestellt, dass sich Daten und Funktionen der unterschiedlichen KI-Verfahren überschneiden; folglich wurde deutlich dass dies bei der Integration zum Gesamtsystem zu bedenken ist.

Neben der visuellen Analyse kann die VR-Anwendung mit den Visualisierungstechniken auch zur Präsentation des Systems eingesetzt werden, um dessen komplexe Funktionalität und das Gesamtverhalten zu vermitteln.

Für die Visualisierung fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen besteht weiterhin Forschungsbedarf; im Folgenden werden einige Aspekte aufgeführt:

In zukünftigen Arbeiten müssen die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Visualisierungstechniken auf Nutzerakzeptanz mit Hilfe von Nutzerstudien getestet und bewertet werden. In dieser Arbeit wurde sich auf bewährte Design- und Gestaltungsprinzipien aus dem Bereich der wissenschaftlichen Visualisierung gestützt; diese gelten überwiegend für 2-dimensionale Darstellungen oder zum Teil für nicht-immersive 3-dimensionale Darstellungen. Inwiefern diese auf immersive VR-Umgebungen übertragbar sind und im Arbeitsalltag produktiv einsetzbar sind, ist zu belegen.

In gängigen Simulationsumgebungen (wie Matlab/Simulink) – in denen bereits Bibliotheken zur Visualisierung von 3D-Gestaltmodellen vorhanden sind – sollen in Zukunft auch Visualisierungstechniken (z.B. in Form von Bibliotheken) zur Verfügung stehen, die es ermöglichen die abstrakten Daten komplexer KI-Verfahren schnell darzustellen. Zudem soll ermöglicht werden, für eine definierte Visualisierungsaufgabe, automatisiert geeignete Visualisierungstechniken vorzuschlagen. Ziel ist, die Analyse komplexer KI-Verfahren zu unterstützen und damit die Entwicklung zu beschleunigen.

Für die Realisierung dieser Vision bedarf es an rechnerinternen formalen Beschreibungssprachen für Visualisierungstechniken und formale Abbildungsregeln von semi-formalen Visualisierungsaufgaben und zu untersuchenden Daten auf geeignete Visualisierungstechniken. Erst auf Basis solcher Beschreibungen ist eine automatisierte Verarbeitung zu visualisierender Daten und ihre Abbildung auf geeignete Visualisierungstechniken möglich. Die Thematik wurde bereits 1994 von ROBERTSON UND DE FERRARI adressiert: *„Our goal ist the systematic, and therefore potentially automatic, generation of visual representations, given a description of all the important data character-*

sitics and the specification of the user's interpretation aims. [...]“ [RD94]. Erste Forschungsansätze wurden u.A. im Rahmen des SFB 614 erarbeitet. Diese beinhalten z.B. die wissensbasierte Verarbeitung von zu visualisierenden Daten und eine automatische Darstellung von jeweils geeigneten Visualisierungstechniken [WR12]. Ein anderer Forschungsansatz ist eine automatische Auswahl von zu visualisierenden Daten und deren Darstellung mit Hilfe autonomer Software-Agenten [RW10]. Da die Visualisierung allgemein eine kreative Aufgabe ist und persönliche Vorlieben gefragt sind, sollte der Anwender dennoch die Kontrolle über den Visualisierungs-Prozess behalten [SM00, S. 116].

Abkürzungsverzeichnis

2d	2-dimensional
3d	3-dimensional
AMS	Autonomes mechatronisches System
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CO	Controller
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMU	Digitaler Mock-Up
engl.	englisch
et al.	et alii – und andere
etc.	et cetera – und so weiter
fortgeschr.	fortgeschritten
ggf.	gegebenenfalls
i.d.R.	in der Regel
inkl.	inklusive
IV	Informationsverarbeitung
Kap.	Kapitel
KI	künstliche Intelligenz
KO	Kognitiver Operator (im Operator-Controller-Modul)
Komm.	Kommunikation
Koop.	Kooperation
mech. Syst.	mechatronisches System
MFM	Mechatronisches Funktionsmodul

MID	Molded Interconnect Devices
OSG	OpenSceneGraph
OCM	Operator-Controller-Modul
PVT	Primär-Visualisierungstechnik
RO	Reflektorischer Operator
SE	Systemelement
SFB	Sonderforschungsbereich
SK	Systemkomponente
s.o.	selbstoptimierend
SysML	Systems Modeling Language
u.a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
usw.	und so weiter
VA	Visualisierungsaufgabe
vgl.	vergleiche
VMS	Vernetztes mechatronisches System
VP	Virtueller Prototyp
VR	Virtual Reality
VT	Visualisierungstechnik
WS	Wirkstruktur
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil
zw.	zwischen

Literaturverzeichnis

- [ADG+09] ADELT, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definition, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009
- [AMS+11] AIGNER, W.; MIKSCH, S.; SCHUMANN, H.; TOMINSKI, C.: Visualization of Time-Oriented Data. In: Karat, J.; Vanderdonck, J. (Eds.): Human Computer Interaction Series, Springer Verlag, London, 2011
- [Are11] AREND, P.: Visualisierungstechniken zur Analyse der Logistiksimulation des Schienenverkehrssystems RailCab. Bachelorarbeit, Fakultät Informatik, Elektrotechnik, Mathematik (IEM), Universität Paderborn, 2011
- [ASW11] ABEL, D.; SCHMITZ, M.; WENZEL, S.: Nutzung von Virtual Reality zur Personalqualifizierung in der Produktions- und Logistikplanung. ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 10/2011, Hanser Verlag, München, 2011
- [Aut13-0l] MÜLLER, A.: Werkstoffe: Nachhaltige Mobilität mit innovativen Kunststofflösungen. <http://www.autocad-magazin.de/acm/news/werkstoffe-nachhaltige-mobilitaet-mit-innovativen-kunststoffloesungen>, Bayer MaterialScience AG, 2013
- [AW95] ASTRÖM, K.J.; WITTENMARK, B.: Adaptive Control. Addison-Wesley, Reading, 2. Ed., 1995
- [Bar01] BARTRAM, L.: Perceptual and interpretative properties of motion for information visualization. PhD Thesis, Simon Fraser University, School of Computing Science, 2001
- [BBB+92] BISHOP, G.; BRICKEN, W.; BROOKS, F.; BROWN, M. et al.: Research Directions in Virtual Environments. Report of an National Science Foundation (NSF) Invitational Workshop, March 23-24 1992. Computer Graphics 26(3), August 1992
- [BBW07] BEETZ, M.; BUSS, M.; WOLLHERR, D.: Cognitive Technical Systems – What is the Role of Artificial Intelligence? In: KI 2007: Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science, Volume 4667/2007, Springer, Berlin, 2007, pp. 19-42
- [BDK+06] BATKIEWICZ, T.J.; DOHSE, K.C.; KALIVARAPU, V., DOHSE, T.; WALTER, B.; KNUTZON, J.; PARKHURST, D.; WINER, E.; OLIVER, J.: Multimodal UAV Ground Control System. In: 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Sept. 6-8 2006, Portsmouth, Virginia, 2006
- [BDW03] BERNHARD, J.; DRAGAN, M.; WENZEL, S.: Klassifizierung von Visualisierungsverfahren für GNL. Technical Report 03005 des Sonderforschungsbereichs 559 – Modellierung großer Netze in der Logistik, Teilprojekt M9, Dortmund, 2003
- [BDW05] BERNHARD, J.; DRAGAN, M.; WENZEL, S.: Evaluation und Erweiterung der Kriterien zur Klassifizierung von Visualisierungsverfahren für GNL. Technical Report 05001 des Sonderforschungsbereichs 559 – Modellierung großer Netze in der Logistik, Teilprojekt M9, Dortmund, 2005
- [Ber83] BERTIN, J.: Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps. University of Wisconsin Press, Madison, WI, USA, 1983
- [BF92] BESHERS, C.; FEINER, S.: Automated Design of Virtual Worlds for Visualizing Multivariate Relations. In: Kaufmann, A.; Nielson, G. (Eds.): Proceeding of Visualization 1992, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, pp. 283-290, 1992

- [BK08] BEIERLE, C; KERN-ISBERNER, G.: Methoden wissensbasierter Systeme – Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen, Vieweg Teubner Verlag u. GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 4. Auflage, 2008
- [Bri09] BRILL, M.: Virtuelle Realität. Informatik im Fokus, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [Bro10] BROY, M. (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovation durch software-intensive eingebettete Systeme. acatech DISKUTIERT, Springer, Berlin, 2010
- [BRS07] BENNET, C.; RYALL, J.; SPALTEHOLZ, L.; GOOCH, A.: The aesthetics of graph visualization. In: Cunningham, D.W.; Meyer, G.; Neumann, L. (Eds.): Eurographics Workshop on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization, and Imaging, pp. 57-64, Eurographics Association, 2007
- [BT11] BORZYKH, M.; TRÄCHTLER, A.: RailCab – Ein Schienenverkehrsmittel mit autonomen Einzelfahrzeugen und innovativer Spurführungstechnik. In: 11. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden, 23.-25. Feb. 2011, Dresden, 2011
- [BTG+09] BORZYKH, M.; TRÄCHTLER, A.; GEISLER, J.: Aufbau und Regelung eines sturzvariablen Bahnfahrwerks mit Einzelradlenkung. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme. 6. Paderborner Workshop, 2. und 3. April 2009, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 250, 2009
- [BW10] BIUNDO, S.; WENDEMUTH, A.: Von kognitiven technischen Systemen zu Companion-Systemen. In: KI – Künstliche Intelligenz, Springer-Verlag, Volume 24, Number 4, August, 2010, pp. 335–339, 2010
- [BZB+09] BUNGARTZ, H.J.; ZIMMER, S.; BUCHHOLZ, M.; PFLÜGER, D.: Modellbildung und Simulation – eine anwendungsorientierte Einführung, Berlin, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [CB04] CRÜCHTEN, M.; VON BOHUSZEWICZ, O.: Ist weniger mehr? Einfache, dezentrale Virtual Reality Lösungen im Vergleich zu zentralen High-End-Systemen. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.) 3. Paderborner Workshop, Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 17.-18. Juni 2004, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 149, Paderborn, 2004
- [CCK+83] CHAMBERS, J.M.; CLEVELAND, W.S.; TUKEY, P.A.; KLEINER, B.: Graphical Methods for Data Analysis. Duxbury Press, 1983
- [CKM05] CERFONTAINE, P. KUHLEN, T.; MÜLLER-HELD, B.: Interaktive, VR-gestützte Finite-Elemente-Datenanalyse von Werkzeugmaschinen. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.) 4. Paderborner Workshop, Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 9.-10. Juni 2005, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005
- [Cow91] COWAN, N.: The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. Behavioral and Brain Science, 24, pp.87-114, 1991
- [CSW09] CRAIG, A.B.; SHERMAN, W.R.; WILL, J.D.: Developing Virtual Reality Applications – Foundations of effective design. Burlington, USA; Morgan Kaufmann Publishers; 2009; S. 37
- [CMS99] CARD, M.K.; MACKINLAY, J.D.; SCHNEIDERMAN, B.: Readings in Information Visualization: Using Vision to Think. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999
- [Dah05] DAHM, M.: Grundlagen der Mensch-Computer-Interaktion. Addison-Wesley Verlag, 2005
- [DDG+10] DELFMANN, W.; DANGELMAIER, W.; GÜNTHER, W.; KLAUS, P.; OVERMEYER, L.; ROTHENGATTER, W.; WEBER, J.; ZENTES, J.: Eckpunktepapier zum Grundverständnis der Logistik als wissenschaftliche Disziplin. In: Delfmann, W.; Wimmer, T. (Hrsg.): Strukturwandel in der Logistik – Wissenschaft und Praxis im Dialog., DVV Media Group, Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, S. 3-10, 2010

- [Döb08] DÖBLER, T.: Simulation und Visualisierung in der Produktentwicklung. In: FAZIT Schriftenreihe, Informations- und Medientechnologie in Baden Württemberg. Mit freundlichen Grüßen Stiftung Baden-Württemberg, Marktanalyse Band 12, 2008
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortschrittliche mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, 2011
- [EC88] ELLSON, R.; COX, D.: Visualization of injection molding, In: Simulation (Transaction of The Society for Modeling and Simulation International), SAGE Journals, pp. 183-188, 1988
- [EEW07] EINSFELD, K.; EBERT, A.; WÖLLE, J.: Hannah – a vivid and flexible 3d information visualization framework. In: IV07 (IEEE Information Visualization 2007), 11th International Conference Information Visualization, 2007
- [EEW08] EINSFELD, K.; EBERT, A.; WÖLLE, J.: Modified Virtual Reality for Innovative Semantic Information Visualization. In: IV08 (IEEE Information Visualization 2008), 12th International Conference Information Visualization, 2008
- [Ert09] ERTEL, W.: Grundkurs Künstliche Intelligenz – Eine praxisorientierte Einführung, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2., überarbeitete Auflage, 2009
- [Est12-ol] EST – ENGINEERING SYSTEMS TECHNOLOGIES GMBH & CO. KG: <http://www.est-kl.com/products/data-gloves/cyberglove-systems/virtualhand-sdk.html>, , 2012
- [Fah04] FAHRENTHOLZ, M.: Konzeption eines Betriebskonzepts für ein bedarfsgesteuertes schienengebundenes Shuttlesystem. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 157, 2004
- [Few06] FEW, S.: Information Dashboard Design – The Effective Visual Communication of Data. O'Reilly Media, 2006
- [Föl08] FÖLLINGER, O.: Regelungstechnik – Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Hüthig Verlag, Heidelberg, 10. durchgesehene Auflage, 2008
- [FZ98] FURNAS, W.G.; ZHANG, X.: MuSE: A Multiscale Editor. In: Proceedings of the 11th Symposium on User Interface Software and Technology (UIST98), Nov. 1-4 1998, pp 107-116, San Francisco, CA, ACM, 1998
- [GBR+04b] GAUSEMEIER, J.; BAUCH, J.; RADKOWSKI, R.; SHEN, Q.: A Virtual Reality-based Design Environment for Self-Optimizing Mechatronic Systems. In: Drews, Paul (Eds.): Mechatronics & Robotics 2004, Sep. 13-15, Aachen, APS European Center for Mechatronics and Robotics, 2004
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen, Hanser Verlag, München, 2001
- [GEM01] GREEN, P.; E. KRIEGER, A.; M. WIND, Y.: Thirty Years of Conjoint Analysis: Reflections and Prospects. Interfaces, 31(3), S. 68-70, 2001
- [GF06] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K.: Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [GFD+08] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus (Teil 2). In: Konstruktion, Ausgabe Sept. 2008, Springer-VDI-Verlag und Co. KG, 2008
- [GHK+06] GAUSEMEIER, J.; HAHN, A.; KESPOHL, H.D.; SEIFERT, L.: Vernetzte Produktentwicklung – Der Weg zum Global Engineering Networking. Carl Hanser Verlag München Wien, 2006
- [GN03] GÖRZ, G.; NEBEL, B.: Künstliche Intelligenz. Fisher Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main, 2003

- [Gör00] GÖRTZ, G.: Einführung in die künstliche Intelligenz. Addison Wesley Verlag, 2. Auflage, 2000
- [GPW09] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.; WENZELMANN, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen, Hanser Verlag, München, 2009
- [GRS03] GÖRZ, G.; ROLLINGER, C.-R.; SCHNEEBERGER, J. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. Oldenburg Wissenschaftsverlag, München, 4. Auflage, 2003
- [GRW09] GAUSEMEIER, J.; RADKOWSKI, R.; WABMANN, H.: Virtuelle und erweiterte Realität zur Analyse komplexer mechatronischer Systeme. ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 11/2009, Hanser Verlag, München, S. 1024-1030
- [GS09] GUMM, H.P.; SOMMER, M.: Einführung in die Informatik, Wissenschaftsverlag, Oldenburg, 8., vollständig überarbeitete Auflage, 2009
- [GSA+11] GAUSEMEIER, J.; SCHÄFER, W.; ANACKER, H.; BAUER, F.; DZIWOK, S.: Einsatz semantischer Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 19./20. Mai 2011, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011
- [GSS+10] GEISLER, J.; SEXTRO, W.; SONDERMANN-WÖLKE, S.; TRÄCHTLER, A.: Experimentelle Untersuchung der Selbstoptimierung innerhalb des RailCab-Spurführungsmoduls. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): Tagungsband des 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 18.-19. März, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010
- [GT09] GEISLER, J.; TRÄCHTLER, A.: Control of the Pareto Optimality of Systems with Unknown Disturbances. In: Proceedings of the 7th International Conference on Control and Automation (ICCA 2009), Dec 9-11 2009, Christchurch, New Zealand, 2009
- [GVT08] GUTIERREZ, M. A.; VEXO, F.; THALMANN, D.: Stepping into Virtual Reality. Springer Verlag London Limited 2008
- [Hes06] HESTERMEYER, T.: Strukturierte Entwicklung der Informationsverarbeitung für die aktive Federung eines Schienenfahrzeugs. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2006
- [HM90] HABER, R.B.; MCNABB, D.A.: Visualization Idioms: A Conceptual Model for Scientific Visualization Systems. In: Visualization in Scientific Computing, p. 74-93, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, 1990
- [HMM00] HERMANN, I.; MELANCON, G.; MARSHALL, M.S.: Graph visualization and navigation in information visualization: A survey. IEEE Transaction in Visualization and Computer Graphics, 6(1): pp. 24-43, 2000
- [HT10] HAUBELT, C.; TEICH, J.: Digitale Hardware/Software-Systeme – Spezifikation und Verifikation. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [HTF96] HARASHIMA, F.; TOMIZUKA, M.; FUKUDA, T.: Mechatronics – “What Is It, Why and How?” An Editorial. In: IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Volume 1, Nr. 1, 1996
- [HTS+08] HENKE, C.; TICHY, M.; SCHNEIDER, T.; BÖCKER, J.; SCHÄFER, W.: Organization and control of autonomous railway convoys. In: Proceedings of the 9th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'08), Kobe, Japan, 2008
- [HWK+12] HASSAN B.; WABMANN, H.; KLAAS, A.; KEBLER, J.H.: Cascaded Heterogeneous Simulations for Analysis of Mechatronic Systems in Large Scale Transportation Scenarios. In: Proceedings of the 2012 Spring Simulation Multi-Conference, 26-29 March 2012, Orlando, FL, USA, Spring Simulation Multiconference Books: Emerging M&S Applications in Industry & Academia Symposium (EAIA), 2012

- [Ise08] ISERMANN, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2. vollständig neu bearbeitete Auflage, 2008
- [JH09] JENEWEIN, K.; HUNDT, D.: Wahrnehmung und Lernen in virtueller Realität – Psychologische Korrelate und exemplarisches Forschungsdesign. Arbeitsberichte des Instituts für Berufs- und Betriebspädagogik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, IBBP-Arbeitsbericht Nr. 67, 2009
- [KKE+10] KEIM, D.; KOHLHAMMER, J.; ELLIS, G.; MANSMANN, F.: Mastering the Information Age – Solving Problems with Visual Analytics. Eurographics Association, Goslar, 2010
- [KKU+07] KULYK, O.; KOSARA, R.; URQUIZA, J.; WASSINK, I.: Human-Centered Aspects. In: Kerren, A. Ebert, A.; Meyer, J. (Hrsg.): Human-Centered Visualization Environments, GI-Dagstuhl Research Seminar, Dagstuhl Castle, Germany, March 5-8, 2006, Series: Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 4417, Subseries: Image Processing, Computer Vision, Pattern Recognition, and Graphics, p.13-74, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [Kl09] KLÖPPER, B.: Ein Beitrag zur Verhaltensplanung für interagierende intelligente mechatronische Systeme in nicht-deterministischen Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, 2009
- [KN98] KRAMER, U.; NECULAU, M.: Simulationstechnik. Carl Hanser Verlag München Wien, 1998
- [KPS+83] KOSSLYN, S.M.; PINKER, S.; SIMCOX, W.; PARKIN, L.: Understanding Charts and Graphs: A Project in Applied Cognitive Science, ERIC Document Reproduction Service, 1983
- [Kra09] KRAPPE, H.: Erweiterte virtuelle Umgebungen zur interaktiven, immersiven Verwendung von Funktionsmodellen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau. In: Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe, Band 1, Universitätsverlag Karlsruhe, 2009
- [KU68] KEPPEL, G.; UNDERWOOD, B.J.: Proactive inhibition in shortterm retention of single items. Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 1, pp. 201-213, 1968
- [LBB+11] LIEFOLD, S.; BARTHEL, C.; BÄRECKE, F.; GABBERT, U.: Hybrides Postprocessing numerischer Simulationsmodelle im Automotiven VE-Prozess. In: Schenk, M. (Hrsg): Tagungsband der 14. IFF-Wissenschaftstage, 8. Fachtagung Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme, 28.-30. Juni 2011, Fraunhofer Verlag, Magdeburg, 2011
- [LGN+11] LIPIEC, K.; GESKE, M.; NAUMANN, A.; RABE, S.: Virtuelle Technologien zur Überwachung von Zuständen in elektrischen Energiesystemen. In: 14. IFF-Wissenschaftstage, Fachtagung Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme, 28. – 30. Juni 2011, Magdeburg, 2011
- [LHL01] LÜCKEL, J.; HESTERMAYER, T.; LIU-HENKE, X.: Generalisation of the Cascade Prinziple in View of a Structured Form of Mechatronic Systems, IEEE/ASME (AIM 2001), Villa, Olmo; Como, Italien, 2001
- [LMS10] LMS Imagine S.A.: Dashboard User Manual for AMESim. Rev. 10, November 2010, LMS Engineering Innovation, 2010
- [Lüc02] LÜCKEL, J.: Mechatronik – Eine Einführung zur Vorlesung: Grundlagen der Regelungstechnik. Universität Paderborn, 2002
- [LW04] LANG, U.; WÖSNER, U.: Virtual and Augmented Reality Developments for Engineering Applications. In: Neittaanmäki, T.; Rossi, T.; Korotov, S.; Onate, E.; Periaux, J.; Knörzer, D. (Ed.): European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS, July 24-28 2004, Jyväskylä, 2004
- [Mac86] MACKINLEY, J.: Automating the Design of Graphical Presentations of Relational Information. ACM Transactions on Graphics, 5(2), p.110-141, 1986
- [Maz09] MAZZA, R.: Introduction to Information Visualization. Springer-Verlag London, 2009

- [McC87] MCCORMICK, B. H.; DE FANTI, T. A.; BROWN, M. D.: Visualization in Scientific Computing. Computer Graphics, Vol. 21, Nr. 6, pp. 1-14, 1987
- [MDR91] MCCONAILL, P.; DREWS, P.; ROBROCK, P. (Eds.): Mechatronics and Robotics. ICS Press Amsterdam, 1991
- [McE95] MCEACHREN, A.M.: How Maps Work: Representation, Visualization, and Design. Guilford Press, New York, NY, USA, 1995
- [MHS+02] MATKOVIC, K.; HAUSER, H.; SAINITZER, R.; GRÖLLER, E.: Process Visualization with Levels of Detail. In: Proceedings of the IEEE Symposium in Information Visualization (InfoVis), pp. 67-70, Los Alamitos, CA, USA, 2002
- [Mik12-ol] MIKROCONTROLLER.NET: <http://www.mikrocontroller.net/articles/Drehgeber>, 2012
- [Mor69] MORI, T.: Yaskawa Internal Trademark Application Memo, 21.131.01, July, 1969
- [Mar07] MARTZ, P.: OpenSceneGraph Quick Start Guide. A Quick Introduction to the Cross-Platform Open Source Scene Graph API. Computer Graphics System Development Corporation, California, USA, 2007
- [Nau00] NAUMANN, R.: Modellierung und Verarbeitung vernetzter intelligenter mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2000.
- [NH04] NISCHWITZ, A.; HABERÄCKER, P.: Masterkurs Computergrafik und Bildverarbeitung. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2004
- [Nil12] NILSON, N.J.: John McCarthy – 1927-2011. National Academy of Sciences, 2012
- [Oes05] OESTERREICH, B.: Objektorientierte Softwareentwicklung. Analyse und Design mit UML 2.0. Oldenbourg Verlag, München, 7. Auflage, 2005
- [OMH+08] OSMIC, S.; MÜNCH, E.; HENKLER, S.; SCHÄFER, W.; GIESE, H.; HIRSCH, M.: Safe Online-Reconfiguration of Self-Optimizing Mechatronic Systems. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Eds.): Self-Optimizing Mechatronic Systems: Design the Future, 7th International Heinz Nixdorf Symposium, Feb. 20.-21. 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 223, Paderborn, 2008
- [Ope-ol] Documentation of OpenSceneGraph – an open source 3D graphics toolkit. Unter: <http://www.openscenegraph.com>
- [OSH10] OVTCHAROVA, J.; SCHOTTE, W.; HERTER, J.: Simulation des dynamischen Verhaltens von Schläuchen in Virtueller Realität unter Berücksichtigung von Massenströmen. In: Gausemeier, J.; Grafé, M.: (Hrsg.) 9. Paderborner Workshop, Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 10.-11. Juni 2010, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 274, S. 97-111, Paderborn, 2010
- [Pae02] PAELKE, V.: Design of Interactive 3D-Illustrations. Dissertation, Fakultät für Mathematik und Informatik, Universität Paderborn, C-Lab Publikation, Band 14, Shaker Verlag, 2002
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHAUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Grundlage erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung, Springer Verlag, 7. Auflage, Berlin Heidelberg, 2007
- [PD10] PREIM, B., DACHSELT, R.: Interaktive Systeme – Grundlagen, Graphical User Interfaces, Informationsvisualisierung. Band 1, Springer, 2010
- [PMM97] PATERNO, F.; MANCINI, C.; MENICONI, S.: ConcurTaskTrees: A Diagrammatic Notation for Specifying Task Models. In: Proceedings of IFIP TC13 International Conference on Human Computer Interaction (INTERACT), p. 362-369, Boston, MA, USA, Kluwer Academic Publishers, 1997
- [PBF+93] PYLYSHYN, Z.; BURKELL, J.; FISHER, B.; SEARS, C.; SCHMIDT, W.; TRICK, L.: Multiple parallel access in vision attention. In: Canadian Journal of Experimental Psychology, 48(2), pp. 260-283, 1993

- [Rad10] RADKOWSKI, R.: Brauchen wir Virtual Reality in der zukünftigen Produktentwicklung? In: Gausemeier, J.; Grafe, M.: (Hrsg.) 9. Paderborner Workshop, Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 10.-11. Juni 2010, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 274, S. 275-295, Paderborn, 2010
- [Rad12] RADKOWSKI, R.: Virtual Reality & Augmented Reality in der Produktentwicklung. Vorlesung SS2012, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, FG Produktentstehung, 2012
- [RD94] ROBERTSON, P.K.; DE FERRARI, L.: Systematic Approaches to Visualization: Is a Reference Model Needed? In: Rosenblum L.; Earnshaw, R.A.; Encarnacao, J.; Hagen, H.; Kaufman, A. A.; Klimentko, S.; Nielson, G.; Post, F.; Thalmann, D. (Eds.): Scientific Visualization, Advances and Challenges, Academic Press, Los Alamitos, 1994
- [RN07] RUSSEL, S.; NORVIG, P.: Künstliche Intelligenz – Ein moderner Ansatz. Pearson Studium, München, 2. Auflage, Nachdruck, 2007
- [Rob91] ROBERTSON, P.K.: A Methodology for Choosing Data Representations. IEEE Computer Graphics and Applications, 11(3), p. 56-67, 1991
- [Rot10] ROTH, R.: Simulation und Modellbildung im Marketing . Vorlesung WS 2010/2011, FH Giessen Friedberg, 2010
- [RW08] RADKOWSKI, R.; WABMANN, H.: Echtzeit-Visualisierung eines sturzvariablen Fahrwerks zur Analyse des Fahrverhaltens. In: Gausemeier, J.; Grafe, M.: (Hrsg.) 7. Paderborner Workshop, Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 5.-6. Juni 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, S. 43-60, Paderborn, 2008
- [RW10] RADKOWSKI, R.; WABMANN, H.: Software-Agent Supported Virtual Experimental Environment for Virtual Prototypes of Mechatronic Systems. In: Proceedings of the ASME World Conference on Innovative Virtual Reality (WINVR) 2010, May 12-14 2010, Ames, Iowa, USA, 2010
- [SBF+96] STRUBE, G.; BECKER, B.; FRESKA, C.; HAHN, U.; OPWIS, K.; PALM, G.: Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verlag, 1996
- [SBK+10] STÖCKLEIN, J.; BOLTE, M.; KLOMPMAKER, F.; GEIGER, C.; NEBE, K.: Interaktive Illustration heuristischer Optimierungsverfahren zur Wegeplanung. In: Gausemeier, J.; Grafe, M.: (Hrsg.) 9. Paderborner Workshop, Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 10.-11. Juni 2010, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 274, S. 191-207, Paderborn, 2010
- [Sch06] SCHÖNER, H.-P.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil. 2., vollständig bearbeitete Auflage, Springer Berlin Heidelberg, 2006
- [Sch89] SCHWEITZER, G.: Mechatronik-Aufgaben und Lösungen. Fortschrittsbericht, VDI Nr. 787. VDI, Düsseldorf, 1989
- [SFB08] SONDERFORSCHUNGSBEREICH 614: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus, Universität Paderborn, Finanzierungsantrag 2. Halbjahr 2009 bis 1. Halbjahr 2013, Band 1, 2008
- [SGB+05] SHEN, Q.; GAUSEMEIER, J.; BAUCH, J.; RADKOWSKI, R.: A 2D+3D Virtual Prototyping System for the Design of Self-Optimizing Mechatronic Systems. In: Moallem, Abbas (Eds.): 11th International Conference on Human-Computer Interaction, Las Vegas, Nevada, USA, July 22-27, 2005
- [SHH+11] STARK, R.; HAYKA, H.; ISRAEL, J.H.; KIM, M.; MÜLLER, P.; VÖLLINGER, U.: Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie. Informatik-Spektrum, 34/1, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2011
- [Shn96] SHNEIDERMAN, B.: The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. In: Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Languages, 1996
- [SM00] SCHUMANN, H.; MÜLLER, W.: Visualisierung – Grundlagen und allgemeine Methoden. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2000

- [SP09] SHNEIDERMAN, B.; PLAISANT, C.: Designing the User Interface: Strategies for Effective Human Computer Interaction. Addison Wesley, 5. Auflage, 2009
- [SR88] SCHULZE, K.P.; REHBERG, K.-J.: Entwurf von adaptiven Systemen – Eine Darstellung für Ingenieure. VEB Verlag Technik, Berlin, 1988
- [SRH+09] SEDLMAIR, M.; RUHLAND, K.; HENNECKE, F.; BUTZ, A.; BIOLETTI, S.; O’SULLIVAN, C.: Towards the Big Picture: Enriching 3D Models with Information Visualization and Vice Versa. In: Proceedings of the 9th International Symposium on Smart Graphics, SG 2009, Salamanca, Spain, May 28-30, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [SSS+11] SCHUMANN, M.; SCHENK, M.; SCHMUCKER, U.; SAAKE, G.: Digital Engineering – Herausforderungen, Ziele und Lösungsbeispiele. Hybrides Postprocessing numerischer Simulationsmodelle im Automotiven VE-Prozess. In: Schenk, M. (Hrsg): Tagungsband der 14. IFF-Wissenschaftstage, 8. Fachtagung Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme, 28.-30. Juni 2011, S. 191-199, Fraunhofer Verlag, Magdeburg, 2011
- [SSW07] SAHIN, E.; SPEARS, W. M.; WINFIELD, A. F. T.: Swarm Robotics. In: Lecture Notes in Computer Science, Volume 4433/2007, Springer, Berlin, 2007
- [Sug02] SUGIYAMA, K.: Graph Drawing and Applications for Software and Knowledge Engineers. World Scientific Publishing Company, 2002
- [Tan02] TANENBAUM, S.: Computernetzwerke. Addison-Wesley Verlag, 4. Auflage, 2002
- [TC05] THOMAS, J.J.; COOK, K.A.: Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics. National Visualization and Analytics Center (NVAC), IEEE Computer Society, 2005
- [Tel08] TELEA, A.C.: Data Visualization – Principles and Practice. A K Peters Ltd., 2008
- [Trä06] TRÄCHTLER, A.: RailCab – mit innovativer Mechatronik zum Schienenverkehrssystem der Zukunft. In: VDE (Hrsg.): VDE Kongress 2006 – Innovations for Europe – Fachtagungsberichte der ITG/BMBF, 23.-25 Okt. 2006, Aachen, VDE-Verlag, 2006
- [Trä09] TRÄCHTLER, A.: Entwurf intelligenter mechatronischer Systeme – Regelungstechnische Konzepte für selbstoptimierendes Verhalten. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): Tagungsband des 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 2.-3. April, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 250, Paderborn, 2009
- [Tuf01] TUFTE, E.R.: The visual Display of Quantitative Information. Graphics Press, 2nd edition, 2001
- [VDC12] VIRTUAL DIMENSION CENTER (VDC): White Paper Virtuelles Nutzfahrzeug – Anwendungen, Herausforderungen, Ergebnisse. Kompetenzzentrum Virtuelle Realität und Kooperatives Engineering w.V., Fellbach, 2012
- [War04] WARE, C.: Information Visualization – Perception for Design. 2. Auflage, Morgan Kaufmann, 2004
- [Wei92] WEIBMANTEL, H.: Mechatronik-Elektromechanik-Feinwerktechnik. In: VDI-Workshop, Braunschweig, Germany, 1992
- [Wer25] WERTHEIMER, M.: Drei Abhandlungen zur Gestalttheorie, Verlag der Philosophischen Akademie Erlangen, 1925, Neu-Auflage 1967
- [Wer39] WERTHEIMER, M.: Source Book of Gestalt Psychology. Chapter Laws of Organisation in Perceptual Forms, Harcourt Brace, New York, 1939
- [Wex93] WEXELBLATT, A.: Virtual Reality – Applications and Explorations. Academic Press Professional, Inc., Cambridge, 1993
- [Win92] WINSTON, P. H.: Artificial Intelligence. 3rd Edition, Addison-Wesley, 1992

- [WK11] WABMANN, H.; KREFT, S.: Virtual Prototyping – Ingenieure entwickeln mit Virtueller Realität. In: Marco Hemmerling (Hrsg.): Augmented Reality – Mensch, Raum und Virtualität, PerceptionLab1, Wilhelm Fink Verlag, München, 2011
- [WL90] WEHREND, S.; LEWIS, C.: A Problem-oriented Classification of Visualization Techniques. In: Proceedings IEEE Visualization, Oct. 1990, p. 139-143, 1990
- [WNB99] WARE, C.; NEUFELD, E.; BARTRAM, L.: Visualizing causal relations. In: Proceedings of IEEE Information Visualization: Late Braking Hot Topics, pp. 39-42, 1999
- [WR12] WABMANN, H., RADKOWSKI, R.: Knowledge-based Zooming Technique for the Interactive Analysis of Mechatronic Systems. In: Proceedings of IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES) 2012, pp. 109-114, 13.-15. June 2012, Lisbon, Portugal, 2012
- [Wri07] WRIGHT, H.: Introduction to Scientific Visualization. Springer Science and Business Media, LLC, 2007

Normen und Richtlinien

- [DIN19226] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Leittechnik – Regelungstechnik und Steuerungstechnik – Allgemeine Grundbegriffe. DIN 19 226 Teil 1, Beuth-Verlag, Berlin, 1995
- [ISO11179] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO); INTERNATIONAL ELECTRO – TECHNICAL COMMISSION (IEC): Informationstechnik – Metadatenregistrierung (MDR) – Teil 1: Rahmenwerk, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [ISO19501] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO); INTERNATIONAL ELECTRO – TECHNICAL COMMISSION (IEC): Information technology — Open Distributed Processing — Unified Modeling Language (UML) Version 1.4.2. ISO/IEC 19501:2005(E), ISO copyright office, Geneva, 2005
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth-Verlag, Berlin, 2004
- [VDI3633a] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen, VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1, Beuth-Verlag, Berlin, 2009
- [VDI3633b] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Simulation und Visualisierung, VDI-Richtlinie 3633, Blatt 11, Beuth-Verlag, Berlin, 2009

Anhang

Inhaltsverzeichnis	Seite
A1	Ergänzungen zur Problemanalyse..... A-1
A1.1	Charakterisierung von Daten A-1
A1.2	Visuelle Variablen und Visuelle Elemente A-7
A1.3	Designregeln, Gestaltungsprinzipien und Wahrnehmungsregeln A-8
A1.4	Platzierung von Visualisierungstechniken im 3D-Raum A-12
A2	Ergänzungen zur Konzeption A-15
A2.1	Komponenten des RailCab-Systems A-15
A2.2	Analyseaufgaben des RailCab-Systems A-15
A2.2.1	Analyseaufgaben der Logistiksimulation A-15
A2.2.2	Analyseaufgaben der Konvoiregelung und Kommunikation ... A-18
A2.2.3	Analyseaufgaben des Sturzvariablen Fahrwerks..... A-21
A2.3	Simulationsdaten des RailCab-Systems A-23
A2.3.1	Simulationsdaten der Logistiksimulation..... A-23
A2.3.2	Simulationsdaten der Konvoiregelung und Kommunikation ... A-26
A2.3.3	Simulationsdaten des Sturzvariablen Fahrwerks..... A-28
A2.4	Visualisierungsaufgaben A-32
A2.4.1	Zuordnung von Analyseaufgaben zu Visualisierungsaufgaben..... A-32
A2.4.2	Auflistung verwendeter Visualisierungstechniken und ihrer Ausprägungen A-33
A2.4.3	Auswahlmatrix – Geeignete Visualisierungstechniken für Visualisierungsaufgaben A-35
A2.5	Visualisierungstechniken..... A-38
A2.5.1	Visualisierungstechniken für Wirkbeziehungen A-38
A2.5.2	Steckbriefe der Primär-Visualisierungstechniken A-39
A2.5.3	Steckbriefe der Sekundär-Visualisierungstechniken..... A-40
A2.5.4	Steckbriefe der Logistiksimulation A-40
A2.5.5	Steckbriefe des Sturzvariablen Fahrwerks A-40

A1 Ergänzungen zur Problemanalyse

A1.1 Charakterisierung von Daten

In Tabelle A-1 werden die unterschiedlichen Daten-Kategorien und ihre wesentlichen Charakteristika beschrieben. Die erste Spalte beschreibt die Kategorie, die zweite Spalte die Datenbezeichnung und die dritte Spalte erläutert diese. Die Datentypen sind nicht immer trennscharf; so können eine Menge nominaler Daten auch ordinal sein. Die Charakteristika sind zusammengetragen aus [SM00], [PD10], [Maz09], [AMS+11]. In der letzten Spalte werden – soweit möglich – expressive und effektive Visuelle Variablen oder Visualisierungstechniken genannt. Sie beruhen auf Design- und Wahrnehmungsregeln (vgl. Kap. A1.3) und wurden auch aus der genannten Literatur zusammengetragen. Die Erläuterung jeder Visualisierungstechnik kann im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen, erfolgt aber in der Literatur.

Tabelle A-1: Übersicht unterschiedlicher Datenkategorien und Datentypen

Kategorie	Datenbezeichnung	Erläuterung	Effektive / Expressive Visuelle Variable
Bezugssystem	räumlich oder geografisch	Es besteht ein Bezug zum physischen/räumlichen System (z.B. eine Karte oder ein Gebäudeplan)	Position
	abstrakt	Es besteht kein Bezug zum physischen/räumlichen System.	
Attributtyp / Skala (möglicher Wertebereich der Ausprägung)	quantitativ (metrische Skala)	Diese Daten besitzen einen metrischen Wertebereich (z.B. Liste mit Float <2.3, 4.56, ...>) und ermöglichen die Durchführung arithmetischer Operationen. Beispiele sind sensorisch erfasste physikalische Kenngrößen oder Unternehmenskennzahlen. Werden sie in geordnete Bereiche eingeteilt, können sie in <i>kategorische</i> , <i>ordinale</i> Daten (s.u.) umgewandelt werden, wie z.B. eine Tageszeit in <morgens, mittags, abends>. Sie werden auch als Klassifizierung von Werten bezeichnet, da kontinuierliche Werte in Klassen eingeteilt werden [PD10, S. 449].	Position, Länge, Winkel
	qualitativ / kategorisch (nicht metrische Skala)	Kategorische Daten (oder: qualitative Merkmale) verwenden nicht-metrische Wertebereiche und dienen der Beschreibung, Gruppierung und Ordnung. Hierzu zählen nominale Daten (s.u.). Die einzig mögliche Rechenoperation ist der Test auf Gleichheit oder Ungleichheit [PD10, S. 449]. Qualitative/ Kategorische Daten lassen sich in Zahlenwerte überführen (z.B. Indexierung) und werden rechnerintern häufig so repräsentiert.	

	nominal	Nominale Daten stellen eine ungeordnete Menge von Daten dar. (z.B. die Variable Fahrzeugmarken mit den Ausprägungen <Audi, BMW, Ford, usw.>.) Durch Ordnung können sie in ordinale Daten überführt werden (z.B. durch alphabetische Sortierung der Namen) [PD10, S. 449].	Effektiv: Farbe (Farbton!), Textur (Symbol), Verbindung, Umfassung (Umrandung)
	ordinal	Eine ordinale Variable ist ein Tupel, eine geordnete Menge von nicht messbaren Werten. Beispiele sind Ordnungswörter <erste, zweite, dritte, ..., n-te> oder Kategorien wie <kalt, warm, heiß>. Neben einem Gleichheitstest kann hier die Richtung der Ausprägung bestimmt werden [PD10, S. 450].	Effektiv: Helligkeit, Sättigung, (Farbton, nur wenn für Beobachter sinnvoll), Größe (Länge)
Datentyp (Anzahl Attribute, die die Quantität beschreiben)	Punkt	Jedes Datenelement wird als Punkt im n-dimensionalen Raum betrachtet. (z.B. Messung: Blätter <länge, breite, typ, alter> mit <1.6, 2, B, 5>)	Streudiagramm (Scatter Plot), Glyphen
	Skalar (Betrag)	Eine Größe, die allein durch einen Zahlenwert repräsentiert ist. Skalare besitzen Größe/Umfang aber keine richtungsbezogene Informationen (z.B. Temperatur, Wellenlänge, Masse, Energie)	Balkendiagramm, Kreisdiagramm (wie univariate Daten)
	Skalar (Array, Liste)	Eine Größe, die durch mehrere Zahlenwerte repräsentiert ist (eine Variable speichert mehrere Werte im Array, Liste oder Struktur). Oft diskrete Stichproben kontinuierlicher Funktionen. Meist Datensets: 1D (Linie), 2D (Fläche, Bild), 3D (Volumen)	Linien-Diagramme, schattierte Oberflächen, Volumen-Rendering
	Vektor (Richtung)	Datenelement, das eine gerade Linie mit einer Richtung und Länge im n-dim. Raum (z.B. Richtung von Partikeln im Windkanal, Kraft, Beschleunigung)	Pfeile, Stromlinien, Partikelbahnen
	Tensor	Ein Tensor ist eine multilineare Abbildung (Abb. die in jeder Variable linear ist). Tensor 0-ter Ordnung ist ein Skalar, 1-ter Ordnung ist ein Vektor, Tensor 2-ter Ordnung ist eine Matrix.	Bisher wenig Visualisierungstechniken erforscht
	Kontinuität von Daten (kontinuierlich)	Daten sind repräsentiert durch (Stichproben von) Funktionen, unabhängige Variable (Raum, Zeit, Spektral) und abhängige Variable (Systemgrößen). (Sie sind quantitativ und ordinal.)	Ähnlich zu Skalaren.
Datenstruktur / Topologie (nicht-kontinuierlicher Daten), meist für Relationen verwendet	Sequentiell, linear	Dies sind lineare Sequenzen von Daten, z.B. ein Text oder eine Liste.	Text (Annotation), Folge von Symbolen
	relational	Daten, zwischen denen eine Relation besteht (Tabellen, relationale Datenbanken). (s.u.)	Netzwerk-artige oder Baum-artige Darstellungen
	temporal	Daten, die sich über die Zeit verändern (siehe Tabelle A-2). Zeitdeskriptoren: es gibt versch. Bedeutungen von Zeit: Simulationszeit, aktuelle Zeit, Frame, Berechnungs-Zeit, Aufnahme- und Abspiel-Zeit, Nutzers Zeitrahmen. Zu beachten: Zeitmodelle müssen synchronisiert werden.	Animationen (kontinuierliche Bewegung, Blinken, Verändert bestimmter visueller Variablen)

Relationen von Daten	hierarchisch (Bäume)	Anders als bei Graphen ist der Relationstyp bei Bäumen immer ein Enthalten-sein-In bzw. eine Mutter-Kind-Beziehung (Untergeordnet-sein). Hierarchien von Datenobjekten o. Attributen werden typischerweise als Baumstrukturen repräsentiert. Bäume sind eine Untermenge von Graphen und somit Netzwerken, enthalten jedoch keine Zyklen. Häufig besteht die Relation von Datenobjekten jedoch in der Art ihrer Verschachtelung. (Hierarchische Strukturen lassen sich einfacher visualisieren als Graphen).	Vielfältige Spezialtechniken: <i>Baumvisualisierungen</i> , <i>Cone Tree (Kegelbaum)</i> , <i>Perspektive Wall</i> .
	netzwerkartig (Graphen)	Verknüpfte Datenobjekte bilden häufig Netzwerke, die sich als Graphen beschreiben lassen, wobei Datenobjekte bzw. Attribute die Knoten bilden und die - möglicherweise vielfältigen - Relationen zwischen ihnen werden als Kanten repräsentiert. (z.B. Moleküle: Kugel-Strich Modell).	Netzwerke (Node-Link-Diagramme), Knoten können einfache Kreise, Glyphen, Vorschaubilder oder Texte sein. Anordnungen: hierarchische Techniken, radiale Techniken, hyperbolische Techniken.
	Objekt-Attribut Relationen	Relationen existieren nicht nur zwischen Datenobjekten, sie können auch in Form logischer Assoziationen zwischen Datenobjekten und ihren Attributen auftauchen (Hotels mit Ausstattungsmerkmalen, die vorhanden oder nicht vorhanden sind - dies beschreibt Relation zwischen Objekt und Attribut) [PD10].	<i>Venn-Diagramm</i> (dessen Kreise ein Attribut repräsentieren, die Objekte werden in Kreise/ Schnittmengen davon einsortiert), oder optimiert: <i>Cluster-Map</i> (Node-Link-Diagramm; hat keine topologischen Einschränkungen).
Dimension (auch: Anzahl der zu untersuchenden Attribute)	abhängige / unabhängige Attribute	Ein abhängiges Attribut hängt von einem anderen Attribut ab (z.B. von der Zeit); ein unabhängiges Attribut dagegen nicht.	
	univariat (eindimensional)	Dies sind Datenobjekte mit einer in sequentieller Form gespeicherten Variable bzw. einem Attribut. (eine Dimension variiert in Abhängigkeit einer anderen) (z.B. zeitabhängige Variablen, wie Anzahl E-Mails pro Tag, Gewinnspanne eines Unternehmens, Höhe eines Flugzeugs). Schneidermann definiert es etwas anders, bei ihm bezieht sich 1D auf die Repräsentation von Daten (z.B. Texte, alphabetische Listen von Namen o. Menüs.) nicht auf die Anzahl der Variablen [PD10, S. 450], [Shn96].	Textuelle Anzeige eines Wertes (deutlich schwerer zu erkennen als ein Balken o.ä.), Balkendiagramme, Kreisanzeigen wie Tachometer (Wert=Pos. eines Zeigers), farbige Markierung von Grenzwerten oder wichtigen Bereichen, Histogramme, 1D-Streudiagramme, Tag Clouds (Wörterwolke nach Häufigkeit benutzter Wörter).

	bivariat (zweidimensional)	Es werden zwei verschiedene Dimensionen eines Datensatzes unterschieden (z.B zwei Attribute eines Produktes, wie Preis u. elektr. Leistung eines Haushaltsgerätes). Es sind zwei Attribute, die visualisiert werden müssen [PD10, S. 450].	Zweidimensionale Achsendiagramme (XY-Diagramme). Z.B. Punkt-, Linien-, oder Säulendiagramme. (Landkarten sind wichtige Spezialform), Flächen, Bilder
	trivariat (dreidimensional)	Hier gibt es drei abhängige Attribute. Es handelt sich um einen Sonderfall multidimensionaler Daten, der durch die Auswahl dreier besonders relevanter Attribute leicht herbeigeführt werden kann.	Höhenfelder, Iso-Oberflächen, Volumen, 3D-Streudiagramme mit 3 Achsen für Attributausprägungen, 2D-Scatterplots um Verdeckungsprobleme in 3D zu umgehen
	multivariat (multidimensional)	Dies sind Datensätze mit mehr als zwei Attributen. Die meisten relationalen und statistischen Datenbanken speichern multidimensionale Datenobjekte, deren n Attribute einen n-dimensionalen Raum bilden (Strukturierung in Tabellen möglich). Häufig hat ein Datenobjekt (eine Zeile) dabei dutzende Attribute (Spalten). Dazu reichen 2D. o. 3D-Diagramme (selbst unter Nutzung weiterer visueller Wertekodierungen) für die Darstellung nicht mehr aus. (Bsp: Kennzahlen eines Unternehmens, Wirtschaftsindikatoren eines Landes, Wetterdaten einer konkr. Messstation, verschiedene Merkmale eines techn. Produktes). Die Attribute können je von untersch. Datentyp sein.	<i>2D-Scatterplots</i> mit weiteren Attributwertekodierungen in Form visueller Eigenschaften (Form, Größe, Textur), <i>Scatterplot-Matrizen</i> , <i>Parallele Koordinaten</i> , <i>Star-Plots = Kiviatdiagramm / Kiviatgraph</i> (radiale/ sternförmige Anordnung der Achsen, SOLL/IST Vergleiche mehrerer Daten gut). [PD10, S. 457ff.].

Die folgende Tabelle A-2 beschreibt unterschiedliche Charakteristika zeit-orientierter Daten. Daten werden als zeit-orientiert bezeichnet, sobald ein Daten-Attribut (bzw. eine Dimension) mit der Zeit assoziiert ist. Die Beschreibung ist angelehnt an AIGNER et.al., die sich mit der Modellierung wesentlicher Zeit-basierter Aspekte befassen [AMS+11, S. 66]. Auch hier wird in der letzten Spalte eine Auswahl geeigneter Visualisierungstechniken skizziert.

Tabelle A-2: Beschreibung von zeit-orientierten Daten – Ausprägungen und Erläuterungen der Daten

Kategorie	Datenbezeichnung	Erläuterung	Effektive / Expressive Visuelle Variable
Art der Daten	Ereignisse	Ereignisse treten sehr kurz auf und lösen meist Änderung weiterer Datenwerte aus.	Blinken (Animation)
	Zustände	Zustände dauern über eine längere Zeit an.	Farbton Zustandsdiagramm
Zeitverhalten, Skala	ordinal (temporal)	Hier sind lediglich relative Ordnungsrelationen gegeben (z.B. bevor, nachdem). Diese sind ausreichend wenn qualitative zeitliche Aussagen interessieren und keine quantitativen Daten vorhanden sind.	Zeitliche Reihenfolge von Animationen
	diskret	Dies sind quantifizierbare zeitliche Distanzen (z.B. Sekunden oder Millisekunden).	Punkt-Diagramm (1D-Streudiagramm), Balkendiagramm
	kontinuierlich	Beim kontinuierlichen Zeitverlauf ist ein Mapping auf reelle Zahlen möglich. Zwischen zwei benachbarten Punkten ist existiert immer ein dritter Punkt.	Linien-Diagramm (Linien-Plot)
Zeitmodell: Betrachtungszeitraum, Gültigkeitsbereich	punkt-basiert	Beim punkt-basierten Betrachtungspunkt ist die Zeitspanne sehr klein jedoch größer als Null.	Gantt-Diagramme, kurzes Blinken (Animation)
	intervallbasiert	Dies ist ein längerer Teilabschnitt der Zeit (z.B. kann die Zeitangabe 20. August bis zu 24 Stunden enthalten.)	Zeitlinie (Timeline), Gantt-Diagramme, Planungs-Linien (Projektpläne)
Anordnung	linear	Die Zeit von der Vergangenheit in die Zukunft verläuft linear; es gibt keine Wiederholung von Zeit-Einheiten.	Zeitlinie (Timeline), TimeWheel (Zeitrad), Gantt-Diagramme, Planungs-Linien (Projektpläne)
	zyklisch	Zyklische Zeit enthält wiederkehrende Zeitwerte (z.B. Frühjahr, Sommer, Herbst, Winter).	Auf einen Kreis werden mehrere Variablen aufgetragen (Kreisdiagramme)
Beobachtungspunkt, Ansicht	geordnet (der Reihe nach)	Geordnete Zeitdomänen betrachten Aktionen, die nacheinander passieren. (<i>Total geordnet</i> : nur eine Sache zu einem Zeitpunkt, <i>Partiell geordnet</i> : überlappende Ereignisse)	Gantt-Diagramme, Planungs-Linien (Projektpläne)
	verzweigend	Bei verzweigenden Zeitsträngen werden parallel ablaufende Aktionen oder alternative Szenarien betrachten; es tritt jedoch nur ein Strang ein. (Dies unterstützt Entscheidungsprozesse).	Baumartige Darstellungen

	multiple Perspektiven	<p>Dies sind simultane (auch konträre) Sichten der Zeit. Alle multiplen Zeitstränge treten tatsächlich ein (z.B. Augenzeugenberichte, o. stochastische Multi-Run Simulationen: für gleiches Experiment variieren Ergebnisse abhängig der Initialisierung).</p> <p>Sowohl verzweigende als auch multiple Perspektiven erfordern die Einführung der Unsicherheit/ Wahrscheinlichkeit, um zu vermitteln welcher der Alternativen Wege eintreten wird</p>	Baumartige Darstellungen, Entscheidungsbäume
Abstraktionen:		Um die Komplexität zeit-orientierter Daten zu beherrschen werden Abstraktionen eingeführt. Dies können unterschiedliche Granularitäts-Stufen oder Gruppierungen der Zeit sein (z.B. Minuten, Stunden, Tage, ...). Zeitvariablen werden auf kleinere oder größere Einheiten abgebildet.	Hierarchische Tabellen (z.B. Kalender-Darstellungen)
Abstraktionsgrade	keine	Es erfolgt keine Gruppierung von Zeit-Einheiten.	
	einzelne	Jeder Zeit-Wert wird auf die selbe Zeiteinheit abgebildet (z.B. alles in Millisekunden)	
	multiple	Es sind mehrere Abstraktionsgrade in einem Modell vorhanden (z.B. Kalender).	Balkendiagramme, Farben
Zeit-Primitiven	augenblicklich / unmittelbar	Dies ist ein einzelner Punkt auf einer Zeitachse (Zeitpunkt). Je nachdem ob ein punkt-basiertes oder intervall-basiertes Zeitmodell genutzt wird, kann ein einzelner Punkt auch eine Dauer beinhalten (z.B. ein Datum).	Punkt-Diagramm
	Intervall	Eine Zeit-Menge des unterliegenden Zeitmodells; kann durch die Zeitpunkte <i>Anfangs</i> und <i>Endpunkt</i> definiert sein oder <i>Anfang</i> und <i>Dauer</i> .	Gantt-Diagramm
	Spanne / Bereich	Eine Spanne hat keine definierten Referenzpunkte (kein Anfangs- und Endpunkt); es wird lediglich die Dauer angegeben (z.B. vier Tage).	Zeitbalken ohne Angabe über Start- und Endpunkt (Länge ausschlaggebend)
Bestimmtheit (Determiniertheit)	bestimmt (determiniert)	Eine Zeitbeschreibung ist determiniert, wenn alle zeitlichen Aspekte präzise spezifiziert sind (Anfang, Ende, Granularität, usw.).	Gantt-Diagramm oder Planungs-Linien mit präzisen Zeitangaben
	unbestimmte (nicht deterministisch)	Existieren keine genauen Spezifikationen über die Zeit, ist die Beschreibung nicht determiniert (z.B. <i>der Transport dauerte vom 8. Juni bis 11. Juni</i> . Liegt ein stündliches Zeitmodell vor, ist dies in obiger Information nicht bestimmt.)	Planungs-Linien (Projektpläne), z.B. frühester Start und spätester Start.

A1.2 Visuelle Variablen und Visuelle Elemente

Die **Visuellen Variablen** (auch: graphische Eigenschaften) einer visuellen Repräsentation sind: Position, Größe (bzw. Länge), Richtung oder Orientierung, Helligkeit, Farbe, Textur (bzw. Musterung) und Form des Elements (siehe z.B. [Ber83]). (Die Form hat wiederum eigene visuelle Variablen und zudem *Visuelle Elemente*, siehe unten). Werden bewegliche Elemente dargestellt, z.B. Animationen in VR, wird zudem die zusätzliche Variable „Bewegung“ (zeit-abhängiger Daten) berücksichtigt. Es sind die Basis-Elemente, aus deren Ausprägung und Kombination eine Visualisierungstechnik besteht. Sie können in räumliche Eigenschaften und Objekt-Eigenschaften unterteilt werden. Bild A-1 veranschaulicht dies.

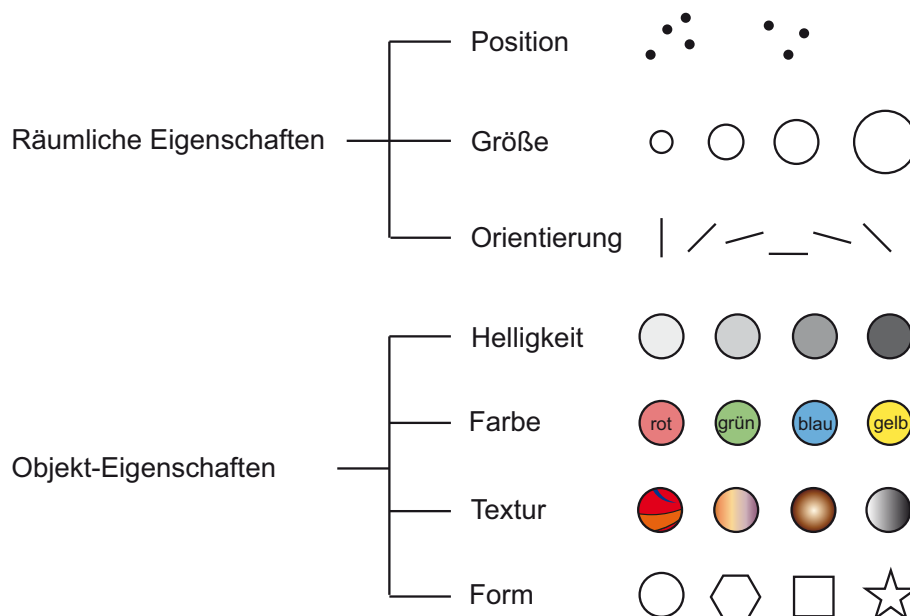


Bild A-1: Visuelle Variablen nach [Ber83]

Diese Variablen lösen beim Menschen einen sofortigen Reiz im Gehirn aus, d.h. sie fallen in einer Umgebung unmittelbar auf. Sie weisen sog. „Retinalen“ Eigenschaften auf; dies sind die Eigenschaften, auf die die Retina der Augen unabhängig ihrer Position sensibel reagiert.

Wie die Variablen auf die menschliche Wahrnehmung wirken und wie sie folglich effektiv eingesetzt werden wird in Kapitel A1.3 aufgezeigt.

Daneben gibt es grafische **Visuelle Elemente** (die eine Dimension beinhalten):

- Punkte (0D)
- Linien (1D)
- Oberflächen (2D)
- Volumen (3D) und zusätzlich

- Kurven nach [SM00]
- geometrische Formen nach [SM00]

Die Variable Form wird um diese Elemente erweitert, dies ist der Bezug der räumlichen Dimension. Die meisten Bilder, Grafiken (hier: Visualisierungstechniken) haben eine Form und verwenden weitere Visuelle Variablen.

A1.3 Designregeln, Gestaltungsprinzipien und Wahrnehmungsregeln

In der Tabelle A-3 sind Designregeln, Wahrnehmungsregeln und Gestaltgesetze für die Entwicklung von Darstellungen von Informationen zusammengetragen. Die Gesetze und Regeln wurden seit dem 20. Jahrhundert⁵¹ überarbeitet und ergänzt; es werden fortwährend neue Gesetze verfasst und in verschiedenen Wissenschaftsgebieten publiziert. Die folgende Tabelle erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Auch führt sie nicht die wichtigsten Gestaltgesetze und -regeln auf, sondern die für diese Arbeit als relevant betrachteten. Die Regeln sind im Wesentlichen aus folgender Literatur zusammengetragen: [AMS+11], [Few06], [PD10], [SM00], [Wer25], [Wer39].

Tabelle A-3: Designregeln, Gestaltungsprinzipien, Wahrnehmungsregeln

Regel Nummer	Regel Bezeichnung und Beschreibung
	Wahrnehmung allgemein
1	Selektive Wahrnehmung: Der Mensch sieht nur das, worauf er bewusst achtet. Die Wahrnehmung ist nicht nur äußerst selektiv, sondern auch nur bedingt zuverlässig. Ein und dieselbe Darstellung kann unterschiedlich interpretiert werden, abhängig von der Erwartung [PD10].
2	Anzahl gemerkter Informationen: Das Arbeitsgedächtnis kann nur eine begrenzte Menge an Informationen aufnehmen. Nach neueren Forschungen sind es bei jungen Erwachsenen drei bis vier Einheiten. Kinder und ältere Menschen merken sich noch weniger [PD10], [Cow91].
3	Behalten von Informationen: Wenn kurz nacheinander versch. Informationen, z.B. Listen von Wörtern, präsentiert werden, merkt man sich eher die zuerst präsentierten Wörter als die später präsentierten. Die zuletzt präsentierten Informationen werden auch besser gemerkt. Zudem können ähnliche Informationen schlechter gemerkt werden, als solche die sich weniger ähnlich sind [PD10], [KU68].

⁵¹ Als eigentliche Begründer der Gestaltpsychologie gelten Max Wertheimer, Wolfgang Köhler, Kurt Koffka und Kurt Lewin. Ihre Forschungen fanden im 20. Jahrhundert statt. Diese sogenannte „Berliner Schule der Gestaltpsychologie“ arbeitete am Gegenstand der Wahrnehmung sowie an zahlreichen anderen allgemeinen Grundlagen der Psychologie.

4	Ablenkung vermeiden: Benutzer sollen so wenig wie möglich von ihrer eigentlichen Aufgabe abgehalten werden [PD10].
5	Informationen erkennen: Visualisierungstechniken und Interaktionen sind so zu gestalten, dass der Mechanismus des Erkennens (nicht Erinnerns) genutzt wird [PD10].
6	Hervorheben von Informationen: Akzentuierung (Hervorheben) sind ein wichtiges Mittel, um Expressivität und Effektivität von Visualisierungstechniken zu verbessern [AMS+11].
	Visuelle Suche
7	Markante Eigenschaften: Je mehr andere Objekte sichtbar sind (sog. Ablenker), die vom eigentlichen Zielobjekt (gesuchte Information) ablenken, desto länger dauert die Suche nach einem Zielobjekt. Wenn sich dieses durch ein bestimmtes Merkmal von allen ablenkenden Objekten deutlich unterscheidet, ist die Suchdauer unabhängig von der Anzahl der Ablenker [PD10].
8	Eine präattentive Wahrnehmung funktioniert auch für eine größere Menge an ablenkenden Objekten, solange diese auf gleiche Weise dargestellt werden [PD10].
9	Eine präattentive Wahrnehmung ist nicht möglich , wenn sich das Zielobjekt erst durch eine Kombination mehrerer individueller Merkmale (z.B. Form und Farbe) erkennen lässt [PD10].
	Designregeln zum Einsatz von Farben
10	Farbe als starke visuelle Variable: Insbesondere Farbe wird vom Menschen spontan und ohne bewusste Wahrnehmungsaktivitäten erkannt. Darüber hinaus lässt sich Farbe als visuelle Variable prinzipiell mit allen Visualisierungstechniken kombinieren und stellt somit einen zusätzlichen Freiheitsgrad für die Visualisierung der Daten zur Verfügung. Zu den Nachteilen der Farbe zählt jedoch die Farbenfehlsichtigkeit und der Reproduktion der Visualisierung in Graustufen, zum Beispiel in Printmedien [SM00].
11	Blau dargestellte Informationen sparsam einsetzen: blau wird nicht in der gleichen Intensität wahrgenommen wie Gelb-, Grün-, oder Rottöne (da Menschen ca. 10 Mal so viele Rot- u. Grünzapfen besitzen). Subtile Unterschiede in Blautönen werden kaum erkannt. Daher sollten Blautöne nicht vorwiegend genutzt werden. Reines Blau für die Darstellung von Text, dünnen Linien u. kleinen Formen sollte vermieden werden [PD10].
12	Gelb zieht das Auge mehr an als Rot und wird als höherer Wert wahrgenommen [EC88].
13	Helligkeit ist der wichtigste Farbparameter um Objekte zu unterscheiden; Menschen können Helligkeitsunterschiede wesentlich einfacher als Farbton- oder Sättigungsunterschiede wahrnehmen. Da unterschiedliche Grautöne eine natürliche visuelle Hierarchie besitzen stellen sie unterschiedliche Quantitäten besser dar als Farbe [Tuf01].
14	Das Auge nimmt dunkle Objekte mit größerer Wirkung wahr als helle [CCK+83].
15	Stark gesättigte , aufmerksamkeitslenkende Farben sollten sparsam eingesetzt werden. Ihre Signalwirkung ist z.B. für Warnsymbole sinnvoll. Vorwiegend sollten weniger gesättigte Pastellfarben genutzt werden [PD10].
16	Durch Variation der Farb-Sättigung kann die Ordnung (z.B. klein, mittel, groß) von Objekten abgebildet werden [Ber83].

17	Bis zu drei verschiedene Farben können effektiv genutzt werden. Der Farbton ist dabei sehr effektiv für nominale Informationen. Dabei können auch transparenten Farben eingesetzt werden [Mac86], [EC88].
18	Überwältigende visuelle Darstellung vermeiden: Farben sollten sehr sparsam eingesetzt werden um Darstellungen zu vermeiden, die visuell überladen und damit schwer zu betrachten sind. Sie sollten nur dort verwendet werden, wo der gewünschte Effekt nicht durch andere Gestaltungsmöglichkeiten erreicht werden kann, bspw. durch spezielle Anordnung oder Abgrenzung durch Linien [Few06].
	Gestaltgesetze: Auswahl von Gestaltgesetzen nach Max Wertheimer [Wer25], [Wer39]:
19	Gesetz der Nähe: Räumliche Nähe führt dazu, dass Darstellungen als zusammengehörig wahrgenommen werden, selbst wenn sich Formen und Farben unterscheiden. Folglich sollten Unterschiede vor allem durch große Distanzen vermittelt werden.
20	Gleichheit: Die Gleichheit von Farben und Formen führt ebenfalls, aber in geringerem Maße als die Nähe, zur Wahrnehmung von Zusammengehörigkeit.
21	Geschlossenheit/Abschluss: Geschlossene Objekte werden besser erkannt als nicht geschlossene und werden als zusammengehörig wahrgenommen. Wenn diese nicht vollständig umschlossen (z.B. unterbrochene Linien) sind, werden sie automatisch vom Gehirn vervollständigt..
22	Kontinuität: Objekte, welche eine Fortsetzung anderer Objekte zu sein scheinen, werden als diesen zugehörig bzw. als Teil des gesamten Objekts wahrgenommen, auch wenn sie unterbrochen sind.
23	Ähnlichkeit: Die Ähnlichkeit von Form, Größe, Farbe, Ausrichtung oder Textur führt dazu, dass sie als zusammengehörig bzw. als Gruppe wahrgenommen werden.
24	Gemeinsames Schicksal: Objekte, die räumlich gleich ausgerichtet sind oder sich zeitlich in dieselbe Richtung bewegen, werden vom Gehirn gruppiert (z.B. Pfeile, die in dieselbe Richtung zeigen).
25	Prägnante Gestalt: Die menschliche Wahrnehmung zeigt eine Tendenz zur deutlichen und prägnanten Form. Prägnante Formen sind z.B. ein Kreis, ein Dreieck oder Rechteck.
26	Bewegung: Objekte, die eine Bewegung in dieselbe Richtung implizieren, werden als ganze Einheit wahrgenommen.
27	Prägnanz: Objekte mit besonderen Merkmalen werden zuerst und stärker wahrgenommen.
	Bewegung
28	Eine Bewegung ist zur Aufmerksamkeitslenkung , z.B. bei Überwachungsaufgaben in Leitständen, besonders gut geeignet. Ihre falsche Verwendung (z.B. zu viele bewegende Objekten, zu häufiges Blinken) kann das Gegenteil bewirken [PD10].
29	Anzahl beweglicher Objekte: Betrachter können bis zu fünf gleichzeitig stattfindende Bewegungen korrekt interpretieren und entsprechend reagieren [PD10], [PBF+93].
30	Animierte Veränderungen: In einer komplexen 3D-Visualisierung (z.B. Computerspielen) werden animierte Veränderungen sicherer und schneller erkannt, als nicht-animierte Veränderungen von Objekten, bspw. deren Formen. Dieser Unterschied ist besonders ausgeprägt, wenn sich die Veränderungen nicht im Fokus des visuellen Feldes ereignen [PD10], [Bar01].

31	Kausalität durch Bewegung: Bewegungen, die zeitlich gut aufeinander abgestimmt sind, können sehr gut vermitteln, wie bestimmte Vorgänge zusammenhängen: beginnt eine Bewegung unmittelbar nachdem eine andere abgeschlossen wurde, nimmt der Betrachter einen kausalen Zusammenhang wahr [PD10], [WNB99].
32	Geschwindigkeit einer Bewegung: Die Geschwindigkeit einer Bewegung beeinflusst die aufmerksamkeitslenkende Wirkung. Eine schnelle Bewegung wird als ein Ereignis wahrgenommen, das eine schnelle Reaktion erfordert. Geschwindigkeit kann als Maß für die Dringlichkeit eingesetzt werden [PD10].
33	Bewegung des Blickpunktes: Wenn der Blickwinkel bewegt wird während die Daten animiert werden, ist die Interpretation der Daten schwierig [PD10].
	Aufmerksamkeit
34	Größe von Objekten fordern Aufmerksamkeit: Die Größe der Objekte ist auswirkend auf die Aufmerksamkeit; Größere Objekte werden eher gesehen [PD10].
35	Aufmerksamkeit nicht über-beanspruchen: Die Aufmerksamkeit, die für die Bedienung einer Software oder eines Gerätes benötigt wird, sollte minimal sein, insbesondere wenn die Software nur unterstützende Funktion hat und die Aufmerksamkeit für eine komplexere Hauptaufgabe benötigt wird [PD10], [Dah05].
36	Aufmerksamkeit mit Hilfe von Blinken generieren: Bei Informationen, die eine direkte Aufmerksamkeit benötigen, können visuelle Blinksignale verwendet werden. Diese Warnmeldung sollte allerdings nur dann eingesetzt werden, wenn auch wirklich sofortige Aufmerksamkeit bzw. direktes Handeln erforderlich sind [PD10], [Few06].
37	Zu viele Alarm-Darstellungen vermeiden: Das Anzeigen eines (visuellen) Alarms bzw. einer Warnung sollte nur in Situationen erfolgen in denen dringend reagiert werden muss, um ein Abstumpfen gegenüber zu häufigen, unnötigen Warnungen zu vermeiden. Dabei bleibt ein Alarm nicht nur negativen Ereignissen vorbehalten, auch gute Bedingungen können hervorgehoben werden, sofern sie eine baldige Reaktion erfordern [Few06].
	2D vs. 3D Darstellungen
38	Einsatz von 2D und 3D-Darstellungen vorziehen: 2-dimensionale Darstellungen sind häufig klarer als solche in 3D, da letztere die kognitive Auslastung bzw. den mentalen Aufwand des Betrachters erhöhen. Dies liegt daran, dass die Dreidimensionalität auf dem zweidimensionalen Bildschirm nur durch Perspektive darstellbar ist. Daher sollten 2D Repräsentationen im Allgemeinen denen in 3D vorgezogen werden. Allerdings erfordern bestimmte Situation dreidimensionale Darstellung (beispielsweise Objekte in Bewegung oder Daten mit einer dreidimensionalen, räumlichen Komponente). Hier sind 3-dimensionale Darstellungen zu verwenden [PD10], [Maz09]. Fazit für diese Arbeit: Der 3D-Raum der VR-Anwendung begünstigt die 3-dimensionalen Darstellungen. Daher sollten weitestgehend 3-dimensionale Darstellungen verwendet werden. 2-dimensionale Darstellungen sind geeignet für abstrakte Daten, für die sich kein räumlicher Bezug festlegen lässt.
	Sonstiges
39	Anpassen der Darstellung an das mentale Modell der Nutzer: Ein Nutzer konstruiert sich ein mentales Modell seines speziellen Tätigkeitsbereiches um die Domäne in der er arbeitet verstehen zu können. In diesem Modell sind z.B. alle wichtigen Dinge, Ereignisse und deren Beziehungen zueinander enthalten. Je näher eine Darstellung an diesem mentalen Modell ist, desto einfacher fällt es dem Nutzer diese zu verstehen [Few06].

40	Die visuelle Variable „Position“ ist sehr effektiv: Von allen graphischen Eigenschaften ist die Position entlang einer Achse diejenige mit dem unmittelbarsten visuellen Einfluss. Die Position wird effektiver wahrgenommen als Farbe [Mac86].
41	Bei Flächenwahrnehmung beträgt die Sensitivität 6% - das heisst, dass sich zwei Flächen um mindestens 6% in ihrer Größe unterscheiden müssen, damit ein Unterschied zwischen ihnen vom Betrachter wahrgenommen wird [KPS+83].
42	Transparenz ermöglicht es, dass Dinge von hohem Interesse schnell erkannt werden können, indem durch Dinge von geringem Interesse hindurchgeblickt wird [Ber83].
43	Glyphen (Symbole) wie z.B. Sterne, Pfeile oder andere Arten der symbolischen Repräsentation sind besser geeignet für qualitative Aussagen und um besondere oder außergewöhnliche Eigenschaften oder Daten auszumachen [CCK+83].
44	Länge wird akkurater / genauer wahrgenommen als Ausrichtung oder Steigung [KPS+83].
45	Form kann nur für nominale Unterscheidungen genutzt werden und wird nicht selektiv wahrgenommen [Mac86].

A1.4 Platzierung von Visualisierungstechniken im 3D-Raum

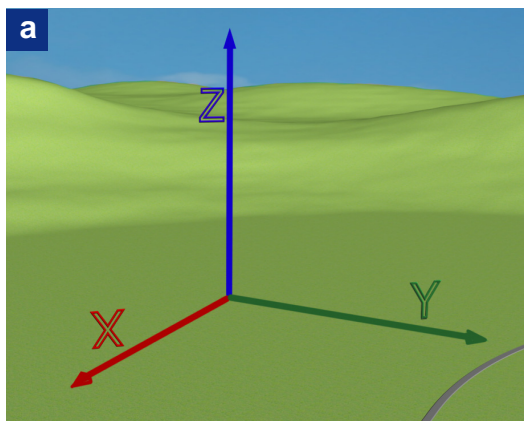
Die Platzierung einer Visualisierung im 3D-Raum einer VR-Anwendung enthält den Anzeigort und die Ausrichtung der Visualisierung (sog. örtliche Referenz). Folgende Techniken entstammen der Computergrafik und sind für solch eine Platzierung etabliert. Sie sind in Bild A-2 und Bild A-3 dargestellt (angelehnt an [Kra09], [NH04]):

Display-fixierte Visualisierungstechnik: Dies ist in der Regel ein *Head-Up-Display* (HUD). Ein HUD ist eine Darstellungstechnik, bei dem einem Anwender Informationen in sein Sichtfeld projiziert werden. In VR werden HUDs meist am Rand des Bildschirms platziert, um Statusinformationen eines Objekts oder alternative Ansichten der Virtuellen Umgebung darzustellen; Ein HUD ist meist eine transparente 2D-Fläche, die am Bildschirm „haftet“ (displayfixiert).

Weltfixierte Visualisierungstechnik: Diese ist i.d.R. ein 3D-Objekt, das am Umgebungsmodell der Virtuellen Umgebung positioniert und ausgerichtet wird (z.B. Farbkarte über 3D-Modellen).

Objektfixierte Visualisierungstechnik: Diese ist i.d.R. ein 3D-Objekt, das an einem 3D-Modell fixiert oder aber zwischen mehreren 3D-Modellen angeordnet wird.

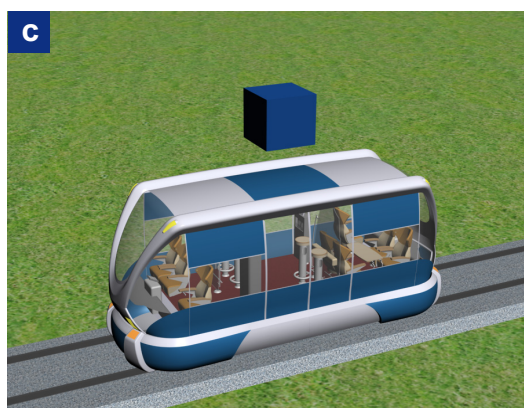
Anwenderfixierte Visualisierungstechnik: Dies ein sog. Billboard (deutsch: Plakatwand). Als Billboard wird eine dem Betrachter stets zugewandte Fläche bezeichnet (anwenderfixiert). Für die Darstellung zusätzlicher Informationen in VR wird die Fläche in der Nähe eines zugehörigen 3D-Modells positioniert und darauf Informationen über interne Daten dargestellt. Dabei können unterschiedlichste Visualisierungstechniken verwendet werden, z.B. Annotationen und Diagramme. Ein Billboard ist auch objektfixiert oder weltfixiert, dreht sich jedoch zum Nutzer hin.



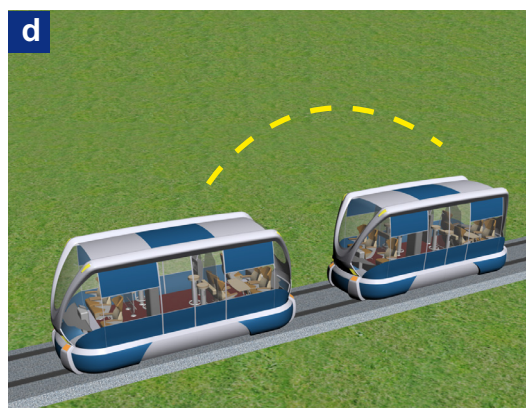
Weltfixiert - Visualisierungstechnik fest im globalen Koordinatensystem



Displayfixiert: Visualisierungstechnik am Display fixiert (Head up Display)



Objektfixiert - Visualisierungstechnik am Objekt

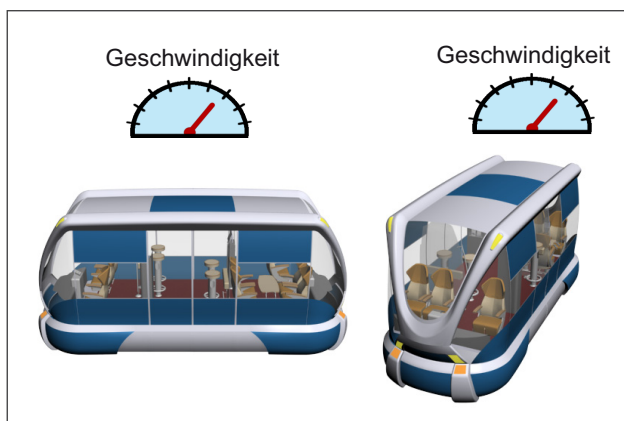


Objektfixiert - Visualisierungstechnik zwischen zwei Objekten

Bild A-2: Beispiele zur Platzierung einer Visualisierungstechnik in VR-Anwendungen: a) weltfixiert, b) displayfixiert (Head Up Display) und c) objektfixiert an einem Objekt sowie d) zwischen mehreren Objekten.



Feste Ausrichtung: Visualisierungstechnik ist fest am Objekt ausgerichtet



Billboard: Bei Bewegung des Objekts bleibt Visualisierungstechnik zum Nutzer ausgerichtet

Bild A-3: Beispiele für die Ausrichtung einer Visualisierungstechnik in VR-Anwendungen: feste Ausrichtung oder fortwährend zum Nutzer ausgerichtet (Billboard)

A2 Ergänzungen zur Konzeption

A2.1 Komponenten des RailCab-Systems

Das Schienenverkehrssystem RailCab zeichnet sich durch zahlreiche Komponenten aus. Aus logistischer Sicht wurden die wesentlichen Komponenten und ihre Wirkweise in [Fah04] definiert (siehe Tabelle A-4). Im Rahmen des RailCab Projektes wurden diese um folgende Komponenten erweitert: Regionen-Kontrolleinheiten und Weichenkontrolleinheiten. All diese Komponenten werden hier als AMS behandelt. Sie sind sog. *aktive Komponenten*, die während eines Transportprozesses auf Änderungen reagieren oder eigenes Verhalten aufweisen.

Tabelle A-4: Komponenten des RailCab-Systems aus logistischer Sicht, in Anlehnung an [Fah04, S.10]

	Transportgut (z.B. Passagier)	RailCab (AMS)	Bahnhof u. Haltepunkt (AMS)	Depot (AMS)	Strecken- kontrolle (AMS)
Räumliche Ausprägung	Orts- veränderlich	Orts- veränderlich	Ortsfest	Ortsfest	Ortsfest
Funktionale Anforderungen	Auftrags- generierung	Koordination der Fahrt, Ortung	Disposition: zusammenführen von Transportgut zu RailCab	einlagern, auslagern, Wartung	Stellbefehle vor- geben, überwa- chen
Interagiert mit	Bahnhof, RailCab	Bahnhof, Strecken- kontrolle, andere Rail- Cabs, Depot	Transportgut, RailCab, Depot	RailCab, Bahnhof	RailCab, andere Strecken- kontrollen

A2.2 Analyseaufgaben des RailCab-Systems

A2.2.1 Analyseaufgaben der Logistiksimulation

Zur Analyse der Logistiksimulation zählen im Wesentlichen folgende Fragestellungen: Kann die Transportaufgabe erfüllt werden und wie gut kann sie erfüllt werden, unter dem betrachteten Ziel, eine möglichst zuverlässige und schnelle Beförderung bei möglichst geringem Energieaufwand zu gewährleisten? Können die weiteren logistischen Anforderungen (siehe Kapitel 4.2.1) erfüllt werden? Wie gut funktionieren die Routing und Planungs-Algorithmen? Werden überhaupt Konvois gebildet? Zudem soll ein Vergleich unterschiedlicher Betriebsstrategien und ihrer Parameter ermöglicht werden und Optimierungspotentiale identifiziert werden.

Die Analyseaufgaben der Logistiksimulation sind in Tabelle A-5 dargestellt. In der ersten Spalte wird die Entwicklungstätigkeit des entsprechenden Verfahrens dargestellt, die zweite Spalte enthält die Analyseaufgaben. In der dritten Spalte erfolgt die Bezeichnung der entsprechenden allgemeingültigen Analyseaufgabe (Erläuterung siehe Kapitel 4.3.1). In der vierten Spalte werden die abgeleiteten Visualisierungsaufgaben genannt. Die letzte Spalte enthält eine Zuordnung der Visualisierungsaufgabe zu den Strukturierungsebenen VMS, AMS oder MFM sowie zu den IV-Ebenen des Operator-Controller-Moduls.

Bei der Analyse der Logistiksimulation werden Experimente mit folgenden zwei Analyse-Schwerpunkten durchgeführt:

Vergleich von Betriebsstrategien: Es werden unterschiedliche Betriebsstrategien entwickelt und dazu werden unterschiedliche Parameterausprägungen untersucht. Die Parameter sind: die Anzahl der Fahrzeuge in einem Szenario und ihre Kapazität (Sitzplatzangebot), Strategien zur Auftragszuweisung (bspw. ob das nächste oder das leerste Fahrzeug einen Auftrag erhält), die Reisegeschwindigkeit und Strategien bzw. Regeln zur Konvoibildung.

Vergleich von Modellausprägungen: Hier wird insbesondere die Streckeninfrastruktur betrachtet, die Anzahl und Verteilung von Bahnhöfen und Depots oder ob eine ein- oder mehrgleisige Streckenführung geeignet ist. Die Bewertungskriterien sind die Qualität der erbrachten Transportaufgabe (Wartezeiten, Fahrzeiten, Komfort usw.), Wirtschaftlichkeit insbes. Energieverbrauch und Sicherheit (z.B. Kollision).

Tabelle A-5: *Analyseaufgaben der Logistiksimulation und Verhaltensplanung*

Entwicklungsaufgabe (und Verfahren)	Beschreibung der Analyse-Fragestellung	Bezeichnung der Analyse-Aufgabe	Bezeichnung und Beschreibung der abgeleiteten Visualisierungsaufgabe	Zuordnung zu Makro-Ebenen u. dem OCM
Logistik-Simulation				
Logische Beschreibung des Streckenmodells (Transportnetzwerk als Graph) modellieren und Bewegungsverhalten der Fahrzeuge auf dem Streckenmodell simulieren	Verhalten der RailCabs auf einem gegebenen Streckenmodell analysieren: Welche Auswirkung hat die Infrastruktur der Strecke auf die Güte des Transports?	Geometrie, Bewegungsverhalten, Korrelation / Kontext	3D-Modell der Schienenstrecke und Bewegungsverhalten der Fahrzeuge darstellen: Das Fahrverhalten der Fahrzeuge soll sichtbar sein, folglich soll die Güte des Transports bewertet werden können. (VA: Gestaltbehaftete Systemkomponenten, Bewegungsverhalten)	Makro: VMS, AMS OCM: KO
Logistische Betriebsstrategie entwickeln und systematisches Herantasten an optimales Ergebnis durch Parametervariation: Parameterwahl analysieren, Regeln der Strategie analysieren (z.B. wann feuert eine Regel?) Betriebsstrategien vergleichen	Beladung (Aufträge) von RailCabs analysieren: Wie ist die aktuelle Beladung eines RailCabs? Überblick: Sind alle fahrenden RailCabs gleichmäßig mit Aufträgen (Beladung) ausgelastet?	Kontinuierliche Messwertaufnahme, Systemparameter, Zweck (Transportgut), Statistik	Beladung darstellen: Die Anzahl aktueller Passagiere (Beladung) eines RailCabs soll sichtbar sein. In der Überblicksdarstellung soll ein Überblick über die Auslastung aller RailCabs verschafft werden. (VA: Systemparameter, Statistik, Aufmerksamkeitslenkung)	Makro: VMS, AMS OCM: KO
	Wartezeiten analysieren: Wie lang sind die Wartezeiten der Passagiere am Bahnhof?	Kontinuierliche Messwertaufnahme / Systemparameter	Wartezeiten der Passagiere (Beladung) am Bahnhof darstellen (VA: Systemparameter, Statistik)	Umfeld
	Vorgaben (Ereignisse) höherer mechatronischer Ebenen analysieren: Wann und wo treten Ereignisse bzw. Vorgaben einer höheren Ebene ein, die Auswirkung auf das Verhalten haben? (z.B. Auftragsanfrage, Auftragszuweisung eines neuen Auftrags, Stauinformationen, Möglichkeit zur Konvoibildung)	Ereignis, Aktivität, ggf. Kommunikation	Die Vorgaben / Ereignisse (z.B. Auftragsvergabe, Konvoibildung initiieren) darstellen: Die Ereignisse und folglich entsprechendes Verhalten der Fahrzeuge soll deutlich sichtbar sein. (VA: Gestaltbehaftete Systemkomponente, Ereignisse)	Makro: AMS OCM: KO (Berechnung von Vorgaben)
	Statistische Daten eines RailCabs analysieren: z.B.: Durchschnittsgeschwindigkeit, der Anteil der Leerfahrten vs. der beladenen Zeit, Wartezeiten im Depot	Statistik, Historie	Statistische Auswertungen eines RailCabs darstellen: Für jedes RailCab sollen die statistischen Daten abgerufen werden können. (VA: Statistik, Abrufen von Informationen)	Makro: AMS

Routenplanungs-Algorithmus entwickeln (z.B. verschiedene Graphensuche-Verfahren)	Beobachten einer geplanten Route. Welche Route plant ein RailCab zu fahren?	System-Ziele, geplante Route (Weg)	Geplante Route (Ziele) eines RailCabs darstellen. (VA: Ziele, Modellstruktur)	Makro: AMS OCM: KO
	Ziele eines RailCabs analysieren: Wo befindet sich die Zielstation und wann ist die geplante sowie tatsächlich eingetroffene Ankunftszeit? Auch aktuelle Ziele aller RailCabs sollen untersucht werden.	System-Ziele (örtliche und zeitliche), Systemparameter (Ankunftszeit)	Zielstationen (örtliche Ziele) und Ankunftszeit (zeitliche Ziele) darstellen: In der Überblicks-Darstellung soll ein Überblick über Ziele aller RailCabs verschafft werden. (VA: Ziele, Systemparameter)	Makro: VMS, AMS OCM: KO
	Auslastung befahrener Strecken analysieren: Wie ist die Auslastung der Schienenstrecke? Stark befahrene oder nicht befahrene Segmente sollen identifiziert werden.	Statistik	Auslastung einzelner Streckensegmente darstellen. (VA: Statistik)	Makro: VMS
Routen-Umplanung aufgrund von Stau-Informationen	Meidung von Staus analysieren: Wo / wann könnten potentiell Staus auftreten? Sind RailCabs in der Lage den Staus selbstständig auszuweichen?	Korrelation / Kontext, (Verhaltensanpassung), Ziele	Aktuelle Ziele aller RailCabs darstellen; zusätzlich nach Ankunftszeit Ziele kategorisieren (VA: Wirkweise (Ziele), System-Ziele)	Makro: VMS OCM: KO
Parameter für Entscheidungsfindungen einstellen	Entscheidungsfindung analysieren: Trifft ein RailCab die richtigen Entscheidungen, wie z.B. die Richtungs-wahl an Weichen oder eine Auftragsannahme?	Entscheidungsfindung (Aktivitäten, Ereignisse), Statistik	Aktivitäten/Ereignisse, wie Auftragseingang und -annahme oder Routenwechsel darstellen: Auch ein Überblick über Entscheidungsfindungen aller RailCabs soll möglich sein. (VA: Entscheidungsfindung, Aktivitäten (IV), Ereignisse, Aufmerksamkeitslenkung, Statistik)	Makro: VMS, AMS OCM: KO

A2.2.2 Analyseaufgaben der Konvoiregelung und Kommunikation

Die Vorgaben aus der Logistiksimulation lösen einen Konvoi-Prozess aus, da diese als übergreifende Instanz alle Fahrzeuge und ihre Position kennt und zwei wesentliche Entscheidungen bzgl. der Konvoibildung trifft: 1. Mit wem ist ein Konvoi sinnvoll? 2. Wann ist ein Konvoi sinnvoll?

Eine relevante Fragestellung bei der Konvoiregelung ist, ob die Regelung funktioniert, ohne dass Kollisionen eintreten. Konkrete Analyseaufgaben sind in Tabelle A-6 gelistet. In der ersten Spalte wird die Entwicklungstätigkeit genannt, die zweite Spalte enthält die dabei anfallenden Analyseaufgaben. In der dritten Spalte erfolgt die Bezeichnung der Analyseaufgaben-Klasse (Erläuterung siehe Kapitel 4.3.1). In der vierten Spalte werden die abgeleiteten Visualisierungsaufgaben genannt. Die letzte Spalte enthält eine Zuordnung der Visualisierungsaufgabe zu den Strukturierungsebenen VMS, AMS oder MFM sowie zu den Ebenen des Operator-Controller-Moduls.

Tabelle A-6: *Analyseaufgaben Konvoiregelung und Kommunikation*

Entwicklungsaufgabe (und Verfahren)	Beschreibung der Analyse-Fragestellung	Bezeichnung der Analyse-Aufgabe	Bezeichnung und Beschreibung der abgeleiteten Visualisierungsaufgabe	Zuordnung zu Makro-Ebenen u. dem OCM
Konvoiregelung				
Reglersynthese und Simulation des Reglers	<p>Konvois eines Anwendungsszenarios analysieren:</p> <p>Wo befinden sich Konvois? Es soll überblickt werden, auf welchen Streckensegmenten aktuell Konvois gebildet werden, d.h. welche Fahrzeuge sich im Konvoi-Prozess befinden könnten.</p>	Bewegungsverhalten, Statistik	<p>RailCab-Konvois darstellen:</p> <p>Bereiche darstellen (hervorheben), an denen Konvois gebildet werden. Der Anwender soll auf die entsprechenden Segmente aufmerksam gemacht werden, da aus der Entfernung die Fahrzeuge, sowie deren Abstände schwer zu erkennen sind.</p> <p>(VA: Statistik, Aufmerksamkeitslenkung)</p>	<p>Makro: VMS</p> <p>OCM: KO</p>
	<p>Länge eines Konvois analysieren:</p> <p>Wie ist die Länge der Konvois?</p>	Kontinuierliche Messwertaufnahme	<p>Konvoilänge darstellen:</p> <p>Länge und Anzahl der RailCabs im Konvoi sollen sichtbar sein.</p> <p>(VA: übergreifende VA, Systemgrößen)</p>	<p>Makro: VMS</p>
	<p>Abstandsregelung analysieren:</p> <p>Funktioniert die Abstandsregelung? Gibt es kritische Abstände?</p>	Bewegungsverhalten, Kontinuierliche Messwertaufnahme	<p>Abstände zwischen RailCabs darstellen.</p> <p>(VA: übergreifende VA, Wirkweise, Systemgröße / Systemparameter)</p>	<p>Makro: VMS, AMS</p> <p>OCM: RO, CO</p>
	<p>Zustände des Konvoi-Prozesses überprüfen:</p> <p>Werden die Zustände in richtiger Reihenfolge durchlaufen? Sind die Übergangsbedingungen korrekt? Z.B. das Umschalten zwischen Positions- und Geschwindigkeitsregelung. Funktioniert folglich die Konvoibildung und -auflösung, insbes. im Weichenbereich?</p>	Bewegungsverhalten, Zustände, Aktivitäten, Korrelation / Kontext	<p>Konvoi-Zustände eines jeden Fahrzeugs darstellen:</p> <p>Während der Konvoibildung und -Auflösung soll die Bewegung der RailCabs, die Zustände und deren Übergangsbedingungen angezeigt werden. (Ggf. sind auch vergangene Zustände interessant; z.B. als Liste anzeigen).</p> <p>(VA: Gestalt, Wirkweise, Zustände, Zustandsübergänge)</p>	<p>Makro: VMS, AMS</p> <p>OCM: RO,</p>
	<p>Wirkbeziehungen zwischen einzelnen Fahrzeugen analysieren:</p> <p>Wirkbeziehungen, wie Abstände, Kommunikation, Kollision usw. sehen, um Rückschlüsse auf das Modell zu ziehen.</p>	Bewegungsverhalten, Kontinuierliche Messwertaufnahme, Kommunikation	<p>Wirkbeziehungen darstellen:</p> <p>Während der Konvoibildung und -Auflösung soll die Wirkbeziehung zwischen den Fahrzeugen sichtbar sein.</p> <p>(VA: Wirkweise)</p>	<p>Makro: AMS</p> <p>OCM: RO, CO</p>
	<p>Entscheidungsfindungen analysieren:</p> <p>Wann, oder wie entscheidet ein RailCab, sich einem Konvoi anzuschließen (z.B. Vorgaben von einer höheren Ebene, Entscheidungsgrößen).</p>	Aktivitäten	<p>Eine Kombination aus vorherigen Visualisierungsaufgaben ermöglicht das Nachvollziehen der Entscheidungsfindungen</p>	<p>Makro: VMS, AMS</p> <p>OCM: KO, RO</p>

Kommunikation				
Blöcke (modelliert in StateFlow Charts) werden nacheinander geprüft, ob die Kommunikation gemäß der Erwartung funktioniert.	Einleitung der Kommunikation analysieren: Wird eine Komm. rechtzeitig eingeleitet? Wann kommuniziert ein RailCab?	Kommunikation (systemextern), Kommunikationsablauf, Aktivitäten, Wirkweise	Kommunikationsablauf und -partner darstellen: Es soll das Einleiten des Konvois sichtbar sein, sowie welche RailCabs an der Kommunikation beteiligt sind. Auf der Überblicksdarstellung soll die Kommunikation zwischen vielen RailCabs oder RailCab-Konvois dargestellt werden. (VA: Wirkweise, Kommunikation)	Makro: VMS, AMS OCM: RO
	Kommunikationspartner analysieren: Mit wem kommuniziert ein RailCab; Kommunizieren die richtigen Blöcke (Sender, Empfänger) miteinander?	Kommunikation (systemextern), Aktivitäten,	Kommunikationspartner darstellen (VA: Wirkweise, Kommunikation)	Makro: VMS, AMS OCM: RO
	Datenübertragung überprüfen: Funktioniert die Datenübertragung eines Kommunikations-Busses? Welche Daten kommuniziert ein RailCab?	Kontinuierliche Messwertaufnahme, Kommunikation (systemextern)	Kommunikationsdaten darstellen: Die ausgetauschten Daten, wie z.B. Position oder Geschwindigkeit sollen angezeigt werden (VA: Systemgrößen)	Makro: VMS, AMS OCM: RO
	Zustände analysieren: Aktuellen Zustand in den StateFlow Charts der einzelnen Komponenten überprüfen, um zu sehen ob richtige Zustandsfolge durchlaufen wird.	Zustände	Zustände der StateFlows (Zustandsdiagramme) darstellen: Es soll sichtbar sein, welches Fahrzeug der Koordinator, welches Member ist, usw. (VA: Zustände)	Makro: VMS, AMS OCM: RO
	Systemparameter überprüfen: Sind Werte von internen Variablen / Signalen korrekt? (z.B. Distanz zwischen RailCabs, Position eines RailCabs, aktuelle Geschwindigkeit, Länge und Mitglieder des Konvois)	Kontinuierliche Messwertaufnahme	Werte der Systemparameter darstellen: Bei Bedarf sollen gewünschte Systemparameter abrufbar sein. (VA: Systemgrößen)	Makro: VMS, AMS OCM: RO, CO
	Daten-Überläufe von Nachrichtenpuffern oder Ausfall von Nachrichten feststellen. (Es hat jeweils jeder Sender und Empfänger einen Puffer)	Ressource (Puffer), Statistik	Statistische Auswertungen über Ausfall von Nachrichten und Füllstand eines Puffers darstellen (VA: Statistik, Warnung bei Überlauf)	Makro: AMS OCM: RO

A2.2.3 Analyseaufgaben des Sturzvariablen Fahrwerks

Bei der Entwicklung der Regelung interessieren den Entwickler im Wesentlichen folgende Aspekte: zum einen die Stabilität des Systems, zum anderen die Regelgüte des Reglers. Die Stabilität beschreibt, ob bei konstanter (auch sprungartiger konstanter) Anregung des Systems, das System nach unendlicher Zeit auf ein konstantes Ergebnis kommt. Für Schienenfahrzeuge ist dieses Ergebnis das konstante Erreichen einer Ruhelage in der Spur. Ist dies nicht der Fall, ist das System instabil und das Fahrzeug pendelt zwischen den Gleisen (Querposition der Achse oszilliert). Die Regelgüte beschreibt, wie gut dem Soll-Verlauf gefolgt werden kann; es ist die Abweichung zwischen Soll und Ist. Wesentliche Parameter, die Stabilität und Regelgüte beeinflussen, sind: Geschwindigkeit, Reibung im Rad- Schiene-Kontakt oder äußere Einflüsse. Sie werden bei der Reglerauslegung eingestellt und folglich das Verhalten des Fahrwerks analysiert. Ergebnis der Regelung ist die Querverschiebung auf dem Gleis. Ziel ist es, eine möglichst stabile Fahrt des Fahrwerks im Gleis zu erreichen (keine Oszillation). Zudem wird die Reglerstruktur analysiert. Es wird überprüft, wie gut Spurführung und Überwachung funktionieren und wann sie aktiv sind.

Die Visualisierung in VR soll bei der Reglersynthese und -analyse unterstützen. Da das Zusammenspiel von Fahrzeug und Strecke ersichtlich ist, sollen Rückschlüsse auf das Gesamtsystem gezogen werden können.

Tabelle A-7 zeigt zusammengefasst die konkreten Analyseaufgaben. In der ersten Spalte wird die Entwicklungstätigkeit genannt, die zweite Spalte enthält die dabei anfallenden Analyseaufgaben. In der dritten Spalte erfolgt die Bezeichnung der entsprechenden Analyseaufgaben-Klasse (Erläuterung siehe Kapitel 4.3.1). In der vierten Spalte werden die abgeleiteten Visualisierungsaufgaben genannt. Die letzte Spalte enthält eine Zuordnung zu den Ebenen des Operator-Controller-Moduls. Da es sich beim Fahrwerk um ein MFM handelt, wird hier lediglich diese Makro-Ebene betrachtet.

Tabelle A-7: *Analyseaufgaben des Sturzvariablen Fahrwerks*

Entwicklungsaufgabe (und Verfahren)	Beschreibung der Analyse-Fragestellung	Bezeichnung der Analyse-Aufgabe	Bezeichnung und Beschreibung der abgeleiteten Visualisierungsaufgabe	Zuordnung zum OCM
	Haupt-Analyseaufgaben: Bewegungsverhalten analysieren: Wie verhält sich das Fahrwerk auf der Schiene? Wie gut ist die Stabilität des Fahrwerks im Gleis und die Regelgüte aufgrund geänderter Reglerstruktur oder -parameter?	Korrelation / Kontext, Geometrie und Bewegungsverhalten	Bewegungsverhalten, Stabilität und Regelgüte (Systemgrößen) darstellen	CO
Regler-Struktur auslegen (Reglersynthese):				
Spurführungsregelung überprüfen	Zustände analysieren: Wann wird ein Regler zur Sturzverstellung aktiviert? Setzt sich folglich die Sturzaktorik in Bewegung?	Zustände (Regler-Zustand), Bewegungsverhalten, Systemgrößen	Regler-Zustand und Lenk- bzw. Sturzwinkel darstellen: Es soll dargestellt werden welche Regler aktuell aktiv, inaktiv oder ausgefallen sind. Folglich soll die Radstellung und Größe des eingestellten Winkels angezeigt werden.	RO
	Systemparameter analysieren: Was ist die Ursache für die Sturzverstellung: Vorsteuerung bei Kurvenfahrt, zu hohe Querverschiebung, instabiles Verhalten (niedrige Reibung), Ausfall der Lenkaktorik?	Umgebung, Kontinuierliche Messwertaufnahme, Korrelation / Kontext	Wirkweise und Systemparameter für Sturzverstellung darstellen: Die Ursache soll deutlich dargestellt werden, z.B. der Kurvenradius, der Wert der Querverschiebung, Stabilität, Ausfall der Lenkaktorik (Fehlermeldung)	RO, CO
Überwachung und Diagnostik überprüfen	Ein-/Ausgabegrößen analysieren: Was sind die Eingänge und Ergebnisse der Überwachung? Welcher Regler wird folglich aktiviert?	Kontinuierliche Messwerte und Regler-Zustand	Systemparameter und Status der Überwachung darstellen: Eingangsgröße an Überwachungskomponente, Status der Überwachungskomponente (aktiv/inaktiv) und Ergebnisgrößen anzeigen.	RO
	Systemkomponente (Verhalten) analysieren: Wann löst die Überwachung eine Warnung, Fehler oder Verhalten im Notfall aus? Gibt es z.B. einen Ausfall der Lenk- oder Sturz-Regelung und / oder Aktorik? Welches Verhalten wird folglich ausgelöst?	Verhaltensanpassung (fehlertolerante Regelung)	Warnung / Fehler der Überwachung darstellen: Warnungen und Fehler der Überwachung und Diagnostik darstellen, wenn sie auftreten. (VA: Warnung/Fehlermeldung)	RO
	Systemparameter analysieren: Wie gut konnte der max. Reibungswert in Querrichtung geschätzt werden?	Kontinuierl. Messwertaufnahme und Umgebung (Geometrie und Störgrößen)	Reibungswert (Systemgröße) darstellen: Reibungswert im Zusammenhang mit der Umgebung darstellen	RO

Lokale Regelung auslegen (Regler-Kaskaden)				CO
Regler auslegen, PID-Anteile des Reglers zur Lenkung bestimmen	Systemparameter und Systemgrößen analysieren: Wie wirken sich eingestellte Parameter des Reglers auf Lenkwinkel und folglich auf das Bewegungsverhalten des Fahrwerks aus?	Kontinuierliche Messwertaufnahme, Systemgröße, Bewegungsverhalten	Lenkwinkel (Systemgröße) darstellen: Lenkwinkel darstellen, (ggf. SOLL und IST darstellen zum Vergleich.) Auswirkung auf Verhalten des Fahrwerks anzeigen (Wirkzusammenhang: Parametergröße, Systemgröße, Grundsystem)	CO
	Systemparameter und Systemgrößen analysieren: Wie wirken sich eingestellte Parameter des Reglers auf Sturzwinkel und folglich auf das Bewegungsverhalten des Fahrwerks aus?	Kontinuierliche Messwertaufnahme Systemgröße, Bewegungsverhalten	Sturzwinkel (Systemgröße) darstellen: Sturzwinkel darstellen, (ggf. SOLL und IST darstellen zum Vergleich.) Auswirkung auf Verhalten des Fahrwerks anzeigen (Wirkzusammenhang: Parametergröße, Systemgröße, Grundsystem)	CO
	Messgrößen (Systemparameter) analysieren: Wie wirken sich Messgrößen des Wirbelstromsensors auf das Bewegungsverhalten des Fahrwerks aus (Querverschiebung)?	Korrelation / Kontext, Bewegungsverhalten	Querverschiebung (Systemparameter) darstellen: Zusammenhang zwischen gemessener Größe (z.B. Querverschiebung), Sturz- und Lenkverstellung sowie Stabilität darstellen.	RO, CO
	Systemgrößen im Zusammenhang zur Umgebung analysieren: Werden Sturz- und Lenkwinkel in Abhängigkeit des Verlaufs der Schienenstrecke richtig berechnet? (z.B. bei Vorsteuerung bei Kurvenfahrt)	Kontinuierl. Messwertaufnahme und Umgebung (Geometrie)	Kurvenradius, Geschwindigkeit, Lenk- u. Sturzwinkel (Systemgrößen) darstellen: Lenkwinkel kontinuierlich darstellen, Sturzwinkel bei Aktivierung. Optional: den Kurvenradius der Schienenstrecke als genaue Zahl darstellen und die Geschwindigkeit des RailCabs darstellen	CO
	Umgebungseinflüsse analysieren: Welche Kräfte wirken aktuell auf das Fahrwerk?	Umgebung (Störgrößen)	Kräfte (Systemparameter) darstellen: Kräfte darstellen (Normal-Kraft, Gravitationskraft, Querkraft, Reibkraft)	CO
Modell bilden (Regleranalyse)	Modell analysieren: Bei Analyse der Reglerstruktur sollen Rückschlüsse auf das Modell gezogen werden.	Korrelation / Kontext	Siehe einzelne Aufgaben der Regler-Synthese	CO, RO

A2.3 Simulationsdaten des RailCab-Systems

A2.3.1 Simulationsdaten der Logistiksimulation

In der folgenden Tabelle sind die Daten gelistet, die für die Visualisierung der Logistiksimulation benötigt werden. Die Daten wurden aus den Visualisierungsaufgaben abgeleitet und sind auch nach diesen strukturiert. Die Tabelle beschreibt einen allge-

meinen Datensatz, der für jedes RailCab gesondert betrachtet wird. Die Werte der Daten sind demnach für jedes RailCab unterschiedlich. In der ersten Spalte der Tabelle ist die Visualisierungsaufgabe aufgezeigt, die zweite Spalte benennt den Datenwert. In der dritten Spalte wird die Kategorie bzw. Datentyp festgelegt. In der letzten Spalte erfolgt eine kurze Beschreibung.

Tabelle A-8: Simulationsdaten aus der Logistiksimulation strukturiert nach den Visualisierungsaufgaben

Visualisierungsaufgabe	Daten	Datentyp	Beschreibung
3D-Modell des Streckenmodells (Geometrie) und Bewegungsverhalten der Fahrzeuge darstellen			
Streckenmodell (Logikmodell und Grafikmodell)	Verlauf der Strecke	Segment IDs (geometrische Beschreibung)	Streckensegmente sind in der Logistiksimulation Strecken zwischen zwei Weichen. Sie bestehen aus Geraden, Kreisbögen und Klothoiden und haben eine eindeutige ID. Das Grafikmodell wird automatisch aus der logischen Beschreibung generiert.
Position des RailCabs	Position (x,y,z) im 3D-Raum	3D-Vektor (dynamisch)	Beschreibt absolute Pos. im 3D-Raum
Orientierung des RailCabs	Orientierung im 3D-Raum (Winkel, Achse) oder Rotationsmatrix	4D-Matrix (dynamisch)	Beschreibt relative Orientierung im 3D-Raum (abhängig von Pos.)
Vorgabe / Ereignisse höherer mechatronischer Ebene : Auftragsvergabe und Informationen zum Auftrag (z.B. Passagier); Beladung eines RailCabs			
Zeit eines neu eingetroffenen Auftrags (Auftragseingang ist gleichzeitig Ereignis/Vorgabe höherer Ebenen)	Zeitstempel der Simulationszeit	temporal (Ereignis)	Beschreibt den Zeitpunkt eines eingetroffenen Auftrags. Das Datum wird nur dann aufgezeichnet, wenn ein neuer Auftrag eintrifft.
Position des neu eingetroffenen Auftrags	Position (x,y,z) im 3D-Raum	3D-Vektor (statisch)	Der Auftrag trifft i.d.R. an einer der Stationen im Anwendungsszenario ein.
Zielstation des Auftrags	Name der Station	nominal	Beschreibt den Namen der Station
Gewünschte Ankunftszeit des Auftrags	Zeitstempel	temporal	Beschreibt den Zeitpunkt der gewünschten Ankunft.
Eingeplantes Fahrzeug für den Auftrag	Fahrzeug IDs (Systemparameter)	nominal (Integer)	Jedem Auftrag wird eine Fahrzeug-ID zugeteilt. Das Fahrzeug transportiert

			den Auftrag zum gewünschten Ziel.
Vorgabe / Ereignisse höherer mechatronischer Ebene			
Konvoibildung initiieren	Wert: 0 oder 1	nominal (Integer)	Ist ein bestimmter Abstand zwischen min. zwei Fahrzeugen unterschritten, besteht die Möglichkeit zur Konvoibildung. Das Fahrzeug erhält eine Vorgabe, den Konvoi einzuleiten.
Am Konvoi teilnehmende Fahrzeuge	Fahrzeug IDs (Systemparameter)	nominal (Integer)	Einem RailCab werden die IDs der RailCabs mitgeteilt, mit denen der Konvoi gebildet werden kann.
Position (Reihenfolge) des aktuellen RailCabs im Konvoi	Wert: 0 bis n, wobei n Anzahl der teilnehmenden Fahrzeuge im Konvoi sind	nominal (Integer)	Beschreibt die Position des RailCabs im Konvoi, sodass es Vor- und Nachfolger im Konvoi kennt.
Statistische Auswertungen eines RailCabs			
Geschwindigkeit (m/sec)	Systemgröße von 0 bis 44 m/sec	Skalar (float)	Beschreibt die Geschwindigkeit eines RailCabs. Für statistische Auswertungen wird die Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet.
Beladung (Anzahl der aktuell transportierten Passagiere)	Wert: 0 bis n, wobei n maximale Anzahl an Sitzplätzen ist. (Systemparameter)	Skalar (Integer)	Beschreibt die Anzahl der Passagiere, die ein RailCab aktuell transportiert. Für statistische Aussagen der gesamten Simulationszeit werden alle Aufträge eines RailCabs summiert.
Standzeit im Depot	Anzahl Stunden, Minuten	temporal (Integer)	Beschreibt die bisherige Standzeit im Depot.
Zurückgelegte Strecke	Anzahl Kilometer (Kennzahl)	Skalar (float)	Beschreibt die Gesamtlänge aller befahrenen Streckensegmente.
Geplante Route eines RailCabs	Liste von Segment IDs	nominal / sequentiell (Liste)	Beschreibt die geplanten, zu befahrenden Streckensegmente bis zur Zielstation. Wird die Route zwischen durch umgeplant, wird das von der VR-Anwendung entsprechend interpretiert und darauf aufmerksam gemacht.
Zielstationen	Name der Station (String)	nominal	Beschreibt den Namen der Station
Position der Zielstation (örtliche Ziele)	Position (x,y,z) im 3D-Raum	3D-Vektor (statisch)	Beschreibt die Position einer Station im Anwendungsszenario
Geplante Ankunftszeit (zeitliche Ziele)	Zeitstempel	temporal	Beschreibt den Zeitpunkt der geplanten Ankunftszeit. Richtet sich nach der gewünschten Ankunftszeit des Auftrags.

Streckensegment, das aktuell befahren wird	Segment ID (Systemparameter)	nominal / geometrisch (Segmente: statisch, befahrene Segment-IDs: dynamisch)	Streckensegmente sind in der Logistiksimulation Strecken zwischen zwei Weichen. Sie bestehen aus Geraden, Kreisbögen und Klothoiden und haben eine eindeutige ID.
--	------------------------------	--	---

A2.3.2 Simulationsdaten der Konvoiregelung und Kommunikation

Tabelle A-7 stellt die Spezifikation der zu visualisierenden Daten aus der Simulation der Konvoiregelung und Kommunikation dar. Die Daten ergeben sich aus den Visualisierungsaufgaben und sind auch nach diesen strukturiert. Sie werden für jedes RailCab aufgezeichnet. In der ersten Spalte der Tabelle ist die Visualisierungsaufgabe aufgezeigt, die zweite Spalte benennt den Datenwert. In der dritten Spalte wird die Kategorie bzw. Datentyp festgelegt. In der letzten Spalte erfolgt eine kurze Beschreibung.

Tabelle A-9: Simulationsdaten der Konvoiregelung und Kommunikation strukturiert nach Visualisierungsaufgaben

Visualisierungsaufgabe	Daten	Datentyp	Beschreibung
RailCab-Konvois darstellen			
Position des RailCabs	Position (x,y,z) im 3D-Raum	3D-Vektor (dynamisch)	Beschreibt absolute Pos. im 3D-Raum
Orientierung des RailCabs	Orientierung im 3D-Raum (Winkel, Achse) oder Rotationsmatrix	4D-Matrix (dynamisch)	Beschreibt relative Orientierung im 3D-Raum (abhängig von Pos.)
Strecken-Segmente (bafahren von den RailCabs)	Segment-ID	nominal / geometrisch	Beschreibt die aktuell befahrenen Streckensegmente.
Konvoilänge darstellen (Länge und Anzahl der RailCabs im Konvoi)	Position (x,y,z) im 3D-Raum	3D-Vektor (dynamisch)	Beschreibt absolute Pos. im 3D-Raum. Länge aller Fahrzeuge im Konvoi repräsentieren Gesamtlänge des Konvois.
Vorgabe aus der Logistiksimulation, einen Konvoi zu bilden	Wert: 0 oder 1	nominal (Integer)	Ist ein bestimmter Abstand zwischen min. zwei Fahrzeugen unterschritten, besteht die Möglichkeit zur Konvoibildung. Das Fahrzeug erhält eine Vorgabe, den Konvoi einzuleiten.
Zustände eines RailCabs im Konvoi-Prozesses darstellen	Werte: 0 bis 3	Nominal (Integer)	0: keine Konvoi, aufschließen 1: Merging1 (unkritischer Abstand), 2: Merging2 (kritischer Abstand), 3: Platoon (Konvoi-Folgefahrt)
Abstände zwischen Fahrzeugen darstellen (IST und SOLL)	Werte: 0 bis n (Systemparameter)	Skalar (float)	Wert kennzeichnet den Abstand zwischen zwei RailCabs.
Systemgrößen / Werte (für			

den Wirkzusammenhang)			
Geschwindigkeit (IST und SOLL)	Werte: 0 bis 44 m/s	Skalar (float)	Repräsentiert die SOLL oder die IST Geschwindigkeit
Maximaler Verzögerung für Fahrzeug	Werte: 0 bis n	Skalar (float)	Repräsentiert die maximale Verzögerung
Kommunikation darstellen			
Konvoilänge, wieviel Fahrzeuge sind am Konvoi beteiligt?	Werte: 0 bis n	Skalar (Integer)	Repräsentiert Anzahl der Teilnehmer im Konvoi
Kommunikationsablauf und -partner darstellen			
Zustände des StateFlows (Distance)			
Positionsübertragung an hinteres RailCab. Besteht aus 2 parallelen Zuständen: state [0] sendet Position; state [1] empfängt Position	Zustände, Werte: 1 oder 2	nominal (Integer)	[0]=1: keine Datenübertragung [0]=2: eigene Position wird gesendet [1]=1: keine Datenübertragung [1]=2: Positionsdaten werden übertragen
Kommunikationspartner darstellen	RailCab-IDs	nominal (Integer)	Die RailCab IDs sind die Teilnehmer des Konvois
Kommunikationsdaten darstellen	Name der übertragenen Werte	nominal (String)	Repräsentiert die Werte, die bei der Kommunikation ausgetauscht werden (hier: Position und Geschwindigkeit)
Zustände der StateFlows (Zustandsdiagramme) darstellen			
Zustände der StateFlows (ConvoyCoordination)	Zustände, Werte: 0 bis 16	nominal, (Integer)	Beschreibt den Zustand im Konvoi. Besteht aus zwei parallelen Zuständen: state [0] beschreibt das Verhalten im Konvoi, state [1] beschreibt das Verhalten als Koordinator eines Konvois. (Beschreibung der Werte siehe nächste Zeile)
<p>[0]=1: Kein Konvoi; Leerlauf [0]=2: Kein Konvoi; Anfrage zum Beitritt in Konvoi gestellt; warte auf Freigabe [0]=3: Kein Konvoi; Freigabe erteilt; warte auf Konfiguration/Eigenschaften des Konvois [0]=4: Kein Konvoi; Konfiguration des Konvois erhalten. Entscheidung über Beitritt. [0]=5: Im Konvoi; Leerlauf; Reaktion auf eingehende Nachrichten [0]=6: Im Konvoi; Warte auf Freigabe den Konvoi zu verlassen [0]=7: Im Konvoi; Koordinator des Konvois wird geändert [0]=8: Kein Konvoi; Neuer Versuch Konvoi zu bilden [0]=9: Kein Konvoi; Warte auf Übermittlung von vorausfahrendem und nachfolgendem Shuttle [0]=10: Kein Konvoi; Abstand zum vorausfahrendem Shuttle wird geschlossen [0]=11: Im Konvoi; Abstand zum vorausfahrenden Shuttle wird vergrößert; Konvoi wird verlassen [1]=1: Koordinator; Leerlauf [1]=2: Koordinator; Anfrage zum Beitritt in Konvoi erhalten; Warte auf Konfiguration/Eigenschaften des neuen Shuttles</p>			

[1]=3: Koordinator; Entscheide über Beitritt [1]=4: Koordinator; Beitritt zugestimmt; Warte auf Bestätigung des Beitritts [1]=5: Koordinator; Falls noch kein Konvoi besteht, wird dieser nun aufgebaut [1]=6: Koordinator; Sende Konfiguration/Eigenschaften des Konvois an alle Shuttles [1]=7: Koordinator; Falls das letzte Shuttle den Konvoi verlassen hat, wird dieser nun aufgelöst [1]=8: Koordinator; Anfrage zum Verlassen des Konvois erhalten; Entscheide über Freigabe [1]=9: Koordinator; Rolle des Koordinators soll abgegeben werden [1]=10: Koordinator; Rolle des Koordinators wird an anderes Shuttle übergeben [1]=11: Kein Koordinator; Leerlauf [1]=12: Kein Koordinator; Empfange Konfiguration/Eigenschaften des Konvois [1]=13: Kein Koordinator; Entscheidung die Rolle des Koordinators zu übernehmen [1]=14: Kein Koordinator; Kündige Übernahme der Rolle des Koordinators an [1]=15: Kein Koordinator; Frage Konfiguration/Eigenschaften aller Shuttles im Konvoi ab [1]=16: Kein Koordinator; Übernehme Rolle des Koordinators			
Statistische Auswertungen über Ausfall von Nachrichten und Füllstand eines Puffers darstellen			
Füllstand Nachrichtenpuffer (ausgehende Nachrichten)	Wert in 0 bis 100%	Skalar (Integer)	Wert stellt aktuellen Füllstand des Nachrichtenpuffers dar.
Füllstand Nachrichtenpuffer (eingehende Nachrichten)	Wert in 0 bis 100%	Skalar (Integer)	Wert stellt aktuellen Füllstand des Nachrichtenpuffers dar.
Anzahl der Elemente in der Nachrichten-Warteschlange (je für ein- und ausgehende Nachrichten)	Werte: 0 bis n, wobei n Länge der Nachrichten-Warteschlange ist	Skalar (Integer)	Aktuelle Anzahl der Elemente in der Nachrichten-Warteschlange
Max. Länge der Nachrichtenschlange (je für ein- und ausgehende Nachrichten)	Wert: 0 bis n, wobei n max. Länge der Nachrichten-Warteschlange ist	Skalar (Integer)	Maximale Länge der Nachrichten-Warteschlange
Ausfall von Nachrichten	Wert in 0 bis 100%	Skalar (Integer)	Wert stellt bisherigen Ausfall der Nachrichten eines RailCabs dar.
Priorität eines RailCabs	Werte: 1 oder 2	nominal (Integer)	Beschreibt die Priorität eines RailCabs. 1: höchste Priorität (wird nach Möglichkeiten an Weichen von anderen RailCabs durchgelassen), 2: niedrige Priorität
Koordinator eines Konvois	Wert: 0 oder 1	nominal (Integer)	Beschreibt die Rolle eines RailCabs im Konvoi; lediglich ein Fahrzeug kann Koordinator sein. 0: kein Koordinator 1: Koordinator

A2.3.3 Simulationsdaten des Sturzvariablen Fahrwerks

Im Folgenden sind die Daten gelistet, die für die Visualisierung des Sturzvariablen Fahrwerks erforderlich sind. Die Daten ergeben sich aus den Visualisierungsaufgaben und sind auch nach diesen strukturiert. In der ersten Spalte der Tabelle ist die Visuali-

sierungsaufgabe aufgezeigt, die zweite Spalte benennt den Datenwert. In der dritten Spalte wird die Kategorie bzw. Datentyp festgelegt. In der letzten Spalte erfolgt eine kurze Beschreibung.

Tabelle A-10: Simulationsdaten aus der Regelung des Sturzvariablen Fahrwerks

Visualisierungsaufgabe	Daten	Datentyp	Beschreibung
Geometrie und Bewegungsverhalten			
Position (der Fahrwerksachse)	Pos. x,y,z im 3D-Raum	3D-Vektor	Beschreibt absolute Pos. im 3D-Raum
Orientierung (der Fahrwerksachse)	Orientierung im 3D-Raum (Winkel, Achse) oder Rotationsmatrix	4D-Matrix	Beschreibt relative Orientierung im 3D-Raum (abhängig von Pos.)
Bewegungsverhalten (Kinematik)	Kinematische Kette		Wird intern in der VR-Anwendung abhängig vom Lenk- oder Sturzwinkel berechnet
Stabilität	Kennzahl 0 oder 1	nominal, Skalar (float)	0: stabil 1: instabil
Regelgüte (Abweichung SOLL/IST)	Kennzahl 0 bis 100%	quantitativ, Skalar (float)	Beschreibt die Abweichung in %
IST-Werte der Regler-Kaskaden (lokale Regelung):			
Lenkwinkel links (IST)	0 bis -3 (Intervall)	Skalar (float)	Winkel des linken Rads, Drehung um y-Achse
Lenkwinkel rechts (IST)	0 bis +3 (Intervall)	Skalar (float)	Winkel des rechten Rads, Drehung um y-Achse
Sturzwinkel links (IST)	0 bis -12 (Intervall)	Skalar (float)	Winkel des linken Rads, Drehung um z-Achse
Sturzwinkel rechts (IST)	0 bis +12 (Intervall)	Skalar (float)	Winkel des rechten Rads, Drehung um z-Achse
Regler-Status (Zustand) der Spurführungsregelung:			
Lenkung aktiv/inaktiv	Kennzahl 0 oder 1	nominal, boolean	Diskretes Umschalten des Status; 0: inaktiv 1: aktiv
Sturz aktiv/inaktiv	Kennzahl 0 oder 1	nominal, boolean	Diskretes Umschalten des Status 0: inaktiv 1: aktiv

Systemparameter (für Sturzverstellung):			
Kurvenradius	Kennzahl 0 bis 40 Meter	Skalar (float)	Beim Überschreiten eines vom KO vorgegebenem Schwellenwert wird die Sturzverstellung aktiviert; auch die Lenkung wird beeinflusst (aufgrund mechanischer Begrenzung können zu enge Radian nicht befahren werden).
Querverschiebung in Bezug auf Verlassen der Sicherheitszone (Größe des Wirbelstromsensors)	Kennzahl -5 bis +5 mm sind das max. Spurspiel	Skalar (float)	Beim Überschreiten eines Schwellenwerts (z.B. $-2 < y_{\text{Spurspiel}} < 2$) wird die Sturzverstellung aktiviert
Stabilität (s.o.)			
Reibungswert in Querrichtung (Größe des Schätzverfahrens)	Kennzahl 0 bis 0,38	Skalar (float)	Beim Unterschreiten eines Schwellenwerts (hier $< \text{als } 20\%: \text{also } < 0,08$) wird die Sturzverstellung aktiviert
Geschwindigkeit	Kennzahl 0 bis 10m/s (36km/h)	Skalar (float)	Hohe Geschwindigkeit beeinflusst Lenkung. (Je schneller, desto vorsichtiger muss gelenkt werden.)
Kräfte: Normal-Kraft, Gravitationskraft, Querkraft, Reibkraft	Jeweils: Kennzahl 0 bis F_{nom}	Skalar (float)	Stellen die entsprechenden Kräfte dar
Status (Zustand) der Überwachungs- und Diagnostik Komponente (aktiv/inaktiv)	Kennzahl 0 oder 1	nominal, boolean	Diskretes Umschalten des Status 0: inaktiv 1: aktiv
Warnungen/Fehlermeldungen der Überwachung:			
Ausfall Lenkaktorik (max. 2 Stück)	Jeweils Kennzahl 0 oder 1	nominal, boolean	Diskretes Umschalten des Status 0: inaktiv 1: aktiv
Ausfall Wirbelstromsensoren (max. 4 Stück)	jeweils Kennzahl 0 oder 1	nominal, boolean	Diskretes Umschalten des Status 0: inaktiv 1: aktiv
Ausfall Sensoren für Lenkung (max. 2 Stück)	jeweils Kennzahl 0 oder 1	nominal, boolean	Diskretes Umschalten des Status 0: inaktiv 1: aktiv
Ausfall Sensoren für Sturzver-	jeweils	nominal, boolean	Diskretes Umschalten

stellung (max. 2 Stück)	Kennzahl 0 oder 1		des Status 0: inaktiv, 1: aktiv
Eingeleitetes Verhalten der Überwachung aufgrund des Fehlers			
Aktivierung Sturzaktorik (links u. rechts)	jeweils Kennzahl 0 oder 1	nominal, boolean	Diskretes Umschalten des Status 0: inaktiv, 1: aktiv
Messgrößenaufbereitung mit weniger Sensoren:			
- Für Querverschiebung: statt 4 kann mit 1 Sensor gefahren werden	Anzahl aktiver Wirbelstromsensoren (1 bis 4)	Skalar	Diskretes Umschalten des Verfahrens zur Messgrößenaufbereitung
- Für Lenkung: statt 2 kann mit 1 Sensor gefahren werden	Anzahl aktiver Sensoren für Lenkung (1 bis 2)	Skalar	Diskretes Umschalten des Verfahrens zur Messgrößenaufbereitung
- Für Sturzverstellung: statt 2 kann mit 1 Sensor gefahren werden	Anzahl aktiver Sensoren für Sturzverstellung (1 bis 2)	Skalar	Diskretes Umschalten des Verfahrens zur Messgrößenaufbereitung
Nothalt erzwingen (wenn alle Sensoren ausgefallen)	Kennzahl 0 oder 1	nominal, boolean	Diskretes Umschalten in Nothalt 1: Nothalt, 0: kein Nothalt
Umgebung			
Kurvenradius bzw. Krümmung (siehe oben unter Systemparameter zur Sturzverstellung)	3D-Modell (Geometrie), Krümmung: Kennzahl 0 bis 0,025 (=40m Radius)	Skalar (float)	Beeinflusst die Sturzverstellung oder Lenkung

A2.4 Visualisierungsaufgaben

A2.4.1 Zuordnung von Analyseaufgaben zu Visualisierungsaufgaben

Tabelle A-11 stellt die Zuordnung von Analyseaufgaben zu Visualisierungsaufgaben dar. Dies ist eine 1:1 Zuordnung und hilft bei einer definierten Analyseaufgabe eine entsprechend geeignete Visualisierungsaufgabe zu formulieren.

Tabelle A-11: Zuordnung von Analyseaufgaben zu Visualisierungsaufgaben

Analyseaufgabe	Visualisierungsaufgabe(n)	VA-Klasse(n)
Korrelation / Kontext	Abstrakte Daten im Kontext zum Grundsystem darstellen	Wirkbeziehung / Flüsse, Informationsverarbeitung (IV)
Übersicht und Detail	Alle Ebenen des mechatronischen Systems in einer Umgebung darstellen	Alle
Anwendungsszenario	Umgebungsmodelle darstellen	Gestaltbehaftete Systemkomponenten
Verhalten / Bewegungsverhalten / Verhaltensanpassung	Gestalt und Struktur der Systemkomponente darstellen, Bewegungsverhalten und Verhaltensanpassung der Systemkomponente darstellen, Verhalten und Verhaltensanpassung informationsverarbeitender Komponenten darstellen	Gestaltbehaftete Systemkomponenten, Informationsverarbeitung (IV)
Kontinuierliche Messwerte	Systemgrößen, Systemparameter darstellen	Übergreifende VA – Systemgrößen, Systemparameter
Wirkbeziehung / Wirkstruktur / Flüsse	Wirkweise, Wirkstruktur und Informationsflüsse zwischen gestaltbehafteten Systemkomponenten darstellen; Wirkweise, Wirkstruktur und Informationsflüsse zwischen Systemkomponenten der Informationsverarbeitung darstellen	Wirkbeziehung / Flüsse, Informationsverarbeitung (IV)
Kommunikation (systemextern oder systemintern)	Kommunikation darstellen (Sender, Empfänger, Datenart, usw.)	Wirkbeziehung / Flüsse
Kooperation	Wirkweise, Wirkstruktur und Informationsflüsse zwischen Systemkomponenten darstellen, Systemgrößen, Systemparameter darstellen	Wirkbeziehung / Flüsse, Informationsverarbeitung (IV)
System-Ziele / Zweck	Ziele und Zweck des Systems darstellen	Wirkbeziehung / Flüsse: Ziele / Zweck
Planen	Aktivitäten darstellen, Zustände darstellen	Informationsverarbeitung (IV)
Lernen	Lernprozess darstellen, Aktivitäten darstellen, Zustände darstellen	Informationsverarbeitung (IV)
Funktionen (IV)	Funktionen der Informationsverarbeitung darstellen	Informationsverarbeitung (IV)
Zustände (IV)	Zustände / Zustandsübergänge / Zustandsfolgen darstellen	Informationsverarbeitung (IV)
Aktivitäten (IV)	Aktionen und Aktivitäten darstellen	Informationsverarbeitung (IV)
Störgrößen (Umgebung)	Umgebungsmodelle darstellen, Umgebungseinflüsse darstellen	Gestaltbehaftete Systemkomp. – Umgebungsmodelle, Umgebungseinflüsse, Übergreifende VA – Systemparameter (extern)
Ressourcen	Verbrauchte Ressourcen des Systems darstellen	Übergreifende VA – Systemparameter
Statistik (Verteilung, Streuung)	Statistik darstellen	Informationsverarbeitung (IV) – Statistik
Bewertung (der Umfeldanalyse, der Diagnose)	Abstrakte Daten im Kontext zum Grundsystem darstellen	Informationsverarbeitung (IV)

A2.4.2 Auflistung verwendeter Visualisierungstechniken und ihrer Ausprägungen

Im Folgenden erfolgt eine Auflistung aller eingesetzten und entwickelten Visualisierungstechniken dieser Arbeit und ihre möglichen Ausprägungen.

Bild A-4 zeigt alle Techniken und ihre Ausprägungen in Form einer Matrix. Die Zeilen der Matrix beinhalten alle Visualisierungstechniken, die Spalten zeigen mögliche Ausprägungen der Techniken – ohne Priorität oder Wertung der Ausprägungen – auf. Die Ausprägungen sind mit einer Zahl oder mit der Eigenschaft *abstrakt* oder *konkret* gekennzeichnet. Die Zahlen bzw. Eigenschaften können verwendet werden, um die jeweilige Ausprägung der Technik für Bereiche des VR-Kontinuums (VMS, AMS, MFM) zuzuweisen.

	Visualisierungstechnik	Mögliche Ausprägungen				
Primär- Visualisierungstechniken Struktur- und Verhaltensdiagramme	3D-Modell (ggf. Hülle von 3D-Modell)	abstrakt (niedrige Polygon-Anzahl)	konkret (hohe Polygon-Anzahl)	transparent	gefärbt	
	Farbkarte	Farbe: hohe Deckkraft	Farbe: niedrige Deckkraft	Datenstruktur: niedrige Anzahl an Zellen	Datenstruktur: hohe Anzahl an Zellen	
	Visuelles Netzwerk	Wirkbeziehung zwischen einzelnen Systemkomponenten	Wirkbeziehung zwischen mehreren Systemkomponenten	Linien-, Verbindungsart (siehe Linie)	Knoten-Form (siehe Form)	
	Semantischer Zoom	-				
	Fokus und Kontext: Daten-Linse	1: Rein geometrische Linse	2: Darstellung abstrakter Daten	3: Mini-Lupen		
	Systemkomponenten-Diagramm (Wirkstruktur)	abstrakt (ohne Text)	konkret (mit Text)	1: Animation aktiver Komponenten		
	Aktivitäts-Diagramm	abstrakt (ohne Text)	konkret (mit Text)	1: Animation aktiver Komponenten		
	Zustandsdiagramm	abstrakt (ohne Text)	konkret (mit Text)	1: Status (einzelne Zustände)		

Bild A-4: Mögliche Ausprägungen der in dieser Arbeit verwendeten oder entwickelten Visualisierungstechniken (Teil 1 von 2)

		Visualisierungstechnik	Mögliche Ausprägungen				
Sekundär-Visualisierungstechniken	Visuelle Variable	Position	1: 2D (am Bildschirm)	2: 3D			
		Größe / Länge	Größe der Skalierung				
		Orientierung	1: Orientierung im 2D Raum	2: Orientierung im 3D Raum			
		Winkel	Größe des Winkels				
		Farbe, hat 3 Dimens.:					
		Farbton	Farbwert auf Farbskala				
		Helligkeit	Wert auf Helligkeitsskala				
		Sättigung	Wert auf Sättigungsskala				
		Textur	abstrakt: niedriger Detailgrad	konkret: hoher Detailgrad	1: Art der Textur		
		Form (geometrisch)	Art der Form				
	Visuelle Elemente	Punkt	-				
		Linie / Verbindung	1: Beschaffenheit: durchgezogen	2: Beschaffenheit: gestrichelt	3: Stärke: dick	4: Stärke: dünn	5: hat eine Richtung
		Pfeil	1: 2D	2: 3D			
		Fläche	-				
		Volumen	-				
		Kurven	Linien-, Verbindungsart (siehe Linie)				
	Effekte	Hervorhebung (Kontrast von Hintergrund)	Farbige Hervorhebung	Hervorhebung durch Gruppierung / Umfassung			
		Umfassung (eingeschlossener Formen)	Farbe der Umfassung	Größe der Umfassung / Gruppe			
		Transparenz	Stärke der Transparenz				
	Visuelle Metaphern	Glyph (Symbol am 3D-Modell)	Art des Glyphs (=Metapher)				
		Metapher	Art der Metapher				
		Icon	Art des Icons				
	Sonstige	Text / Annotation	-				
		Animation	abstrakt: angenähertes Bewegungsverhalten	konkret: phys. korrektes Bewegungsverhalten	1: bewegen	2: blinken	3: kurz aufpoppen
		Farblegende	-				
		Geschwindigkeitsanzeige	1: Tachometer	2: Digitale Anzeige (auch: Datenrate)	3: (historisch: Farbschweif)		
		Balkendiagramm	1: mit Farbverlauf	2: eine Farbe (ohne Farbverlauf)			
		Info-HUD	in Kombination mit Text				
		überhöhte Darstellung	-				
	Interaktion	Interaktionsart	1: zur Navigation (z.B. Zoomen) in der VR-Umgebung	2: Selektion eines 3D-Modells (Abrufen weiterer Informationen)	3: Ansichten / Szenen wechseln	4: Aktivieren / Deaktivieren von VT	5. Simulation verlangsamen, beschleunigen (bei Offline-Simulation)
		Zoom	1: Zoom interaktiv / explorativ	2: nur Zoom auf ausgewählten / fixierten Bereich	3: Kombination mit semantischem Zoom		

Bild A-5: Mögliche Ausprägungen der in dieser Arbeit verwendeten oder entwickelten Visualisierungstechniken (Teil 2 von 2)

A2.4.3 Auswahlmatrix – Geeignete Visualisierungstechniken für Visualisierungsaufgaben

Bild A-6 und Bild A-7 stellen eine Matrix aller im Rahmen dieser Arbeit definierten Visualisierungsaufgaben dar, sowie zu diesen zugeordnete Visualisierungstechniken. Die Zeilen zeigen die Visualisierungsaufgaben, die Spalten stellen Visualisierungstechniken dar. Ist eine Visualisierungstechnik für eine Visualisierungsaufgabe geeignet, wird die entsprechende Zelle in der Matrix mit „geeignete VT“ markiert (siehe Legende). Kann zusätzlich zur geeigneten Visualisierungstechnik eine optionale Technik eingesetzt werden, ist sie mit „teilweise geeignet“ markiert. In der Regel dient diese optionale Visualisierungstechnik, um detailliertere Informationen darzustellen. Für eine Visualisierungsaufgabe können mehrere Techniken kombiniert werden. Die Matrix hilft bei der Auswahl einer geeigneten Visualisierungstechnik für eine definierte Visualisierungsaufgabe.

A2.5 Visualisierungstechniken

In diesem Kapitel werden ergänzende Informationen zu den Visualisierungstechniken sowie die konzipierten Steckbriefe dieser Arbeit vorgestellt. Einige der Visualisierungstechniken sind zudem implementiert worden; die implementierten Techniken werden im Steckbrief direkt in dem für eine Prinzipskizze vorgesehenen Feld aufgezeigt.

A2.5.1 Visualisierungstechniken für Wirkbeziehungen

Hier erfolgen Ergänzungen zur Visualisierungstechnik *Visuelle Netzwerke*.

Visuelle Grammatik für Visuelle Netzwerke: Bild A-8 beschreibt eine Visuelle Grammatik für den Einsatz *Visueller Netzwerke* zur Darstellung von Wirkbeziehungen mechatronischer Systeme.

Grafische Merkmale/ Visuelle Variable	Piktogramm	Bedeutung und Verwendung
Geschlossene Kontur		Systemkomponente (z.B. AMS)
Form und Farbe geschlossener Bereiche		Art/Typ einer (abstrakten) Systemkomponente
Größe geschlossener Bereiche		Wert/Eigenschaft von System- komponenten, größer = mehr
Hinzugefügte Formen		Hinzugefügte Systemkomp., Teil einer Wirkbeziehung
Eingeschlossene Formen		Enthaltene Systemkomponenten
Räumlich angeordnete Formen		Serie, Reihenfolge
Verbindende Linien/ Kanten		Wirkbeziehung, Fluss
Beschaffenheit der Verbindung		Art/Typ der Wirkbeziehung
Linienstärke der Verbindung		Stärke der Wirkbeziehung
Richtung der Verbindung		Richtung der Wirk- beziehung / des Flusses
Nachbarschaft		Gruppen von Systemkomponenten

Bild A-8: *Visuelle Grammatik grafischer Merkmale zur Kodierung verschiedener Aspekte Visueller Netzwerke für mech. Systeme, angelehnt an [War04, S.214].*

Die visuelle Grammatik beschreibt auf einer eher abstrakten Ebene, wie Visuelle Variablen bzw. grafische Merkmale für mechatronische Systeme verwendet werden können. Diese Grammatik wurde in Anlehnung an WARE entwickelt, die eine visuelle Grammatik von Diagrammelementen zur Kodierung verschiedener Aspekte in Node-Link-Diagrammen vorschlägt [War04, S. 214].

Abhängig der Art einer Wirkbeziehung (z.B. statische Beziehung, dynamischer Informationsfluss usw.) weisen die Kanten Visueller Netzwerke unterschiedliche Beschaffenheit auf. Bild A-9 beschreibt mögliche Ausprägungen der Beschaffenheit von Kanten.




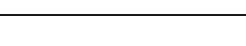
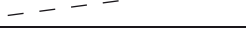
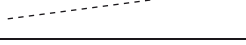




Ausprägungen einer Kante	Beschreibung u. Beispiel	Zuordnung zum VR-Kontinuum	Möglichkeiten der Präsentation
	Verbindung allgemein	Überblick	Veränderung der Farbe, Animierte Striche (Fluss), Veränderung der Verbindungsform von Überblick zu Detail, ausblenden / einblenden,
	Verbindung allgemein mit Richtung	Detail, Richtung sichtbar	
	gestrichelte Linie für Informationsfluss	Detail, Art der Verbindung sichtbar	
	Informationsfluss mit Richtung (animiert)	Detail, Richtung sichtbar	
	Kurze Striche - schnelle Datenübertragung	Detail, Art der Verbindung sichtbar	
	Lange Striche - langsame Datenübertragung	Detail, Art der Verbindung sichtbar	
	gebogen - wg. Hindernissen, rein ästhetische Gründe	Überblick und Detail	
	Stärke der Verbindung - Datenmenge	Detail, Art der Verbindung sichtbar	
	Glyphen (Datentyp, Art der Inf.)	Detail, Glyph sichtbar	
	Annotation (Datentyp, Art der Inf., weitere Attribute)	Detail, Annotation sichtbar	

Bild A-9: Visuelle Grammatik für die Beschaffenheit von Kanten/Linien Visueller Netzwerke zur Darstellung einer Wirkbeziehung mechatronischer Systeme

A2.5.2 Steckbriefe der Primär-Visualisierungstechniken

Hier werden Steckbriefe für Visualisierungsaufgaben vorgestellt, die mit Primär-Visualisierungstechniken dargestellt werden. Die Steckbriefe sind in Bild A-10 bis Bild A-13 aufgezeigt.

A2.5.3 Steckbriefe der Sekundär-Visualisierungstechniken

Die Sekundär-Visualisierungstechniken werden im Wesentlichen für die Klassenübergreifenden Visualisierungsaufgaben (vgl. Kap. 4.4.4) der Taxonomie eingesetzt. Die Steckbriefe der Sekundär-Visualisierungstechniken sind in Bild A-19 bis Bild A-29 dargestellt.

A2.5.4 Steckbriefe der Logistiksimulation

Eine Auswahl an Visualisierungsaufgaben und -techniken der Logistiksimulation wird in den Steckbriefen in Bild A-14 bis Bild A-16 beschrieben.

A2.5.5 Steckbriefe des Sturzvariablen Fahrwerks

Die Steckbriefe in Bild A-17 und Bild A-18 beschreiben ausgewählte Visualisierungsaufgaben und -techniken des Sturzvariablen Fahrwerks.

Erläuterungen zum Steckbrief in Bild A-17 (Reibungswerte):

Der Reibungswert (zwischen Rad und Schiene) in Querrichtung kann ein instabiles Verhalten des Fahrwerks erzeugen. Wird der Reibungswert zu niedrig, verursacht dies ein Rutschen auf der Schiene. Ein Schätzverfahren im Regler berechnet den Reibungswert. Da es hierzu wenige Anhaltspunkte gibt, ist die Schätzung sehr aufwändig und unter realen Bedingungen nahezu unmöglich. In der VR-Anwendung werden durch die Umgebung Informationen geliefert, die zur Überprüfung des geschätzten Wertes genutzt werden können. Bild A-17 stellt dies dar. Links in der Prinzipskizze des Steckbriefs ist der aktuell geschätzte Reibungswert als Pfeil und Annotation dargestellt. Die Farbe rot signalisiert, dass der Reibungswert zu klein ist; folglich wird der Sturz aktiviert. Rechts ist der Reibungswert wieder groß genug; dies zeigt die Länge des Pfeils zusammen mit der Farbe grün. Da der Reibungswert lediglich geschätzt ist, kann es vorkommen dass dieser nicht korrekt ist. Die Umgebung, wie der Schienenverlauf, eine Steigung oder Witterungseinflüsse, geben dem Ingenieur Hinweise ob der Reibungswert annähernd richtig geschätzt wird. Ein Entwickler kann hier seine Annahmen überprüfen (konfirmative Analyse) und ggf. das Schätzverfahren anpassen.

Erläuterungen zum Steckbrief in Bild A-18 (Ausfall von Systemkomponenten):

Fallen Systemkomponenten, wie z.B. die Lenk-Aktoren aus, veranlasst die Überwachung und Diagnoseeinheit umgehend eine Aktivierung der Regler zur Sturzverstellung (siehe Bild A-18). In der VR-Anwendung wird der Fehler dargestellt; diese wird mit einem rot markierten HUD signalisiert. Ein Entwickler ist über den Vorfall informiert und kann überprüfen, ob die Sturzverstellung rechtzeitig eingeschaltet wird.

Visualisierung der Kommunikation (Struktur und Verhalten)				
Entwicklungsaufgabe		KI-Verfahren, mechatronische Ebenen		
Kommunikation zwischen RailCabs entwickeln, Kommunikationsprotokolle und -kanäle auslegen		Beschreibung des Verfahrens: Autonome Kommunikation MFM: - CO: - AMS: Komm. zw. einzelnen Fahrzeugen simulieren RO: Komm. wird im RO berechnet VMS: Komm. zw. Konvois simulieren KO: -		
Analyseaufgabe		Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen		
Kommunikations-Struktur und Verhalten analysieren (system-extern) Welche Systeme kommunizieren miteinander; wann komm. sie? Wird die Komm. frühzeitig eingeleitet? Fallen ggf. Nachrichten aus?		MFM: - RO: Abarbeitung der Nachrichtenfolge analysieren AMS: Komm. zw. einzelnen Fahrzeugen analysieren (Sender, Empfänger, Übertragungsgeschw.) KO: Vorgaben vom KO analysieren VMS: Komm. zw. Konvois analysieren		
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen		
Kommunikationsstruktur und Kommunikation visualisieren. Es müssen Sender, Empfänger, die Übertragungsgeschwindigkeit sowie Fehler dargestellt werden. Änderung der Kommunikationsstruktur zur Laufzeit muss sichtbar sein.		VA - Klasse: Wirkbeziehung/Flüsse - Informationsflüsse zur Kommunikation MFM: - RO: Eingabe/Ausgabe des Komm.-Moduls AMS: Komm. zw. RailCabs visualis. KO: Vorgaben vom KO VMS: Komm zw. Konvois visualisieren		
Daten				
Nr.	Datum / Systemgröße	Attributtyp / Datentyp	Beschreibung	Zeitverhalten
1	Zustand „state_pos“	nominal / skalar (Integer)	Zustand Positionsübertragung. Besteht aus zwei parallelen Zuständen: state [0] sendet Position, state [1] empfängt Position	dynamisch, diskret
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik		
Visuelle Netzwerke, Kommunikationslinien		Primär-VT: Visuelle Netzwerke		
Erfüllung der VA: Verbindungslinien zeigen Kommunikationswege, die Knoten die kommunizierenden Komponente				
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik				
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregel	Darstellungsdimension	
1	Datenübertragung: auf Linie Sender/Empfänger: auf Position	Regel Nr.: 6, 10, 21, 30, 32	3-dimensional, Linie im 3D-Raum	
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Das visuelle Netzwerk beschreibt die Wirkweise zwischen vernetzten Systemkomponenten oder Verbänden. Die Kanten zeigen die Kommunikation (Relation), die Knoten die kommunizierenden Komponenten. Gruppen von Komponenten werden zusätzlich hervorgehoben. Werden die Kanten durch gestrichelte Linien animiert, zeigen sie das Verhalten (Kommunikation zur Laufzeit) an. Nicht animierte Linien zeigen die Kommunikations-Struktur an.				
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums				
MFM: nicht relevant	AMS:	VMS:		
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR				
Erscheinung: Die Kanten zwischen den Systemkomponenten erscheinen automatisch, wenn eine Komm. eingeleitet wird. Sie wird bei Beendigung der Komm. ausgeblendet.	Verhalten: Die Geschwindigkeit und Richtung der Kommunikation wird durch animierte gestrichelte Linien dargestellt. Bei Unterbrechung der Komm. bleibt die Animation stehen. Zur Verdeutlichung eines Fehlers werden die Linien zudem rot gefärbt.	Interaktion: Durch Selektion einer Kante können weitere Informationen zur Komm. abgerufen werden. Dies kann die Anzahl und Art der Nachrichten sein. Diese werden dann in einem zusätzlichen HUD dargestellt.		
Implementierungsaufwand: hoch	Sonstige Bemerkungen: Die Beschaffenheit der Kanten repräsentiert unterschiedliche Daten / Arten der Kommunikation. Dazu sei auf die visuelle Grammatik visueller Netzwerke verwiesen (Kap. 5.6.2).			
Erstellungsdatum: 06.05.2012		Letzte Aktualisierung: 03.10.2012		Bearbeiter: Waßmann, Helene

Bild A-10: Visualisierung der Kommunikation mit Vis. Netzwerken (Wirkbeziehungen)

Visualisierung der Historie von Ereignissen (Statistik und Muster) am Bsp. der Auftragsvergabe				
Entwicklungsaufgabe		KI-Verfahren, mechatronische Ebenen		
Auftrags-System und Betriebsstrategien entwickeln. Dazu werden Parameter / Kriterien eingestellt, nach denen z.B. Aufträge angenommen oder abgelehnt werden.		Beschreibung des Verfahrens: Auftragsvergabe, Betriebsstrategie MFM, VMS: - CO, RO: - AMS: Auftrags-System weist einzelnen KO: wird im KO berechnet AMS Aufträge zu (Ereignisse) net		
Analyseaufgabe		Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen		
Vergangene Ereignisse analysieren (z.B. Annahme Auftrag, Ablehnung Auftrag, Stauinformation).		MFM, VMS: - CO, RO: - AMS: Ereignisse eines AMS analysieren KO: werden im KO berechnet		
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen		
Alle Ereignisse auf den bisher vom RailCab befahrenen Streckenabschnitten visualisieren. Zudem soll die Art der Ereignisse sichtbar sein.		VA - Klasse: Statistik und Muster-Historie MFM, VMS: - CO, RO: - AMS: Ereignisse eines RailCabs KO: Vorgaben vom KO visualisieren		
Daten				
Nr.	Datum / Systemgröße	Attributtyp / Datentyp	Beschreibung	Zeitverhalten
1	Position des RailCabs	quantitativ / Vektor	Vektor gibt Position im 3D-Raum an.	dynamisch, quasi-kontinuierlich
2	Art des Ereignisses	nominal		---
3	Zeitpunkt des Ereignisses	temporal	Beschreibt den Zeitpunkt der Simulationszeit, an dem das Ereignis auftritt.	statisch, diskret, punkt-basiert
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik		
Glyphen (z.B. Männchen oder Pfeile) hinter RailCabs		Sekundär-VT: Glyphen/Metaphern		
Erfüllung der VA: Positionen und Metaphern deuten auf vergangene Ereignisse eines RailCabs hin.				
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik				
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension	
1	Ort des Ereignisses: auf Position Art des Ereignisses: auf Metapher	Regel Nr.: 5, 10, 17, 20, 43	3-dimensional, Metaphern im 3D-Raum	
<p>Prinzipiskizze der Visualisierungstechnik: Die Glyphen/Metaphern werden über den Streckensegmenten platziert, die vom betrachteten RailCab befahren wurden. Die Glyphen selbst geben Hinweise auf die eingetroffenen Ereignisse an den entsprechenden Stellen. Dazu werden die Ereignisse intern gespeichert und anhand der Metapher repräsentiert.</p> <p>Legende: ■ : Auftrag angenommen ■ : Auftrag abgelehnt ■ : Stau-Information erhalten</p>				
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums				
MFM: nicht relevant	AMS: Die Historie kann nur für ein RailCab beobachtet werden, da sich sonst auf gleichen befahrenen Strecken die Glyphen verschiedener RailCabs überschneiden würden.		VMS: nicht relevant	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR				
Erscheinung: Das Speichern der Ereignisse und Darstellen der Glyphen wird beim Betätigen eines entsprechenden Buttons durch den Anwender aktiviert. Zusätzlich wird das zu beobachtende RailCab selektiert. Beim zweiten Betätigen des Buttons werden die Glyphen ausgeblendet.		Verhalten: Die Glyphen erscheinen abhängig eines eingetroffenen Ereignisses einmalig. Sie werden solange dargestellt, bis die Visualisierung vom Anwender deaktiviert wird.		Interaktion: Durch Selektion eines Glyphs können weitere Informationen zum Ereignis abgerufen werden. (Diese können als Annotation dargestellt werden).
Implementierungsaufwand: hoch		Sonstige Bemerkungen: Je nach untersuchten Ereignissen werden unterschiedliche, geeignete Glyphen eingesetzt. Die Farbe eines Glyphen gibt zudem Aufschluss über die Stärke des Ereignisses.		
Erstellungsdatum: 06.05.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012		Bearbeiter: Waßmann, Helene

Bild A-11: Visualisierung der Historie von Ereignissen (Statistik und Muster)

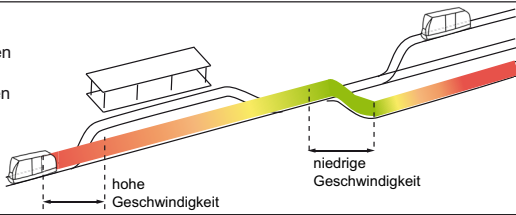
Visualisierung der Historie von Systemgrößen (Statistik und Muster)				
Entwicklungsaufgabe		KI-Verfahren, mechatronische Ebenen		
Regelung der RailCab-Geschwindigkeit (Umwelteinfluss: Steigung der Strecke).		Beschreibung des Verfahrens: Regelung MFM: - KO: Planung der Geschwindigkeit AMS: Regeln eines Fahrzeugs VMS: -		
Analyseaufgabe		Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen		
Vergangene kontinuierliche Messgrößen analysieren (z.B. Systemgrößen wie die Geschwindigkeit).		MFM, VMS: - AMS: Geschwindigkeit analysieren Umgebung: Geschw. wird innerhalb eines untersuchten Anwendungsszenarios analysiert.		
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen		
Systemgröße (z.B. Geschwindigkeit) auf den bisher vom RailCab befahrenen Streckensegmenten visualisieren. Es soll sichtbar sein auf welchem Streckenbereich welche Geschwindigkeit gefahren wurde.		VA - Klasse: Statistik und Muster - Historie MFM: - AMS: Geschw. eines RailCabs visualisieren VMS: -		
Daten				
Nr.	Datum / Systemgröße	Attributtyp / Datentyp	Beschreibung	Zeitverhalten
1	Position des RailCabs	quantitativ / Vektor	Vektor gibt die Position im 3D-Raum an	dynamisch, quasi-kontinuierlich,
2	Geschwindigkeit	quantitativ / Skalar	Geschwindigkeit beträgt 0 km/h bis 160 km/h	statisch, Spanne / Bereich
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik		
Farbiger Balken hinter RailCabs		Primär-VT: Farbkarten		
Erfüllung der VA: Farben des Balkens deuten auf vergangene Systemgrößen des RailCabs hin.				
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik				
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension	
1	befahrene Position: auf Position Systemgröße: auf Farbe	Regel Nr.: 5, 10, 16, 17, 40	3-dimensional, Linie im 3D-Raum	
<p>Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Der Farbbalken (auch: Timeline) wird über den Streckensegmenten platziert, die vom betrachteten RailCab befahren wurden. Die Farben des Balkens repräsentieren vergangene Systemgrößen an den entsprechenden Bereichen der Farbkarte. Dazu werden die Systemgrößen intern gespeichert und anhand der Farbe repräsentiert. Die Abbildung einer Systemgröße auf die Farbe kann individuell eingestellt werden.</p> 				
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums				
MFM: nicht relevant	AMS: Die Historie kann nur für ein RailCab beobachtet werden, da sich sonst auf gleichen befahrenen Strecken die Farbbalken verschiedener RailCabs überschneiden würden.		VMS: nicht relevant	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR				
Erscheinung: Der Farbbalken erscheint beim Betätigen eines entsprechenden Buttons durch den Anwender. Zusätzlich wird das zu beobachtende RailCab selektiert. Beim zweiten Betätigen des Buttons wird der Farbbalken ausgeblendet.		Verhalten: Bereiche des Farbbalkens werden abhängig der vergangenen Systemgrößen einmalig eingefärbt. Die Färbung bleibt solange, bis die Visualisierung vom Anwender deaktiviert wird.	Interaktion: Durch Selektion eines Bereichs des Farbbalkens können weitere Informationen zur Systemgröße abgerufen werden. Dies kann ein konkreter Wert der Systemgröße sein. (Er wird als Annotation dargestellt).	
Implementierungsaufwand: hoch		Sonstige Bemerkungen:		
Erstellungsdatum: 04.09.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012		Bearbeiter: Waßmann, Helene

Bild A-12: Visualisierung der Historie von Systemgrößen (Statistik und Muster)

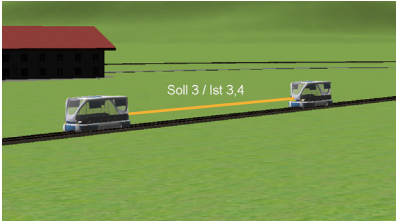

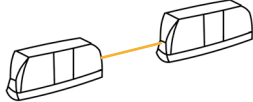
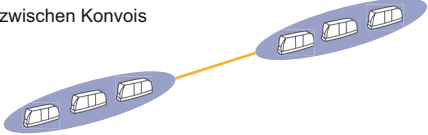
Visualisierung von Abständen (Wirkweise)			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Abstände zwischen Systemkomponenten sollen dargestellt werden. Dies können Abstände zwischen einzelnen Fahrzeugen sein, zwischen Modulen aber auch Verschiebungen eines Bauteils, wie z.B. eine Querverschiebung eines Rads auf der Schiene.		VA-Klasse: Wirkbeziehung / Flüsse - Abstände MFM: Abstände zw. Modulen AMS: Abstände zw. AMS VMS: Abstände zw. VMS, z.B. zwischen zwei aufeinanderfolgenden Konvois. KO, RO, CO: Abstände können auf allen OCM-Ebenen berechnet werden.	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Linie mit Annotation, Balkendiagramm		Primär-VT: Linie (Teil eines Visuellen Netzwerkes) Sekundär-VT: Annotation, Balken, Farbe	
Erfüllung der VA: Länge der Linie und ggf. eine Annotation stellen eingängig den Abstand dar.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension
	Wert des Abstands: auf Länge der Linie	Regel Nr.: 10, 16, 17	3-dimensional, im 3D-Raum platziert
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Der Abstand zw. zwei Systemkomponenten wird mit Hilfe einer Linie dazwischen dargestellt. Eine Annotation an der Linie gibt den konkreten Wert des Abstands an. Kritische Abstände können zudem durch eine Färbung der Linie (z.B. rot) hervorgehoben werden. Ist der Abstand zwischen zwei Modulen sehr klein wird eine überhöhte Darstellung als Balkendiagramm empfohlen.		 Optionale Darstellung: Grenze / Schwellenwert überschritten  überhöhte Darstellung (wenn z.B. Abstands-Raum zu klein)	
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM: Abstand zw. Modulen oder Bauteilen eines Moduls	AMS: Abstand zw. Fahrzeugen 	VMS: Abstand zwischen Konvois 	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Der Abstand wird beim Aktivieren eines entsprechenden Menü-Buttons eingeblendet. Die System-Komponenten, zwischen denen er berechnet wird, werden vorher spezifiziert.	Verhalten: Die Länge der Linie ändert sich mit dem Wert des Abstands. Überschreitet der Wert einen Schwellenwert, wird die Linie rot gefärbt.	Interaktion: keine	
Implementierungsaufwand: niedrig	Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 06.05.2012	Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	Bearbeiter: Waßmann, Helene	

Bild A-13: Visualisierung von Abständen (Wirkbeziehungen)

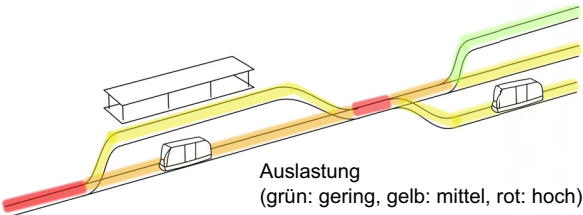
Visualisierung der Streckenauslastung (Statistik und Muster)				
Entwicklungsaufgabe		KI-Verfahren, mechatronische Ebenen		
Logische Beschreibung des Streckenmodells modellieren; Routenplanung simulieren; Betriebsstrategie entwickeln		Beschreibung des Verfahrens: Routenplanung, Betriebsstrategie MFM: - KO: Wird im KO berechnet AMS: Routenplanung simulieren VMS: - Betriebsstrategie wird global berechnet		
Analyseaufgabe		Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen		
Streckenauslastung analysieren Welche Streckensegmente sind stark befahren? Bereiche mit starker Auslastung weisen auf ungeeignete Topologie oder schlechte Routenplanung hin		MFM: - AMS: - VMS: - Umgebung: Die Streckenauslastung wird als Umgebungseinfluss betrachtet		
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen		
Überblick über die gesamte Strecke des Szenarios und die Auslastung visualisieren. Es müssen stark und schwach ausgelastete Bereiche deutlich erkennbar sein.		VA - Klasse: Statistik und Muster - Verteilung / Auslastung MFM: - AMS: - VMS: Streckenauslastung des gesamten Szenarios analysieren		
Daten				
Nr.	Datum / Systemgröße	Attributtyp / Datentyp	Beschreibung	Zeitverhalten
1	Streckensegment	Segment-ID: nominal / (geometrisch) netzwerkartig	Streckensegmente sind Strecken zwischen zwei Weichen. Sie bestehen aus Geraden, Kreissegmenten und Klothoiden und haben eine eindeutige ID. Jede Segment-ID kann eine andere Auslastung haben.	dynamisch, quasi-kontinuierlich
2	Auslastung von (1)	quantitativ / skalar		
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik		
Farbige Markierung der Streckensegmente		Primär-VT: Farbkarte		
Erfüllung der VA: Auffällige Farben der Farbkarte deuten auf stark befahrene Bereiche der Strecke hin.				
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik				
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension	
1	auf Position	Regel Nr.: 10, 17, 40	3-dimensional, Farbmarkierung im 3D-Raum	
2	auf Farbe			
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik:				
<p>Stark befahrene Streckensegmente werden rot gefärbt; wenig befahrene werden grün gefärbt. Für die Zuweisung der Farbe auf die Streckensegmente ist der Zugriff auf das logische Streckenmodell erforderlich.</p>  <p style="text-align: right;">Auslastung (grün: gering, gelb: mittel, rot: hoch)</p>				
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums				
MFM: nicht relevant		AMS: nicht relevant		VMS: Ausprägung siehe Prinzipskizze
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR				
Erscheinung: Die Visualisierung erscheint beim Betätigen eines entsprechenden Buttons durch den Anwender. Beim zweiten Betätigen des Buttons wird sie deaktiviert.		Verhalten: Für jedes Streckensegment wird rechnerintern ein Zähler gespeichert. Beim Überfahren des Segments durch ein Fahrzeug wird der Zähler hochgesetzt. Häufig befahrene Segmente werden rot gefärbt, wenig befahrene werden grün gefärbt usw.		Interaktion: Aktivieren und Deaktivieren der Visualisierungstechnik
Implementierungsaufwand: hoch		Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 02.05.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012		Bearbeiter: Waßmann, Helene

Bild A-14: Visualisierung der Streckenauslastung (Statistik und Muster)

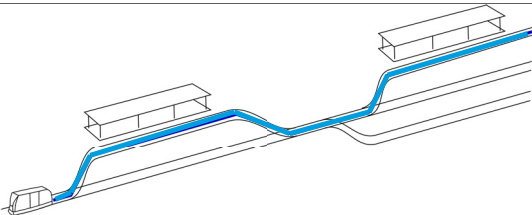
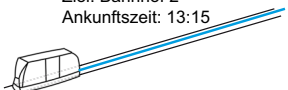
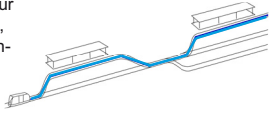
Visualisierung der geplanten Fahrtroute (Planen)				
Entwicklungsaufgabe		KI-Verfahren, mechatronische Ebenen		
Routenplanungs-Algorithmen entwickeln		Beschreibung des Verfahrens: Routenplanung, Betriebsstrategie MFM: - KO: Wird im KO berechnet AMS: Routenplanung simulieren VMS: -		
Analyseaufgabe		Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen		
Geplante Route und Ankunfts-Zeit überprüfen. Welche Route fährt ein RailCab? Was ist das Ziel und geplante Ankunftszeit?		MFM: - KO: Wird im KO berechnet AMS: Routenplanung analysieren VMS: - Umgebung: Route wird innerhalb des untersuchten Anwendungsszenarios analysiert		
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen		
Geplante Route (Weg) darstellen. Zudem sollen beim Heranzoomen an ein RailCab das Ziel und die geplante Ankunftszeit sichtbar sein.		VA - Klasse: Informationsverarbeitung - Planen (Weg), Funktion: Weg planen MFM: - AMS: Route, Ziel u. Ankunftszeit eines RailCabs visualisieren VMS: Route eines RailCabs als Überblick visualisieren		
Daten				
Nr.	Datum / Systemgröße	Attributtyp / Datentyp	Beschreibung	Zeitverhalten
1	zu befahrende Streckensegmente	Segment-IDs: nominal / sequentiell (Liste)	Geplante, zu befahrende Streckensegmente werden in einer Liste gespeichert und nacheinander abgearbeitet. Die Segmente sind durch Geraden, Kreisbögen und Klothoiden beschrieben und haben eine eindeutige ID.	Segmente: statisch; Liste: dynamisch, quasi-kontinuierlich
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik		
Linien über geplante Streckensegmente		Sekundär-VT: Linien		
Erfüllung der VA: Die Linie stellt den Weg dar, der vom RailCab befahren wird. Die Darstellung ist eingängig.				
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik				
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension	
1	geometrische Beschreibungen der Streckensegmente werden auf Linien / Kreissegmente abgebildet	Regel Nr.: 39, 40	3-dimensional, Verlauf im 3d-Raum	
<p>Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Die geplante Route wird durch eine farbige Linie repräsentiert, die dem geometrischen Verlauf der Streckensegmente entspricht. Sie wird über dem 3D-Streckenmodell positioniert.</p> 				
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums				
MFM: nicht relevant	AMS: Ziel: Bahnhof 2 Ankunftszeit: 13:15 	VMS: Die Fahrtroute kann nur für ein RailCab beobachtet werden, da sich sonst auf gleichen befahrenen Strecken die Linien verschiedener RailCabs überschneiden würden. 		
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR				
Erscheinung: Die Visualisierung erscheint beim Betätigen eines Buttons durch den Anwender. Zusätzlich wird das zu beobachtende RailCab selektiert.		Verhalten: Die Linien erscheinen sobald die zu befahrenden Segmente vom Routenplanungs-Algorithmus berechnet werden. Sie verändern ihre Position, wenn die Route umgeplant wird.		Interaktion: Aktivieren und Deaktivieren der Visualisierungstechnik
Implementierungsaufwand: hoch		Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 02.05.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012		Bearbeiter: Waßmann, Helene

Bild A-15: Visualisierung der geplanten Fahrtroute (IV-Planen)

Visualisierung der Entscheidung für eine Route (Entscheidungsfindung)				
Entwicklungsaufgabe		KI-Verfahren, mechatronische Ebenen		
Betriebsstrategie entwickeln. Parameter für Entscheidungsfindung einstellen.		Beschreibung des Verfahrens: Routenplanung, Betriebsstrategie MFM: - KO: Wird im KO berechnet AMS: Routenplanung simulieren VMS: -		
Analyseaufgabe		Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen		
Entscheidungsfindung analysieren. Trifft ein RailCab die richtigen Entscheidungen, wie z.B. die Richtungswahl an Weichen?		MFM: - KO: Vorgaben (z.B Auftrag) werden im KO berechnet AMS: Entscheidungsfindung analysieren VMS: ggf. Überblick über alle Entscheidungen Umgebung: ...		
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen		
Die Entscheidungsfindung und das Ergebnis der Entscheidung sollen visualisiert werden. Auch soll der Grund / das Kriterium für eine Entscheidung sichtbar sein.		VA - Klasse: Klassen-übergreifende VA - Entscheidungsfindung MFM: - AMS: Entscheidungsfindung visualisieren VMS: Entscheidungsfindung aller RailCabs visualisieren		
Daten				
Nr.	Datum / Systemgröße	Attributtyp / Datentyp	Beschreibung	Zeitverhalten
1	Streckensegment	nominal / (geometrisch) netzwerkartig (Segment-ID)	Alternative Streckensegmente an Weichen (Verzweigungen). Die Segmente sind durch Geraden, Kreissegmente und Klothoiden beschrieben und haben eine eindeutige ID.	diskret, dynamisch
2	Entscheidungsvariable	nominal / Segment-ID	Zwischen zwei Segment-IDs wird entschieden. Resultat ist eine Segment-ID.	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik		
Linien für Wege, Farbe für Ergebnis		Sekundär-VT: Animation, Farben		
Erfüllung der VA: Durch gefärbte Linie wird das Ergebnis der Entscheidung deutlich.				
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik				
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension	
1	auf Position	Regel Nr.: 17, 20, 21, 30, 36	3-dimensional, Farbmarkierung im 3d-Raum	
2	auf Animation und Farbe			
<p>Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: An einer Verzweigung (Weiche) werden die möglichen zu befahrenden Routen als farbige Linien markiert. Die geplante und die neue (umgeplante) Route erhalten je unterschiedliche Farben. Der Grund der Umplanung wird als Glyph (Metapher) am RailCab eingeblendet.</p>				
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums				
MFM: nicht relevant	<p>AMS:</p>	<p>VMS: Farbkarte repräsentiert aktuelle Entscheidungsfindungen aller RailCabs.</p>		
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR				
Erscheinung: Die Linien erscheinen dann automatisch, wenn sich ein RailCab an einer Weiche zwischen zwei Routen entscheiden muss. Durch eine auffällige Animation wird der Anwender darauf aufmerksam gemacht.		Verhalten: Während der Entscheidungsfindung werden die Linien im Wechsel eingeblendet (Animation). Die Linie, die das Resultat einblendet, bleibt längere Zeit stehen.		Interaktion: keine
Implementierungsaufwand: mittel		Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 02.05.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012		Bearbeiter: Waßmann, Helene

Bild A-16: Visualisierung der Entscheidung für eine Route (Entscheidungsfindung)

Visualisierung des maximalen Reibungswerts in Querrichtung (Umgebung, Wirkstruktur – IV)				
Entwicklungsaufgabe		KI-Verfahren, mechatronische Ebenen		
Reglerstruktur auslegen, Spurführungsregelung und Überwachung und Diagnostik überprüfen, Schätzverfahren für max. Reibungswert entwickeln		Beschreibung des Verfahrens: Regelung (Spurführung) MFM: Regelung des Sturzvariablen Fahrwerks CO: Regler-Kaskaden RO: Konfiguration der lokalen Regler		
Analyseaufgabe		Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen		
Wie gut konnte der maximale Reibungswert in Querrichtung geschätzt werden?		MFM: kontinuierliche Messwertaufnahme, Bewegungsverhalten RO: geschätzten Reibungswert analysieren		
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen		
Reibungswert im Zusammenhang mit der Umgebung darstellen		VA - Klasse: klassen-übergreifende VA - Systemgröße MFM: Geometrie und Bewegungsverhalten des Fahrwerks darstellen CO: - RO: max. Reibungswert darstellen		
Daten				
Nr.	Datum / Systemgröße	Attributtyp / Datentyp	Beschreibung	Zeitverhalten
1	Richtung der Reibung	3D-Position / Vektor	Gibt Richtung (Orientierung) der Reibungskraft an	quasi kontinuierlich
2	max. Reibungswert	Wert 0 bis 0,38 / Skalar	wird in % angegeben	quasi kontinuierlich
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik		
Pfeil und Farbe für Reibungswert		Sekundär-VT: Systemgrößen		
Durch Größe und Richtung des Pfeils ist die Reibungskraft nachvollziehbar. 3D-Modell der Schienen stellt Umgebung dar.				
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik				
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension	
1	Länge und Farbe des Pfeils	Regel-Nr.: 10, 31, 43	3-dimensional am Rad	
Prinzipskizze:				
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR				
Erscheinung: Pfeil wird eingeblendet, wenn Reibung die Sturzverstellung beeinflusst.		Verhalten: Größe und Farbe des Pfeils ändern sich kontinuierlich mit dem Datenwert der Simulation.		Interaktion: Bei Bedarf Aktivieren / Deaktivieren des Pfeils
Implementierungsaufwand: niedrig		Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 05.06.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012		Bearbeiter: Waßmann, Helene

Bild A-17: Visualisierung des Reibungswertes (IV-Wirkstruktur, Umgebung)

Visualisierung des Ausfalls von Lenkaktoren (Warnung, Verhaltensanpassung – IV)				
Entwicklungsaufgabe		KI-Verfahren, mechatronische Ebenen		
Reglerstruktur auslegen, Überwachung und Diagnostik überprüfen		Beschreibung des Verfahrens: Regelung (Spurführung) MFM: Regelung des Sturzvariablen Fahrwerks RO: Konfiguration der lokalen Regler		
Analyseaufgabe		Analyseaufgaben auf mechatronischen Ebenen		
Wann löst die Überwachung eine Warnung aus? Welches Verhalten wird folglich ausgelöst?		MFM: Verhaltensanpassung, fehlertolerante Regelung RO: Verhalten der Überwachung und Diagnostik analysieren		
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen		
Warnungen und Fehlermeldungen der Überwachung und Diagnostik darstellen, wenn sie auftreten.		VA - Klasse: klassen-übergreifende VA - Warnung MFM: Geometrie und Bewegungsverhalten des Fahrwerks darstellen CO: Ausfall Lenkaktoren RO: Reaktion der Überwachung darstellen		
Daten				
Nr.	Datum / Systemgröße	Attributtyp / Datentyp	Beschreibung	Zeitverhalten
1	Ausfall Lenkaktork	Kennzahl 0 oder 1 / nominal, boolean	0: Aktorik inaktiv, 1: Aktorik aktiv	diskret
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik		
Warnung auf HUD, rote Färbung des HUD		Sekundär-VT: Info-HUD		
Durch auffällig rote Färbung des HUD und kurze Information zum Fehler wird Warnung sofort gesehen.				
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik				
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension	
1	Färbung des HUD	Regel-Nr.: 10, 31, 36, 37, 38	2-dimensional als HUD	
Prinzipskizze:				
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR				
Erscheinung: Warnung wird eingeblendet, wenn die Aktorik ausgefallen ist.		Verhalten: Zu Anfang blinkt das HUD kurzzeitig, sodass die Warnung sofort auffällt.		Interaktion: keine
Implementierungsaufwand: niedrig		Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 05.06.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012		Bearbeiter: Waßmann, Helene

Bild A-18: Visualisierung einer Warnung über Ausfall von Lenkaktoren (Warnung, IV-Verhaltensanpassung)




Visualisierung von Kräften (Systemgröße)			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Geregelte Systemgrößen oder einwirkende Umfedeinflüsse (hier Kräfte) sollen direkt an der Systemkomponente dargestellt werden, an der sie erzeugt werden.		VA-Klasse: klassen-übergreifende VA - Systemgröße MFM: Kräfte eines MFM visualisieren CO: Ausgabegrößen des Controllers AMS: Kräfte eines AMS visualisieren RO: - VMS: - KO: -	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Pfeil, dargestellt als Glyph an der Systemkomponente und Animation des Pfeils		Sekundär-VT: Glyph, Text / Annotation, Animation	
Erfüllung der VA: Der Kräfte-Pfeil ist eine gewohnte Darstellung für den Ingenieur. Als Glyph an der Systemkomponente verdeutlicht er die aktuelle Kraft.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension
	Kraft: auf Pfeil Wert der Kraft: Länge des Pfeils	Regel Nr.: 10, 30, 39, 40	3-dimensional, im 3D-Raum ausgerichtet
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Die aktuell einwirkende oder resultierende Kraft wird als Glyph (Metapher: Pfeil) an der entsprechenden Stelle der Systemkomponente platziert. Die Länge des Pfeils zeigt den Wert der Kraft an. Zudem stellt eine Annotation den konkreten Wert dar.			
			 Kraft: F
Ausprägungen für Bereiche des Kontinuums			
MFM: z.B. Reibkraft 	AMS: z.B. Wind, Fliehkraft, Reaktionskraft 	VMS: nicht relevant	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Der Kräfte-Pfeil erscheint automatisch, wenn die Kraft einsetzt. Er wird ausgeblendet, wenn die Kraft den Wert Null hat.	Verhalten: Die Größe des Pfeils ändert sich abhängig des Wertes der Kraft (Animation).	Interaktion: keine	
Implementierungsaufwand: niedrig	Sonstige Bemerkungen: Kräfte-Pfeile sind eine gewohnte Darstellung für den Ingenieur; sie eignen sich daher auch für VR-Anwendungen zur Darstellung von Kräften.		
Erstellungsdatum: 06.05.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	
Bearbeiter: Waßmann, Helene			

Bild A-19: Visualisierung von Kräften (Systemgröße)

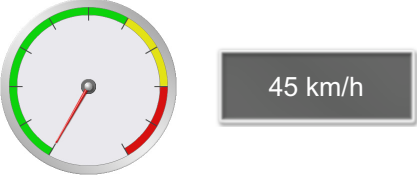
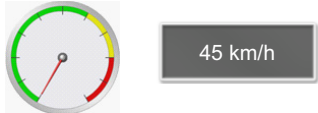
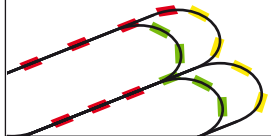
Visualisierung von Geschwindigkeit (Systemgröße)			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Es soll die Systemgröße „Geschwindigkeit“ eines mechatronischen Systems dargestellt werden.		VA-Klasse: klassen-übergreifende VA - Systemgröße MFM: - CO: Systemgröße des Controllers AMS: Geschw. eines AMS visualisieren RO: - VMS: Geschw. vieler AMS visualisieren KO: -	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Geschwindigkeitsanzeige, Farbkarte		Sekundär-VT: Geschwindigkeitsanzeige, Animation Primär-VT: Farbkarte	
Erfüllung der VA: Geschwindigkeitsanzeigen (wie z.B. ein Tachometer) sind eine gewohnte und eingängige Darstellung für die Geschwindigkeit. Die Farbkarte gibt Überblick über die Geschwindigkeit vieler RailCabs.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension
	Wert der Geschw.: auf Ausschlag des Zeigers, auf Text oder auf Farbe der Farbkarte	Regel Nr.: 6, 10, 17, 30, 39	Tachometer und Text: 2-dimensional auf Billboard o. HUD Farkarte: 3-dimensional
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Tachometer: Zeiger des Tachometers zeigt aktuelle Geschwindigkeit an. Die Farben grün, gelb und rot symbolisieren einen unkritischen bzw. kritischen Bereich Alternative Technik: HUD: Der Text (Zahl) auf dem HUD zeigt die aktuelle Geschwindigkeit an.			
			
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM: nicht relevant	AMS: 	VMS: 	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Die Geschwindigkeitsanzeige erscheint beim Selektieren einer Systemkomponente. Beim Klicken auf die Anzeige selbst wird sie deaktiviert.	Verhalten: Die Position des Zeigers eines Tachometers ändert sich mit dem Wert der Geschwindigkeit. Ähnlich ändert sich die Zahl auf einem HUD (Animation).	Interaktion: Selektieren der Systemkomponente, Deaktivieren der Geschwindigkeitsanzeige.	
Implementierungsaufwand: niedrig	Sonstige Bemerkungen: Die Darstellung des Tachometers ist der eines Textes auf einem HUD vorzuziehen. Ein sich permanent ändernder Text ist mühsam zu lesen.		
Erstellungsdatum: 06.05.2012	Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	Bearbeiter: Waßmann, Helene	

Bild A-20: Visualisierung der Geschwindigkeit (Systemgröße)

Visualisierung von Winkeln (Systemgröße)			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Es soll die Systemgröße „Winkel“ eines mechatr. Systems dargestellt werden.		VA-Klasse: klassen-übergreifende VA - Systemgröße MFM: Winkel eines MFM visualisieren CO: Systemgröße des Controllers AMS: - RO: - VMS: - KO: -	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Fläche (Halbkreis und Kreissegment), Farbe		Sekundär-VT: Fläche, Farbe, Animation, überhöhte Darstellung	
Erfüllung der VA: Ein Kreissegment, das den Öffnungswinkel repräsentiert, ist eine gewohnte und eingängige Darstellung.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension
	Wert des Winkels: auf Winkel des Kreissegments	Regel Nr.: 10, 13, 30, 39	2-dimensional, auf einem Billboard
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Der Wertebereich eines Winkels wird als Halbkreis dargestellt. Zusätzliche Annotationen geben die Grenzwerte an. Der aktuelle Wert des Winkels wird durch ein Kreissegment dargestellt, das den Winkel repräsentiert. Das Kreissegment wird farblich hervorgehoben. Ist ein Winkel sehr klein, wird er durch eine überhöhte Darstellung repräsentiert. Die Darstellung erfolgt auf einem Billboard. Dieses ist an die Achse ausgerichtet, um die sich der Winkel dreht.			
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM:		AMS: nicht relevant	VMS: nicht relevant
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Die Darstellung des Winkels erscheint automatisch, wenn die Systemgröße gestellt wird.	Verhalten: Das Kreissegment ändert seinen Winkel dynamisch, abhängig des aktuellen Winkel-Wertes (Animation).	Interaktion: keine	
Implementierungsaufwand: mittel	Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 06.05.2012	Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	Bearbeiter: Waßmann, Helene	

Bild A-21: Visualisierung von Winkeln (Systemgröße)

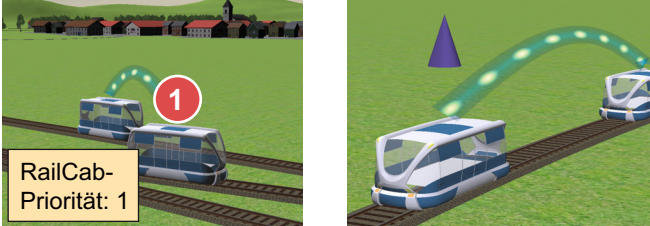
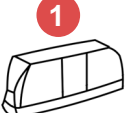
Visualisierung von Rollen (Kennzahl, Kenngröße)			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Für die Kooperation zwischen mech. Systemen werden den Systemen Rollen zugewiesen. Es soll die Rolle eines Systems sichtbar sein.		VA-Klasse: klassen-übergreifende VA - Kennzahl / Kenngröße MFM: - CO: - AMS: Rolle eines AMS visualisieren RO: - VMS: - KO: Kooperationen werden im KO berechnet	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Ein Glyph stellt anhand einer Metapher die Rolle eines Systems dar		Sekundär-VT: Glyph, Metapher	
Eine eingängige visuelle Metapher stellt die Rolle eines Systems dar.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension
	Rolle: auf Metapher Position des AMS: auf Pos. der Metapher	Regel Nr.: 39, 40, 43	2-dimensional als Billboard oder 3-dimensional als 3D-Modell
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Links: Priorität eines RailCabs Rechts: Koordinator eines Konvois wird mit einer Metapher (kegelförmiges Hütchen) gekennzeichnet			
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM: nicht relevant	AMS:	VMS: nicht relevant	
			
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Die Metapher erscheint über einem System, sobald es die Rolle zugewiesen bekommt.	Verhalten: Wird die Rolle einem anderen System zugewiesen, wechselt die Position der Metapher.	Interaktion: keine	
Implementierungsaufwand: niedrig	Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 06.05.2012	Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	Bearbeiter: Waßmann, Helene	

Bild A-22: Visualisierung von Rollen (Kennzahl/Kenngröße)

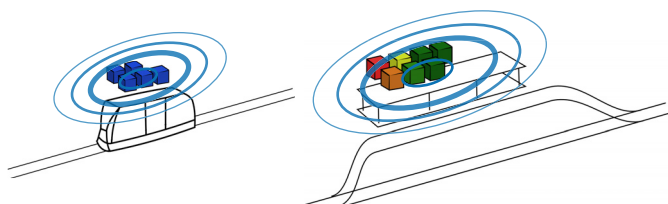
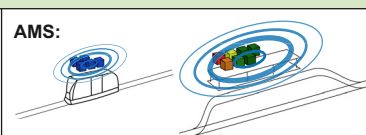
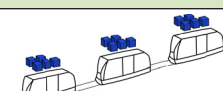
Visualisierung von Ereignissen			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Es sollen Ereignisse dargestellt werden, die einem System vorgegeben werden. Dies kann z.B. ein eingegangener Auftrag oder ein Signal zum Einleiten eines Konvois sein.		VA-Klasse: klassen-übergreifende VA - Ereignis MFM: - AMS: Ereignis eines AMS visualisieren VMS: Ereignis mehrerer AMS visualisieren CO: - RO: - KO: Ereignisse werden vom KO vorgegeben	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Metapher, Effekt (kurzes Aufpoppen)		Sekundär-VT: Metapher, Glyph, Effekt	
Erfüllung der VA: Die Metapher wird mit Hilfe eines auffälligen Effekts eingeblendet. Die Art der Metapher repräsentiert ein Ereignis.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension
	Ereignis: Art der Metapher Pos. des Ereignis: Pos. der Metapher	Regel Nr.: 36, 40, 43	3-dimensional, 3D-Modell am System
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Ein visueller Effekt verdeutlicht den eingegangenen Auftrag. Der Effekt kann z.B. ein kurzes Aufpoppen oder kurz erscheinende konzentrische Kreise sein. Die Art der Metapher repräsentiert das Ereignis. Sie wird über dem mech. System platziert. 			
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM: nicht relevant	AMS: 	VMS:  max. 5 Ereignisse können überblickt werden (Design-Regel Nr. 29)	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Die Metapher erscheint automatisch, wenn ein Ereignis auftritt. Sie wird ausgeblendet, wenn das Ereignis keine Gültigkeit mehr hat.	Verhalten: Nach dem Erscheinen ändert sich die Metapher nicht.	Interaktion: Durch Selektion der Metapher werden weitere Informationen aufgerufen.	
Implementierungsaufwand: niedrig	Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 06.05.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	
Bearbeiter: Waßmann, Helene			

Bild A-23: Visualisierung von Ereignissen

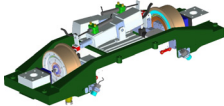
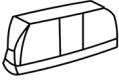
Visualisierung der Stabilität (Kennzahl, Kenngröße)			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Es soll die Stabilität des Systems dargestellt werden. Dabei kann das System entweder stabil oder instabil sein.		VA-Klasse: klassen-übergreifende VA - Kennzahlen MFM: Stabilität eines MFM visualis. CO: Systemgröße vom Controller berechnet AMS: Stabilität eines AMS visualis. RO: - VMS: - KO: -	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Information (Text) auf farbigem HUD		Sekundär-VT: Text / Annotation, Info-HUD, Farbe	
Erfüllung der VA: Die Farbe des HUD ist auffällig und die Information auf dem HUD ist einfach zu verstehen.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension
	Stabilität des Systems: auf Text und Farbe	Regel Nr.: 10, 37, 38	2-dimensional, auf einem HUD
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Informationsgrafik (HUD) stellt dar, ob das System stabil oder instabil ist. Zusätzliche Färbung deutet auf kritischen Zustand (rot: instabil) bzw. unkritischen Zustand (grün: stabil) hin. <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px 10px; border: 1px solid black;">System instabil</div> <div style="background-color: green; color: white; padding: 5px 10px; border: 1px solid black;">System stabil</div> </div>			
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM: <div style="background-color: red; color: white; padding: 2px 5px; display: inline-block;">System instabil</div> 	AMS: <div style="background-color: green; color: white; padding: 2px 5px; display: inline-block;">System stabil</div> 	VMS: nicht relevant	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Die Info zur Stabilität wird während der gesamten Analysephase eingeblendet.		Verhalten: Die Farbe des HUD wechselt auf rot sobald das System instabil ist, auf grün sobald es stabil ist.	Interaktion: keine
Implementierungsaufwand: niedrig		Sonstige Bemerkungen: keine	
Erstellungsdatum: 06.05.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	Bearbeiter: Waßmann, Helene

Bild A-24: Visualisierung der Stabilität (Kennzahl/Kenngröße)

Visualisierung der Regelgüte (Kennzahl, Kenngröße)			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Es soll die Regelgüte eines Reglers dargestellt werden, wobei die Regelgüte die Differenz zwischen SOLL und IST- Größe ist.		VA-Klasse: klassen-übergreifende VA - Systemgröße MFM: Regelgüte eines MFM visualisieren AMS: Regelgüte eines AMS visualisieren VMS: - CO: Systemgrößen werden von CO berechnet RO: - KO: -	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Balkendiagramm		Balkendiagramm, Farbe, Animation, Text	
Erfüllung der VA: Die Länge des Balkens repräsentiert die Regelgüte. Die Darstellung ist eingängig.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension
	Wert der Regelgüte: Länge des Balkens Überschreitung Schwellwert: Farbe des Balkens	Regel Nr.: 10, 17, 30	2-dimensional, auf einem HUD
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Die Länge des Balkens stellt die Differenz zwischen SOLL- und IST-Größe dar. Eine kleine Abweichung vom SOLL-Wert wird grün dargestellt, eine große Abweichung wird rot dargestellt.			
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM: Ausprägung bleibt gleich 	AMS: Ausprägung bleibt gleich 	VMS: nicht relevant	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Das Balkendiagramm wird während der gesamten Analysephase eingeblendet. Durch Klicken auf die Vis.-Technik wird sie wieder deaktiviert.	Verhalten: Die Länge des Balkens ändert sich dynamisch mit dem Wert der Regelgüte.	Interaktion: Deaktivieren der Visualisierungstechnik	
Implementierungsaufwand: mittel	Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 06.05.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	
Bearbeiter: Waßmann, Helene			

Bild A-25: Visualisierung der Regelgüte (Kennzahl/Kenngröße, Schwellenwerte)

Aufmerksamkeitslenkung auf Bereiche			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Es soll auf Bereiche aufmerksam gemacht werden, an denen interessante Vorgänge / Berechnungen / Zustände stattfinden. Dies kann z.B. eine Konvoibildung oder zu hohe Geschwindigkeit von RailCabs sein.		VA-Klasse: Visualisierungs-Zweck - Aufmerksamkeitslenkung MFM: - AMS: - VMS: Vorgänge mehrerer AMS visualisieren CO, RO, KO: Vorgänge können auf allen Ebenen stattfinden	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Gruppierung u. Hervorhebung betroffener Systemkomponenten		Sekundär-VT: Farbton, Hervorhebung, Form, Gruppierung Primär-VT: Farbkarte	
Erfüllung der VA: Durch farbliche Hervorhebung der Bereiche bzw. Systemkomponenten wird die Aufmerksamkeit des Anwenders darauf gelenkt.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension
	Pos.: auf Pos. der Hervorhebung Art des Vorgangs: Farbe und Form der Hervorhebung	Regel Nr.: 6, 10, 20, 21	3-dimensional, an oder über den Systemkomponenten
Prinzipiskizze der Visualisierungstechnik: Links: Ovale grenzen Bereiche ein, auf die die Aufmerksamkeit gelenkt werden soll. Hier sind es RailCabs, die sich im Konvoi-Prozess befinden. Rechts: Auffällige Farben der Farbkarte markieren Bereiche (siehe Primär-Visualisierungstechnik).			
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM: nicht relevant	AMS: nicht relevant	VMS:	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Die Hervorhebung erscheint, wenn bestimmte Vorgänge eintreten. Sie verschwindet wieder, wenn der Vorgang vorbei ist.	Verhalten: Die Hervorhebungen bewegen sich mit den Systemkomponenten mit. Ggf. wird die Farbe abhängig eines Vorgangs geändert.	Interaktion: Navigation / Zoomen in den entsprechenden Bereich.	
Implementierungsaufwand: hoch	Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 06.05.2012	Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	Bearbeiter: Waßmann, Helene	

Bild A-26: Aufmerksamkeitslenkung auf Bereiche (Visualisierungs-Zweck)

Aufmerksamkeitslenkung auf (nicht sichtbare) Ereignisse / Aktivitäten			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Auf Grund verdeckter oder weit entfernter Komponenten sind nicht alle Ereignisse eines Systems sichtbar. Daher soll auf verdeckte Ereignisse aufmerksam gemacht werden.		VA-Klasse: klassen-übergreifende VA - Ereignisse Visualis.-Zweck - Aufmerksamkeitslenkung MFM: - CO: - AMS: Ereignis eines AMS visualisieren RO: - VMS: Ereignis mehrerer AMS visualisieren KO: Ereignisse vom KO vorgegeben	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Vorschau der Ereignisse auf kleinen Datenlinsen		Primär-VT: Fokus und Kontext, Daten-Linse	
Erfüllung der VA: Kleine Datenlinsen zeigen eine Vorschau der eingetroffenen Ereignisse.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregel	Darstellungsdimension
	Ereignis: Art der Metapher die in Datenlinse erscheint	Regel Nr.: 28	Linse: 2-dimensional: auf HUD Vorschau: 3-dimensional
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Kleine Datenlinsen zeigen eine Vorschau auf Ereignisse, die in aktuell nicht sichtbaren Bereichen der VR-Anwendung auftreten. Sie erscheinen am Bildschirmrand und werden 5-10 Sekunden lang angezeigt. Ist ein Anwender am Ereignis interessiert, selektiert er eine Linse und wird automatisch zu dem Bereich geführt, in dem das Ereignis stattgefunden hat.			
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM: nicht relevant	AMS:	VMS:	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Die Vorschau in der Datenlinse erscheint automatisch, wenn ein Ereignis auftritt. Nach 5-10 Sekunden wird sie ausgeblendet.	Verhalten: Das Ausblenden der Datenlinse erfolgt mittels einer immer höheren Transparenz.	Interaktion: Beim Klicken auf eine Datenlinse wird die virtuelle Kamera zum Bereich des Ereignisses geführt.	
Implementierungsaufwand: hoch	Sonstige Bemerkungen: keine		
Erstellungsdatum: 06.05.2012	Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	Bearbeiter: Waßmann, Helene	

Bild A-27: Aufmerksamkeitslenkung auf nicht sichtbare Ereignisse (Vis.-Zweck)


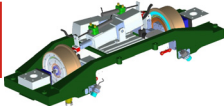
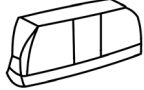
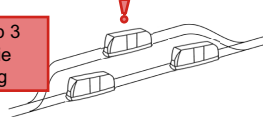
Visualisierung einer Warnung			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Bei Systemfehlern, z.B. Ausfall einer Systemkomponente, soll eine Warnung dargestellt werden.		VA - Klasse: Visualisierungs-Zweck - Warnung MFM: Warnung eines MFM visualis. AMS: Warnung eines AMS visualis. VMS: Warnung mehrerer AMS visualis. CO, RO, KO: Warnungen können für alle Ebenen relevant sein	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Information (Text) auf farbigem HUD		Sekundär-VT: Text / Annotation, Info-HUD, Farbe	
Erfüllung der VA: Die auffällige Farbe des HUD und ein prägnanter Text sind eine eingängige Darstellung. Dadurch wird schnell auf Systemfehler hingewiesen.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregeln	Darstellungsdimension
	Fehler: auf Text	Regel Nr.: 10, 36, 37, 38	2-dimensional, auf HUD
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Der Text der Warnung erscheint auf einem HUD. Die Farbe rot unterstützt die Dringlichkeit einer Warnung. Durch kurzes Blinken des HUDs wird die Aufmerksamkeitslenkung verstärkt.			
			
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM: Lenkaktoren ausgefallen 	AMS: Abstands-Sensor ausgefallen 	VMS: RailCab 3 Energie niedrig 	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Das Info-HUD mit der Warnung erscheint automatisch, wenn ein Fehler auftritt. Es verschwindet wenn der Fehler behoben ist.	Verhalten: Kurzes Blinken beim Auftritt des Fehlers.	Interaktion: keine	
Implementierungsaufwand: niedrig	Sonstige Bemerkungen: Die Vis.-Technik kann in Kombination mit einer farblichen Hervorhebung der gestaltbetroffenen Systemkomponente oder IV-Systemkomponente, die den Fehler aufweist, dargestellt werden (Design-Regel Nr. 6).		
Erstellungsdatum: 06.05.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	
Bearbeiter: Waßmann, Helene			

Bild A-28: Visualisierung von Warnungen (Visualisierungszweck)

Interaktives Abrufen von Daten / Detail-Informationen			
Visualisierungsaufgabe (VA)		Klasse der VA und mechatr. Ebenen	
Nach Bedarf sollen Detailinformationen zu einer vom Anwender gewählten Systemkomponente abgerufen werden. Dies können aktuelle Systemgrößen oder statistische Daten einer Systemkomponente sein. Die Daten sollen an der entsprechenden Systemkomponente dargestellt werden.		VA-Klasse: Visualisierungs-Zweck - Abrufen von Informationen MFM: Daten eines MFM darstellen CO, RO, KO: es können Daten aller OCM Ebenen dargestellt werden. AMS: Daten eines AMS darstellen VMS: -	
Visualisierungstechnik (VT)		Klasse der Visualisierungstechnik	
Text auf einem Head Up Display		Sekundär-VT: Text / Annotation, Info-HUD	
Erfüllung der VA: Die gewünschten Informationen werden in Nähe der Systemkomponente gut erkennbar dargestellt.			
Abbildung der Daten auf die Visualisierungstechnik			
Nr.	Abbildung auf Visuelle Variable	Designregel	Darstellungsdimension
	Datenwerte und Systemgrößen werden auf Text abgebildet	keine	2-dimensional, auf Head Up Display
Prinzipskizze der Visualisierungstechnik: Detail-Informationen (hier: zu Passagieren und RailCabs) werden bei Selektion der entsprechenden Systemkomponente als Text auf einem Head Up Display (HUD) dargestellt. Durch eine Linie vom HUD zur entsprechenden Systemkomponente wird der Zusammenhang von Informationen und Komponente dargestellt. Die selektierte Systemkomponente kann zudem hervorgehoben werden.			
Ausprägungen für Bereiche des VR-Kontinuums			
MFM: 	AMS: 	VMS: nicht relevant	
Präsentation der Visualisierungstechnik in VR			
Erscheinung: Das HUD mit dem Text erscheint beim Selektieren einer Systemkomponente. Beim Klicken auf das HUD selbst wird es wieder deaktiviert.	Verhalten: Werden Systemgrößen (oder Datenwerte) zur Laufzeit verändert, werden auf dem HUD die aktuellen Werte präsentiert.	Interaktion: Selektieren der Systemkomponente; Deaktivieren des HUDs	
Implementierungsaufwand: niedrig	Sonstige Bemerkungen: Nutzen: durch die zusätzlichen Informationen zusammen mit dem Verhalten der Systemkomponente kann der Anwender unterschiedliche Informationen verknüpfen.		
Erstellungsdatum: 06.05.2012		Letzte Aktualisierung: 04.10.2012	
Bearbeiter: Waßmann, Helene			

Bild A-29: Abrufen von Detailinformationen (Visualisierungs-Zweck)