

# **Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeein- flussungsanlagen**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 299**

**bast**

# **Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeein- flussungsanlagen**

von

Christoph Schwietering

Ingenieurbüro Schwietering  
Aachen

Thorsten Neumann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Berlin

Tobias Volkenhoff  
Adrian Fazekas  
Elena Jakobs  
Markus Oeser

Institut für Straßenwesen  
RWTH Aachen

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 299

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

#### **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt: FE 03.0464/2010/IGB**  
Einfluss von Fehlern auf die Qualität von  
Streckenbeeinflussungsanlagen

**Fachbetreuung:**  
Melanie Zorn

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-352-7

Bergisch Gladbach, September 2017

## Kurzfassung – Abstract

### **Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen**

Zur Sicherung der Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland soll im Bereich der kollektiven Verkehrsbeeinflussung in Zukunft das Werkzeug des prozessorientierten Qualitätsmanagements genutzt werden.

Diese Forschungsarbeit hatte die Erarbeitung eines vollständigen Prozess- und Qualitätsmodells und praxistauglicher Handlungsempfehlungen für die verschiedenen Lebenszyklusphasen von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) zum Ziel.

Zu diesem Zweck wurden diverse Grundlagen zur Gestaltung eines auf SBA bezogenen Qualitätsmanagementsystems herangezogen. Das erarbeitete Prozessmodell umfasst 34 bewertungsrelevante Prozesse in den Lebenszyklusphasen Planung, Bau und Betrieb, einschließlich des unterstützenden Prozesses Wartung und Instandsetzung.

Zur Identifikation von Lücken in der Qualitätssicherung der Prozesse wurde eine Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) durchgeführt. Anhand von Expertenwissen wurden Fehler und Fehlerursachen analysiert und die kritischsten Qualitätsprobleme zusammengestellt.

Anhand der Ergebnisse des Prozessmodells wurde zur quantitativen Beschreibung der Auswirkungen möglicher Fehler ein Qualitätsmodell entwickelt. Auf Grundlage eines Bayes'schen Netzes wurden die Auswirkungen von Fehlern auf nachfolgende Prozesse im gesamten SBA-Lebenszyklus systematisch abgebildet. Das probabilistische Qualitätsmodell kann dabei außerdem als Diagnose-Werkzeug zur Untersuchung der Fehlerursachen von beobachteten Störungen einer SBA genutzt werden.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden anhand der Ergebnisse des Prozessmodells praxisorientierte, ressourcenschonende Handlungsempfehlungen abgeleitet und in einem Dokument für Planer und Betreiber von Streckenbeeinflussungsanlagen zusammengestellt. Zudem wurde eine Methode zur Abschätzung des Nutzens der Maßnahmen beschrieben, um die erforderlichen Investitionen zur Qualitätssicherung zu begründen.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich im Zusammenhang mit der Adaption des Qualitätsmodells auf eine konkrete SBA insbesondere

mit der Optimierung des Modells in Form von Anpassungen der Modelltopologie beschäftigen. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob die in dieser Forschungsarbeit erarbeiteten Ergebnisse auf andere Typen von Verkehrsbeeinflussungsanlagen übertragbar sind.

### **The impact of failures on the quality of active traffic control systems**

In the future, process-oriented quality management should be used to ensure the efficiency of the transport infrastructure in Germany in the field of collective traffic management systems.

This research work achieved a complete process and quality model and practicable recommendations for actions to enhance quality for the entire life cycle of active traffic control systems.

In order to develop a complete process model, existing designs of quality management systems of traffic control systems were used. The final process model is divided into the life cycle phases 'planning', 'construction', and 'operation' including maintenance, which supports the phase 'operation'. The process model contains 34 valuation-relevant processes.

A failure mode and effect analysis (FMEA) was created and executed to identify problems in the quality assurance of the processes defined in the process model. On the basis of expert knowledge, failure and failure causes were analyzed and the most critical quality problems were identified.

Based on the results of the process model, a quality model for a quantitative description of the effect of failures was developed. The concept of Bayesian network was used to systematically illustrate the impact of failures on following processes throughout the life cycle of active traffic control systems. The probabilistic quality model can also be used as a diagnostic tool for analyzing failure causes of observed disturbances of an active traffic control system.

As part of the research, practicable and resource-saving recommendations for action to enhance quality were derived, based on the results of the process model and compiled in a document for planners and operators of active traffic control systems. Additionally, a method to estimate the benefit of the recommendations was described for justify the required investment for quality assurance.

The focus of future research should examine the adaption of the quality model to a specific active

traffic control system, in particular the optimization of the model topology. Furthermore, it should be analyzed whether the elaborated results of research can be applied to other types of traffic control systems.

## Summary

### The impact of failures on the quality of active traffic control systems

#### 1 Problem definition and purpose of the study

In order to meet the increasing demands for mobility in Germany, it is necessary to ensure the capacity of the traffic infrastructure. Especially in times of budgetary restrictions, a purposeful and efficient allocation of financial resources is essential. The status detection and condition assessment, as well as pavement management systems for road construction and maintenance allow a comprehensive resource allocation.

Currently, in the field of collective traffic control, a reorientation with the focus on the maintenance of infrastructure is established, instead of concentrating on new constructions. For this purpose quality management should be used in the future. Basic approaches are described in FGSV (2012)<sup>1</sup> and currently further works are made by experts of the research group 3.2.10 of the FGSV. Basis for this should constitute relevant standards and specifications.

The challenges of the use of quality management in the field of traffic management are on the one hand depending on the federal system. Every state has e.g. its own organizational structure. On the other hand, there are different processes that are necessary for the performance of a traffic control system. For a comprehensive quality management, the entire life cycle is subdivided in planning, construction, and operation; for all these phases, various

processes are involved. Most of the processes of the life cycle phases 'construction' and 'operation' of a traffic control system are already known and defined. The effect of failures on planning and tender on the quality of traffic control systems needs to be analyzed. Furthermore, appropriate criteria and parameters for quality assessment needs to be assigned to every process.

Further research is needed in the field of combining quality evaluations using synthesis methods. Theoretical basic research already exists, which should be tested in a practical implementation. NEUMANN (2014)<sup>2</sup> describes an approach to calculate the entire quality and to prioritize quality-related problems on the basis of Bayesian networks.

#### 2 Research methodology

This research project aims at formalizing and combining available expertise on failures and failure causes of active traffic control systems with a mathematical quality model. The methodology is developed on the example of an active traffic control system, but should be applied to other types of traffic control systems.

The failure mode and effect analysis (FMEA) systematically captures typical failures and failure causes of processes of the life cycle. Using this method, expert knowledge is used to estimate the input parameters for the quality model.

On basis of a probabilistic process description, the quality model is used for case-specific applications in the field of reproductive failures and as a diagnostic tool.

<sup>1</sup> FGSV, 2012: Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln 2012

<sup>2</sup> NEUMANN, 2014: Neumann, T.: Qualitätsmodellierung und –bewertung im Verkehr mittels eines probabilistischen Rahmenkonzepts, In: Straßenverkehrstechnik 7.2014, S. 450-457

Taking all important life cycle phases and its processes from 'planning' to 'operation' into account, specific recommendations for actions for quality management systems of active traffic control systems are listed.

After completing the research project, concrete and practical results are available for practice, particularly for planners and operators of active traffic control systems. These can be used directly in operation as a diagnostic tool to identify possible causes of errors. In addition, a method for planners to justify and estimate the benefit of necessary investments was developed.

### **3 Results**

#### **3.1 Process model**

To describe the complex system of an active traffic control system, the complete process chain including the life cycle phases planning, construction and operation was designed in a process model. The variable sign setting requests (e.g. congestion warning, fog warning) were listed as "Top Events". These Top Events represent the end of the error propagation.

First, the most important quality management systems and their practice in transportation were examined and described. The findings were used as a basis to define a quality management systems for active traffic control systems. To analyze the most important quality problems of an active traffic control system a failure mode and effect analysis (FMEA) was chosen, because it allows the improvement of the quality degree actions for early error detection and correction. It takes all relevant processes of the system into account, as well.

The FMEA was created on the basis of the process model. Based on available expertise, the most critical quality problems of active traffic control systems were determined. The

critical processes are calculated based on the importance, the probability of occurrence and the probability of error detection.

#### **3.2 Quality model**

As part of the research, a quality model has been designed, which models the effects of errors on subsequent processes. Based on a developed network function (see Fig. 1), the processes and the immediate subsequent processes were graphed.

The model was finally designed on basis of Bayesian networks. These provide a generic and probabilistic framework for a probabilistic model with causal and statistical relationships in complex systems.

The results of the process model and the FMEA have been transferred into a quality model that is used to quantify the effects of possible errors or shortcomings on subsequent processes in the lifecycle of an active traffic control system including maintenance & overhaul. In addition, the quality model can be used for diagnosing causes of errors for observed problems (for example, the effectiveness of an active traffic control system).

#### **3.3 Recommendations for actions**

As part of the research, practical and resource-saving recommendations for actions to enhance the quality for the entire life cycle (for example, at the observed deficits in terms of failed detection devices) were derived and summarized in a separate document for 'planners' and 'operators' of active traffic control systems.

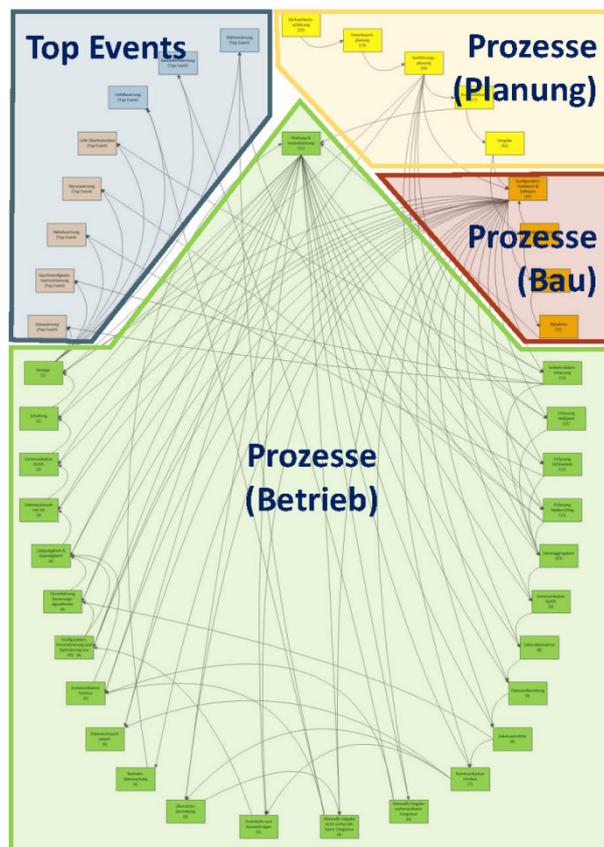
Based on the results of the process model, the recommendations were formulated, discussed in expert workshops, evaluated and optimized. In addition to the completeness and accuracy, the recommendations for actions were evaluated in terms of the

expected effort for the introduction and implementation of the measure, as well as the effectiveness. Subsequently, previously coordinated recommendations for actions were additionally discussed with the advisory group of the research project and finalized.

The structure of the recommendations has been mapped using the processes of the life cycle phases of the process model. A clear document for planners and operators is available to integrate measures in active traffic management centers at short notice.

### 3.4 Benefit of quality management measures

By formulation recommended actions, a catalogue of concrete measures has been created, which can be used by operators of active traffic control systems to reduce the failure probability of the system.



**Fig. 1:** Functional network of the processes of an active traffic control system

For the costs and benefits of developed recommendations for actions it is difficult or impossible to estimate the monetary values, therefore no cost-benefit-analysis could be used. However, by means of a cost-utility analysis, it is possible to set up a priority list of recommendations for actions to enhance the quality based on the operator-specific requirements, which is adapted to the needs of the concrete traffic control system and thus providing for the efficient use of resources.

The cost-utility analysis was performed to illustrate the procedure using a practical example. The method is suitable for the estimation of the benefits of quality management measures and to justify the investment required for quality assurance.

## 4 Conclusion and further research

The aim of the research was the development of a complete process and quality model for the life cycle phases planning, construction and operation of traffic control systems, and practicable recommendations for the introduction and implementation of quality management measures should be derived.

In the process model, all valuation-relevant processes of the entire lifecycle of active traffic control systems were illustrated. On the basis of expert knowledge, critical processes were determined and evaluated as part of a Failure Mode Effects Analysis (FMEA). As a result, the 10 most critical failures were identified in the life cycle phase operation only. Especially the processes 'data processing' and 'manual input of unpredictable events' are effected. Based on the detailed consideration of the individual life cycle phases, the most critical processes of each phase were identified. In the phase 'planning' the processes 'implementation planning' and 'tender' and in the phase construction the process 'configuration

hardware & software' were the most critical ones.

The impact of the errors on subsequent processes were modeled in a quality model based on the results of the process model and the FMEA.

Based on a Bayesian network, the probability of occurrence and error propagation were illustrated and calculated, taking the dependencies of the processes into account. Furthermore, the quality model can be used as a diagnostic tool to identify possible causes during operation of an active traffic control system.

The quality model based on a Bayesian network proved to be a suitable strategy for implementing the complex process chain of an active traffic management system.

As part of the research, recommendations for planners and operators of active traffic control systems were formulated, based on the process model. In addition, a method to estimate the benefit of the measures and practical examples have been provided and illustrated to justify the investment required for quality assurance.

Future research should deal with further optimization of the quality model in form of adjustments to the model topology and databased estimations of the required model parameters.

Furthermore, the results of the process and quality model should be tested in practice using an concrete active traffic control system. However, it should be noted that the process model is based on an exemplary designed active traffic control system and therefore needs to be adjusted in practical application to other types of traffic control types, such as route guidance systems or ramp control.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Ausgangslage, Zielsetzung und Vorgehensweise</b> .....	<b>11</b>	3.1.1	Existierende Ansätze	42
<b>2</b>	<b>Prozessmodell</b> .....	<b>12</b>	3.1.2	Bayes'sche Netze	43
2.1	Grundlagen zu Streckenbeeinflussungsanlagen	12	3.2	Aufbau des Qualitätsmodells	47
2.1.1	Aufbau einer Streckenbeeinflussungsanlage	12	3.2.1	Funktionsnetz	47
2.1.2	Lebenszyklus einer Streckenbeeinflussungsanlage	15	3.2.2	Topologie des Qualitätsmodells	48
2.1.3	Methoden und Werkzeuge zur Steigerung der Qualität	16	3.3	Kalibrierung des Qualitätsmodells	49
2.2	Prozessbeschreibungen	20	3.3.1	Erfassung von Verstärkungsfaktoren für Fehlerursachen	50
2.2.1	Lebenszyklusphase Planung	20	3.3.2	Erfassung bedingter Wahrscheinlichkeiten für die Fehlerfortpflanzung	52
2.2.2	Lebenszyklusphase Bau	21	3.3.3	Quantifizierung des Qualitätsmodells	54
2.2.3	Lebenszyklusphase Betrieb	22	3.3.4	Technische Realisierung	58
2.3	Aufstellung FMEA	25	3.4	Optimierung des Qualitätsmodells	59
2.3.1	Qualität und FMEA	25	3.4.1	Skalierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten für Fehlerursachen	61
2.3.2	Systemabgrenzung	29	3.4.2	Skalierung der Verstärkungsfaktoren im Prozess „Wartung & Instandsetzung“	62
2.3.3	Prozessmodell	30	3.4.3	Sensitivitätsanalyse	63
2.3.4	Funktionen	30	3.5	Evaluierung des Qualitätsmodells	64
2.3.5	Fehlerarten und Fehlerursachen	30	3.5.1	Referenzfall ohne Evidenzen	64
2.3.6	Bedeutung und Top Event	30	3.5.2	Anwendung als Fehlerfortpflanzungsmodell	65
2.3.7	Vermeidungsmaßnahmen und Auftretenswahrscheinlichkeit	32	3.5.3	Anwendung als Diagnosewerkzeug	78
2.3.8	Entdeckungswahrscheinlichkeit	33	3.5.4	Zusammenfassung und Bewertung der Evaluationsergebnisse	80
2.3.9	FMEA-Formblatt	34	<b>4</b>	<b>Funktionale Beschreibung</b>	<b>82</b>
2.4	Auswertung FMEA	34	<b>5</b>	<b>Handlungsempfehlungen</b>	<b>85</b>
2.4.1	Durchführung FMEA	35	<b>6</b>	<b>Vorgehensweise zur Ermittlung des Nutzens von QM-Maßnahmen</b>	<b>86</b>
2.4.2	Die 10 kritischsten Fehler von SBA	35	6.1	Einführung	86
2.4.3	Kritikalität der Lebenszyklusphasen	35	6.2	Nutzenermittlung	86
2.4.4	Betrachtung der Systemkomponenten	36	6.3	Kostenermittlung	93
2.4.5	Kritischste Prozesse unterschieden nach Fehlerarten	37	6.4	Vorgehensweise zur Nutzen-Kosten-Ermittlung	95
2.4.6	Kritischste Fehler der Lebenszyklusphase Planung	38	6.5	Beispiel	96
2.4.7	Kritischste Fehler der Lebenszyklusphase Bau	39	<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>98</b>
2.4.8	Kritischste Fehler der Wartung und Instandsetzung	39	<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>99</b>
2.4.9	Sensitivitätsanalyse	39			
2.5	Auswahl der zu untersuchenden Evidenzfälle für das Qualitätsmodell	41			
<b>3</b>	<b>Qualitätsmodell</b>	<b>42</b>			
3.1	Grundlagen	42			

Die Anhänge 1 bis 6 zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar



## 1 Ausgangslage, Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Sicherung der Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland ist unerlässlich, um die wachsenden Anforderungen an die Mobilität zu erfüllen. Insbesondere in Zeiten großer Haushaltsrestriktionen stellt die zielgerichtete und effiziente Allokation von Finanzmitteln eine große Herausforderung dar.

Im Bereich von Straßenbau und -erhaltung ist mit der Zustandserfassung und -bewertung sowie dem darauf aufbauenden Pavement Management System ein System etabliert worden, das eine netzweite Zuweisung von Ressourcen ermöglicht.

Auch im Bereich der kollektiven Verkehrsbeeinflussung kommt es derzeit zu einer Neuorientierung von der Konzentration auf Neubaumaßnahmen hin zu einer angemessenen Berücksichtigung des Betriebs und der Erhaltung. Hierzu soll in Zukunft insbesondere das Werkzeug des Qualitätsmanagements genutzt werden. Erste Ansätze, die in FGSV (2012) beschrieben sind, werden derzeit im Arbeitskreis 3.2.10 der FGSV von Experten weiter vertieft. Grundlage hierbei sollen einschlägige Normen und Vorgaben bilden.

Die Herausforderungen der Anwendung eines Qualitätsmanagements im Bereich der Verkehrsbeeinflussung liegen auf der einen Seite im föderalen System. Jedes Bundesland verfügt bspw. über eine eigene Organisationsstruktur. Auf der anderen Seite existieren unterschiedliche Prozesse, die für die Leistungserbringung einer VBA erforderlich sind. Da in einem umfassenden Qualitätsmanagement der gesamte Lebenszyklus, also Planung, Bau, Betrieb und Erneuerung abgebildet werden sollte, entsteht eine Vielzahl von Prozessen, die den einzelnen Phasen zugeordnet werden können. Für den Bau und Betrieb von VBA sind viele dieser Prozesse bereits bekannt. Welche Auswirkungen jedoch Entscheidungen/Fehler in der Planung und Ausschreibung auf die Qualität einer VBA haben können, ist noch zu untersuchen. Darüber hinaus müssen all diesen Prozessen geeignete Kriterien und Kenngrößen zur Qualitätsprüfung zugeordnet werden.

Zudem besteht Forschungsbedarf im Bereich der Zusammenführung von Qualitätsbewertungen mit

Hilfe von Syntheseverfahren. Hier existieren bereits theoretische Vorarbeiten, die in einer praktischen Implementierung erprobt werden sollten. So beschreibt NEUMANN (2014) einen Ansatz, der mit der Hilfe von Bayes'schen Netzen eine Berechnung der Gesamtqualität und eine Priorisierung von Qualitätsproblemen möglich macht.

Das vorliegende Forschungsprojekt hat daher die Formalisierung und Bündelung verfügbaren Expertenwissens zu Fehlern und Fehlerursachen bei Verkehrsbeeinflussungsanlagen mittels eines mathematischen Qualitätsmodells (Expertensystem) zum Ziel. Die Methodik wird am Beispiel der Streckenbeeinflussungsanlage (SBA) entwickelt, soll aber übertragbar auf andere Anlagentypen bleiben.

Die systematische Erfassung von Prozessen im Lebenszyklus mit typischen Fehlern und Fehlerursachen erfolgt mit Hilfe einer Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA). Durch Verwendung dieser Methode wird Expertenwissen genutzt, um die Eingangsgrößen für ein Qualitätsmodell (Prozessmodell, Auftretenswahrscheinlichkeiten) abzuschätzen.

Die Aufstellung des Qualitätsmodells erfolgt auf Grundlage einer probabilistischen Prozessbeschreibung mit fallspezifischen Anwendungsmöglichkeiten als Diagnose-Werkzeug. Daraus werden konkrete Handlungsempfehlungen (z.B. bei beobachteten Defiziten hinsichtlich der Harmonisierungswirkung auf den Verkehr oder bei ausgefallenen Detektionsgeräten) im Rahmen des Qualitätsmanagements von SBA unter Berücksichtigung aller wichtigen Lebenszyklusphasen von Planung bis Betrieb abgeleitet.

Nach Abschluss des Forschungsprojekts stehen damit der Praxis, insbesondere Planern und Betreibern von Verkehrsbeeinflussungsanlagen, konkrete und praxisnahe Ergebnisse zur Verfügung, die nach Umsetzung der im Rahmen des Forschungsprojekts abgeleiteten Anforderungen an ein Diagnosewerkzeug direkt im Betrieb eingesetzt werden können. Zudem wird den Planern eine Methode zur Abschätzung des Nutzens an die Hand gegeben, um die erforderliche Investition zu begründen.

## 2 Prozessmodell

Für die Beurteilung der Qualität einer Streckenbeeinflussungsanlage wird im vorliegenden Forschungsprojekt ein prozessorientierter Ansatz gewählt. Über die Bewertung von Fehlerarten und -ursachen sowie deren Auftretenswahrscheinlichkeiten innerhalb einzelner Prozesse werden die Grundvoraussetzungen für ein Qualitätsmodell geschaffen. Hierzu sind zunächst die Prozesse in geeigneter Form zu identifizieren und zu diskretisieren. Die Bewertung des aufgestellten Prozessmodells erfolgt mit Hilfe einer Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse.

### 2.1 Grundlagen zu Streckenbeeinflussungsanlagen

Anlagen zur Verkehrsbeeinflussung in Deutschland umfassen die Netzbeeinflussungsanlagen (NBA), Knotenpunktbeeinflussungsanlagen (KBA) und Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA). Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) wirken im Sinne einer Verbesserung der Verkehrssicherheit und der Verkehrsabläufe (RWVA, 1997).

Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) dienen zur Beeinflussung der Kraftfahrer, indem über Wechselverkehrszeichen (WVZ) Warnungen oder Vorschriften angezeigt werden (RWVA, 1997). Diese sind an Bundesautobahnabschnitten mit hohen Unfallzahlen oder erhöhter Anfälligkeit für Störungen anzuordnen. Diese Abschnitte verfügen über ein erhöhtes Unfallgeschehen, ein höheres Unfallpotential durch meteorologische Bedingungen wie z.B. Nebel und weisen ein häufigeres Staugeschehen auf (RWVA, 1997). Mit Hilfe der SBA sollen diesen Störungen entgegengewirkt werden.

Die Ziele einer SBA können nach RWVA (1997) und RIEGELHUTH/GLATZ (2015) wie folgt definiert werden:

1. Erhöhung der Verkehrssicherheit
2. Verbesserung des Verkehrsablaufs
3. Verringerung der Schadstoffbelastung

Diese Ziele werden durch die Anzeige von Stauwarnungen, Baustellenwarnungen, Geschwindigkeitsbeschränkungen etc. erreicht, indem der Kraftfahrer durch die WVZ beeinflusst wird (RWVA, 1997). Werden die geschalteten Vorschriften der SBA von dem größten Teil der Kraftfahrer befolgt, ist dies ein möglicher Indikator für die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer. Die konkreten Ziele der Verkehrsbeeinflussung können abhängig vom Straßenbetreiber variieren. Allgemein ist also die Erreichung der konkret gesetzten Ziele zu bewerten, sodass die Definition des angestrebten Qualitätsniveaus ggf. unterschiedlich festzulegen ist. Die Befolgung als möglicher Indikator hat eine hohe Bedeutung, denn ist diese nicht gegeben, wird das Ziel der SBA, die Beeinflussung des Verkehrs, nicht erreicht. Die Befolgung ist von der richtigen Darstellung der Schaltung abhängig. Daher muss die Konformität der Anzeige zu der Verkehrs- und Umfeldsituation gegeben sein (RIEGELHUTH/GLATZ, 2015).

#### 2.1.1 Aufbau einer Streckenbeeinflussungsanlage

Eine SBA ist ein komplexes System mit einer hierarchischen Organisationsstruktur. Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau einer Verkehrsbeeinflussungsanlage von der Datenerfassung über die Verkehrszentrale (VZ) bis zur Datenausgabe.

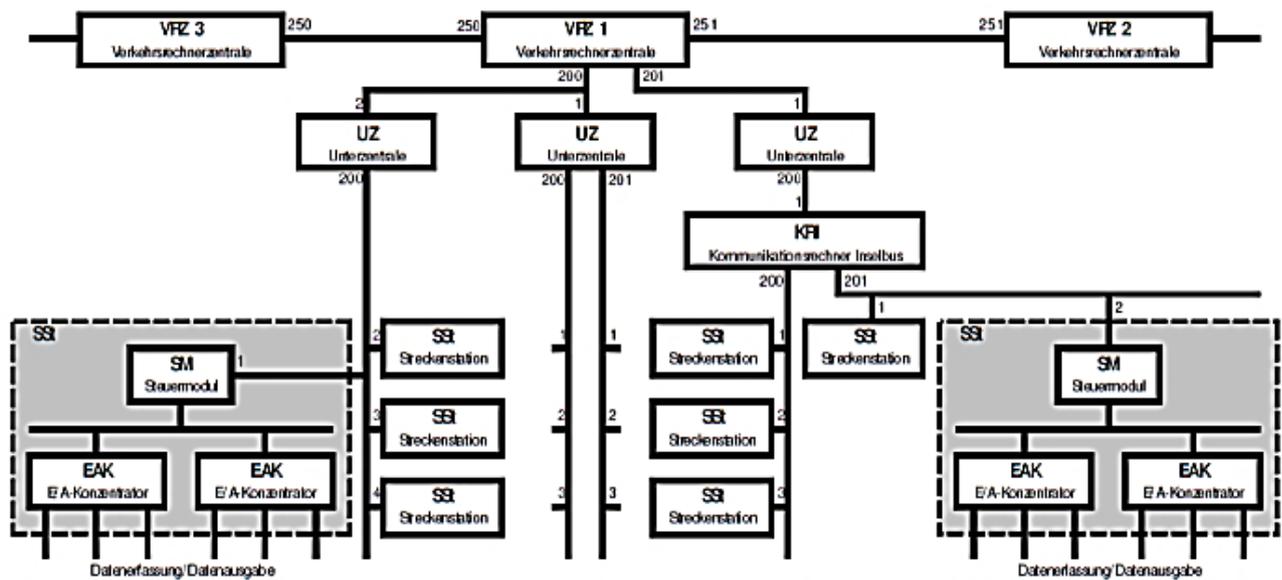


Bild 1: Hierarchische Struktur der Verkehrsleittechnik [TLS, 2012]

Die höchste Ebene der SBA stellt die VRZ dar. Diese überwacht einen bestimmten Bereich des Bundesautobahnnetzes (TLS, 2012). Jeder Verkehrsrechnerzentrale sind Unterzentralen (UZ) zugewiesen, mit denen die VRZ über Fernbusse kommuniziert. Mehrere Streckenstationen (SS) sind jeweils einer Unterzentrale (UZ) untergeordnet. Diese kommunizieren über den Kommunikationsrechner Inselbus (KRI) und/oder über die Inselbusse direkt mit

der UZ. In der Streckenstation befindet sich das Steuermodul (SM), das über den Lokalbus mit den Ein- und Ausgabekonzentratoren (EAK) kommuniziert. Diese sind mit den Datenerfassungs- und -ausgabegeräten verbunden.

An jedem Mess- (MQ) und Anzeigequerschnitt (AQ) befindet sich eine Streckenstation. Der Aufbau der straßenseitigen Infrastruktur ist in Bild 2 dargestellt.

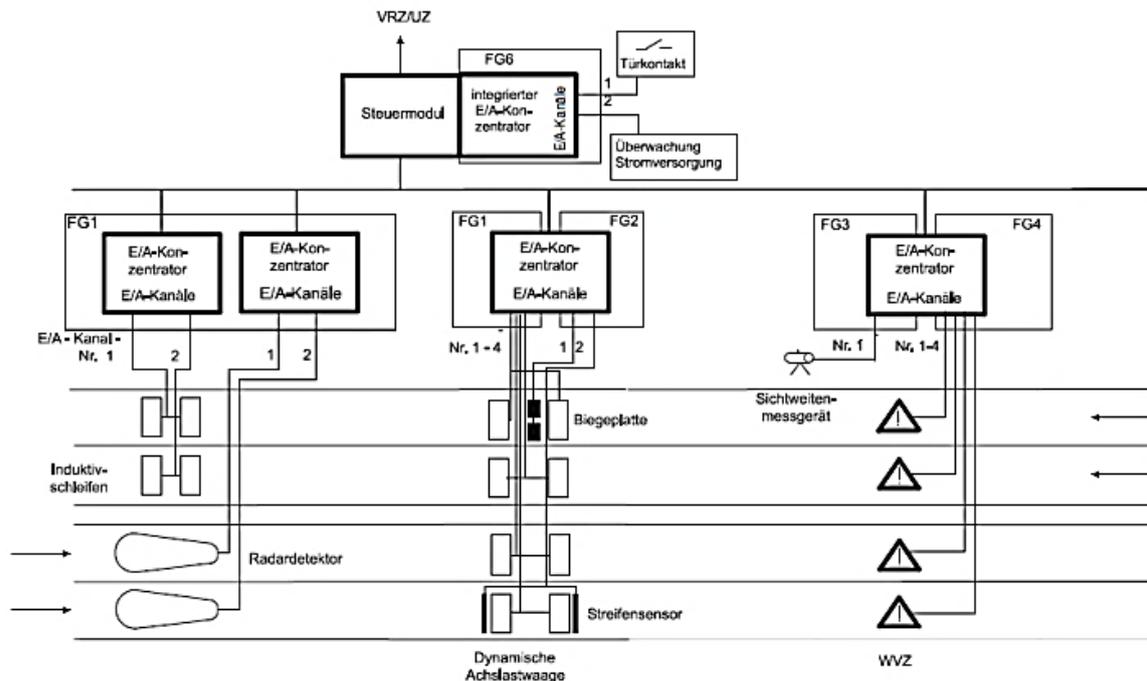


Bild 2: Beispiel eines Aufbaus einer Streckenstation [TLS, 2012]

Jeder sogenannten Funktionsgruppe werden ein oder mehrere EAK zugeordnet. Eine Funktionsgruppe (FG) ist nach TLS (2012) „ein logisches Adressierungselement. Sie kennzeichnet Gruppen von Ein- und Ausgabekanälen, die die gleiche Art von Datenquelle bzw. –senke darstellen.“ So werden z. B. als FG 1 die Verkehrsdatenerfassung zusammengefügt, als FG 3 die Umfelddatenerfassung und FG 4 die Wechselverkehrszeichensteuerung.

Anhand der erfassten Umfeld- und Verkehrsdaten wird eine automatische Schaltung generiert.

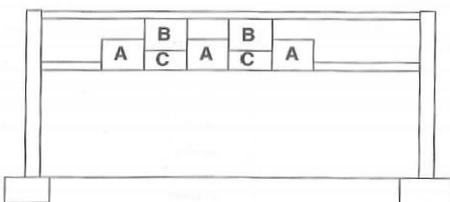
Andere Situationen wie Baustellen und Unfälle werden durch ein Sonderprogramm gesteuert.

So sind die möglichen Schaltungen der Streckenbeeinflussungsanlage wie folgt zusammenzufassen (RWVA, 1997):

- Geschwindigkeitsbeschränkungen,
- Überholverbote,
- Stauwarnung,
- Warnung vor besonderen Gefahren (Unfall, Baustelle usw.),
- Warnung vor witterungsbedingten Gefahren (Nebel, Nässe, Glätte),
- Fahrstreifenzuteilung/Fahrstreifensper- rung.

Die Anzeige dieser Schaltungen erfolgt über Wechselverkehrszeichen (WVZ). Diese werden über Wechselverkehrszeichengeber (WZG) angezeigt. WZG werden über Verkehrszeichenbrücken oder seitliche Aufstellung realisiert (RWVA, 1997).

Über Anzeigequerschnitte (AQ) werden die Schaltungen angezeigt. AQs sind somit die Schnittstelle zwischen dem System Streckenbeeinflussungsanlage und dem Kraftfahrer. Bild 3 zeigt den Aufbau einer Verkehrszeichenbrücke mit drei verschiedenen Wechselverkehrszeichengebern.



**Bild 3:** WZG an Verkehrszeichenbrücke über einer Fahrbahn [RWVA, 1997]

Nach RWVZ (1997) werden den WZG verschiedene WVZ zugeordnet.

WZG A kann folgende Verkehrszeichen anzeigen:

- Dauerlichtzeichen zur Sperrung eines Fahrstreifens oder Umlenkung
- zulässige Höchstgeschwindigkeiten z.B. 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h, 130 km/h
- Aufhebung von zulässigen Höchstgeschwindigkeiten

WZG B zeigt beispielsweise:

- Gefahrstelle
- Schnee- und Eisglätte
- Schleudergefahr bei Nässe und Verschmutzung
- Baustelle
- Stau
- Überholverbot für alle Kraftfahrzeuge
- Überholverbot für LKW
- Ende sämtlicher Streckenverbote
- Ende des Überholverbotes für Kraftfahrzeuge
- Ende des Überholverbotes für LKW

WZG C kann folgende Texte beinhalten (kann jedoch auch frei programmiert werden):

- Unfall
- Nebel/Sicht
- Nässe
- Stau
- Nach/Auf 2 km, 3 km

Die RWVA (1997) empfehlen den gleichen Abstand für Anzeigequerschnitte einer SBA wie für statische Verkehrszeichen, jedoch sind auch hier die örtlichen Verhältnisse mit in Betracht zu ziehen. Dabei werden auch verkehrstechnische und wirtschaftliche Aspekte betrachtet. Ein Regelabstand der Anzeigequerschnitte von 1500 – 2500 m wird jedoch für eine SBA empfohlen (RWVA, 1997).

### 2.1.2 Lebenszyklus einer Streckenbeeinflussungsanlage

Das aus der Betriebswirtschaftslehre stammende Konzept des „Produktlebenszyklus“ (WÖHE, 2000) beschreibt die Marktentwicklung eines Produkts von seiner Entwicklung und Markteinführung bis hin zu dem Zeitpunkt, ab dem die Kosten für Herstellung, Kundenservice etc. aufgrund nachlassender Nachfrage die Umsatzerlöse übersteigen und folglich das Gewinnpotential des Produkts ausgeschöpft ist. Eine nachlassende Produktnachfrage im betriebswirtschaftlichen Kontext entspricht in diesem Zusammenhang einer durch Alterung und Verschleiß reduzierten Wirksamkeit der VBA bis hin zu möglicherweise negativen, verkehrlichen Wirkungen z.B. aufgrund fehlerhafter Anzeigen.

Als Lebenszyklus einer VBA wird die Zeitdauer zwischen den folgenden Zeitpunkten angesehen (BALMBERGER et al., 2014):

- Beginn der Planung einer Anlage
- Vollständiger Rückbau einer Anlage

Werden zwischen diesen beiden Zeitpunkten weitere Lebensabschnitte einer VBA beachtet, ergibt sich der folgende Lebenszyklus einer VBA nach BALMBERGER et al. (2014), fokussiert auf die relevanten Lebenszyklusphasen hinsichtlich des Qualitätsmanagements für Verkehrsbeeinflussungsanlagen:

1. Wirksamkeitsschätzung zur Verifizierung des Bedarfs von verkehrlichen Maßnahmen und Planung von der ersten Machbarkeitsstudie bis einschließlich der Einholung der Angebote und Vergabe der Leistungen zur Errichtung der VBA
2. Bau und Inbetriebnahme von unmittelbar nach Auftragsvergabe der Leistungen bis zur Abnahme der Leistungen nach erfolgreicher Durchführung des "offenen Probebetriebs"
3. Betrieb von unmittelbar nach der Abnahme der Anlage bis zur Ausschaltung der Anlage.

Die anschließend folgenden Phasen nach BALMBERGER et al. (2014):

4. Rückbauphase ab dem Abschalten der Anlage bis zur Beendigung der Rückbauarbeiten oder
5. Sanierungsphase ab dem Abschalten der Anlage bis zum Beginn einer neuen Betriebsphase

spielen demnach hinsichtlich des Qualitätsmanagements eine untergeordnete Rolle (sie können ggf. eine Reaktion auf Ergebnisse des Qualitätsmanagements sein) und werden nachfolgend nicht weiter betrachtet.

In allen Lebenszyklusphasen spielen dabei sowohl technische als auch organisatorische Prozesse eine Rolle, die in unterschiedlicher Weise direkt oder indirekt die Wirksamkeit der VBA beeinflusst. Dies führt dazu, dass an irgendeiner Stelle im Lebenszyklus potentiell auftretende Fehlentscheidungen, Versäumnisse oder Störungen – wenngleich unterschiedlich stark – kurz- oder langfristig in einem reduzierten, verkehrlichen Nutzen der Anlage resultieren können. Ein umfassendes und zielführendes Qualitätsmanagement für VBA darf sich daher nicht allein auf die technischen Eigenschaften während der Betriebsphase konzentrieren, sondern muss insbesondere auch die übrigen Einflüsse im Blick haben.

Zur Ermittlung von Nutzen-Kosten-Verhältnissen ist die Lebensdauer einer SBA relevant. Mit der durchschnittlichen Lebensdauer der einzelnen Komponenten einer Anlage kann im weiteren Verlauf der Arbeit eine mögliche Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlage und der Komponenten ermittelt werden.

BALMBERGER et al. (2014) ermitteln eine durchschnittliche Lebensdauer von 20,6 Jahren für SBA unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen (1-5). Dem Betrieb wird eine mittlere Lebensphase von 17,3 Jahren von der gesamten Lebensdauer zugeordnet. Für technische Komponenten der SBA ergeben sich jedoch oftmals andere Lebensdauern. Tab. 1 fasst die mittleren Lebensdauern verschiedener Systemkomponenten zusammen. So wird eine mittlere Lebensdauer von 5 bis 10 Jahren für Induktionsschleifen angegeben und 5 Jahre für Überkopfsensoren. Die stark variierenden Lebensdauern der verschiedenen Komponenten sind im späteren Verlauf des Projekts relevant zur Einschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Fehlern bzw. deren Ursachen.

Komponente	Mittlere Lebensdauer
Verkehrszeichenbrücke	20 Jahre
Lichtfaser-Wechselverkehrszeichen	10-15 Jahre
LED-Wechselverkehrszeichen	10-15 Jahre
Induktionsschleifen	5-10 Jahre
VDE-Überkopfsensor	5 Jahre
UDE-Bodensensoren	8 Jahre
UDE-Luftsensoren	11 Jahre
Ausrüstung Streckenstation	8 Jahre
Rechner Unterzentrale/VRZ	10 Jahre

Tab. 1: Lebensdauer der Komponenten einer SBA (BALMBERGER et al., 2014)

### 2.1.3 Methoden und Werkzeuge zur Steigerung der Qualität

Zur Steigerung der Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen wurden in der Vergangenheit verschiedene Methoden entwickelt. Bild 4 visualisiert die Entwicklung des Umgangs mit dem Begriff Qualität im Kontext der Streckenbeeinflussungsanlagen.

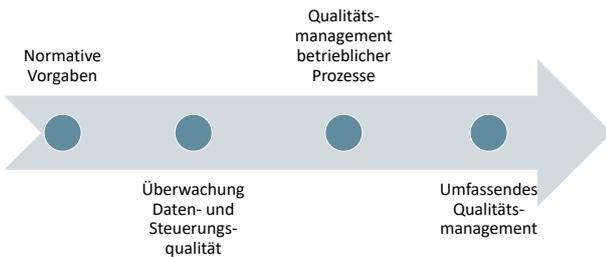


Bild 4: Entwicklung des Qualitätsmanagements in SBA

#### Normative Vorgaben

Zunächst fand eine Konzentration auf normative Vorgaben bzgl. der Planung und Errichtung von SBA statt. Die wichtigsten Richtlinien und Merkblätter werden üblicherweise zwischen Bauherr und Planer bzw. Hersteller als bindend vereinbart. Hierzu zählen:

- Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (2012)

- Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (1999, derzeit in Aktualisierung)
- Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (1997)
- Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (1997)
- „Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen“ (BMV, 1993) sowie der überarbeitete Entwurf 2011 (BMVBS, 2015)

Darüber hinaus existieren zahlreiche Hinweispapiere der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), die einzelne Aspekte einer SBA fokussieren. Sie besitzen im Allgemeinen kein verbindliches Niveau, sind jedoch als Hinweise für den ausführenden Planer sehr wertvoll. Teilweise werden auch Auszüge aus den Hinweispapieren im Rahmen von Ausschreibungen vereinbart. Zu den Papieren gehören:

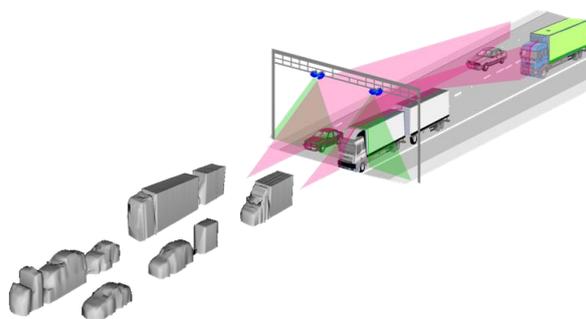
- Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung (2012)
- Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen (2010), derzeit in Aktualisierung
- Hinweise zur Wirkungsabschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen (2007)
- Hinweise zur Qualitätsanforderung und Qualitätssicherung der lokalen Verkehrsdatenerfassung für Verkehrsbeeinflussungsanlagen (2006)
- Hinweise zu variablen Fahrstreifenzuteilungen (2003)
- Hinweise zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in verkehrstechnischen Anwendungen (2003)
- Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr (1991)

Mit den genannten Regelwerken und Hinweispapieren steht eine große Anzahl von Vorgaben bereit, um Fehler bei Planung, Bau und Betrieb einer SBA von vorne herein auszuschließen. Dennoch kann es zu Fehlern kommen, die beispielsweise auf bewusste/unbewusste Verletzung der Vorgaben, auf

technische oder organisatorische Abweichungen der Anlage vom Normalfall oder auf der Abnutzung/dem Ausfall von technischen Komponenten im Betrieb beruhen. Um diese Fehler zu entdecken, sind zahlreiche Werkzeuge zur laufenden Überwachung der Daten- und Steuerungsqualität entwickelt worden.

### Überwachung Daten- und Steuerungsqualität

Die Überwachung der Datenqualität spielt zum einen bei der Abnahme von Sensoren und zum anderen im laufenden Betrieb eine Rolle. Im MARZ (1999), in FGSV (2006) und in BUSCH et al. (2006) werden verschiedene Plausibilitätsprüfungen für Verkehrsdaten genannt, die sowohl lokale Kenngrößen betreffen als auch eine streckenbezogene Plausibilität über alle Messquerschnitte der SBA bewerten. Die Software LOTRAN-DQ beinhaltet die Umsetzung der vorgegebenen Tests (Local Traffic Analyzer for Data Quality, Firma TRANSVER). Das Werkzeug kann auf Zentralenebene eingesetzt werden und ermöglicht eine laufende Bewertung und Darstellung der Datenqualität. Es kann auch im Rahmen von Abnahmen eingesetzt werden.



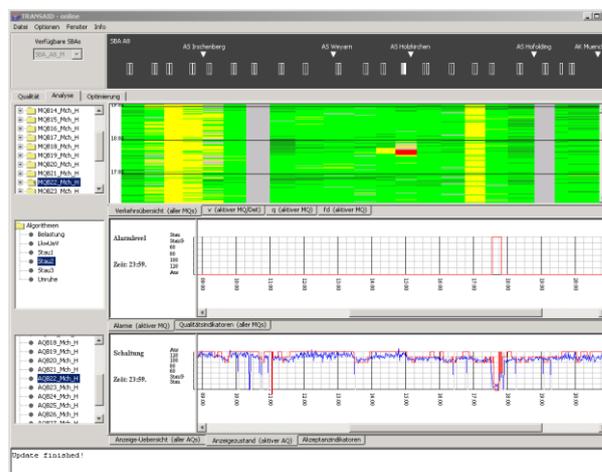
**Bild 5: Systemaufbau VeMAS (ECTN, 2010)**

Auf Abnahmen und Qualitätsbewertung von Verkehrsdatensensorik spezialisiert ist das System VeMAS (Verkehrsdaten-Mess- und Auswertesystem), bei dem mit Hilfe eines Detektionssystems auf Basis von Lasersensorik (2 Laserscanner je Fahrstreifen) eine hochgenaue Parallelmessung zur abzunehmenden Verkehrsdatenerfassung durchgeführt wird (FELDGES et al., 2010). Im Bereich der Umfelddaten existieren ähnliche Plausibilitätschecks zur laufenden Kontrolle, die in FGSV (2010) beschrieben sind. Hierzu existieren derzeit noch keine Software-Lösungen auf dem Markt.

Die Qualität der anstehenden Steuerungen ist ebenfalls Bestandteil einer zyklischen Bewertung.

Üblich sind verkehrstechnische Untersuchungen als Grundlage für potentielle Optimierungen der Parameter der Steuerungsalgorithmen. Hierzu werden üblicherweise Verkehrsingenieure innerhalb der Verkehrszentralen oder externe Berater damit beauftragt, durch den Vergleich von Verkehrs- und Umfelddaten mit den jeweilig anliegenden Schaltungen die Angemessenheit der Parameter zu prüfen. Das Kapitel 10 (Qualitätsmanagement) des Hinweisepapiers zum Einsatz von Steuerungsverfahren in Verkehrsbeeinflussungsanlagen (FGSV, 2012) stellt Grundlagen in Form von Abläufen und Kenngrößen bereit, die zur Bewertung herangezogen werden können.

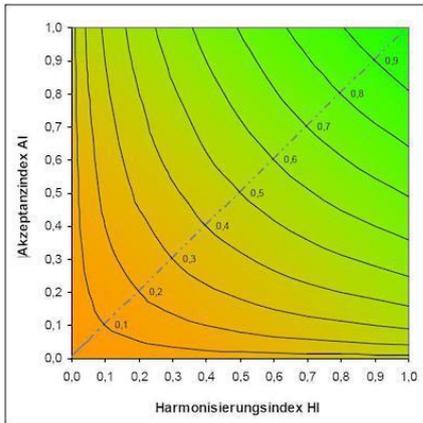
Auch in diesem Bereich gibt es einige Software-Werkzeuge, die automatisierte Prüfungen erlauben. Die Lösung TRANSAID (Firma TRANSVER) berechnet auf der Basis rekonstruierter Verkehrslagen verschiedene Qualitätsindikatoren wie Detektions- und Fehlalarmrate und stellt diese grafisch dar. Mit den angebotenen Diagrammen können u.a. Störfalldetektion, Gefahrenwarnung und Harmonisierungsschaltungen bewertet werden.



**Bild 6: Darstellung Verkehrslage TRANSAID (Firma Transver)**

Für die Bewertung einzelner Schaltungen bestehen auch weitere Verfahren. STEINHOFF (2003) entwickelte zur Bewertung von Harmonisierungsschaltungen ein multikriterielles Verfahren, das verschiedene Indikatoren aus den Bereichen Fahrerakzeptanz, Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf zu einer Gesamtbewertung der Schaltung zusammenführt. Ein dem Konzept nach ähnliches Verfahren zur Bewertung der Harmonisierungsschaltung entwickelten KAPPICH et al. (2010). Hier werden

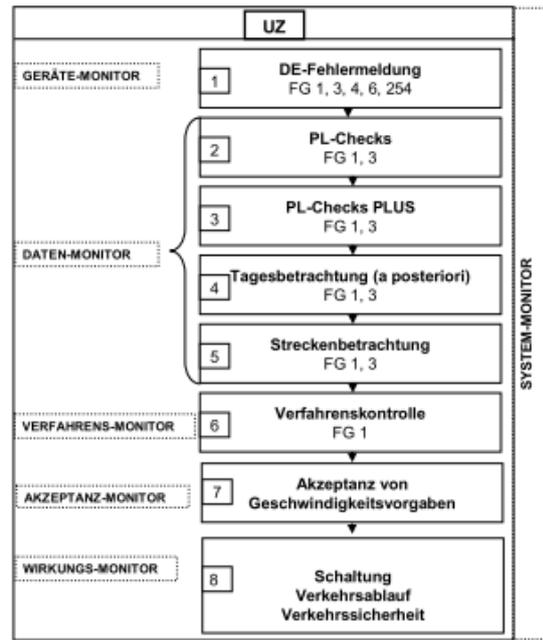
ebenfalls verschiedene Kenngrößen, die auf der einen Seite die Harmonisierungswirkung (Harmonisierungsindex) der Anlage und auf der anderen Seite die Akzeptanz (Akzeptanzindex) des Fahrers charakterisieren, berechnet. Das Verfahren kann online ausgeführt werden und ermöglicht damit eine laufende Qualitätskontrolle.



**Bild 7: Bewertungsfeld Harmonisierung und Akzeptanz (KAPPICH et al., 2010)**

BUSCH et al. (2006) stellen einen Ansatz für ein technisches Qualitätsmanagement der Prozesskette Datenerfassung, -verarbeitung und -ausgabe von VBA im Sinne eines Benchmarking-Systems vor. Durch Benchmarking kann für die öffentliche Verwaltung „Quasi-Wettbewerb“ geschaffen werden, wenn die Ergebnisse des Vergleichs veröffentlicht werden (OLEV, 2008) (KIRSCHFINK/ARETZ, 2009). Neben einer Qualitätsbetrachtung von Systemkomponenten und Datenerfassung wird von BUSCH et al. (2006) auch die „Qualität von Steuerungsalgorithmen“ und „Wirkung und Akzeptanz von Steuerungsmaßnahmen“ berücksichtigt.

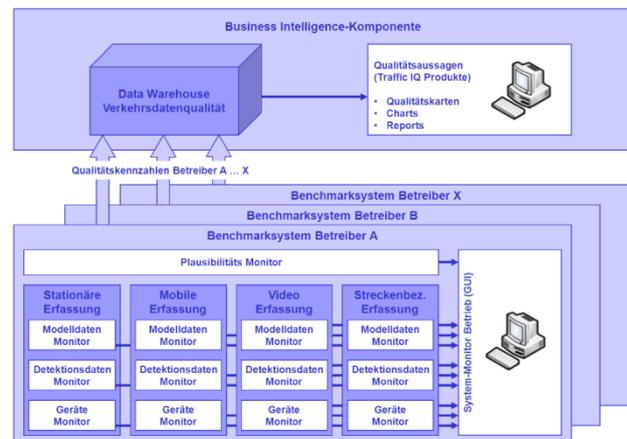
Die Ergebnisse der Qualitätsindikatoren, welche jeweils eine Aussage zur Qualität einer Systemkomponente treffen, werden ggf. gewichtet, zusammengefasst und grafisch dargestellt. Die Qualitätsindikatoren können zu sog. Service-Level zusammengefasst werden, mit der eine vereinheitlichte und objektive Darstellung der Qualität erreicht werden kann. Darüber ist auch ein Vergleich der erzielten Qualität in der Vergangenheit oder mit anderen Anlagen des gleichen Typs möglich.



**Bild 8: Definition eines Benchmarkingsystems (BUSCH et al., 2006)**

Das entwickelte Benchmarkingsystem besteht aus verschiedenen Monitoren, die neben geräte- und verfahrenstechnische Rückmeldungen auch Bewertungen der Datenqualität, der Akzeptanz und der Wirkung einer Anlage visualisieren.

Mit dem Projekt „Traffic IQ“ wurde ein umfassendes theoretisches Konzept zum Qualitätsmanagement der Datenerfassung in den realen Pilot-Betrieb umgesetzt (VON DER RUHREN et al., 2011). Neben der Erfassung und Klassifizierung der Datenqualität wurde die Dokumentation der Qualitätsbewertungen fokussiert.



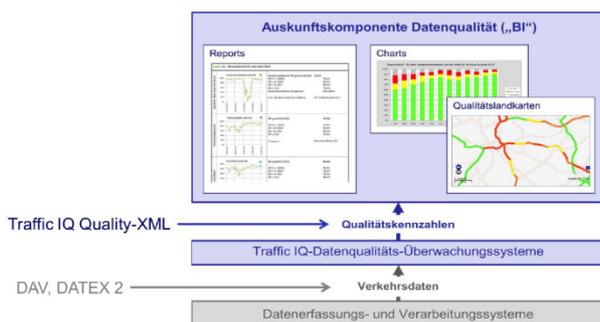
**Bild 9: Systemstruktur „Traffic IQ“ (VON DER RUHREN et al., 2011)**

Im Forschungsvorhaben wurde zunächst ein allgemeingültiges Konzept zur Bewertung der Datenqualität („Benchmarking“) im laufenden Betrieb entwickelt. Verschiedene Testverfahren liefern Qualitätskennzahlen, die in einem mehrstufigen System aus Qualitätsmonitoren aggregiert und visualisiert werden (Bild 9).

Die betrachteten Qualitätskennzahlen orientieren sich an WILTSCJKO (2001):

- Verfügbarkeit
- Aktualität
- Vollständigkeit
- Konsistenz
- Korrektheit
- Metrische Genauigkeit
- Semantische Genauigkeit

Eine Vielzahl von Plausibilisierungs- und Bewertungsverfahren bzgl. der Datenqualität wurden für die verschiedenen Erfassungstechnologien genutzt, um Aussagen bzgl. der betrachteten Qualitätskennzahlen zu erzielen. Die Aggregation erfolgt übergeordnet durch eine „Business-Intelligence-Komponente“. Qualitätsaussagen werden in Form von Berichten, Diagrammen und Karten angeboten (VON DER RUHREN et al., 2011).



**Bild 10:** Systemarchitektur Auskunfts-komponente Datenqualität (VON DER RUHREN et al, 2011)

### Qualitätsmanagement betrieblicher Prozesse

Einen eher organisatorisch orientierten Ansatz stellt die Untersuchung von KIRSCHFINK/ARETZ (2009) dar, die ein „Qualitätsmanagementkonzept für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen (VZ) des Bundes“ erarbeiteten. Im Zuge der Studie wurden relevante Prozesse einer VZ aufgestellt und Prozessbeschreibungen für diese erarbeitet.

Die Gesamtheit aller Prozesse wird als Prozesslandschaft dargestellt und in die Ebenen Hauptprozesse, Teilprozesse und Subprozesse differenziert. Beispielhaft sind in Bild 11 die Prozesse im „Online-Verkehrsmanagement“ dargestellt.

Die identifizierten Prozesse wurden weiterhin drei verschiedenen Kategorien zugeordnet, die jeweils unterschiedliche Tätigkeitsfrequenzen und Reaktionszeiten aufweisen (KIRSCHFINK/ARETZ, 2009):

- Operative Prozesse dienen zur Erstellung der Leistung
- Unterstützungsprozesse helfen beim Aufbau oder der Pflege von Ressourcen zur Leistungserstellung
- Führungsprozesse planen und steuern Abläufe innerhalb der Organisation

Darüber hinaus wurden die identifizierten und klassifizierten Prozesse mit Qualitätskriterien und Qualitätskenngrößen versehen und ein umfangreiches Set an möglichen Ausprägungen aufgestellt. Die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens wurden in einem „Muster-Qualitätsmanagement-Handbuch für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes“ (MUSTER-QMH, 2008) umgesetzt.

Das QM-Handbuch wurde für eine musterhaft konzipierte Verkehrszentrale entworfen und muss bei Anwendung in einem Bundesland auf die länderspezifische Organisations- und Prozessstruktur angepasst werden. Es enthält neben dem Qualitätsmanagementhandbuch, das formalen Anforderungen genügt, im Anhang die erarbeiteten Prozessbeschreibungen sowie eine musterhafte Organisationsstruktur mit dazugehörigen Rollenbeschreibungen.

### Umfassendes Qualitätsmanagement

Auf Basis der bereitstehenden Grundlagen, die sowohl die technische Qualitätssicherung von Daten und Verfahren als auch das organisatorische Qualitätsmanagement betrifft, werden derzeit in mehreren Bundesländern umfassende Qualitätsmanagementsysteme erarbeitet. Das geplante Hinweisdokument zum Qualitätsmanagement in Verkehrsbeeinflussungsanlagen (FGSV AK 3.2.10) soll die Einführung eines umfassenden Qualitätsmanagements fördern.

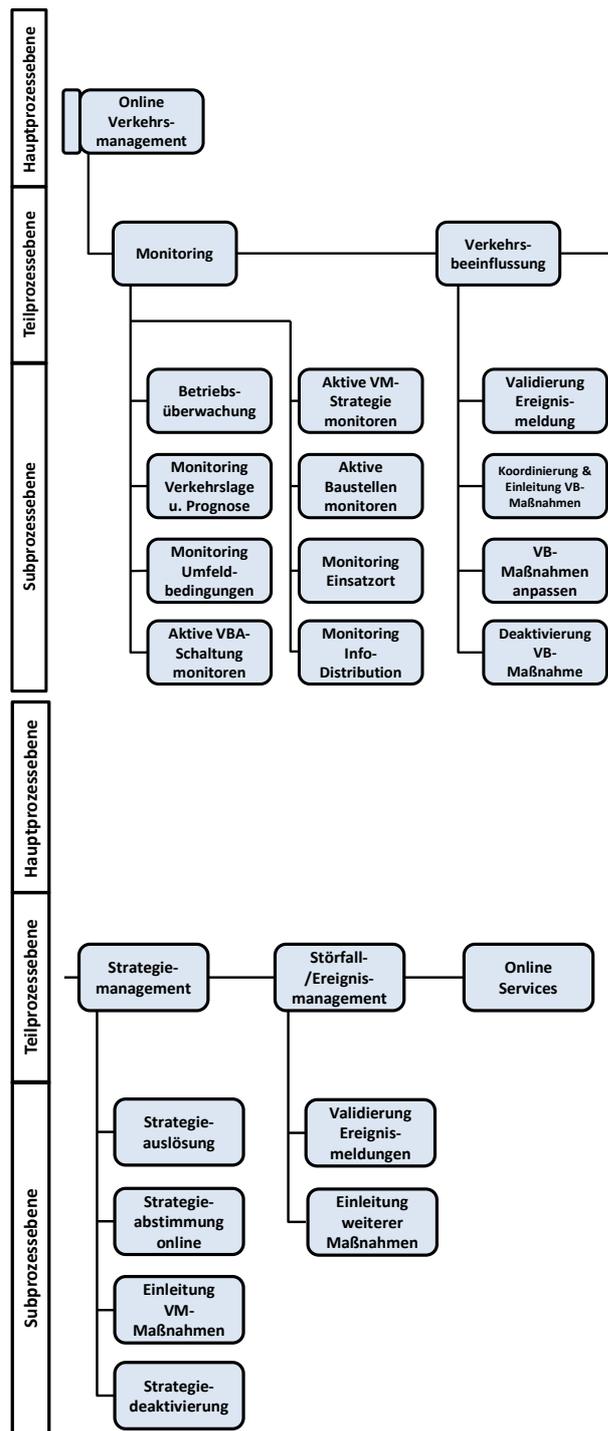


Bild 11: Prozesse „Online-Verkehrsmanagement“ (KIRSCHFINK/ARETZ, 2009)

beitet werden. Hierzu ist es zunächst nötig, die Prozesse der verschiedenen Lebenszyklusphasen zu identifizieren und zu definieren.

Ein Prozess bezeichnet eine Summe von Tätigkeiten, die aus Eingaben Ergebnisse erzeugt (DIN EN ISO 9000, 2005). Dabei kommen verschiedene Ressourcen (z.B. Hardware, Software, Dienstleistungen, Expertenwissen) zum Einsatz.

Zur Erarbeitung des Prozessmodells wurden folgende Datenquellen herangezogen:

- Prozesslandschaft der Verkehrszentrale NRW (STRASSEN.NRW, 2015)
- Technisches Regelwerk: MARZ (1999) und TLS (2012)
- Entwurf des Muster-RE-Entwurfs für Verkehrsbeeinflussungsanlagen (BMVBS, 2015)
- Muster-QM-Handbuch für die Verkehrsrechnerzentralen des Bundes (KIRSCHFINK/ARETZ, 2009)

Aus diesen Quellen wurden die nachfolgend erläuterten Prozesse abgeleitet. Bei der Detailtiefe wurde darauf geachtet, dass die Anzahl der Gesamtprozesse so übersichtlich bleibt, dass ein mathematisches Modell sinnvoll mit Parametern versorgt werden kann. Auf der anderen Seite wurden die Prozesse so detailliert dargestellt, dass grundlegende Funktions- und Wirkungszusammenhänge bezüglich der Funktion einer SBA korrekt abgebildet werden.

Die Prozesse werden den betrachteten Lebenszyklusphasen zugeordnet.

### 2.2.1 Lebenszyklusphase Planung

In der Lebensphase der Planung wird nach STRASSEN.NRW (2015) zwischen fünf Prozessen unterschieden (s. Bild 12).

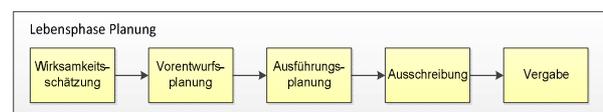


Bild 12: Prozesse der Lebensphase Planung

## 2.2 Prozessbeschreibungen

Im vorliegenden Forschungsvorhaben soll ein prozessorientiertes Modell zur Bündelung des Expertenwissens hinsichtlich der Qualität von SBA erar-

### Wirksamkeitsschätzung

Zur Wirksamkeitsschätzung einer geplanten Verkehrsbeeinflussungsanlage werden vorhandene

Daten z. B. Unfallkosten und Zeitkosten und Erfahrungswerte aus der Fachliteratur herangezogen (FGSV, 2007a). Die Wirksamkeitsschätzung findet vor der Vorentwurfsplanung statt (FGSV, 2007a).

### Vorentwurfsplanung

Zur Vorentwurfsplanung wird ein RE-Entwurf einer Streckenbeeinflussungsanlage basierend auf den Richtlinien für die Gestaltung von einheitlichen Entwurfsgrundlagen im Straßenbau, der „Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen“ (BMV, 1993), erarbeitet. Dieser RE-Entwurf wird dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur vorgelegt und muss genehmigt werden.

Der Vorentwurf umfasst eine Kostenermittlung, die Wirksamkeitsabschätzung und das Nutzen-Kosten-Verhältnis der Anlage basierend auf detaillierten Daten. Außerdem werden eine Übersicht und eine Plandarstellung ausgeführt (BMVBS, 2015).

### Ausführungsplanung

Die Ausführungsplanung wird in der HOAI in der fünften Leistungsphase beschrieben. In diesem Prozess werden fachliche Beteiligte in die Planung einbezogen, Darstellung und Einzelangaben erstellt und Arbeitsergebnisse für alle Beteiligten zur Verfügung gestellt (SIEMON, 2014). Die Ausführungsplanung stellt die detaillierte Planung dar (RWVA, 1997).

### Ausschreibung

Für die öffentliche Ausschreibung des Bauvorhabens wird eine Leistungsbeschreibung mit durchschnittlichen Angebotspreisen ermittelt. Die Leistungsbeschreibung muss unmissverständlich beschrieben, und die berechneten Preise müssen eindeutig sein (DIN 1960, 2012). Die Ausschreibung erfolgt nach den Vorgaben der VOB/A.

### Vergabe

Angebote werden von verschiedenen Auftragnehmern eingereicht und vom Auftraggeber geprüft. Die Eignung des Bieters wird überprüft, und die berechneten Preise werden bewertet. Angebote mit unangemessenen Preisen werden von der Vergabe ausgeschlossen (DIN 1960, 2012). Abschließend wird ein Bauvertrag mit einem geeigneten Auftragnehmer abgeschlossen.

## 2.2.2 Lebenszyklusphase Bau

Die Lebensphase Bau wird nach STRASSEN.NRW (2015) in 4 Prozesse untergliedert (s. Bild 13).

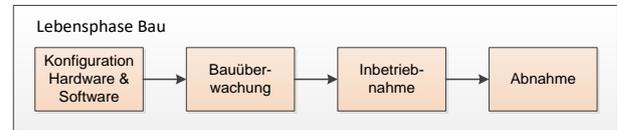


Bild 13: Prozesse der Lebensphase Bau

### Konfiguration Hardware und Software

Dieser Prozess umfasst die Zusammenstellung aller Hardwareeinheiten der Streckenbeeinflussungsanlage (einschließlich deren Montage) und die Konfiguration der Softwareeinheiten.

### Bauüberwachung

Die HOAI bezeichnet die achte Leistungsphase als Objektüberwachung. Zu dieser Leistungsphase gehören zum einen die Aufsicht der Bauüberwachung, zum anderen die Einhaltung des erstellten Terminplans, die Abnahme von Bauleistungen und einer Kostenfeststellung (SIEMON, 2014). Die Bauüberwachung stellt insbesondere die Überwachung der (technischen) Arbeiten während des Baus dar. Der Prozess Bauüberwachung verläuft damit zeitlich parallel zu dem Prozess Konfiguration, wird jedoch der besseren Übersicht wegen als eine Prozesskette dargestellt.

### Inbetriebnahme

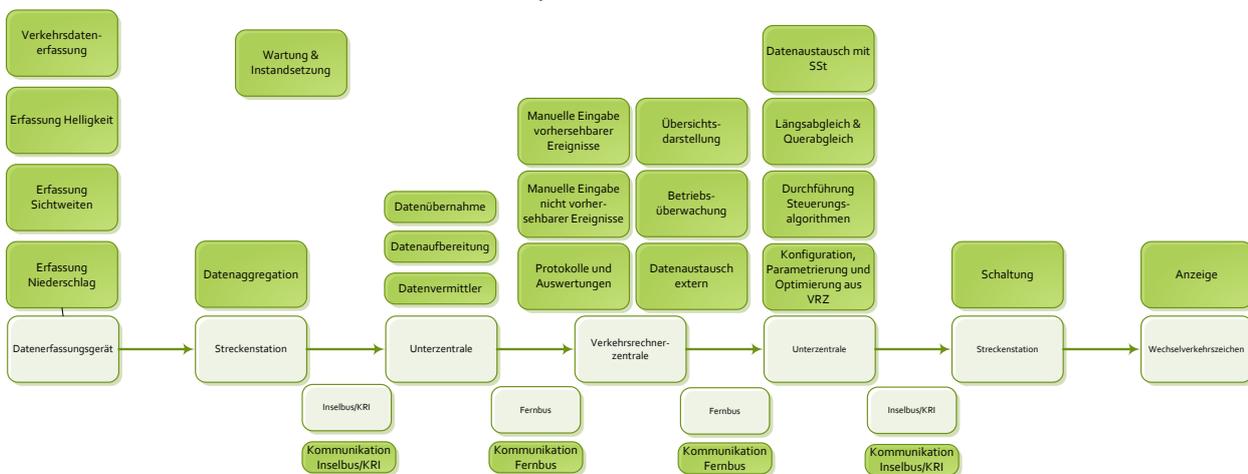
Die Inbetriebnahme umfasst den Blindbetrieb und den offenen Probetrieb. Beim Blindbetrieb werden die Schaltprozesse einer VBA erprobt, jedoch ohne Schaltung der WVZ der Anzeigequerschnitte (RWVA, 1997). In dieser Phase wird die Anlage in allen Elementen auf ihre Funktionsfähigkeit getestet. Im darauffolgenden Probetrieb werden die Schaltungen getestet. Die definierte Phase Inbetriebnahme umfasst somit sowohl den Blindbetrieb, die Inbetriebnahme selber und den Probetrieb.

### Abnahme

Die Abnahme stellt die Übergabe der SBA, die Dokumentation der Verjährungsfristen, Mängelansprüche und die Zusammenstellung der Dokumentation dar (SIEMON, 2014). Nach dem Abschluss aller Arbeiten und nach der Inbetriebnahme wird die Anlage abgenommen. Nach der Abnahme beginnt in der Regel die Gewährleistungsfrist (MARZ, 1999).

### 2.2.3 Lebenszyklusphase Betrieb

Die dritte Lebensphase Betrieb beinhaltet 24 Prozesse, die aus TLS (2012) und MARZ (1999) abgeleitet wurden. Die Prozesse in der Lebenszyklusphase Betrieb wurden zur vereinfachten Abbildung der Prozessketten über 11 hardwaretechnische Systemkomponenten verteilt. Zur besseren Übersicht wurden die Prozesse in Ein- und Ausgabeseite unterschieden. Die Prozesse sind in ihrer logischen Abfolge dargestellt und ihrer jeweiligen Systemkomponente zugeordnet. Laufen auf Systemkomponenten unterschiedliche Prozesse der Betriebsphase



**Bild 14: Prozessmodell in der Lebenszyklusphase Betrieb**

Im Folgenden werden die in der Lebenszyklusphase Betrieb beinhalteten Systemkomponenten beschrieben. Zu den Komponenten werden jeweils die zugehörigen Prozesse aufgelistet.

#### Datenerfassungsgerät

Die Komponente Datenerfassungsgerät umfasst die Messquerschnitte mit der Verkehrs- und der Umfelddatenerfassung. Zu den erfassten Umfelddaten in einer SBA gehört die Erfassung der Sichtweite, der Helligkeit und des Niederschlags. Die Prozesse der Datenerfassungsgeräte werden in der folgenden Auflistung beschrieben:

- *Verkehrsdaterfassung:* Aufgrund der Komplexität des Themengebiets werden hier ausschließlich Induktionsschleifen und Überkopfsensoren zur Verkehrsdaterfassung betrachtet, da diese als Datenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen

ab, werden sie an den jeweiligen Stellen erneut dargestellt.

Zusätzlich zu den für die Darstellung von Anzeigehalten verantwortlichen Prozessen wird ein unterstützender Prozess für die Wartung und Instandsetzung eingeführt, welcher sich auf die Funktionsfähigkeit der Systemkomponenten auswirkt. Bild 14 zeigt die Kette der Systemkomponenten und die zugeordneten Prozesse.

weit verbreitet Verwendung finden. Induktionsschleifen werden in der Fahrbahndecke verlegt und detektieren die Fahrzeuge über die Auswertung der Verstimmungskurve eines aufgebauten Magnetfeldes. Überkopfsensoren können als Radar- oder Kombinationsdetektoren realisiert werden. Diese werden zur Verkehrsdaterfassung über der Fahrbahn angebracht (FGSV, 2006). Es werden in der Regel für jeden Fahrstreifen die Anzahl der Kraftfahrzeuge und LKW-ähnlichen Fahrzeuge und deren Geschwindigkeiten erfasst (TLS, 2012). Die RWVA (1997) empfehlen einen Regelabstand für Messquerschnitte zur Verkehrsdaterfassung ca. 1500 m zur Streckenbeeinflussung.

- *Erfassung Helligkeit:* Der Helligkeitssensor misst die Beleuchtungsstärke, jene Komponente des Lichtstroms, die senkrecht auf

eine Fläche trifft (TLS, 2012). An jedem AQ sollte mindestens ein Helligkeitssensor angeordnet werden.

- *Erfassung Sichtweiten:* Es werden zwei angrenzende Flächen genutzt, deren Kontrastunterschied bei 5% liegt und von dem Sichtweitensensor unterschieden werden kann (FGSV, 2010). Die erfassten Daten entsprechen der meteorologischen Sichtweite und werden zur Detektion von Nebeln genutzt. Die RWVA (1997) empfehlen, die Abstände der Erfassung von Sichtweiten auf die örtlichen Verhältnisse abzustimmen, wobei die meteorologischen Gegebenheiten ausschlaggebend sind.
- *Erfassung Niederschlag:* Der Niederschlag wird durch den Niederschlagssensor und den Fahrbahnsensor ermittelt. Durch den Niederschlagssensor wird die Niederschlagsintensität und -art und durch den Fahrbahnsensor die Wasserfilmdicke und der Zustand der Fahrbahnoberfläche bestimmt. Diese Daten werden zur Schaltung einer Nässewarnung ermittelt (FGSV, 2010). Die Erfassung des Niederschlags wird auf die meteorologischen Verhältnisse abgestimmt. Es wird ein Abstand der Messquerschnitte von 3 – 5 km empfohlen, aber mindestens zwei der Sensoren sollten in einer Streckenbeeinflussungsanlage vorhanden sein (RWVA, 1997).

### Streckenstation Ein- und Ausgabeseite

An jedem Anzeigequerschnitt bzw. Messquerschnitt befindet sich in der Regel eine Streckenstation. An der Eingabeseite dient diese zur Aggregation der Daten, auf der Ausgabeseite zur Schaltung der Anzeigen.

- *Datenaggregation:* Die erfassten Einzelfahrzeugdaten werden zu verschiedenen Kenngrößen in verschiedenen Messintervallen aggregiert (TLS, 2012). Darüber hinaus finden in diesem Prozess Methoden der Datenglättung und Trendextrapolation statt.
- *Schaltung:* In der Streckenstation (SSt) werden die aus der Unterzentrale gegebenen Schaltbefehle weitergegeben. Des

Weiteren werden bei Störungen der WVZ sowie der Sensoren in der SSt Fehlermeldungen generiert. Das Steuermodul, als Bestandteil der Streckenstation, tauscht die Daten zwischen Unterzentrale und den Ein-/Ausgabekonzentratoren (EAK) aus. Die EAKs geben die Steuerungsbefehle weiter an die Wechselverkehrszeichen (TLS, 2012).

### Inselbus und Kommunikationsrechner zur Unterzentrale Ein- und Ausgabeseite (Inselbus/KRI)

Es stehen einer Streckenbeeinflussungsanlage verschiedene Bussysteme zur Übertragung zur Verfügung.

- *Kommunikation:* Auf der Eingabeseite werden die Daten von der Streckenstation über den Inselbus zum Kommunikationsrechner (KRI) bzw. direkt zur UZ übertragen (RWVA, 1997). Der KRI kommuniziert und vermittelt zwischen den Inselbussen und der Unterzentrale. Dieser wird meist in der Nähe der Unterzentrale angeordnet (TLS, 2012). Auf der Ausgabeseite werden die Daten von der Unterzentrale über den KRI und die Inselbusse an die Streckenstation übertragen.

### Unterzentrale Ein- und Ausgabeseite

Auf der Eingabeseite sammelt die Unterzentrale die Daten der verschiedenen Streckenstationen und gibt sie an den Fernbus weiter. Die Unterzentrale bereitet die Daten auf. Auf der Ausgabeseite steuert die Unterzentrale die verschiedenen Anzeigequerschnitte (RWVA, 1997) und übergibt diese Informationen dem Kommunikationsrechner.

- *Datenübernahme:* Die erfassten Daten werden nach der TLS (2012) in Funktionsgruppen gegliedert. Die Daten werden automatisch übernommen. Die Datenübernahme wird so ausgerichtet, dass beliebige Daten aus verschiedenen Quellen übernommen werden können, wobei die Messintervalle je nach Funktionsgruppe parametrierbar sind (FGSV, 2010).
- *Datenaufbereitung:* In der Unterzentrale werden die erfassten Daten aufbereitet. Die Umfelddaten sind für die weitere Steuerung

aufzubereiten. Hierzu gehören Kenngrößen wie Niederschlagsintensität, Wasserfilmdicke, Sichtweite, Fahrbahnoberflächentemperatur und Taupunkttemperatur (FGSV, 2010). Zur Aufbereitung der Verkehrsdaten werden Daten von den jeweiligen Messquerschnitten und Fahrstreifen pro Messzyklus genutzt (TLS, 2012). Verkehrsdaten können in Ausnahmefällen in der Verkehrszentrale aufbereitet werden. Im Rahmen der Datenaufbereitung werden die Daten mittels Plausibilitätschecks geprüft (MARZ, 1999).

- *Datenvermittler*: Die Vermittlung der Daten stellt eine zentrale Schnittstelle dar. Die erfassten Daten werden empfangen und den jeweiligen Funktionskomponenten des Systems zugeordnet. Die Daten werden als Nachrichten übermittelt und vom Datenvermittler auf seine Richtigkeit überprüft (MARZ, 1999).
- *Längs- und Querabgleich*: Durch den Längsabgleich werden die Anzeigequerschnitte, die nacheinander folgen, aufeinander abgestimmt, sodass eine in sich schlüssige Anzeigefolge geschaltet werden kann (MARZ, 1999). Durch den Querabgleich werden die verschiedenen WZG eines Anzeigequerschnitts ebenfalls aufeinander abgestimmt (RWVA, 1997). Die Vorgaben für die Abgleiche sind von verschiedenen Zielen der Verkehrsbeeinflussungsanlage abhängig (FGSV, 2012).
- *Datenaustausch mit SSt*: Zum Datenaustausch mit entsprechenden Schnittstellen werden Nachrichtenpakete erstellt und ggf. in ein anderes Format umgewandelt (MARZ, 1999).
- *Durchführung Steuerungsalgorithmen*: Zu den Steuerungsalgorithmen gehören die Ermittlung der erforderlichen Schaltanforderungen und deren Priorisierung.
- *Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus VRZ*: Die Konfiguration beschreibt die Festlegung von gültigen Kennwerten des Systems, die Parametrierung, die Modifikation der Größen des Systems

und die Optimierung der Anpassung der Werte an die Situation (MARZ, 1999).

### Fernbus Ein- und Ausgabeseite

Auf der höchsten Ebene der Datenübertragung befindet sich der Fernbus zur Kommunikation zwischen der Unterzentrale und der Verkehrszentrale (RWVA, 1997).

### Verkehrszentrale Ein- und Ausgabeseite

Die Verkehrszentrale stellt die oberste Systemebene dar, von welcher die unteren Ebenen überwacht werden (RWVA, 1997).

- *Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse*: Vorhersehbare Ereignisse sind Baustellen, Veranstaltungen und Ferien (MARZ, 1999). Die manuellen Eingaben geschehen über einen Bediener der Verkehrszentrale. Diese Sonderprogramme werden als Hand- und Sonderprogramme bezeichnet (MARZ, 1999) und können eine hohe Priorität in der Überlagerung der Schaltungsprogramme einnehmen (RWVA, 1997).
- *Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse*: Zu den nicht vorhersehbaren Ereignissen gehören Unfälle, Explosionsgefahr, Sondertransporte und Glätte (MARZ, 1999).
- *Protokolle und Auswertungen*: Zur übersichtlichen Darstellung für den Bediener können Auswertergebnisse auf dem Bildschirm angezeigt werden. (MARZ, 1999).
- *Übersichtsdarstellung*: Dem Bediener werden Übersichtsbilder des jeweiligen Bundesautobahnabschnittes dargestellt mit der Lage der VBA, Autobahnmeistereien und anderen relevanten Informationen. Des Weiteren werden die momentane Verkehrssituation, die Umfelddaten, Ereignis- und Störungsmeldungen dem Bediener gezeigt (MARZ, 1999).
- *Betriebsüberwachung*: Störungen wie z. B. Speichermangel oder Gerätestörungen werden erfasst und in einem Wartungsbuch vermerkt (MARZ, 1999). Darüber hinaus werden Gerätestörungen automatisiert er-

fasst und archiviert. Auch Störungsmanagementsysteme (z.B. Ticketsysteme) können eine Rolle spielen.

- *Datenaustausch mit Externen:* Von der Verkehrszentrale aus werden automatisch generierte und vom Bediener erstellte Meldungen an Externe, z.B. die Landesmeldestelle (LMSt), weitergeleitet (MARZ, 1999). Verkehrsinformationszentralen treten derzeit zunehmend als Datenabnehmer auf.

### Wechselverkehrszeichen

WVZ des Typs A, B und C zeigen an einem Anzeigequerschnitt die Verkehrsvorschriften und Gefahrenwarnungen an. Die Anzahl der WVZ pro AQ sind abhängig von der Anzahl der Fahrstreifen (RWVA, 1997).

- *Anzeigen:* Die verschiedenen Wechselverkehrszeichen (A, B, C) der einzelnen Anzeigequerschnitte zeigen über LED- oder Halogenlampen die ermittelten Schaltbilder an.

### Wartung und Instandsetzung

Wartung und Instandsetzung werden normalerweise als ein regelmäßiger Prozess angesehen, der während des Betriebs, abhängig von den jeweiligen Vorgaben, regelmäßig (z.B. alle 6 Monate) oder bei Bedarf durchgeführt wird. Dieser hat einen wesentlichen Einfluss auf den Lebenszyklus aller Systemkomponenten und somit auf die in dieser Phase definierten Prozesse.

## 2.3 Aufstellung FMEA

Im folgenden Kapitel wird die Aufstellung der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) vorgestellt. Hierzu gehört zunächst ein Überblick über die im Projekt verwendeten Begriffsdefinitionen und die Einordnung der FMEA als QM-Methode in einem prozessorientierten Qualitätsmanagement. Darüber hinaus werden die zur Durchführung einer FMEA nötigen Schritte wie beispielsweise Systemabgrenzung, Prozessmodell, Aufstellung des Bewertungssystems beschrieben und spezifiziert.

### 2.3.1 Qualität und FMEA

Nach DIN EN ISO 9000 (2005) ist Qualität der „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“ und kann zusammen mit den „Adjektiven wie schlecht, gut oder ausgezeichnet verwendet werden“. Nach FGSV (2007b) ist Qualität das „Maß der Übereinstimmung zwischen den Eigenschaften eines Objekts (z. B. einer Ware, einer Dienstleistung oder eines Prozesses) und den Anforderungen, die an das Produkt oder den Prozess gestellt werden. Je besser die Eigenschaften des Objektes mit den gestellten Anforderungen übereinstimmen, desto ‚besser‘ ist die Qualität des Objektes“.

Überträgt man diese Definition auf das System „Streckenbeeinflussungsanlage“, so kann als Eigenschaft der Streckenbeeinflussungsanlage auf oberster Ebene – im Gegensatz zu den Detailsigenschaften auf Ebene der einzelnen Prozesse und Systemkomponenten – z.B. deren Funktion definiert werden: die Anzeige von Gefahrenwarnungen und Verkehrsvorschriften mit dem Ziel, die Verkehrssicherheit zu erhöhen und den Verkehrsablauf zu verbessern. Die Anforderung an eine SBA ist in diesem Sinne, dass die Anzeige korrekt und situationsangemessen erfolgt. Bild 15 stellt diese Zusammenhänge dar.

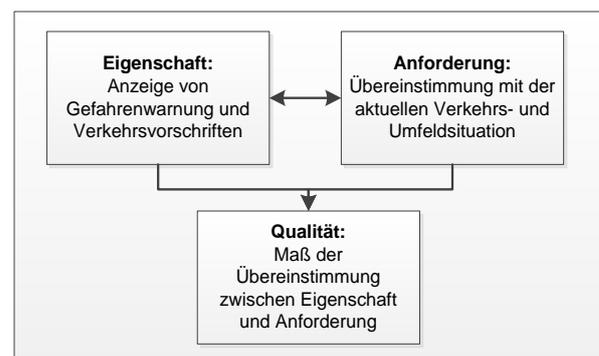
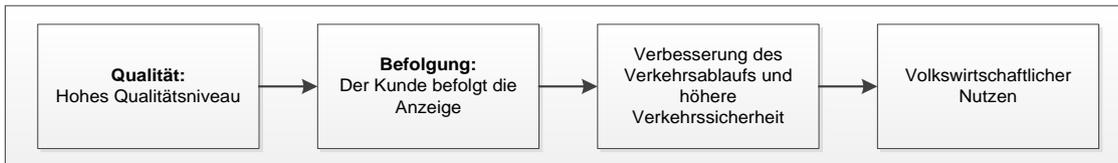


Bild 15: Beschreibung der Qualität einer SBA

Liegt ein hohes Qualitätsniveau vor, so führt dies idealerweise zu Befolgung der Anzeige durch den Verkehrsteilnehmer (RIEGELHUTH/GLATZ, 2015). Die Befolgung der angezeigten Warnungen oder Vorschriften wiederum wirkt sich auf den Verkehrsablauf und auf die Verkehrssicherheit sowie damit auch auf den volkswirtschaftlichen Nutzen aus (vgl. Bild 16).

Es sei darauf hingewiesen, dass die dargestellte Wirkungskette aufgrund der Schwierigkeiten bei der Messung und Bewertung der Akzeptanz von SBA-Schaltungen durch den Verkehrsteilnehmer sowie des daraus resultierenden, verkehrlichen und volkswirtschaftlichen Nutzens im Weiteren nicht näher betrachtet wird. Stattdessen wird angenommen, dass eine fehlerfreie Anzeige stets zu einer maxi-

malen Wirkung der SBA führt, ohne dieses Maximum näher zu spezifizieren. Eine unvollständige oder fehlerhafte Anzeige hingegen lässt nur eine eingeschränkte oder ggf. sogar negative Wirkung der Anlage zu. Erfolgt keine Anzeige, wird natürlich auch keine Wirkung erzielt.



**Bild 16:** Einfluss der Qualität auf den volkswirtschaftlichen Nutzen

Nach DIN EN ISO 9001 (2008) ist ein Prozess ein „Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt“. Dieses Ergebnis ist das Produkt eines jeden Prozesses und kann sowohl eine Dienstleistung, eine Software oder eine Hardware darstellen (DIN EN ISO 9001, 2008).

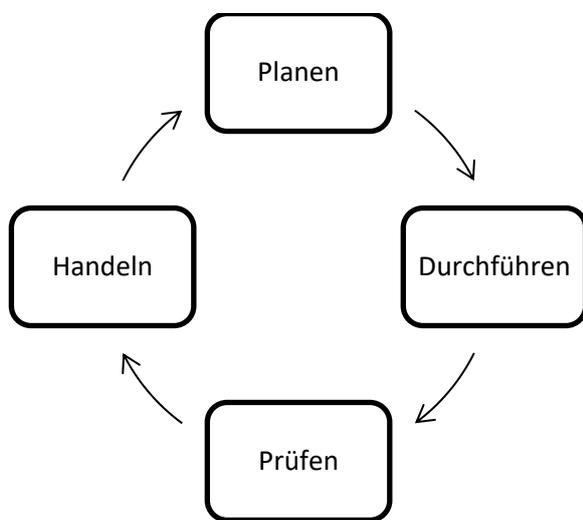
Um ein hohes Qualitätsniveau der SBA zu erreichen, müssen die einzelnen Prozesse betrachtet werden, denn die Gesamtqualität beruht auf den einzelnen Prozessen. So zeigt sich z. B., dass die Qualität der Steuerung der SBA abhängig ist von der Qualität der erfassten Daten (FELDGES et al., 2012). Nach FGSV (2007b) ist die Qualität des gesamten Produkts (die Anzeige) abhängig von den relevanten Prozessen. So kann z. B. ein qualitativ hochwertiges Verkehrssystem nur durch ein hohes Qualitätsniveau der Planungsprozesse erreicht werden.

Der Begriff „Qualitätsmanagement“ setzt sich aus dem zuvor beschriebenen Qualitätsbegriff und dem Management zusammen. Ein Management sind „aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zum Leiten und Lenken einer Organisation“ (DIN EN ISO 9000, 2005). Allgemein umfasst damit das Qualitätsmanagement nach DIN EN ISO 9000 (2005) „aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zum Leiten und Lenken einer Organisation bezüglich Qualität“. Durch ein QM sollen vor allem die Kundenzufriedenheit erhöht sowie die Effizienz der Prozesse gesteigert und Folgekosten von Mängeln reduziert werden

(FGSV, 2007b). Im geplanten Hinweisdokument zum Qualitätsmanagement in Verkehrsbeeinflussungsanlagen (FGSV AK 3.2.10) werden die Gruppen Verkehrsteilnehmer, die für die VBA verantwortlichen Verkehrsministerien, die Straßenbauverwaltungen der Länder als Betreiber sowie die Verkehrsbehörden und die Polizei als maßgebliche Kunden eines Qualitätsmanagementsystems für Verkehrsbeeinflussungsanlagen identifiziert. Zum erweiterten Kundenkreis gehören zudem Anlieger (insbesondere unter dem Aspekt Lärm- und Schadstoffmanagement) sowie (Mobilitäts-) Dienstleister, die die in einer VBA zur Verfügung stehenden Daten nutzen. Das Qualitätsmanagementsystem unterstützt die stetige Verbesserung zur Erfüllung der Ziele der jeweiligen Kundengruppen, unter Beachtung möglicher Zielkonflikte.

FGSV (2007b) definiert acht Grundsätze des Qualitätsmanagements. Der prozessorientierte Ansatz stellt einer der Grundsätze dar. Dieser Ansatz wird von der DIN EN ISO 9001 (2008) zur „Entwicklung, Verwirklichung und Verbesserung der Wirksamkeit eines Qualitätsmanagementsystems, um die Kundenzufriedenheit durch die Erfüllung der Kundenanforderungen zu erhöhen“, empfohlen. Der prozessorientierte Ansatz verbindet Tätigkeiten und Ressourcen zu Prozessen. Das Ergebnis eines Prozesses ist oftmals die Eingabe für den nachfolgenden Prozess (DIN EN ISO 9000, 2005). Durch diesen Ansatz können in einem Qualitätsmanagementsystem die Prozesse besser verstanden und stetig optimiert werden (DIN EN ISO 9001, 2008).

Zur Anwendung dieses Ansatzes in einem Qualitätsmanagementsystem wird in der DIN EN ISO 9001 (2008) die PDCA-Methode (Plan-Do-Check-Act) eingeführt. Bild 17 zeigt den sogenannten Deming-Zyklus. Der erste Schritt stellt das Planen dar, in dem die Prozesse zum Erreichen der Ergebnisse definiert werden. Außerdem sind die Anforderungen des Kunden in diesem Schritt zu beachten. Im nächsten Schritt werden die abgebildeten Prozesse durchgeführt. Im dritten Schritt werden die durchgeführten Prozesse auf ihre Ergebnisse hin geprüft und Maßnahmen ergriffen, um eine ständige Verbesserung der Ergebnisse zu gewährleisten.



**Bild 17: PDCA-Zyklus**

Nach DIN EN ISO 9000 (2005) besteht ein Qualitätsmanagement aus Qualitätsplanung, -lenkung, -sicherung und -verbesserung. BOLTZE et al. (2014) übertragen die Teile des Qualitätsmanagements auf den Deming-Zyklus.

Nach DIN EN ISO 9000 (2005) sind diese wie folgt definiert:

- Qualitätsplanung (Planen): „Teil des Qualitätsmanagements, der auf das Festlegen der Qualitätsziele und der notwendigen Ausführungsprozesse sowie der zugehörigen Ressourcen zum Erreichen der Qualitätsziele gerichtet ist“.
- Qualitätslenkung (Durchführen): „Teil des Qualitätsmanagements, der auf die Erfüllung von Qualitätsanforderungen gerichtet ist“.

- Qualitätssicherung (Prüfen): „Teil des Qualitätsmanagements, der auf das Erzeugen von Vertrauen darauf gerichtet ist, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden“.
- Qualitätsverbesserung (Handeln): „Teil des Qualitätsmanagements, der auf die Erhöhung der Eignung zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen gerichtet ist“.

Für die Qualitätsplanung werden unter anderem die relevanten Prozesse beschrieben. Auf dieses Projekt bezogen stellt die Darstellung der Prozesslandschaft diesen Schritt dar. Im nächsten Schritt, der Qualitätslenkung, wird eine QM-Methode angewendet, um die Anforderungen an die Qualität zu erfüllen. Durch Audits und Dokumentation wird die Qualität gesichert (BOLTZE et al., 2014). Den letzten Schritt stellt die Qualitätsverbesserung dar.

Zur Prüfung und Verbesserung der Qualität können verschiedene QM-Methoden herangezogen werden. Als Hilfsmittel zur Umsetzung dieser Methoden werden QM-Werkzeuge genutzt. In der Literatur sind sieben allgemeine Managementwerkzeuge zur Strukturierung von Informationen in der Planungsphase und sieben allgemeine Qualitätswerkzeuge zur Lösung von Problemen und zur Analyse von Fehlern aufgeführt (KAMISKE, 2012).

Die Fehlerbaumanalyse untersucht mögliche Ausfälle von Produktionsprozessen. Hierzu werden im ersten Schritt die einzelnen Systemkomponenten und deren Funktion anhand eines „Komponentenbaums“ aufgelistet. Dies erfolgt durch ein zuständiges Team. Im zweiten Schritt wird ein Fehlerbaum anhand von Ausfallkriterien erstellt. Die erforderlichen Informationen werden aus anderen Risikoanalysen herangezogen. So kann die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, dass ein Fehler eintritt bzw. eine Komponente ausfällt. Durch die Fehlerbaumanalyse können alle Ausfälle erfasst werden. Existieren in einem System viele mögliche Fehler, so ist für jeden Fehler ein Fehlerbaum zu erstellen (KAMISKE, 2012).

Durch das Benchmarking sollen Prozesse verbessert werden indem diese mit einem Bezugswert verglichen werden (KAMISKE, 2012). Bei einem Prozess-Benchmarking werden die Prozesse eines Systems anhand von festgelegten Messgrößen mit

einem optimierten System verglichen. Anhand eines Benchmarking können die Qualität der Prozesse objektiv bewertet und Problemlösungen erarbeitet werden. Jedoch sind oftmals relevante Vergleichsdaten nicht verfügbar oder von unzureichender Qualität (KAMISKE, 2012).

Die FMEA dient präventiv zur Auffindung von Fehlern und Schwachstellen in einem System bevor dieses freigegeben wird. Die entstehenden Risiken sollen abgeschätzt werden und geeignete Maßnahmen zur Vermeidung und Entdeckung gefunden werden (DIN EN 60812, 2006; DGQ, 2012). Durch die optimale Anwendung einer FMEA kann die Qualität des Produkts gesichert werden, sodass sich die Zufriedenheit der Kunden erhöht und somit finanzielle Mittel und Ressourcen eingespart werden (EBERHARDT, 2013). Die FMEA fördert außerdem die bessere Zusammenarbeit verschiedener Bereiche und nutzt das Fachwissen von Experten (DGQ, 2012).

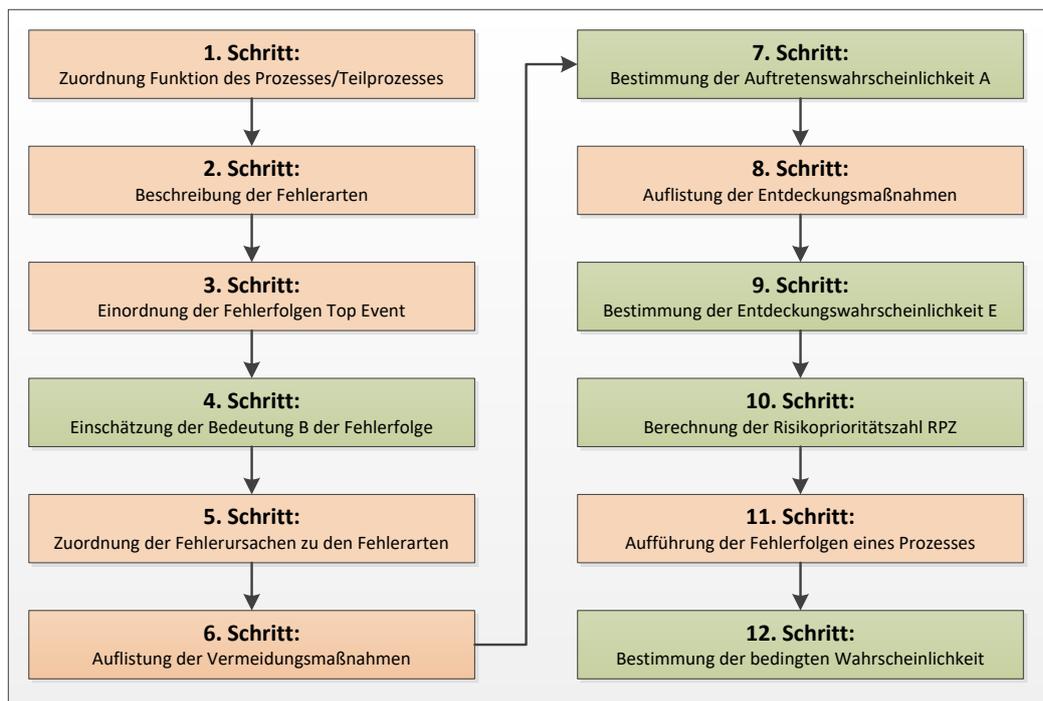
Zur Durchführung der FMEA werden nach DGQ (2012) folgende 5 Schritte definiert:

1. Strukturanalyse
2. Funktionsanalyse
3. Fehleranalyse
4. Maßnahmenanalyse
5. Optimierung

In der Strukturanalyse und in der Funktionsanalyse wird ein Prozessmodell des zu betrachtenden Systems erarbeitet und jedem Prozess eine Funktion

zugeordnet. Zur Fehleranalyse wird ein Formblatt auf Grundlage der Abläufe der Prozesslandschaft entworfen. Dort werden alle Qualitätskriterien zur Bewertung des Risikos eines Prozesses vermerkt. Fehler werden anhand des Grads der Erfüllung einer Funktion abgebildet. Durch die FMEA werden die direkten Auswirkungen eines Fehlers auf die Funktion des gesamten Systems ermittelt und bewertet. Zur Qualitätsprüfung werden außerdem die möglichen Fehlerursachen ermittelt und deren Auftretenswahrscheinlichkeit unter Betrachtung der Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen eingeschätzt. So können durch die FMEA die Kritikalität eines Fehlers bewertet werden und dadurch mögliche Qualitätsverbesserungsmaßnahmen ergriffen werden (DGQ, 2012). Die Vorteile der FMEA sind zum einen, dass Fehler frühzeitig erkannt und beseitigt werden und qualitätsverbessernde Maßnahmen eingeführt werden. Zum anderen werden die Prozesse des Systems und deren Funktion umfassend beschrieben. Als Nachteil zeigt sich jedoch, dass die ermittelten Ergebnisse auf einer subjektiven Einschätzung beruhen (KAMISKE, 2012).

Zur Durchführung einer FMEA wird ein Formblatt entworfen. Die Prozesse und deren Funktionen werden anhand der Prozessketten der Prozesslandschaft abgebildet. Dazu werden die ersten 10 Schritte des Ablaufs einer FMEA (s. Bild 18) in dem Formblatt durchgeführt.



**Bild 18: Ablaufschema der FMEA**

In den orange markierten Schritten werden die Fehlerarten, Fehlerfolgen, Fehlerursachen, Vermeidungsmaßnahmen und Entdeckungsmaßnahmen festgelegt. Die grün hinterlegten Felder sind jene Schritte zur Bewertung der Kenngrößen „Bedeutung“, „Auftrittswahrscheinlichkeit“ und „Entdeckungswahrscheinlichkeit“ zur Berechnung der Risikoprioritätszahl. Diese stellt das Ergebnis einer FMEA in Form der Bewertung der Kritikalität eines Prozesses dar. Nach DIN EN ISO 60812 (2006) ist das Risiko ein „subjektives Maß für die Schwere der Auswirkungen“ eines Fehlers eines Prozesses.

Die Risikoprioritätszahl berechnet sich in der Fachliteratur wie folgend:

$$RPZ = B \times A \times E$$

Mit:

RPZ = Risikoprioritätszahl

B = Bedeutung

A = Auftretenswahrscheinlichkeit

E = Entdeckungswahrscheinlichkeit

Die zur Berechnung der Risikoprioritätszahl erforderlichen Kenngrößen Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit werden durch ein Expertengremium geschätzt. Die

Skalierung dieser Größen sowie die Vorgehensweise in den einzelnen Schritten der FMEA werden in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert.

Eine FMEA betrachtet der Definition nach nicht die Auswirkungen der Fehler auf folgende Prozesse. Zur Erfassung dieser Fehlerfolgen wird im vorliegenden Projekt eine „erweiterte FMEA“ erstellt. Hierzu werden im elften Schritt die möglichen Fehlerfolgen aufgeführt und im zwölften Schritt die Auftretenswahrscheinlichkeit dieser Fehler im Sinne bedingter Wahrscheinlichkeiten bestimmt (s. Bild 18). Anhand dieser Daten kann im Weiteren ein Qualitätsmodell in Form eines Bayes'schen Netzes erstellt werden (s. Kapitel 3).

### 2.3.2 Systemabgrenzung

Im ersten Schritt wird die Abgrenzung des Systems „Streckenbeeinflussung“ definiert. „Die Systembegrenzung bildet die physikalische und funktionale Schnittstelle zwischen dem System und seiner Umgebung, einschließlich anderer Systeme, mit denen sich das betrachtete System gegenseitig beeinflusst. Das sollte für Systeme auf beliebiger Ebene gelten. Für Systeme und/oder Bestandteile außerhalb der Begrenzung sollte der Ausschluss ausdrücklich festgelegt werden“ (DIN EN ISO 60812, 2006).

Die Abgrenzung des Systems SBA erfolgt zum einen durch die Definition der Lebensphasen, wodurch das System zeitlich abgegrenzt wird. Räumlich findet eine Abgrenzung des Systems statt, indem das System von der Eingabeseite, den Sensoren bis hin zur Verkehrszentrale und bis zur Ausgabeseite, den Anzeigen, abgegrenzt wird. Schnittstellen mit externen Systemen werden nicht betrachtet. Eine Ausnahme ergibt sich bei der Bereitstellung von Informationen für die Verkehrszentrale. Des Weiteren wird eine funktionale Schnittstelle zwischen der Darstellung der Anzeige und der Wirkung der Anzeige festgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Systemabläufe zur Schaltung der Anzeige beschrieben, jedoch wird nicht weiter auf die Wirkung der Anzeige auf den Kraftfahrer eingegangen.

### 2.3.3 Prozessmodell

Das Prozessmodell beinhaltet alle bisher aufgeführten Prozesse gruppiert nach den drei Lebenszyklusphasen Planung, Bau und Betrieb. Zusätzlich sind im Prozessmodell die unterschiedlichen sog. Top Events enthalten, die in der FMEA beurteilt werden. In der Lebenszyklusphasen Planung und Bau sind die Prozesse in zeitlicher Abfolge verbunden. Die Lebenszyklusphase Betrieb beinhaltet die technischen Prozesse, die nach Systemkomponenten gruppiert sind. Dabei stellen die hier aufgelisteten Prozesse die Funktionen der zugehörigen Systemkomponenten dar, sodass in der FMEA die Funktionen der Systemkomponenten beurteilt werden.

Das erarbeitete Prozessmodell kann dem Anhang 1 entnommen werden.

### 2.3.4 Funktionen

Durch den gewählten Aufbau des Prozessmodells und der Bezeichnung der Prozesse, kann für die Durchführung der FMEA der Begriff „Funktion“ mit dem Begriff „Prozess“ gleichgesetzt werden.

### 2.3.5 Fehlerarten und Fehlerursachen

Die Prozesse werden im FMEA-Formblatt einzeln und damit voneinander losgelöst betrachtet. Die Fehlerart, Fehlerursache, Fehlerfolge, Vermeidungsmaßnahme und Entdeckungsmaßnahme beziehen sich auf die jeweilige Funktion.

Nach der Zuordnung der Funktionen zu den Prozessen werden für jede Funktion die möglichen Fehlerarten definiert. Ein Fehler definiert sich als die „Nichterfüllung einer Anforderung“ (DIN EN ISO 9000, 2005). EBERHARDT (2013) stellte eine Checkliste möglicher Fehlerarten auf. Zur Erstellung des FMEA-Formblattes wurden folgende Fehlerarten genutzt:

1. Funktion nicht erfüllt
2. Funktion unvollständig erfüllt
3. Funktion fehlerhaft erfüllt
4. Kein Fehler

Die Festlegung auf eine feste Anzahl Fehlerarten, die auf den jeweiligen Prozess angepasst werden, ist auf die Weiterverwendung der FMEA-Ergebnisse in einem mathematischen Modell zurückzuführen. Hierdurch ergibt sich eine feste Anzahl von Zuständen einer Systemkomponente/eines Prozesses. Die Fehlerkategorie „Kein Fehler“ stellt im mathematischen Modell die Gegenwahrscheinlichkeit zur Summe der Auftretenswahrscheinlichkeiten der anderen Fehlerarten dar. Sie wird automatisch berechnet und damit im FMEA-Formblatt nicht explizit abgefragt.

Im darauffolgenden Schritt der FMEA werden mögliche Fehlerursachen für die Fehlerarten beschrieben. Jede Fehlerursache ist dabei genau einer Fehlerart zugeordnet. Es können aber natürlich mehrere Fehlerursachen für eine Fehlerart gefunden werden. Die Beschreibung der Fehlerursache sollte möglichst detailliert erfolgen.

*Beispiel:* Der Niederschlagssensor hat die Funktion „Datenerfassung“. Die Funktion ist nicht erfüllt. Als Fehlerursache wird die Verschmutzung des Sensors angegeben.

### 2.3.6 Bedeutung und Top Event

Die Funktion einer SBA ist die Beeinflussung des Kraftfahrers durch die Anzeige von Verkehrsinformationen und verkehrsrechtlichen Anordnungen. Diese Schaltungen sollten mit der Verkehrs- und Umfeldsituation übereinstimmen. In der Prozesslandschaft werden die Schaltanforderungen der SBA daher als Top Event definiert.

Das MARZ (1999) systematisiert drei Schaltungsmöglichkeiten für Streckenbeeinflussungsanlagen,

die Automatikschaltung, Sonderprogramme und die Handschaltung.

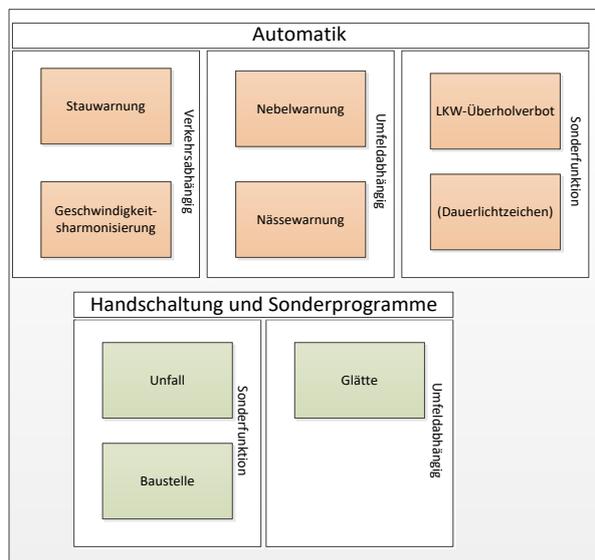
Das Top Event Automatikschaltung umfasst:

- Geschwindigkeitsharmonisierung,
- Stauwarnung,
- Nässewarnung mit/ohne Lkw-Überholverbot,
- Nebelwarnung,
- Lkw-Überholverbot.

Die Top Events, die durch Sonderprogramme oder Handschaltungen aktiviert werden, sind:

- Baustellenwarnung,
- Unfallwarnung,
- Glättewarnung
- (Dauerlichtzeichen).

Eine Unfall-, Baustellen- und Glätteschaltung kann sowohl durch ein Sonderprogramm als auch durch eine Handschaltung vorgenommen werden. Dauerlichtzeichen werden in Kombination mit Gefahrenwarnungen wie z. B. der Unfallwarnung genutzt.



**Bild 19: Darstellung und Gliederung der Top Events**

Die verschiedenen Schaltanforderungen werden für eine bessere Übersicht in der RWVA (1997) nach deren Funktionen untergliedert. Dabei werden die Top Events in verkehrsabhängige Funktion, umfeldabhängige Funktion und Sonderfunktion gegliedert.

Die Untergliederung ist relevant für die verschiedenen Prozessketten im weiteren Verlauf zur Erstellung der Prozesslandschaft. In Bild 19 werden die Top Events unterschieden nach deren Schaltprogramm und der Funktion dargestellt. Die Handschaltung und Sonderprogramme wurden zusammengefasst.

Die Bedeutung B beschreibt die Schwere der Auswirkungen einer Fehlerart (EBERHARDT, 2013). Die Bedeutung bezieht sich auf die höchste definierte Ebene des Systems, das Top Event (VDA, 2012). In der Literatur existieren verschiedene Tabellen zur Kategorisierung der Bedeutung. EBERHARDT (2013) unterteilt die Bedeutung einer Fehlerfolge in fünf Kategorien. Für geringfügige Auswirkung auf das Top Event ist  $B = 1$  und für äußerst schwerwiegende Folgen ist  $B = 10$  vorgesehen.

Ein Fehler in einem Prozess im Lebenszyklus einer SBA kann sich in unterschiedlicher Art und Weise auf die Gesamtfunktion der SBA in Form der definierten Top Events auswirken. So führt bspw. die Fehlerart „vollständiger Ausfall“ im Prozess Anzeige AQ zu einem Totalausfall aller Anzeigen im Top Event. Der „vollständige Ausfall“ im Prozess „Sichtweitenerfassung“ beeinflusst aber nur das Top Event „Nebelwarnung“. Beide Fälle müssen aber auf der einheitlichen Skala der Bedeutung B bewertet werden.

Hierzu wurde in Tab. 2 eine Zuordnung verschiedener Fehlerfolgen der einzelnen Top Events zu einer Skala von 1 bis 10 vorgenommen.

Die Top Events werden in:

- Totalausfall und Falsche Anzeige und
- Teilausfall

unterteilt. Die Auswirkungen einer falschen Anzeige werden den Auswirkungen eines Totalausfalls gleichgesetzt. Es wird angenommen, dass das Top Event Teilausfall geringere Folgen für den Kraftfahrer hat. Die drei möglichen Top Events werden nach den Schaltanforderungen gegliedert. Die RWVA (1997) gibt eine Reihenfolge zur Priorität der Schaltungen an. Schaltanforderungen mit einer geringeren Priorität können von einer Schaltung mit einer höheren Priorität überschrieben werden. Die höchste Bedeutung haben die Gefahrenwarnungen Unfall als auch Glätte, und diese werden mit  $B = 10$  bewertet, wenn ein Totalausfall oder eine falsche

Anzeige zu erwarten ist. Fällt ein WVZ eines AQ aus, so ist dies mit B = 6 zu bewerten. Hat ein Fehler keinen direkten Einfluss auf die Anzeigen, so wird dieser mit B = 1 bewertet.

Hat eine Funktion Auswirkungen auf mehrere Top Events, so wird zur Beurteilung das Top Event mit der höchsten Bedeutung herangezogen.

B	Kategorie der Fehlerfolge und Auswirkungen	Top Events „Totalausfall“ und „Falsche Anzeige“	Top Events „Teilausfall“
10	Äußerst schwerwiegende Folgen	Handschtaltung: Unfall, Glätte	
		Sonderprogramm: Unfall, Glätte	
		Automatik 1: Nebel, Stau, Dauerlichtzeichen	
8	Sehr ernste Folgen	Handschtaltung/Sonderschaltung: Baustelle	
6	Ernste Folgen	Automatik 2: Nässewarnung	Handschtaltung: Unfall, Glätte, Baustelle
			Sonderprogramm: Unfall, Glätte, Baustelle
			Automatik 1+2: Nebel, Stau, Nässewarnung, Dauerlichtzeichen
2	Leichte Auswirkungen	Automatik 3: Geschwindigkeitsharmonisierung, LKW-Überholverbot	Automatik 3: Geschwindigkeitsharmonisierung, LKW-Überholverbot
1	Geringfügige Auswirkungen	Sonstiges (z. B. Wirtschaftlichkeit)	Sonstiges (z. B. Wirtschaftlichkeit)

Tab. 2: Klassifizierung der Bedeutung (auf Grundlage von EBERHARDT, 2013; RWVA, 1997, RWVZ 1997)

**2.3.7 Vermeidungsmaßnahmen und Auftretenswahrscheinlichkeit**

Die Vermeidungsmaßnahme ist eine Maßnahme zur „Beseitigung der Ursache eines möglichen Fehlers“ (DIN EN ISO 9000, 2005). Vermeidungsmaßnahmen sollen präventiv eingesetzt werden, sodass es wahrscheinlich ist, den Fehler zu vermeiden (WERDICH, 2012).

Vermeidungsmaßnahmen sind in den verschiedenen Regelwerken und Richtlinien aufgeführt. Sind keine Vermeidungsmaßnahmen vorgesehen, so ist dies im FMEA-Formblatt zu vermerken (EBERHARDT, 2013).

*Beispiel:* Eine Vermeidungsmaßnahme bzgl. eines verschmutzten Niederschlagssensors wäre eine Reinigung des Niederschlagssensors in einem definierten Zyklus, der beispielsweise in einem Wartungsvertrag vereinbart wird.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass eine Fehlerursache unter Berücksichtigung der Vermeidungsmaßnahmen auftritt (VDA, 2012).

In der Literatur sind verschiedene Bewertungsgrundlagen für die Auftretenswahrscheinlichkeit zu finden. EBERHARDT (2013) gliedert die Auftretenswahrscheinlichkeit in 10 Stufen. Ist mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 10% zu rechnen, so wird ein A = 10 angesetzt. Tritt eine Fehlerursache

mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 ppm auf, so wird die Auftretenswahrscheinlichkeit mit 1 bewertet. Die Skalierung wird überwiegend in der Automobilindustrie zur Einschätzung der Fehlerrate eines Bauteils genutzt. Für regelmäßig auftretende, automatisierte Prozesse bei SBA (betrifft in erster Linie die technischen Prozesse in der Betriebsphase) wird sie in modifizierter Form übernommen (s. Tab. 3).

Um dabei die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers besser beurteilen zu können, wird diese auf einen Zeitraum bezogen. Die Betrachtung der Lebensdauer einer SBA (ca. 20 Jahre) erwies sich nicht als sinnvoll, da einige Komponenten einer Streckenbeeinflussungsanlage bis zu mehrere Male im Jahr ausfallen können. Daher wurde das Auftreten eines Fehlers auf ein Jahr bezogen (siehe Tab.

3). Tritt eine Fehlerursache an 10 Tagen im Jahr auf, so ist die Auftretenswahrscheinlichkeit mit  $A = 10$  zu bewerten. Für eine Auftretensdauer von 0,05 Tagen pro Jahr (1 Mal in 50 Jahren) ist ein  $A = 1$  vorgesehen. Liegt ein Fehler über einen Zeitraum von mehreren Tagen vor, wird jeder Tag als Fehlerauftritt gewertet, sodass man die Anzahl der Tage bewertet, an denen ein Fehler vorlag.

Bei einmaligen Prozessen im Lebenszyklus von SBA (z.B. in der Planungsphase) sowie bei regelmäßigen, jedoch nicht automatisierten Prozessen (während der Betriebsphase) wird jeweils eine alternative Skala verwendet, die sachbedingt auch höhere Auftretenswahrscheinlichkeiten zulässt (s. Tab. 3).

A	Auftrittswahrscheinlichkeit	Fehlerursachen regelmäßig auftretender technischer Prozesse			Fehlerursachen regelmäßig auftretender manueller Prozesse	Fehlerursachen einmalig auftretender Prozesse	
		Anzahl Tage pro Jahr	Auftreten		Auftretenswahrscheinlichkeit	Auftretenswahrscheinlichkeit	
10	Sehr hoch	$\geq 10$	10/Jahr	2,74%	5%	99 %	
9				2,05%	3%	75 %	
8	Hoch	5	5/Jahr	1,37%	2,5%	50 %	
7				0,82%	2%	40 %	
6	Mäßig	1	1/Jahr	0,27%	1,5%	30 %	
5			0,5	1/2 Jahren	0,14%	1%	20 %
4				0,08%	0,5%	15 %	
3	Gering	0,1	1/10 Jahren	0,03%	0,2%	10 %	
2				0,02%	0,1%	5 %	
1	Sehr gering	0,02	1/50 Jahren	0,01%	0,05%	1 %	

Tab. 3: Klassifizierung der Auftretenswahrscheinlichkeit

### 2.3.8 Entdeckungswahrscheinlichkeit

Durch Entdeckungsmaßnahmen sollen aufgetretene Fehlerursachen entdeckt werden, jedoch ist dies in der Praxis nicht immer möglich und es können nur die Fehlerarten und Fehlerfolgen entdeckt werden (WERDICH, 2012).

Fehlerursachen, die trotz Vermeidungsmaßnahme auftreten, sollen durch eine geeignete Maßnahme entdeckt werden, sodass diese behoben werden können. Entdeckungsmaßnahmen existieren sowohl im jeweiligen Prozess, als auch in nachfolgenden Prozessen.

*Beispiel:* Die Fehlerursache „Verschmutzung“ eines Niederschlagssensors kann in der Streckenstation

durch Plausibilitätschecks ermittelt und an die VRZ/UZ weitergemeldet werden (FGSV, 2010). Diese Entdeckungsmaßnahme greift somit nicht im Prozess „Sichtweitenerfassung“ selbst, sondern in einem nachgelagerten Prozess ein.

Mit der Entdeckungswahrscheinlichkeit wird die Wahrscheinlichkeit eingeschätzt, dass unter Verwendung der Entdeckungsmaßnahmen ein entstandener Fehler entdeckt wird (EBERHARDT, 2013).

E	Entdeckungswahrscheinlichkeit	Sicherheit des Prüfverfahrens (bei regelmäßigen Prozessen)	Sicherheit des Prüfverfahrens (bei einmaligen Prozessen)
10	Sehr gering	90%	1%
9			25%
8	Gering	98%	50%
7			60%
6	Mäßig	99,70%	70%
5			80%
4			85%
3	Hoch	99,90%	90%
2			95%
1	Sehr hoch	99,99%	99%

Tab. 4: Klassifizierung der Entdeckungswahrscheinlichkeit (nach EBERHARDT, 2013)

Die Entdeckungswahrscheinlichkeit wird ebenfalls zwischen 1 und 10 bewertet. Ein E-Wert von 10 entspricht nach EBERHARDT (2013) einer sehr geringen Entdeckungswahrscheinlichkeit mit einer Sicherheit des Prüfverfahrens von 90%. Bei einem E-Wert von 1 wird von einer sehr hohen Entdeckungswahrscheinlichkeit und einer Sicherheit des Prüfverfahrens von 99,99% ausgegangen. Die Skala nach EBERHARDT (2013) bezieht sich dabei hauptsächlich auf wiederkehrende, technische Prozesse. Analog zu den Auftretenswahrscheinlichkeiten aus Tab. 3 wird daher für die während Planung und Bau von SBA auftretenden, einmaligen Prozesse eine alternative Skala verwendet (s. Tab. 4).

Zu beachten ist, dass die Kategorisierung der Entdeckungswahrscheinlichkeit entgegengesetzt der Auftretenswahrscheinlichkeit aufgestellt ist. Eine

sehr hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit führt ebenso wie eine sehr geringe Auftretenswahrscheinlichkeit zu einer niedrigen Risikobewertung. Eine sehr geringe Entdeckungswahrscheinlichkeit hat jedoch genau wie eine sehr hohe Auftretenswahrscheinlichkeit eine hohe Risikobewertung in Form der Risikoprioritätszahl zur Folge.

### 2.3.9 FMEA-Formblatt

Zur Durchführung der FMEA werden die Prozesse in einem FMEA-Formblatt nach ihrer Reihenfolge im Prozessmodell dargestellt. Dabei sind der erste Prozess die „Wirksamkeitsschätzung“ und der letzte Prozess die „Anzeige“ am Wechselverkehrszeichen. Das Top Event wird nicht bewertet. Im ausgefüllten FMEA-Formblatt ist die jeweilige Funktion jedes Prozesses angegeben, da sich die Fehlerarten auf diese beziehen. Die Fehlerarten werden nach den o.a. vier Fehlern untergliedert. Dabei wurde entschieden, welche Fehlerarten in dem Prozess überhaupt auftreten können. Die jeweilige Fehlerfolge Top Event wird nach den o.a. vier Fehlerfolgen gegliedert. So kann ein Fehler zu einem Totalausfall, Teilausfall oder zu einer falschen Anzeige führen. Ein Fehler kann Auswirkungen auf mehrere Top Events haben, daher wird das Top Event mit der höchsten Bedeutung angesetzt. Die Bedeutung für jede Fehlerart ist durch die Experten zu schätzen.

Die Fehlerursachen wurden aus der Literatur abgeleitet und im Betreuerkreis abgestimmt. Für jede Fehlerursache werden die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Entdeckungswahrscheinlichkeit durch die Experten geschätzt. Zur Unterstützung bei der Bewertung werden Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen zu den jeweiligen Fehlerursachen angegeben.

Aus dem FMEA-Formblatt ergibt sich durch Multiplikation der klassifizierten Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit direkt die Risikoprioritätszahl als Ergebnis der FMEA.

## 2.4 Auswertung FMEA

In dem folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der FMEA vorgestellt. Hierbei werden auf die Fehler mit den größten Risikoprioritätszahlen eingegangen. Darüber hinaus werden auch Analysen durch

Mittelung der RPZ durchgeführt um die Kritikalität der Lebenszyklusphasen und der Systemkomponenten zu untersuchen. Schlussendlich werden in diesem Kapitel auch Sensitivitätsanalysen durchgeführt um Verbesserungspotentiale in dem modellierten SBA zu identifizieren.

**2.4.1 Durchführung FMEA**

Um die FMEA durchführen zu können mussten, wie in den vorherigen Kapiteln bereits erläutert, die drei Faktoren Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit ermittelt werden. Hierzu wurde im Rahmen des Arbeitskreises 3.2.10 des FGSV am 14.10.2015 ein Workshop durchgeführt. Hierbei wurde aus Zeitgründen das im Vorfeld erarbeitete FMEA Formblatt in 4 Bereiche

geteilt. Entsprechend der 4 Bereiche wurden Expertengruppen gebildet. Ziel des Workshops war die Schätzung aller Faktoren durch die Expertengruppen. Dabei sind innerhalb der Gruppen Diskussionen entstanden, die eine möglichst objektive Schätzung der Werte ermöglicht haben. Die in den folgenden Unterkapiteln vorgestellten Ergebnisse basieren auf der Auswertung dieser Schätzungen durch die Expertengruppen.

**2.4.2 Die 10 kritischsten Fehler von SBA**

Durch die Betrachtung der Risikoprioritätszahl der Fehlerarten der einzelnen Prozesse einer SBA werden die kritischsten Fehler des gesamten Lebenszyklus einer SBA identifiziert (s. Tab. 5).

Nr.	Prozess/Funktion/Systemkomponente	Fehlerart	B	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ
8	Datenaufbereitung	Fehler 3: Fehlerhafte Datenaufbereitung	10	nicht plausible Daten	-	10	nur manuell	10	1000
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 1: Keine Eingabe	10	Fehlende/Verspätete Meldung	Schulung des Personals	9	-	8	720
8	Datenaufbereitung	Fehler 3: Fehlerhafte Datenaufbereitung	10	Fehlerhafte Parameterwerte	Kontrollen/Konfiguration	6	Analyse PL-Fehler, Fehlermeldung VRZ	9	540
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 3: Fehlerhafte Eingabe	10	Fehlende Qualifikation des Personals	Schulung des Personals	5	-	9	450
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 3: Fehlerhafte Eingabe	10	Unspezifische Meldung (z.B. zu ungenau räumliche Abgrenzung des Gefahrenbereichs)	Schulung des Personals	6	Verifikation per Video	7	420
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 3: Fehlerhafte Eingabe	10	Missverständnisse bei der Entgegennahme der Meldung	Schulung des Personals	6	Verifikation per Video	7	420
6	Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 3: Fehlerhafte Eingabe	9	Fehlende Qualifikation des Personals	Schulung des Personals	5	-	9	405
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 3: Fehlerhafte Eingabe	10	Fehlerhafte Meldung (z.B. falsche Standort-/Richtungsangabe)	Schulung des Personals	5	Verifikation per Video	8	400
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 1: Keine Eingabe	10	Bedienung aufgrund eines Softwarefehlers nicht möglich (UZ- bzw. VRZ-Software)	Wartung	6	Fehlerentdeckung durch das Personal in Verkehrsrechnerzentrale	6	360
6	Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 1: Keine Eingabe	9	Versäumnis des Personals	Schulung des Personals	4	-	10	360

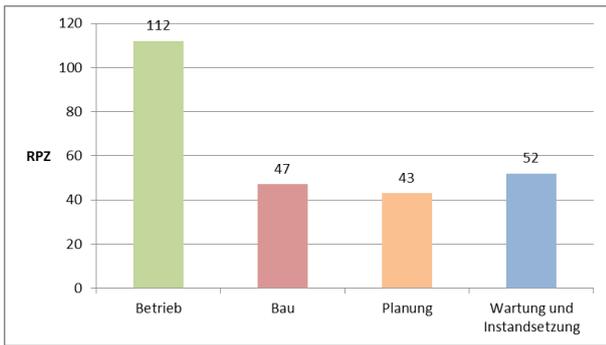
**Tab. 5: Die 10 kritischsten Fehler einer SBA**

Die 10 kritischsten Fehler wurden ausschließlich in der Lebenszyklusphase „Betrieb“ identifiziert. Zum einen der Prozess Datenaufbereitung der Untereinzentrale und zum anderen die Prozesse „manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse“ und „manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse“ der Verkehrsrechnerzentrale weisen die kritischsten Fehler auf. Die Fehlerarten der kritischsten Fehler sind auf die Fehlerart 1 (keine Ausführung der Funktion) und auf Fehlerart 3 (fehlerhafte Ausführung der Funktion) zurückzuführen. Es zeigt sich, dass vor allem die hohe Bedeutung dieser Prozesse bezogen auf die Top Events zu den hohen Risikoprioritätszahlen führt. Darüber hinaus liegt die Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursachen bei mäßig bis hoch. Gleichzeitig ist die Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursachen gering bis mäßig. Die kritischsten Fehler des Prozesses „Datenaufbereitung“ können auf nicht plausible Daten und fehlerhafte Parameterwerte zurückgeführt werden.

Bezüglich der Prozesse in der Verkehrsrechnerzentrale sind im Übrigen häufig menschliche am kritischsten, da diese z.B. im Fall manueller Eingaben in der Regel direkt auf das Top Event wirken und zugleich nur schwer erkannt werden. Jedoch sind z.B. auch Software- bzw. Parameterfehler in der VRZ oder UZ unter den 10 kritischsten Fehlern (vgl. Tab. 5).

**2.4.3 Kritikalität der Lebenszyklusphasen**

Durch die Mittelung der RPZ der Prozessfehler einer Lebensphase ergibt sich die Kritikalität der einzelnen Lebenszyklusphasen. Bild 20 verdeutlicht, dass die kritischsten Fehler in der Lebensphase „Betrieb“ identifiziert werden. Dies wird auch durch die o.a. 10 kritischsten Fehler verdeutlicht. Die Lebenszyklusphasen „Bau“, „Planung“ weisen eine deutlich niedrigere RPZ auf als die Lebensphase „Betrieb“.

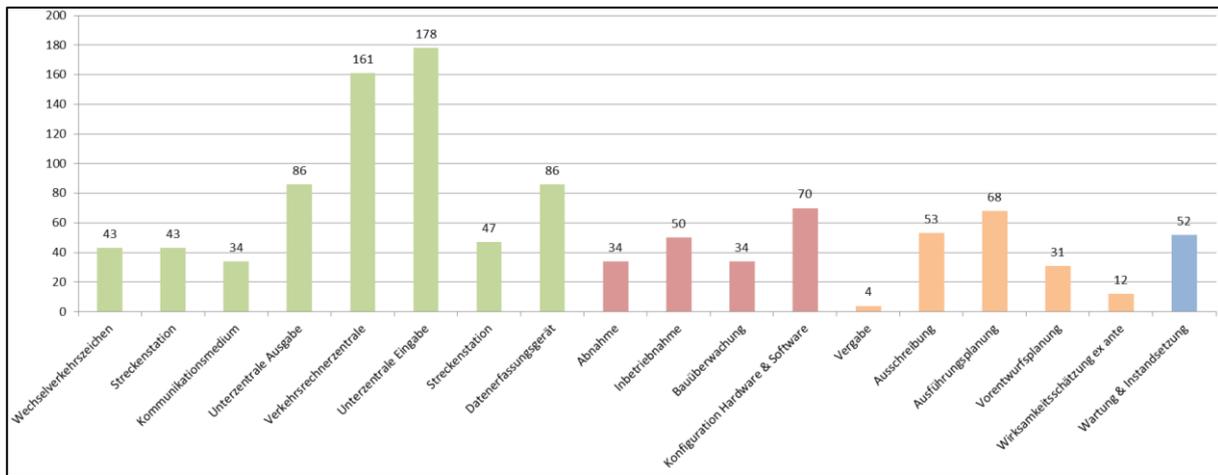


**Bild 20: Mittlere Kritikalität der Lebenszyklusphasen**

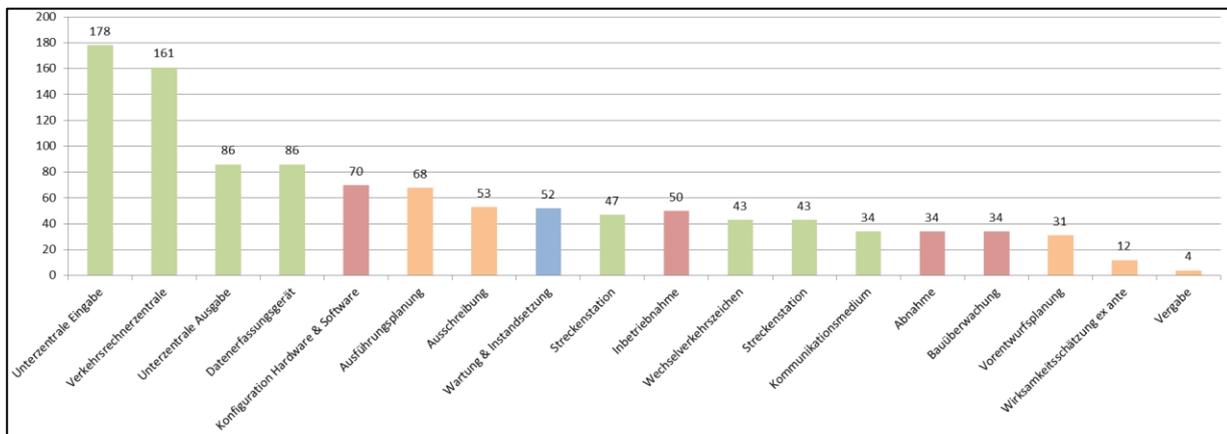
**2.4.4 Betrachtung der Systemkomponenten**

Zur Betrachtung der einzelnen Systemkomponenten des Lebenszyklus einer SBA wurde die RPZ der

verschiedenen Prozesse der Systemkomponenten gemittelt (vgl. Bild 21). Die kritischsten Systemkomponenten sind in der Unterzentrale auf der Eingabe- und in der Verkehrszentrale identifiziert worden. Die Komponenten Datenerfassungsgerät und Unterzentrale Ausgabe in der Lebensphase „Betrieb“ weisen eine hohe RPZ auf. Die Datenerfassung ist von hoher Bedeutung, da die Qualität der Schaltung von der Qualität der erfassten Umfeld- und Verkehrsdaten abhängt. In der Lebenszyklusphase „Bau“ sind die Systemkomponenten „Konfiguration Hardware und Software“ und „Inbetriebnahme“ die kritischsten. In der „Planung“ die Komponenten „Ausführungsplanung“ und „Ausschreibung“.



**Bild 21: Risikowerte der Systemkomponenten**



**Bild 22: Systemkomponenten geordnet nach mittlerer Risikoprioritätszahl**

### 2.4.5 Kritischste Prozesse unterschieden nach Fehlerarten

Fehlerarten werden in die drei Kategorien unterteilt:

- Fehlerart 1: Keine Ausführung der Funktion
- Fehlerart 2: Unvollständige Ausführung der Funktion
- Fehlerart 3: fehlerhafte Ausführung der Funktion.

So zeigt sich bei der Auswertung der Fehlerarten, dass Fehlerart 3 zu einer hohen durchschnittlichen Kritikalität führt, Fehlerart 2 hingegen zu einer niedrigen Kritikalität (vgl. Bild 23).

Im Bild 24 wurden die einzelnen Prozesse nach den möglichen Fehlerarten unterschieden. Es zeigt sich, wie bereits bei der Auswertung der 10 kritischsten

Fehler aufgezeigt wurde, dass der Prozess „Datenaufbereitung“ der Unterzentrale Eingabeseite eine hohe RPZ aufweist. Durch die Betrachtung der einzelnen Fehlerarten wird deutlich, dass Fehlerart 3 eine sehr hohe RPZ hat.

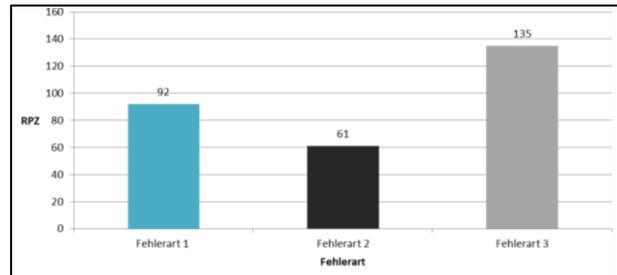


Bild 23: Kritikalität der Fehlerarten

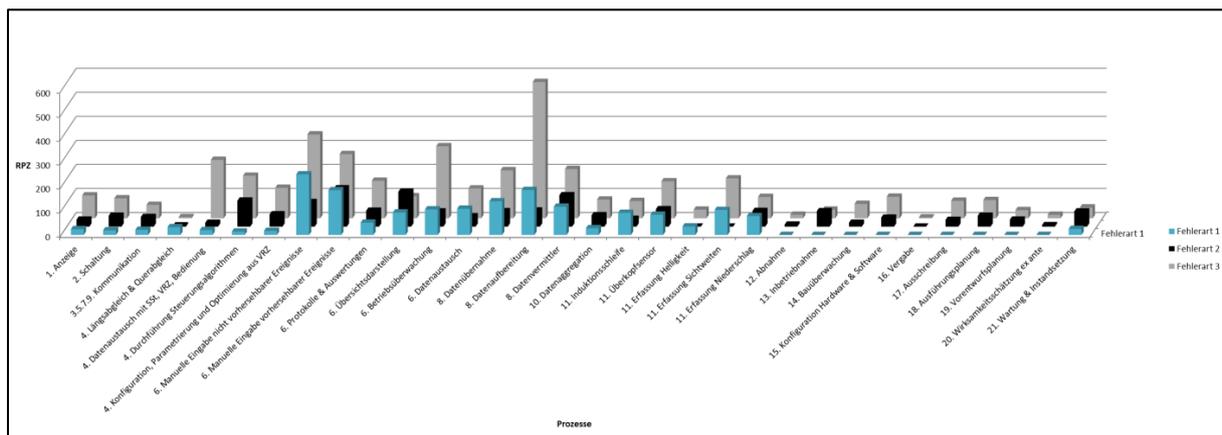


Bild 24 Getrennte Betrachtung der Fehlerarten der Prozesse (Mittelung der Fehlerursachen)

Eine fehlerhafte Datenaufbereitung ist auf fehlerhafte Parameterwerte, fehlerhafte Plausibilitätsprüfungen oder auf nicht plausible Daten zurückzuführen. Die hohe RPZ ist unter anderem auf eine niedrige Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursachen zurückzuführen. Auch die Prozesse „Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse“ und „Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse“ wurden bereits als kritische Prozesse identifiziert. Es zeigt sich, dass Fehlerart 3 als die kritischste Fehlerart des Prozesses anzusehen ist. Diese fehlerhaften Eingaben sind wie bereits erwähnt überwiegend auf menschliche Fehler zurückzuführen. Besonders die Fehler des Prozesses „Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse“ haben eine

mäßige bis sehr geringe Entdeckungswahrscheinlichkeit. Fehlerart 1 (keine manuelle Eingabe) ist zum einen auf Fehler durch das Personal, aber auch auf technische Störungen wie Softwarefehler oder eine defekte Hardware zurückzuführen, die eine Eingabe verhindern. Ein weiterer kritischer Prozess ist die Betriebsüberwachung bei einer fehlerhaften Betriebsüberwachung. Diese Fehlerart ist auf eine fehlerhafte Ergänzung des Wartungsbuches durch den Bediener zurückzuführen. In der gesamten Lebenszyklusphase „Betrieb“ sind die Fehlerarten 1 und 3 die kritischsten. In der Lebensphase „Bau“ und „Planung“ wurde die Fehlerart 1 (keine Prozessausführung) nicht betrachtet, sodass auch hier die Fehlerart 3 am kritischsten ist. Die

Fehlerursache der Fehlerart 3 des Prozesses „Konfiguration Hardware und Software“ beruht unter anderem auf fehlerhafter Parametrierung, fehlerhaften Algorithmen und ungeeigneter Kalibrierung der Detektoren. Die hohe Kritikalität einer fehlerhaften Ausführungsplanung in der Lebenszyklusphase „Planung“ ist neben ihrer Ursache in menschlichen Fehlern vor allem auf deren hohe Bedeutung zurückzuführen. In dem Prozess „Wartung und Instandsetzung“ ist die Fehlerart 2 die kritischste Fehlerart. Werden z.B. bestimmte Komponenten im Wartungsvertrag nicht vereinbart, so ist die Wartung und Instandsetzung unvollständig.

Ausführungsplanung und Ausschreibung sind die kritischsten Prozesse der Lebenszyklusphase Planung zu finden. Die Bedeutung dieser Fehler liegt zwischen leichten Auswirkungen und äußerst schwerwiegenden Auswirkungen. Die Fehler in dieser Lebensphase sind auf menschliche Fehler zurückzuführen und deren Auftretenswahrscheinlichkeit ist mäßig bis gering. Wie bereits erwähnt sind weitere Kontrollen der Ausführungsplanung nicht vorgesehen, dennoch wird die Entdeckungswahrscheinlichkeit dieser Fehler auf mäßig eingeschätzt. Letztendlich können Fehler, die in dieser Lebenszyklusphase auftreten und nicht entdeckt werden nur unter großem Aufwand in den folgenden Lebenszyklusphasen behoben werden.

**2.4.6 Kritischste Fehler der Lebenszyklusphase Planung**

Tab. 6 zeigt die 10 kritischsten Fehler der Lebenszyklusphase Planung. Vor allem in den Prozessen

Nr.	Prozess/Funktion/Systemkomponente	Fehlerart	B	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ
18	Ausführungsplanung	Fehler 3: Fehlerhafte Ausführungsplanung	8	Anzeigehalte nicht mit Straßenverkehrsbehörde abgestimmt	Abstimmung mit der Straßenverkehrsbehörde	4	-	5	160
17	Ausschreibung	Fehler 3: Fehlerhafte Ausschreibung	6	Schnittstellen nicht eindeutig beschrieben (Übergabe Bestandstechnik, Fernmeldekabel, usw.)	Standards für die Ausschreibung einführen	4	Prüfung der Ausschreibungsunterlagen	5	120
18	Ausführungsplanung	Fehler 3: Fehlerhafte Ausführungsplanung	8	Fehlerhafte Planung	Fachwissen	3	Freigabe der Ausführungsplanung	5	120
17	Ausschreibung	Fehler 3: Fehlerhafte Ausschreibung	6	Keine ausreichenden Anforderungen (z.B. bzgl. Bauarten, Schutzklassen, Korrosionsschutz) definiert	Standards für die Ausschreibung einführen	3	Prüfung der Ausschreibungsunterlagen	5	90
17	Ausschreibung	Fehler 2: Unvollständige Ausschreibung	4	Anforderungen ungenau definiert (z.B. Genauigkeit der Datenerfassung)	Unterlagen zur technischen Beschreibung erstellen	3	Inbetriebnahme	6	72
17	Ausschreibung	Fehler 3: Fehlerhafte Ausschreibung	6	Leistungsbeschreibung (LB + LV) fehlerhaft	Kontrollen einführen	3	Inbetriebnahme	4	72
17	Ausschreibung	Fehler 3: Fehlerhafte Ausschreibung	6	Keine Prüfzeugnisse für zertifizierbare Komponenten gefordert	Prüfzeugnisse fordern	3	Prüfung der vorgelegten Prüfzeugnisse	4	72
18	Ausführungsplanung	Fehler 3: Fehlerhafte Ausführungsplanung	8	Fehlerhafte Zuleitungslänge Induktionsschleifen	Herstellervorgaben beachten	2	Freigabe der Ausführungsplanung	4	64
19	Vorentwurfsplanung	Fehler 2: Unvollständige Vorentwurfsplanung	2	Inhalte nicht mit Straßenverkehrsbehörde abgestimmt	Straßenverkehrsbehörde informieren	4	-	8	64
18	Ausführungsplanung	Fehler 3: Fehlerhafte Ausführungsplanung	8	Messquerschnitte falsch positioniert	Richtlinien beachten	3	Freigabe der Ausführungsplanung	2	48

Tab. 6: TOP 10 Fehler in der Lebenszyklusphase Planung

Nr.	Prozess/Funktion/Systemkomponente	Fehlerart	B	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ
15	Konfiguration	Fehler 3: Fehlerhafte Konfiguration	8	Ungeeignete Anbringung/Kalibrierung von Detektoreinheiten	sachgemäße Kalibrierung	3	Probebetrieb	6	144
15	Konfiguration	Fehler 3: Fehlerhafte Konfiguration	8	Fehlerhafte Parametrierung	TLS2012/MARZ anwenden	4	Werktest	4	128
14	Bauüberwachung	Fehler 3: Fehlerhafte Bauüberwachung	4	Mangelnde Erfahrung des Personals	Personalmanagement	4	Inbetriebnahme	6	96
13	Inbetriebnahme	Fehler 2: Unvollständige Inbetriebnahme	8	Unvollständiger Blindbetrieb	Einsatz von erfahrener Personal	2	Prüfung der vorgelegten Testprotokolle	4	64
13	Inbetriebnahme	Fehler 2: Unvollständige Inbetriebnahme	8	Unvollständiger Probebetrieb	Einsatz von erfahrener Personal	2	Prüfung der vorgelegten Testprotokolle	4	64
13	Inbetriebnahme	Fehler 2: Unvollständige Inbetriebnahme	8	Unvollständiger Kommunikationstest	Einsatz von erfahrener Personal	2	Prüfung der vorgelegten Testprotokolle	4	64
15	Konfiguration	Fehler 3: Fehlerhafte Konfiguration	8	Fehlerhafte Algorithmen	TLS2012/MARZ anwenden	2	Werktest	4	64
15	Konfiguration	Fehler 3: Fehlerhafte Konfiguration	8	Fehlerhaftes Zusammenwirken der verschiedenen Vertragspartner	Vorherige Absprachen, bessere Koordination	2	Werktest	4	64
15	Konfiguration	Fehler 2: Unvollständige Konfiguration	8	Unvollständige Zusammensetzung der Softwareeinheiten	MARZ anwenden	3	Werktest	2	48
15	Konfiguration	Fehler 3: Fehlerhafte Konfiguration	8	Menschliche Fehler bei der Konfiguration	-	3	Werktest	2	48

Tab. 7: TOP 10 Fehler in der Lebenszyklusphase Bau

Nr.	Prozess/Funktion/Systemkomponente	Fehlerart	B	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ
21	Wartung & Instandsetzung	Fehler 2: Unvollständige Wartung & Instandsetzung	8	fehlende/unzureichende Erfassung von Störungen/Problemen (z. B. durch unzureichende Qualitätssicherung)	Betriebskonzept	4	-	6	192
21	Wartung & Instandsetzung	Fehler 2: Unvollständige Wartung & Instandsetzung	8	unzureichende Qualifizierung seitens der Betreiber (eigene Wartung/Instandsetzung, Überwachung Leistungen aus Wartungsvertrag)	Schulungen	4	-	4	128
21	Wartung & Instandsetzung	Fehler 3: Fehlerhafte Wartung & Instandsetzung	5	unzureichende Qualifizierung seitens der Betreiber (eigene Wartung/Instandsetzung, Überwachung Leistungen aus Wartungsvertrag)	Schulungen	4	-	4	80
21	Wartung & Instandsetzung	Fehler 2: Unvollständige Wartung & Instandsetzung	8	fehlende Ressourcen seitens der Betreiber (eigene Wartung/Instandsetzung, Überwachung Leistungen aus Wartungsvertrag)	Ressourcenplanung entsprechend Betriebskonzept	3	-	3	72
21	Wartung & Instandsetzung	Fehler 3: Fehlerhafte Wartung & Instandsetzung	5	fehlende Ressourcen seitens der Betreiber (eigene Wartung/Instandsetzung, Überwachung Leistungen aus Wartungsvertrag)	Ressourcenplanung entsprechend Betriebskonzept	3	-	3	45
21	Wartung & Instandsetzung	Fehler 1: Keine Wartung & Instandsetzung	10	Wartungs- und Instandsetzungsvertrag ohne Anschluss ausgelaufen	Vertragsmanagement	4	-	1	40
21	Wartung & Instandsetzung	Fehler 2: Unvollständige Wartung & Instandsetzung	8	Komponente UZ nicht vereinbart	Standard-Wartungsvertrag verwenden	2	-	1	16
21	Wartung & Instandsetzung	Fehler 2: Unvollständige Wartung & Instandsetzung	8	Komponente VRZ nicht vereinbart	Standard-Wartungsvertrag verwenden	2	-	1	16
21	Wartung & Instandsetzung	Fehler 1: Keine Wartung & Instandsetzung	10	Kein Wartungs- und Instandsetzungsvertrag abgeschlossen	Wartungs- und Instandhaltungsvertrag abschließen	1	-	1	10
21	Wartung & Instandsetzung	Fehler 3: Fehlerhafte Wartung & Instandsetzung	5	Keine regelmäßigen / zu seltenen Wartungen vereinbart	Wartungs- und Instandhaltungsvertrag abschließen	2	-	1	10

Tab. 8: TOP 10 Fehler in der Wartung und Instandsetzung

### 2.4.7 Kritischste Fehler der Lebenszyklusphase Bau

Die in der Tab. 7 aufgeführten kritischsten Fehler der Lebenszyklusphase Bau sind vor allem in den Prozessen Konfiguration Hardware und Software und in der Inbetriebnahme identifiziert worden.

Fehler in der Lebenszyklusphase „Bau“ sind von hoher Bedeutung, haben also schwerwiegende Auswirkungen auf das Top Event. Die Fehlerursachen in dieser Lebensphase einer SBA sind auf menschliche Fehler zurückzuführen. Es zeigt sich, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache gering ist und die Entdeckungswahrscheinlichkeit bei mäßig bis sehr hoch liegt. Dies ist auf der Tatsache zu begründen, dass für die Prozesse Prüfungen und Tests vorgesehen sind. Wie schon bei der Lebensphase „Planung“ erwähnt, sind Fehler dieser Lebensphase nur unter großem Aufwand in der folgenden Lebensphase zu beheben.

### 2.4.8 Kritischste Fehler der Wartung und Instandsetzung

Die durchschnittliche RPZ der Fehler der „Wartung und Instandsetzung“ liegt auf einem wenig höheren Niveau als die in den Lebenszyklusphasen „Bau“ und „Betrieb“. Entsprechende Fehler haben insbesondere eine hohe Bedeutung im Sinne ihrer Auswirkungen auf das Top Event. Zugleich haben sie eine geringe bis mäßige Auftretenswahrscheinlichkeit, nicht zuletzt durch standardisierte Wartungsverträge oder durch Schulungen des Personals. Bezüglich der Entdeckungswahrscheinlichkeiten ergibt sich in der Regel ein sehr hoher bis mäßiger Wert.

### 2.4.9 Sensitivitätsanalyse

Die Risikoprioritätszahl wird aus den Kenngrößen Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit berechnet. Wird nur die RPZ betrachtet, so kann keine umfassende Aussage zu den einzelnen Kenngrößen gemacht werden. Wie bereits erwähnt ist die Bedeutung B der maßgebliche Faktor. Jedoch erreichen auch Prozesse mit einer geringen Bedeutung und einem hohen A- und E-Wert eine hohe RPZ.

#### 2.4.9.1 Auftretenswahrscheinlichkeit

Durch die Sensitivitätsanalysen soll die Abhängigkeit der Risikoprioritätszahl von der Auftretenswahrscheinlichkeit untersucht werden. Die hierbei ermittelten Ergebnisse zeigen, welche Risiken sich durch eine minimale Reduzierung der Auftretenswahrscheinlichkeit vermindern lassen.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit gibt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Fehlerursache unter Betrachtung der Vermeidungsmaßnahme an. Wird die Auftretenswahrscheinlichkeit aller Fehler auf 1 gesetzt (vgl. Tab. 9), so werden die Prozesse nur noch anhand des B- und E-Werts verglichen. Durch die Reduzierung des A-Werts wird angenommen, dass durch eine Vermeidungsmaßnahme die Auftretenswahrscheinlichkeit verbessert wird. Dadurch werden die Fehlerarten identifiziert, die keine oder eine ungenügende Entdeckungsmaßnahme haben und die gleichzeitig eine hohe Bedeutung auf die Top Events aufweisen. Aus Tab. 9 wird ersichtlich, dass Fehler in den Prozessen „Datenaufbereitung“ und „Datenaustausch mit SSt“ eine sehr hohe Bedeutung in Bezug auf die Top Events aufweisen. Gleichzeitig ist die Wahrscheinlichkeit der Fehler-

entdeckung sehr gering. Somit liegt in diesen Prozessen ein hohes Potential der Risikominderung durch Optimierung der Vermeidungsmaßnahmen vor. Besonders hohes Potential der Risikominderung liegt auch in den Prozessen der manuellen

Eingaben durch das Personal vor, wobei die Optimierung der Schulungsmaßnahmen hier im Vordergrund steht.

Nr.	Prozess/Funktion/Systemkomponente	Fehlerart	B	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ
8	Datenaufbereitung	Fehler 3: Fehlerhafte Datenaufbereitung	10	nicht plausible Daten	-	1	nur manuell	10	100
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 3: Fehlerhafte Eingabe	10	Fehlende Qualifikation des Personals	Schulung des Personals	1	-	9	90
6	Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 1: Keine Eingabe	9	Versäumnis des Personals	Schulung des Personals	1	-	10	90
8	Datenaufbereitung	Fehler 3: Fehlerhafte Datenaufbereitung	10	Fehlerhafte Parameterwerte	Kontrollen/Konfiguration	1	Analyse PL-Fehler, Fehlermeldung VRZ	9	90
4	Datenaustausch mit SSL, VRZ, Bedienung -> kritischer	Fehler 3: Fehlerhafter Datenaustausch	9	Fehlerhafte Überprüfung der Nachrichtenpakete	Konfiguration sicherstellen	1	Fehler wird in der Unterzentrale erkannt	9	81
4	Datenaustausch mit SSL, VRZ, Bedienung -> kritischer	Fehler 3: Fehlerhafter Datenaustausch	9	Fehlerhafte Umsetzung des Nachrichtenpakets	Konfiguration sicherstellen	1	Fehler wird in der Unterzentrale erkannt	9	81
4	Datenaustausch mit SSL, VRZ, Bedienung -> kritischer	Fehler 3: Fehlerhafter Datenaustausch	9	OSI 2 - Übertragung fehlerhaft	Abnahmetests	1	Fehler wird in der Unterzentrale erkannt	9	81
6	Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 3: Fehlerhafte Eingabe	9	Fehlende Qualifikation des Personals	Schulung des Personals	1	-	9	81
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 1: Keine Eingabe	10	Fehlende Qualifikation des Personals	Schulung des Personals	1	-	8	80
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 1: Keine Eingabe	10	Fehlende/Verspätete Meldung	Schulung des Personals	1	-	8	80

Tab. 9: TOP-10 der Sensitivitätswerte in Bezug auf die Auftretenswahrscheinlichkeit

### 2.4.9.2 Entdeckungswahrscheinlichkeit

In dem FMEA-Formblatt werden Maßnahmen angegeben, welche die Wahrscheinlichkeit, dass Fehler entdeckt werden, erhöht. Besonders in der Lebenszyklusphase Betrieb existieren viele solche Maßnahmen. Würden keine Maßnahmen zur Entdeckung existieren, würden nur noch die Bedeutung und die Auftretenswahrscheinlichkeit von Relevanz sein. Um diese Fehler darzustellen, wird in allen Prozessen ein E = 1 eingesetzt. Somit wird untersucht, wie die Kritikalität durch eine minimale Veränderung der Entdeckungswahrscheinlichkeit reduziert werden kann. In Tab. 10 sind die kritischsten Fehler mit veränderten E-Werten, in der unteren die ursprünglichen kritischsten Fehler aufgeführt

Die kritischsten Fehler sind trotz der Änderung des E-Werts ausschließlich in der Lebenszyklusphase

Betrieb identifiziert worden. Im Vergleich zu den ursprünglichen kritischen Fehlern werden nun Fehler der Prozesse Verkehrsdatenerfassung „Induktionsschleife“, der „Anzeige“ und der „Durchführung Steuerungsalgorithmen“ betrachtet. Die Auftretenswahrscheinlichkeit einer defekten Schleißenfuge ist sehr hoch, trotz vorgesehenen Wartungsmaßnahmen. Durch die Einführung einer geeigneteren Vermeidungsmaßnahme wie z.B. regelmäßige Kontrollen vor Ort, kann die Auftretenswahrscheinlichkeit gesenkt werden. Durch eine defekte oder fehlerhafte Helligkeitssteuerung ist die Anzeige fehlerhaft. Dieser Fehler hat eine mäßige Auftretenswahrscheinlichkeit und kann durch regelmäßige Wartung vermieden werden. Die Fehlerursache „nicht angepasste Grenzwerte“ des Prozesses „Durchführung Steuerungsalgorithmen“ tritt mäßig auf.

Nr.	Prozess/Funktion/Systemkomponente	Fehlerart	B	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ
8	Datenaufbereitung	Fehler 3: Fehlerhafte Datenaufbereitung	10	nicht plausible Daten	-	10	nur manuell	1	100
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 1: Keine Eingabe	10	Fehlende/Verspätete Meldung	Schulung des Personals	9	-	1	90
11	Verkehrsdatenerfassung "Induktionsschleife"	Fehler 1: Keine Datenerfassung	8	Defekte Schleißenfuge	Wartungsmaßnahmen	8	Fehlermeldung an Streckenstation	1	64
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 1: Keine Eingabe	10	Bedienung aufgrund eines Softwarefehlers nicht möglich (UZ- bzw. VRZ-Software)	Wartung	6	Fehlerentdeckung durch das Personal in Verkehrsrechnerzentrale	1	60
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 3: Fehlerhafte Eingabe	10	Unspezifische Meldung (z.B. zu ungenauer räumliche Abgrenzung des Gefahrenbereichs)	Schulung des Personals	6	Verifikation per Video	1	60
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 3: Fehlerhafte Eingabe	10	Missverständnisse bei der Entgegennahme der Meldung	Schulung des Personals	6	Verifikation per Video	1	60
8	Datenaufbereitung	Fehler 3: Fehlerhafte Datenaufbereitung	10	Fehlerhafte Parameterwerte	Kontrollen/Konfiguration	6	Analyse PL-Fehler, Fehlermeldung VRZ	1	60
1	Anzeige (Hardware)	Fehler 3: Fehlerhafte Anzeige	10	Helligkeitssteuerung defekt/fehlerhaft	Wartung	5	manuelle Kontrolle (Operatoren müssen tag und nacht Helligkeitssteuerung kontrollieren); Plausibilitätsprüfung	1	50
4	Durchführung Steuerungsalgorithmen	Fehler 3: Fehlerhafte Durchführung Steuerungsalgorithmen	10	Nicht angepasste Grenzwerte (z.B. Nachfahren von Grenzwerten bei Veränderung wichtiger Eigenschaften des Verkehrsprozesses nicht erfolgt)	MARZ heranziehen/VRAD	5	Visuelle Kontrolle der Schaltungen durch Operatoren	1	50
6	manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	Fehler 1: Keine Eingabe	10	Bedienung aufgrund einer Störung nicht möglich	Wartung	5	Fehlerentdeckung durch das Personal in Verkehrsrechnerzentrale	1	50

Tab. 10: TOP-10 der Sensitivitätswerte in Bezug auf die Entdeckungswahrscheinlichkeit

## 2.5 Auswahl der zu untersuchenden Evidenzfälle für das Qualitätsmodell

Zur weiteren Analyse des Qualitätsmodells in Kapitel 3 sollen auf Grundlage der FMEA-Analyse Evidenzfälle ausgewählt werden. Vorgesehen war zunächst, die zehn kritischsten Fehler von SBA (s. Kapitel 2.4.2) dafür heranzuziehen. Dies erweist sich jedoch als nicht optimal, da die im Rahmen der FMEA gefundenen Top 10 alle in der Lebenszyklusphase „Betrieb“ auftreten und darin nur drei von insgesamt 24 unterschiedlichen Prozessen in der Betriebsphase adressiert werden.

Zusätzlich ist es für die Evaluierung sinnvoll, alle Fehlerarten (keine/unvollständige/fehlerhafte Ausführung der Funktion) abzudecken. Die gefundenen Top 10 weisen keinen Fehler der Art 2 (unvollständige Ausführung) aus. Daher wurden in einem Auswahlprozess letztlich 11 Fehler mit einer möglichst breiten Abdeckung der Lebenszyklusphasen, Prozesse und Fehlerarten unter Beachtung der Fehlerrelevanz (anhand der Risikoprioritätszahl) für die weitere Analyse bestimmt.

Es ergibt sich somit die folgende Zusammenstellung von Evidenzfällen, die für die Evaluierung des Qualitätsmodells in Kapitel 3.5 betrachtet werden sollen (s. Tab. 11). Die Spalte „Rang“ gibt dabei Auskunft darüber, wie schwerwiegend der Fehler entsprechend der RPZ eingeschätzt wurde. Rang 1 entspricht somit dem höchstplatzierten Fehler von insgesamt 279 bewerteten Fehlern. Der niedrigste in der Evaluierung betrachtete Fehler mit dem Rang 69 befindet sich somit noch unter den ersten 25% der kritischsten Fehler.

Nr.	Lebenszyklusphase	Prozess	Fehlerart	Fehlerursache	RPZ	Rang
1	Betrieb	Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	1	Fehlende/verspätete Meldung	720	2
2	Betrieb	Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse	1	Versäumnis des Personals	360	9
3	Betrieb	Betriebsüberwachung	3	Fehlerhafte Ergänzungen des Wartungsbuches durch einen Bediener	300	13
4	Betrieb	Protokolle und Auswertungen	3	Fehler in der Schnittstellenabstimmung/Abgleich	245	19
5	Betrieb	Datenaufbereitung	1	Störung Software	240	23
6	Betrieb	Konfiguration, Parametrierung und Optimierung	3	Fehlerhafte Festlegung Parameter	225	25
7	Betrieb	Erfassung Sichtweiten	3	Verschmutzung des Sensors	210	29
8	Planung	Ausführungsplanung	3	Anzeigehalte nicht mit Straßenverkehrsbehörde abgestimmt	160	47
9	Bau	Konfiguration Hardware & Software	3	Ungeeignete Anbringung / Kalibrierung von Detektoreinheiten	144	57
10	Betrieb	Wartung & Instandsetzung	2	Unzureichende Qualifizierung seitens der Betreiber	128	69
11	Betrieb	Verkehrsdatenerfassung	1	Defekte Schleifenfuge	128	69

Tab. 11: Auswahl der Evidenzfälle für das Qualitätsmodell

### 3 Qualitätsmodell

Im Rahmen der durchgeführten FMEA (s. Kapitel 2) wurden auf Grundlage der ermittelten und sorgfältig interpretierten Risikoprioritätszahlen jeweils mit Blick auf das Top Event (d.h. die Wirkung bzw. Funktion der Anlage) a-priori wesentliche Fehlerquellen im System einer Standard-SBA identifiziert. Nicht berücksichtigt werden dabei die detaillierten Abhängigkeiten der Prozesse untereinander im Sinne der Fehlerfortpflanzung. Genau diese Information ist jedoch wichtig, um bei konkreten Defiziten der Anlage eine systematische Diagnose der Fehlerursachen vorzunehmen, die im Sinne der Lebenszyklusbetrachtung im vorliegenden Forschungsprojekt neben technischen Störungen auch Planungsfehler o.ä. mit in die Überlegung einbezieht.

Ziel des im weiteren Verlauf beschriebenen Qualitätsmodells ist es, mit Hilfe einer prozeduralen Beschreibung und Quantifizierung der Abhängigkeiten der Prozesse einer SBA diese Lücke zu schließen. Die mathematische Grundlage hierzu bildet die Theorie Bayes'scher Netze, die in Kapitel 3.1.2 kurz erläutert wird. Der strukturelle Aufbau des Qualitätsmodells wird daraufhin in Kapitel 3.2 diskutiert.

Zur vollständigen Kalibrierung des Qualitätsmodells werden zusätzlich zu den bereits im Rahmen der FMEA geschätzten Werten (insbesondere die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Fehlerursachen) noch einige weitere Parameter benötigt. Welche dies sind und wie sie im Modell verwendet werden, wird in den Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.3 beschrieben. Kapitel 3.3.4 widmet sich der prototypischen Implementierung des Qualitätsmodells unter Verwendung spezieller, für akademische Forschungszwecke frei verfügbarer Softwaretools.

Zusätzlich angewendete Schritte zur Optimierung des Modells sowie die Ergebnisse einer systematischen Evaluierung anhand ausgewählter Beispiele (vgl. Kapitel 2.5) werden abschließend in den Kapiteln 3.4 und 3.5 erläutert.

#### 3.1 Grundlagen

Das Thema Qualitätsmanagement ist sowohl in der Theorie als auch in der Praxis eng verknüpft mit einer prozessbasierten Sicht auf die betrachteten, technischen und/oder organisatorischen Systeme.

Dem liegt der Gedanke zugrunde, dass gute Rahmenbedingungen (Strukturqualität) gute Prozesse fördern (Prozessqualität), die wiederum für gute Ergebnisse (Ergebnisqualität) von hoher Bedeutung sind. Dabei wird darauf hingewiesen, dass für ein erfolgreiches Qualitätsmanagement genau das Wissen über die diesbezüglichen Abhängigkeiten eine wichtige Rolle spielt (vgl. DONABEDIAN, 1988). Zugleich ist die vollständige und korrekte Erfassung solcher Abhängigkeiten einschließlich deren Abbildung in geeigneten qualitativen und quantitativen Modellen allerdings äußerst schwierig.

GLOWALLA/SUNYAEV (2014) diskutieren in diesem Zusammenhang mit Bezug auf das Qualitätsmanagement von Daten verschiedene formale „Sprachen“ zur Modellierung. Auch BARNAGHI ET AL. (2015) betonen die Wichtigkeit einer prozeduralen Qualitätsbetrachtung („provenance“) für Daten.

##### 3.1.1 Existierende Ansätze

Die vielleicht bekanntesten Arbeiten zur prozeduralen Qualitätsmodellierung im Bereich des Straßen- und Verkehrswesens in Deutschland sind aktuell die von Thomas Wiltchko. Der Autor entwickelt und demonstriert hier das Konzept für ein (graphisches) Rechenmodell auf Grundlage Bool'scher Operatoren, mit dem sehr detailliert die Fehlerfortpflanzung in informationsverarbeitenden Systemen über mehrere Prozesse hinweg beschrieben werden kann (s. WILTCHKO, 2004; WILTCHKO/KAUFMANN, 2005),

Mit einem probabilistischen Qualitätsverständnis (vgl. NEUMANN, 2014; NEUMANN ET AL., 2014) und der Idee einer graphischen Modellierung weisen die genannten Arbeiten dabei bereits einige Parallelen zu dem im vorliegenden Forschungsprojekt verwendeten Ansatz auf (vgl. Kapitel 3.1.2). Die benutzten Analysetechniken erlauben allerdings keine direkte Diagnoserechnung und sind aufgrund der Formalisierung mittels deterministischer Operatoren in der Regel auch nur für sehr präzise beschreibbare Systeme und Prozesse geeignet (vgl. LAUFER, 2011, S. 48).

Da eine solche präzise Beschreibung aus Gründen der Komplexität in der Praxis oft nicht möglich ist, versucht LAUFER (2011) auf Grundlage der Arbeiten von WILTCHKO (2004), das fehlende Wissen stattdessen durch Methoden aus dem Bereich der

künstlichen Intelligenz aus vorhandenen Daten direkt zu schätzen. Die dabei von ihm selbstlernend erzeugten neuronalen Netze haben jedoch den Nachteil, dass sie wesentlich von der Anzahl und Qualität der verfügbaren Trainingsdatensätze abhängen. Ihr Anwendungsbereich beschränkt sich daher im Wesentlichen auf datentechnisch gut erfasste Systeme. Zudem haben neuronale Netze hinsichtlich der darin abgebildeten Wirkungszusammenhänge oftmals den Charakter einer „Black Box“ und sind demnach inhaltlich wenig transparent und im Detail kaum überprüfbar.

LAUFER (2011, S. 52) weist aber auch auf die Möglichkeit der prozeduralen Qualitätsmodellierung unter Verwendung der Ergebnisse einer FMEA hin, wie sie in dieser Kombination im vorliegenden Forschungsprojekt realisiert ist.

Von der grundsätzlichen Notwendigkeit einer prozessübergreifenden Qualitätsbetrachtung im Verkehrsmanagement mit Qualitätsmessungen an allen Prozessschnittstellen sprechen im Übrigen z.B. SEELEN/VRANCKEN (2013). Allerdings beschreiben die Autoren kein konkretes Verfahren zur Modellierung der Fehlerfortpflanzung. Ein generischer Ansatz zur Betrachtung der qualitätsbeeinflussenden Wirkung informationsverarbeitender Systeme findet sich indes in TODORAN ET AL. (2013).

Zuletzt sei noch auf Konzepte wie „Six Sigma“ oder „Total Quality Management“ (TQM) hingewiesen (vgl. LAUFER, 2011). Es handelt sich dabei jedoch weniger um Ansätze zur prozeduralen Qualitätsmodellierung im Sinne des vorliegenden Forschungsprojekts, sondern vielmehr um grundsätzliche Steuerungsstrategien eines organisatorisch verankerten, umfassenden Qualitätsmanagements.

### 3.1.2 Bayes'sche Netze

Ähnlich wie bei LAUFER (2011) stammt auch die Theorie Bayes'scher Netze ursprünglich aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz. Entsprechende Modelle werden dort z.B. zur Abbildung menschlicher Entscheidungsprozesse verwendet (vgl. KOLLER/FRIEDMAN, 2009). Bayes'sche Netze eignen sich aber auch hervorragend für Diagnoseanwendungen bei medizinischen oder technischen Fragestellungen (vgl. HECKERMAN ET AL., 1992; HECKERMAN/NATHWANI, 1992; KRIEGER, 2011).

Dabei sind sie aufgrund ihrer relativ intuitiven, graphischen Darstellung im Gegensatz zu anderen Konzepten (z.B. neuronale Netze) sehr gut interpretierbar und verständlich, was zum einen die Modellbildung als auch die spätere Verwendung als Diagnosewerkzeug erleichtert. Darüber hinaus ermöglichen sie – anders als z.B. das Rechenmodell von WILTSCSKO (2004) – entsprechend ihrer rein auf Wahrscheinlichkeiten basierenden, statistischen Natur auch bei unscharf oder nur grob beschriebenen Prozessen/Komponenten eine angemessene Modellierung.

Das Grundgerüst eines jeden Bayes'schen Netzes ist ein sogenannter gerichteter, azyklischer Graph (vgl. Bild 25). Die Netzknoten ( $X_i$ ) repräsentieren hierbei die als Zufallsvariablen aufgefassten Komponenten/Prozesse des zu modellierenden Systems mit jeweils zwei oder mehr beliebig definierbaren, möglichen Zuständen. Jeder Zustand ist dabei in Abhängigkeit von den Zuständen der anderen Knoten im System unterschiedlich wahrscheinlich. Die (gerichteten) Kanten des Netzes bilden ferner die statistischen (i.d.R. kausalen) Abhängigkeiten der Knoten untereinander ab.

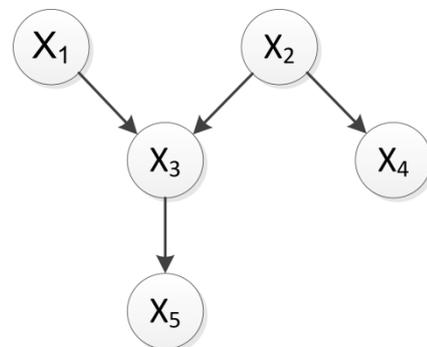


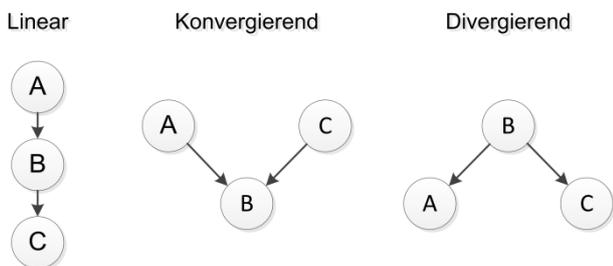
Bild 25: Beispielstruktur eines Bayes'schen Netzes

Bezogen auf die im vorliegenden Forschungsprojekt betrachtete Standard-SBA werden beispielsweise die im Rahmen der FMEA bewerteten Fehlerursachen als jeweils ein Netzknoten mit den beiden möglichen Zuständen „Fehlerursache liegt vor“ und „Fehlerursache liegt nicht vor“ modelliert. Weitere Knoten existieren für die einzelnen Prozesse des Prozessmodells aus Anhang 1 mit den vier Zuständen/Fehlerarten aus Kapitel 2.3.5 sowie für die Top Events (Wirkungsknoten). Zusätzliche Knoten für die in der FMEA bewerteten Entdeckungsmaßnahmen der einzelnen Fehlerursachen können bei Bedarf ebenfalls in das zu entwickelnde Qualitätsmodell aufgenommen werden (vgl. Kapitel 3.2.2).

Das Besondere an Bayes'schen Netzen ist nun, dass sicher bekannte Zustände für einzelne Knoten im Modell – man spricht dann von Evidenzen – genutzt werden können, um im Rahmen sogenannter Inferenz für alle anderen Knoten neue (bedingte) Wahrscheinlichkeitsverteilungen (d.h. entsprechende Auftretenswahrscheinlichkeiten für deren Zustände) zu berechnen, die genau das Zusatzwissen über die bekannten Zustände im System berücksichtigen. In diesem Sinne lassen sich mit Bayes'schen Netzen z.B. die Auswirkungen des Zustandes eines Knotens auf alle Folgeknoten statistisch quantifizieren. Umgekehrt lassen sich wahrscheinliche Ursachen für beobachtete Zustände bei nachgelagerten Knoten identifizieren. Dasselbe Modell kann somit sowohl zur Berechnung der Fehlerfortpflanzung als auch zur Fehlerdiagnose eingesetzt werden, je nachdem, ob man mit den Evidenzen „oben“ oder „unten“ ansetzt. Die Graphenstruktur eines Bayes'schen Netzes kann ferner so interpretiert werden, dass Informationen über den Zustand einzelner Knoten immer entlang der Netzkannten fließen (wobei die Orientierung der Kanten in diesem Fall zunächst unerheblich ist).

Ob sich zwei Knoten  $X_i$  und  $X_j$  unter Berücksichtigung gegebener Evidenzen für die Knotenmenge  $E$  hierbei gegenseitig beeinflussen, hängt davon ab, ob  $X_i$  und  $X_j$  „d-separiert“ sind oder nicht. Zur Erklärung des Begriffs der d-Separation beachte man, dass es in gerichteten Graphen für jeden Knoten innerhalb eines (nicht notwendig gerichteten) Pfades drei grundsätzliche Arten gibt, wie dieser innerhalb des Pfades mit seinen beiden Nachbarknoten verknüpft sein kann (vgl. Bild 26):

- Linear
- Konvergierend
- Divergierend



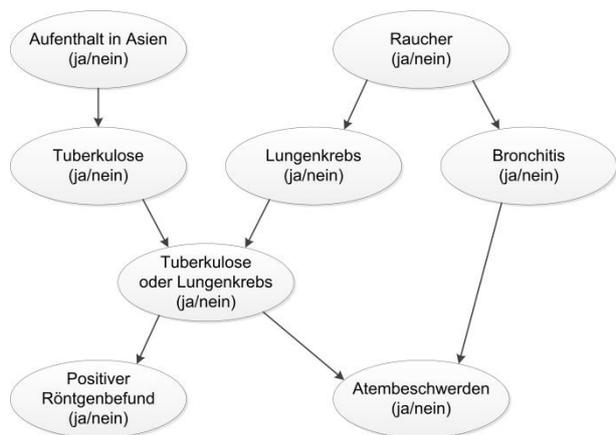
**Bild 26:** Verknüpfungsarten in Bayes'schen Netzen

Ein Pfad zwischen den Knoten  $X_i$  und  $X_j$  heißt dann „d-verbindend“ gegeben  $E$ , falls jeder *innere* Knoten  $X_k$  auf diesem Pfad entweder

1. linear oder divergierend ist und nicht Element der Menge  $E$  ist oder
2. konvergierend ist und gleichzeitig  $X_k$  oder irgendein Nachfolgeknoten von  $X_k$  (entsprechend der gerichteten Kanten im Modell) Element der Menge  $E$  ist.

Die Knoten  $X_i$  und  $X_j$  heißen „d-separiert“, falls es keinen d-verbindenden Pfad zwischen  $X_i$  und  $X_j$  gegeben  $E$  gibt (vgl. CHARNIAK, 1991). Die inhaltliche Bedeutung dieser Definition erschließt sich am besten an einem Beispiel (vgl. LAURITZEN/SPIEGELHALTER, 1988):

Gegeben sei das in Bild 27 dargestellte Bayes'sche Netz mit ausschließlich binären Knoten. Beschrieben ist dort ein hypothetischer Zusammenhang zwischen der Wahrscheinlichkeit, dass eine gegebene Person eine bestimmte Lungenerkrankung (Tuberkulose, Lungenkrebs oder Bronchitis) hat, und der Wahrscheinlichkeit bestimmter Symptome (Atembeschwerden, positiver Röntgenbefund der Lunge). Darüber hinaus werden die beiden Einflussfaktoren „Die Person ist Raucher.“ und „Die Person kommt gerade von einem Asienaufenthalt zurück.“ berücksichtigt, indem diese a-priori die Auftretenswahrscheinlichkeit einzelner der betrachteten Erkrankungen erhöhen.



**Bild 27:** Hypothetisches Beispiel eines Bayes'schen Netzes zur medizinischen Diagnose (vgl. LAURITZEN/SPIEGELHALTER, 1988)

Sei im Folgenden beispielsweise lediglich bekannt, dass die betrachtete Person gerade aus Asien zurückgekehrt ist ( $E = \{„Aufenthalt in Asien“\}$ ). Dann

erhöht sich indirekt unter anderem die Wahrscheinlichkeit von Atembeschwerden, da sich u.a. auch die Wahrscheinlichkeit einer Tuberkulose erhöht (kausales Schlussfolgern). Der Zustand im Knoten „Aufenthalt in Asien“ beeinflusst demnach den Zustand im Knoten „Atembeschwerden“. Der Pfad „Aufenthalt in Asien → Tuberkulose → Tuberkulose oder Lungenkrebs → Atembeschwerden“ ist in diesem Fall d-verbindend. Man beachte, dass der alternative Pfad „Aufenthalt in Asien → Tuberkulose → Tuberkulose oder Lungenkrebs ← Lungenkrebs ← Raucher → Bronchitis → Atembeschwerden“ nicht d-verbindend ist. Insbesondere beeinflusst ein Aufenthalt in Asien a-priori auch nicht die Wahrscheinlichkeit einer Bronchitis oder die von Lungenkrebs.

Ist umgekehrt nur bekannt, dass die Person tatsächlich unter Atembeschwerden leidet ( $E = \{\text{„Atembeschwerden“}\}$ ), so ergibt sich folgendes Szenario: Wie es in diesem Fall vom Knoten „Atembeschwerden“ aus zu jedem der Knoten „Tuberkulose“, „Lungenkrebs“ und „Bronchitis“ einen d-verbindenden Pfad gibt, so ist klar, dass sich zunächst auch die Wahrscheinlichkeit aller drei modellierten Krankheitsbilder erhöht, da jedes potentiell Auslöser für die beobachteten Symptome sein kann (diagnostisches Schlussfolgern). Dabei erhöht sich im Übrigen auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Person zuvor in Asien war, da dies ein möglicher Grund für die diagnostisch abgeleitete Erhöhung der Wahrscheinlichkeit einer Tuberkulose ist. Der Pfad „Atembeschwerden ← Tuberkulose oder Lungenkrebs ← Tuberkulose ← Aufenthalt in Asien“ mit ausschließlich linearen, inneren Knoten, die nicht Element der Menge E sind, ist entsprechend d-verbindend.

Anders verhält es sich, wenn zusätzlich bekannt ist, dass eine Tuberkulose z.B. ausgeschlossen werden kann ( $E = \{\text{„Atembeschwerden“}, \text{„Tuberkulose“}\}$ ). Der Knoten „Tuberkulose“ blockt in diesem Fall entsprechend der Definition von d-Separation den Informationsfluss hin zum Knoten „Aufenthalt in Asien“. Dies ist insofern auch plausibel, als dass natürlich nicht der Asienaufenthalt an sich für die Atembeschwerden verantwortlich ist, sondern lediglich eine dadurch möglicherweise induzierte Tuberkulose. Da diese im konkreten Fall jedoch per Evi-

denz ausgeschlossen ist, gibt es keinen Zusammenhang zwischen einem möglichen Asienaufenthalt und den beobachteten Krankheitssymptomen.

Zu beachten ist allerdings, dass der Ausschluss von Tuberkulose bei vorliegenden Atembeschwerden unter anderem z.B. die Wahrscheinlichkeit von Lungenkrebs sowie die einer Bronchitis erhöht (interkausales Schlussfolgern). Auch dies ist plausibel, da mit dem Wegfall von Tuberkulose als Auslöser der Symptome andere Ursachen – in diesem Fall Lungenkrebs oder Bronchitis – vorliegen müssen. Eine bestätigte Tuberkulose hingegen würde die Wahrscheinlichkeit von Lungenkrebs oder Bronchitis mit der gleichen Begründung reduzieren. In der englischsprachigen Fachliteratur spricht man in diesem Zusammenhang auch von „Explaining away“, wenn das Wissen über einzelne Ursachen in einem Bayes’schen Netz bei einem bekannten mittelbaren oder unmittelbaren Effekt die Wahrscheinlichkeit anderer Ursachen für denselben Effekt verringert, d.h. die anderen Ursachen gewissermaßen „weg erklärt“ (vgl. KOLLER/FRIEDMAN, 2009).

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass im konkreten Beispiel der Knoten „Atembeschwerden“ je nach betrachtetem Pfad als konvergierender Knoten (Fall A) bzw. als Nachfolger des konvergierenden Knotens „Tuberkulose oder Lungenkrebs“ (Fall B) ein Element der Menge E ist, ergibt sich in Übereinstimmung mit dem Konzept der d-Separation schließlich, dass in dieser Situation sogar alle vier relevanten Pfade d-verbindend sind:

- „Tuberkulose → Tuberkulose oder Lungenkrebs ← Lungenkrebs“ (Fall B)
- „Tuberkulose → Tuberkulose oder Lungenkrebs → Atembeschwerden ← Bronchitis ← Raucher → Lungenkrebs“ (Fall A)
- „Tuberkulose → Tuberkulose oder Lungenkrebs → Atembeschwerden ← Bronchitis“ (Fall A)
- „Tuberkulose → Tuberkulose oder Lungenkrebs ← Lungenkrebs ← Raucher → Bronchitis“ (Fall B)

Das gezeigte Beispiel demonstriert trotz seiner vermeintlichen Einfachheit, wie Bayes’sche Netze in der Lage sind, auch komplexe kausale Abhängigkeiten und Strukturen im Kontext der Fehlerfortpflanzung und Diagnose nachzubilden, indem sich

die Knotenzustände im Modell in sehr plausibler und nachvollziehbarer Art und Weise in ihren Auftretenswahrscheinlichkeiten gegenseitig beeinflussen.

Dabei ist natürlich anzugeben, wie stark und in welcher Form die einzelnen Knotenzustände voneinander abhängig sind. Die Quantifizierung erfolgt hierzu über sogenannte Wahrscheinlichkeitstabellen, die für jeden Knoten  $X_i$  die bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $P(X_i|Pa(X_i))$  auf der Menge der möglichen Zustände von  $X_i$  unter Berücksichtigung der Zustandskombinationen seiner Elternknoten angeben (vgl. Bild 28). Die Menge  $Pa(X_i)$  der Elternknoten von  $X_i$  enthält dabei alle Knoten im Modell, von denen aus eine Kante direkt auf  $X_i$  zeigt. Sie kann wie im Fall der Knoten „Aufenthalt in Asien“ und „Raucher“ aus Bild 27 unter Umständen auch leer sein. Bild 28 zeigt die (hypothetischen) Wahrscheinlichkeitstabellen für alle Knoten des gezeigten Beispiels.

Der entscheidende Punkt bei Bayes'schen Netzen ist nun, dass sich aus den genannten Wahrscheinlichkeitstabellen unter Berücksichtigung der im Netzwerk codierten Abhängigkeitsstrukturen die Verbundwahrscheinlichkeitsverteilung über alle Knoten  $X_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) des Modells berechnen lässt. Die dazugehörige Formel (Kettenregel für Bayes'sche Netze) lautet:

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i|Pa(X_i))$$

Die Verteilung  $P(X_1, \dots, X_n)$  repräsentiert dabei sozusagen das vollständige Wissen über die Auftretenswahrscheinlichkeiten jeder Kombination von Zuständen der Knoten  $X_1, \dots, X_n$ . Dies schließt über die entsprechenden Randverteilungen insbesondere vollständiges Wissen bezüglich der A-priori-Verteilungen  $P(X_i)$  aller Knoten  $X_i$  sowie bezüglich aller bedingten Wahrscheinlichkeiten der Form  $P(X_i|E)$  mit beliebigen nichtleeren Mengen  $E \subset \{X_1, \dots, X_n\} \setminus \{X_i\}$  an Evidenzknoten ein. Denn es gilt:

$$P(X_i|E) = \frac{P(X_i, E)}{P(E)}$$

wobei sich  $P(X_i, E)$  und  $P(E)$  ebenfalls jeweils unmittelbar als Randverteilung aus  $P(X_1, \dots, X_n)$  ergeben.

Aufenthalt in Asien	
Ja	Nein
1%	99%

Raucher	
Ja	Nein
50%	50%

Aufenthalt in Asien	Tuberkulose	
	Ja	Nein
Ja	5%	95%
Nein	1%	99%

Raucher	Lungenkrebs	
	Ja	Nein
Ja	10%	90%
Nein	1%	99%

Raucher	Bronchitis	
	Ja	Nein
Ja	60%	40%
Nein	30%	70%

Tuberkulose	Lungenkrebs	Tuberkulose oder Lungenkrebs	
		Ja	Nein
Ja	Ja	100%	0%
Ja	Nein	100%	0%
Nein	Ja	100%	0%
Nein	Nein	0%	100%

Tuberkulose oder Lungenkrebs	Positiver Röntgenbefund	
	Ja	Nein
Ja	98%	2%
Nein	5%	95%

Tuberkulose oder Lungenkrebs	Bronchitis	Atembeschwerden	
		Ja	Nein
Ja	Ja	90%	10%
Ja	Nein	70%	30%
Nein	Ja	80%	20%
Nein	Nein	10%	90%

**Bild 28:** Hypothetische (bedingte) Wahrscheinlichkeiten für das Beispiel aus Bild 27 (vgl. LAURITZEN/SPIEGELHALTER, 1988)

Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass bei der Berechnung solcher bedingten Wahrscheinlichkeiten in praktischen Anwendungen jedoch in der Regel nie die vollständige Verbundwahrscheinlichkeitsverteilung  $P(X_1, \dots, X_n)$  bestimmt wird. Stattdessen stehen für Bayes'sche Netze effiziente, sogenannte Inferenzalgorithmen zur Verfügung, die dasselbe Ergebnis in deutlich kürzerer Rechenzeit ermitteln. Wesentlich hierfür ist letztlich die Faktorisierung von  $P(X_1, \dots, X_n)$  gemäß der zuvor

genannten Kettenregel, welche gerade bei größeren Netzen eine sinnvolle Berechnung auf handelsüblichen PCs o.ä. überhaupt erst ermöglicht (vgl. KOLLER/FRIEDMAN, 2009).

Ein weiterer essentieller Vorteil der Faktorisierung ist ferner, dass sich dadurch die Anzahl an (zu kalibrierenden) Parametern, die zur vollständigen Beschreibung der Verbundwahrscheinlichkeitsverteilung  $P(X_1, \dots, X_n)$  benötigt werden, drastisch reduziert. Wächst sie bei einer unmittelbaren Festlegung der Wahrscheinlichkeiten  $P(X_1=x_1, \dots, X_n=x_n)$  aller Kombinationen von möglichen Zuständen  $x_1, \dots, x_n$  der Zufallsvariablen  $X_1, \dots, X_n$  noch exponentiell mit der Knotenanzahl  $n$ , so besteht unter Berücksichtigung der Kettenregel bei Bayes'schen Netzen im günstigsten Fall ein nur linearer Zusammenhang. Im Beispiel aus Bild 27 reduziert sich die Parameterzahl unter Berücksichtigung der üblichen Normierungsbedingung für Wahrscheinlichkeitsverteilungen von  $2^8 - 1 = 255$  auf gerade einmal 18 Werte (vgl. Bild 28).

Im Übrigen lässt sich oftmals durch zusätzliche Annahmen über sogenannte lokale, probabilistische Modelle (vgl. KOLLER/FRIEDMAN, 2009) eine weitere Verringerung der Anzahl explizit zu kalibrierender Parameter erreichen (vgl. Kapitel 3.3.3). All dies macht Bayes'sche Netze zu einem mächtigen, mathematischen Konzept zur probabilistischen Beschreibung komplexer Systeme.

### 3.2 Aufbau des Qualitätsmodells

Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts ist u.a. die systematische Analyse des Einflusses von Fehlern im Lebenszyklus einer (Standard-)SBA auf deren verkehrliche Wirksamkeit in Form eines mathematischen Qualitätsmodells, welches sowohl zur Fehlerfortpflanzungs- als auch zur Diagnoserechnung verwendet werden kann. Unter Berücksichtigung der Ausführungen des Kapitels 3.1 wird hierzu im Folgenden der probabilistische Ansatz eines Bayes'schen Netzes gewählt. Im ersten Schritt ist somit die topologische Struktur des Modells zu erarbeiten, welche in den folgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben wird.

#### 3.2.1 Funktionsnetz

Auftretende Fehler in den Prozessen einer SBA (vgl. Prozessmodell in Anhang 1) können neben der

Beeinflussung der Funktion, in der sie ausgelöst werden, auch Auswirkungen auf andere Prozesse und Funktionen haben. Bild 29 zeigt exemplarisch den Prozess der Wirksamkeitsschätzung. Ausgangspunkt als betrachtete Fehlerart ist dabei die Situation „Keine Wirksamkeitsschätzung“ (s. roter Pfeil). Als zugehörige Fehlerursache gilt der Fall „Keine Datengrundlage“ (links). Ferner wirkt sich die betrachtete Fehlerart in der Wirksamkeitsschätzung – in ggf. unterschiedlicher Form – z.B. auf den Prozess „Vorentwurfsplanung“ aus. Mögliche (i.d.R. unterschiedlich wahrscheinliche) Fehlerfolgen sind in diesem hypothetischen Beispiel „Keine Vorentwurfsplanung“, „Unvollständige Vorentwurfsplanung“ und „Fehlerhafte Vorentwurfsplanung“ (vgl. Bild 29).

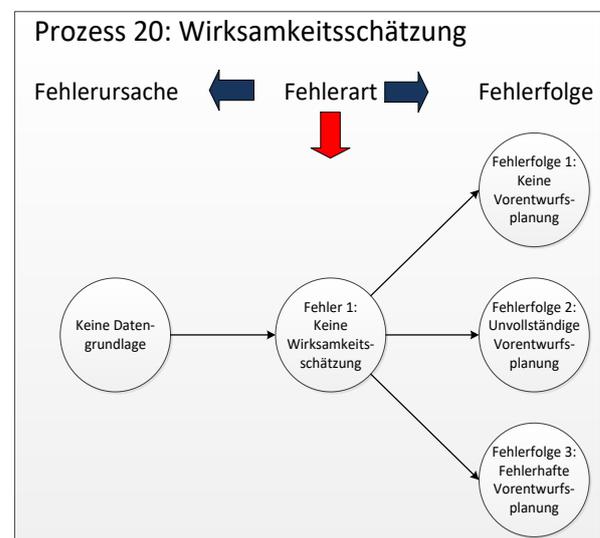
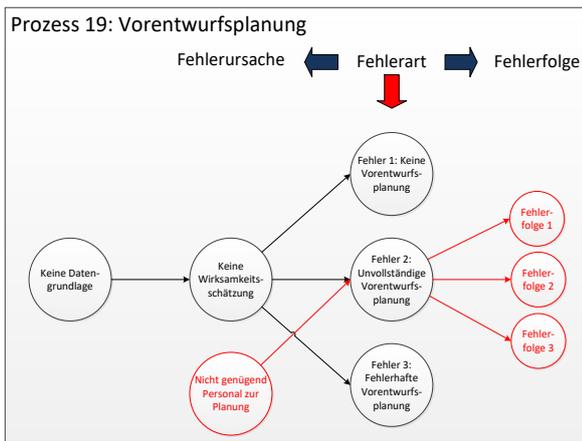
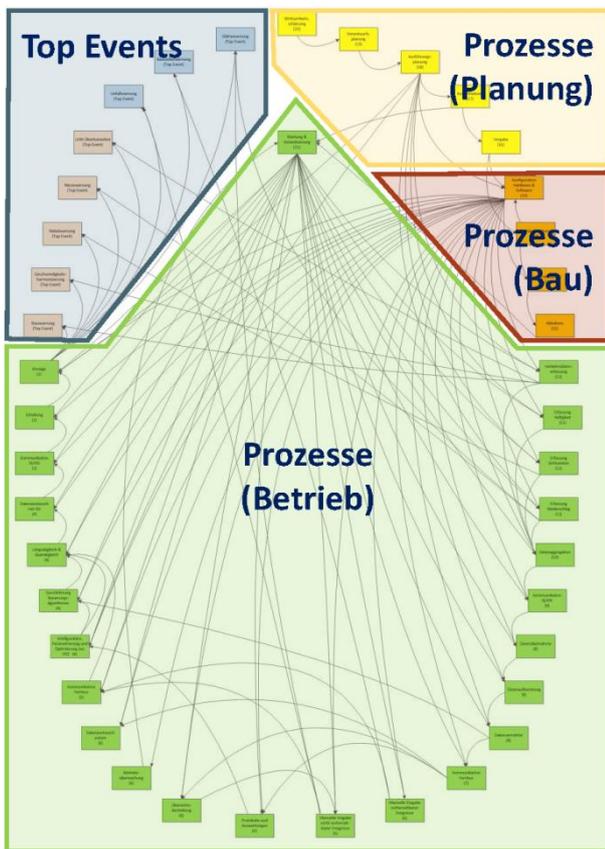


Bild 29: Fehlerfortpflanzung im Ausgangsprozess

Wird nun der nächste Prozess, auf den sich die Fehlerfolgen des Prozesses Wirksamkeitsschätzung beziehen, betrachtet (s. Bild 30), so rückt die Fehlerart des ursprünglichen Prozesses nach links und wird gewissermaßen zur Fehlerursache für die auftretenden Fehlerarten in der Vorentwurfsplanung. Diese wiederum entstehen direkt aus den ursprünglichen Fehlerfolgen aus Bild 29. Da sich also die ganze Kette in gleicher Weise verschiebt, wird jeweils aus der Fehlerart des vorherigen Prozesses die Fehlerursache des aktuellen Prozesses und es entstehen neue Fehlerfolgen, die Auswirkungen auf nachfolgende Prozesse haben. In jedem Prozess können dabei zudem neue „lokale“ Fehlerursachen hinzukommen (vgl. Fehlerursache „Nicht genügend Personal zur Planung“ in Bild 30), die direkt auf den jeweils betrachteten Prozess wirken.



**Bild 30:** Fehlerfortpflanzung im nachfolgenden Prozess



**Bild 31:** Graphische Darstellung des Funktionsnetzes

Fehlerfolgen müssen sich natürlich nicht nur auf den jeweils laut Prozessmodell nachfolgenden Prozess auswirken, sondern können theoretisch jeden beliebigen Prozess im Kontext der SBA (einschließlich der Top Events) unmittelbar beeinflussen. Welche Prozesse in diesem Sinne im Einzelnen direkt voneinander abhängig sind, wurde im Rahmen des vorliegenden Projekts in einem iterativen Vorgehen zusammen mit einem Expertengremium diskutiert. Das Ergebnis – auch Funktionsnetz genannt – ist im Sinne eines visuellen Eindrucks der Komplexität in

Bild 31 graphisch dargestellt. Die vollständige Übersicht im Anhang 2 listet ferner detailliert für jeden Prozess die unmittelbaren Folgeprozesse im Sinne dieses Funktionsnetzes in tabellarischer Form auf.

### 3.2.2 Topologie des Qualitätsmodells

Das Funktionsnetz gemäß Kapitel 3.2.1 bildet die zentrale Grundlage für die Graphenstruktur des als Qualitätsmodell zu entwickelnden Bayes'schen Netzes. Dabei bildet jeder Prozess zunächst einen eigenen Knoten, der die folgenden vier Zustände mit jeweils unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten annehmen kann:

- „Funktion nicht erfüllt“ (Fehler 1),
- „Funktion unvollständig erfüllt“ (Fehler 2),
- „Funktion fehlerhaft erfüllt“ (Fehler 3),
- „Kein Fehler“.

Ebenso werden die acht identifizierten Top Events (vgl. Prozessmodell in Anhang 1) als jeweils separater (Wirkungs-)Knoten mit den möglichen Zuständen

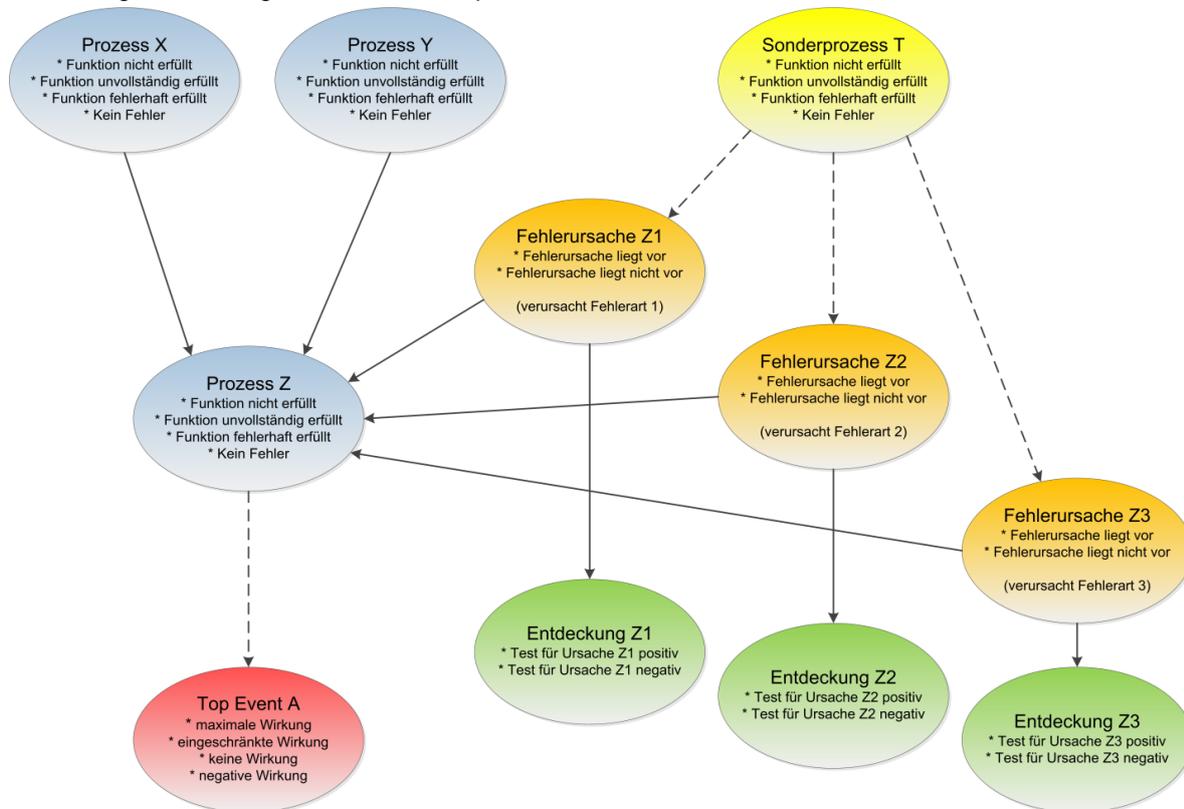
- „Maximale Wirkung“,
- „Eingeschränkte Wirkung“
- „Keine Wirkung“
- „Negative Wirkung“

beschrieben. Die modellierten Abhängigkeiten zwischen Prozess- und Wirkungsknoten orientieren sich in diesem Zusammenhang unmittelbar am Funktionsnetz aus Bild 31 (s. auch Anhang 2).

Ansonsten kommen noch Knoten für die in der FMEA bewerteten Fehlerursachen pro Prozess hinzu, die jeweils direkt mit dem jeweils zugehörigen Prozessknoten über eine Kante im Modell verknüpft sind. Es sei darauf hingewiesen, dass in diesem Zusammenhang natürlich nur solche Fehlerursachen explizit modelliert wurden, die nicht schon als Fehlerart in einem vorgelagerten Prozess beschrieben sind. Dies betrifft neben einigen weiteren z.B. die Fehlerursache „Vertauschter Schleifen-draht“ im Prozess „Verkehrsdatenerfassung“, welche von der Logik des Qualitätsmodells her als „Fehlerhafte Funktionserfüllung“ im Prozess „Konfiguration Hardware und Software“ interpretiert wird. Darüber hinaus wurden auch solche Fehlerursachen nicht berücksichtigt, für die aus bestimmten

Gründen keine vollständigen Schätzwerte aus der FMEA vorlagen. Deren Anzahl ist jedoch sehr gering. Knoten für die Entdeckung von Fehlerursachen sind wegen ihrer für die Projektfragestellung untergeordneten Bedeutung optional und werden daher im Rahmen der technischen Realisierung des Qualitätsmodells nicht explizit modelliert (vgl. Kapitel 3.3.4).

Bild 32 zeigt schematisch die grundsätzliche Topologie des Qualitätsmodells (inkl. der optionalen „Entdeckungsknoten“) mit den generischen Bezeichnungen der möglichen Zustände pro Knoten.



**Bild 32:** Schematische Darstellung der Topologie des Qualitätsmodells

Besonders hingewiesen werden soll noch auf den dargestellten Sonderprozess T. Es handelt sich hierbei um einen Prozess, der bei nicht fehlerfreier Funktion trotz direkter Verknüpfung im Funktionsnetz nur indirekt Fehler im jeweiligen Folgeprozess induziert. Dies geschieht, indem eine fehlende, unvollständige oder fehlerhafte Funktion zunächst „nur“ die Auftretenswahrscheinlichkeiten bestimmter, nicht notwendig aller (lokaler) Fehlerursachen des jeweiligen Folgeprozesses erhöht (vgl. Kapitel 3.3.1). Im konkreten Qualitätsmodell, wie es im vorliegenden Forschungsprojekt entwickelt wurde, zählen die Prozesse „Vergabe“, „Bauüberwachung“

Im Zentrum steht dabei in der Darstellung der Prozess Z. Die Anzahl der Vorgängerprozesse (hier X und Y) ist ebenso wie die Anzahl der (lokalen) Fehlerursachen variabel. Darüber hinaus wirkt auch nicht jeder Prozess auf ein Top Event (vgl. gestrichelte Linie). Tatsächlich betrifft dies in der konkreten Realisierung des Qualitätsmodells (vgl. Funktionsnetz) nur die vier Knoten der Datenerfassung sowie die Knoten der manuellen Erfassung von vorhergesehenen und unvorhergesehenen Ereignissen sowie die Anzeige.

und „Wartung und Instandsetzung“ als Sonderprozesse.

### 3.3 Kalibrierung des Qualitätsmodells

Ziel der Kalibrierung ist die vollständige Festlegung der benötigten Wahrscheinlichkeitstabellen der Form  $P(X_i|Pa(X_i))$  unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Topologie des Qualitätsmodells (vgl. Kapitel 3.1.2). Für die Knoten der Fehlerursachen können dabei direkt die im Rahmen der FMEA geschätzten Auftretenswahrscheinlichkeiten verwendet werden. Hierzu ist lediglich der geschätzte Punktwert A gemäß der entsprechenden

Skala aus Tab. 3 in eine „echte“ Wahrscheinlichkeit zu übertragen. Für Fehlerursachen, die von keinem Sonderprozess abhängen, ist damit die Kalibrierung im Prinzip abgeschlossen (beachte Kapitel 3.4).

Etwas aufwändiger ist die Kalibrierung für Fehlerursachen, deren Auftretenswahrscheinlichkeiten von Fehlern in der Vergabe, der Bauüberwachung oder der Wartung und Instandsetzung beeinflusst werden. Da die Werte aus der FMEA gewissermaßen lediglich die A-priori-Wahrscheinlichkeit des Auftretens der jeweiligen Fehlerursache bei einem ansonsten fehlerfrei funktionierenden System angeben, ist abzuschätzen, wie stark beispielsweise eine nicht durchgeführte, unvollständige oder fehlerhafte Wartung und Instandsetzung hier die entsprechende Fehlerwahrscheinlichkeit erhöht (s. Kapitel 3.3.1).

Ferner liefert die FMEA keine Aussage darüber, mit welchen Wahrscheinlichkeiten sich Fehler entlang des Funktionsnetzes von einem Prozess zum nächsten fortpflanzen. Auch hierzu sind geeignete, bedingte Wahrscheinlichkeiten zu schätzen (s. Kapitel 3.3.2).

### 3.3.1 Erfassung von Verstärkungsfaktoren für Fehlerursachen

Die Funktionserfüllung in den Sonderprozessen „Vergabe“, „Bauüberwachung“ sowie „Wartung und Instandsetzung“ (keine Funktionserfüllung, unvollständige Funktionserfüllung, fehlerhafte Funktionserfüllung, kein Fehler) beeinflusst – wie in Kapitel 3.2.2 erwähnt – in der Regel unterschiedlich stark die Auftretenswahrscheinlichkeiten bestimmter Fehlerursachen (in anderen Prozessen). Zur Bestimmung der entsprechenden Verstärkungsfaktoren durch ein Expertengremium gibt es im Folgenden grundsätzlich drei Möglichkeiten:

- Schätzung der Verstärkungsfaktoren pro betroffener Fehlerursache
- Schätzung pauschaler Verstärkungsfaktoren pro betroffenem Prozess (d.h. gleiche Verstärkungsfaktoren für alle Fehlerursachen im gleichen Prozess)
- Pauschale Schätzung der Verstärkungsfaktoren für alle Prozesse (d.h. gleiche Verstärkungsfaktoren für alle betroffenen Fehlerursachen in allen betroffenen Prozessen)

In allen Fällen bedeutet ein Faktor 2 beispielsweise, dass sich die Auftretenswahrscheinlichkeit verdoppelt. Ein Faktor 3 impliziert eine Verdreifachung der Auftretenswahrscheinlichkeit. Der Faktor 1 repräsentiert ferner den Umstand, dass es im konkreten Fall keine Verstärkung gibt.

In Bezug auf das im vorliegenden Projekt entwickelte Qualitätsmodell wurden die Verstärkungsfaktoren durch ein Expertengremium systematisch geschätzt. Für die Auswirkungen der Sonderprozesse „Vergabe“ und „Bauüberwachung“ wurde dabei die oben geschilderte Variante 1 gewählt, d.h. die Schätzung pro betroffener Fehlerursache. Dies war sinnvoll und möglich, da entsprechend dem zuvor definierten Funktionsnetz (s. Kapitel 3.2.1) von der Vergabe bzw. der Bauüberwachung jeweils lediglich zwei Prozesse mit nur wenigen Fehlerursachen direkt beeinflusst werden. Die Ergebnisse für den Prozess „Vergabe“ sind in Tab. 12 zusammengefasst. Tab. 13 zeigt die geschätzten Verstärkungsfaktoren im Zusammenhang mit der Bauüberwachung.

Fehlerursache	Unvollständige Vergabe (Fehler 2)	Fehlerhafte Vergabe (Fehler 3)
F_15_1_1 Unvollständige Zusammenstellung der Hardwareeinheiten	1.1	1.4
F_15_1_2 Unvollständige Zusammenstellung der Softwareeinheiten	1.2	1.5
F_15_1_3 Defekte Hardwareeinheiten	1	1.2
F_15_1_4 Fehlerhafte Algorithmen	1	1.5
F_15_1_5 Fehlerhafte Parametrierung	1	1.8
F_15_1_6 Fehlerhaftes Zusammenwirken der verschiedenen Vertragspartner	1	2
F_15_1_7 Menschliche Fehler bei der Konfiguration	1	2
F_15_1_8 Ungeeignete Anbringung/Kalibrierung von Detektoreinheiten	1	2
F_14_1_1 Abwesenheit des Personals	1.5	1.2
F_14_1_2 Keine Bemusterung durchgeführt	1.1	1.3
F_14_1_3 Keine Werkstests durchgeführt	1.1	1.3
F_14_1_4 Mangelnde Erfahrung des Personals	1	2

**Tab. 12: Verstärkungsfaktoren für den Sonderprozess „Vergabe“**

Fehlerursache	Keine Bauüberwachung (Fehler 1)	Unvollständige Bauüberwachung (Fehler 2)	Fehlerhafte Bauüberwachung (Fehler 3)
F_15_1_1 Unvollständige Zusammenstellung der Hardwareeinheiten	2	1	1
F_15_1_2 Unvollständige Zusammenstellung der Softwareeinheiten	3	1.5	1.5
F_15_1_3 Defekte Hardwareeinheiten	2	1.5	1.5
F_15_1_4 Fehlerhafte Algorithmen	2	1.5	1.5
F_15_1_5 Fehlerhafte Parametrierung	3	2	2
F_15_1_6 Fehlerhaftes Zusammenwirken der verschiedenen Vertragspartner	4	3	3
F_15_1_7 Menschliche Fehler bei der Konfiguration	5	3	3
F_15_1_8 Ungeeignete Anbringung/Kalibrierung von Detektoreinheiten	5	3	3
F_13_1_1 Unvollständiger Blindbetrieb	1.5	1.5	1.5
F_13_1_2 Unvollständiger Probetrieb	1.5	1.5	1.5
F_13_1_3 Unvollständiger Kommunikationstest	6	3	3
F_13_1_4 Fehler beim Blindbetrieb	2	1.5	1.5
F_13_1_5 Fehler beim Probetrieb	2	1.5	1.5
F_13_1_6 Fehler beim Kommunikationstest	2	1.5	1.5

**Tab. 13: Verstärkungsfaktoren für den Sonderprozess „Bauüberwachung“**

Anders verhält es sich beim Sonderprozess „Wartung und Instandsetzung“. Da dieser auf praktisch alle Prozesse im Betrieb einer SBA einwirkt, war hier aufgrund der Vielzahl zugehöriger Fehlerursachen nur die Variante 2, d.h. die Schätzung von

pauschalen Verstärkungsfaktoren pro betroffenem Prozess möglich (vgl. Tab. 14). Variante 3, d.h. die pauschale Schätzung über alle Prozesse und Fehlerursachen hinweg, kommt im vorliegenden Projekt nicht zum Einsatz.

Prozess	Keine Wartung & Instandsetzung (Fehler 1)	Unvollständige Wartung & Instandsetzung (Fehler 2)	Fehlerhafte Wartung & Instandsetzung (Fehler 3)
P_11_1 Verkehrsdatenerfassung	7	5	3
P_11_2 Erfassung Helligkeit	3	2	2
P_11_3 Erfassung Sichtweiten	8	6	4
P_11_4 Erfassung Niederschlag	7	5	3
P_10_1 Datenaggregation	5	3	2
P_9_1 Kommunikation IB/KRI	3	2	2
P_8_1 Datenübernahme	2	1.5	1.5
P_8_2 Datenaufbereitung	2	1.5	1.5
P_8_3 Datenvermittler	2	1.5	1.5
P_7_1 Kommunikation Fernbus	3	2	2
P_6_1 Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse	2	1.5	1.5
P_6_2 Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse	2	1.5	1.5
P_6_3 Protokolle und Auswertungen	2	1.5	1.5
P_6_4 Übersichtsdarstellung	2	1.5	1.5
P_6_6 Datenaustausch extern	2	1.5	1.5
P_5_1 Kommunikation Fernbus	3	2	2
P_4_1 Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus VRZ	2	1.5	1.5
P_4_2 Durchführung Steuerungsalgorithmen	2	1.5	1.5
P_4_3 Längsabgleich & Querabgleich	2	1.5	1.5
P_4_4 Datenaustausch mit SST	2	1.5	1.5
P_3_1 Kommunikation IB/KRI	3	2	2
P_2_1 Schaltung	5	3	2
P_1_1 Anzeige	7	5	3

Tab. 14: Verstärkungsfaktoren für den Sonderprozess „Wartung und Instandsetzung“

Sämtliche Verstärkungsfaktoren aus Tab. 12 bis Tab. 14 dienen somit direkt der Skalierung der gemäß Tab. 3 in Prozentwerte übertragenen A-priori-Auftretenswahrscheinlichkeiten aus der FMEA. Im Falle einer fehlerfreien Funktionserfüllung im Prozess „Vergabe“, „Bauüberwachung“ bzw. „Wartung und Instandsetzung“ wird hierbei angenommen, dass es in naheliegender Weise natürlich keine Verstärkung gibt (entspricht Faktor 1). Folglich sind damit die benötigten Wahrscheinlichkeitstabellen aller Fehlerursachenknoten im Qualitätsmodell vollständig mit Werten besetzt (vgl. Kapitel 3.3.3).

### 3.3.2 Erfassung bedingter Wahrscheinlichkeiten für die Fehlerfortpflanzung

Was noch fehlt, ist die Abschätzung, mit welcher Wahrscheinlichkeit Fehler in einem beliebigen Prozess bestimmte Fehlerarten in den gemäß Funktionsnetz jeweils unmittelbar nachfolgenden Prozessen induzieren. Wie hoch ist beispielsweise die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Konfiguration der Hardware und Software während des Baus im

Fall einer fehlerhaften (oder unvollständigen) Ausführungsplanung? Oder wie wahrscheinlich ist es, dass Protokolle und Auswertungen auf Ebene der VRZ trotz unvollständiger Fernbus-Kommunikation zwischen Unterzentrale und VRZ fehlerfrei erstellt werden können?

Zur Beantwortung wurden auch in diesem Fall die benötigten Werte in einem iterativen Prozess unter Einbeziehung des bereits mehrfach genannten Expertengremiums per Schätzung erhoben. Tab. 15 zeigt exemplarisch die Werte für den Prozess „Schaltung“ in Abhängigkeit vom Zustand der Kommunikation zwischen Unterzentrale und Streckenstation. Dabei ist zu beachten, dass die bedingten Wahrscheinlichkeiten zunächst nur in der Form  $P(X_i|X_j)$  mit  $X_j \in Pa(X_i)$ , nicht aber in der gemäß Kapitel 3.1.2 eigentlich benötigten Form  $P(X_i|Pa(X_i))$  ermittelt wurden. Der Einfluss der einzelnen Elternknoten auf den betrachteten Prozess wurde somit zunächst jeweils isoliert beschrieben, da ansonsten die Anzahl zu schätzender Parameter exponentiell angestiegen wäre und sich damit der manuellen

Schätzung entzogen hätte. Die nachträgliche Verknüpfung der Einflüsse aller Elternknoten eines Prozesses über einen sogenannten Noisy-MAX-Ansatz wird in Kapitel 3.3.3 näher erläutert.

Kommunikation IB/KRI	Schaltung			
	Fehler 1	Fehler 2	Fehler 3	Kein Fehler
Fehler 1	30%	10%	30%	30%
Fehler 2	10%	45%	5%	40%
Fehler 3	5%	10%	60%	25%
Kein Fehler	0%	0%	0%	100%

**Tab. 15: Bedingte Wahrscheinlichkeiten für den Prozess „Schaltung“ unter Berücksichtigung des jeweiligen Zustandes im Prozess „Kommunikation IB/KRI“**

Auffällig sind die positiven Wahrscheinlichkeiten einer fehlerfreien Schaltung trotz einer fehlerbehafteten oder sogar ausgefallenen Kommunikation. Begründet wird dies dadurch, dass es z.B. möglich ist, dass eine aktuelle Schaltung auch bei Unterbrechung der Verbindung zwischen Unterzentrale und Streckenstation über einen bestimmten Zeitraum aufrecht erhalten oder eine Default-Schaltung vorgenommen werden kann. Solange diese Schaltung mit den vorherrschenden Verkehrsbedingungen übereinstimmt, ist also trotz technischer Fehler aus Sicht des Ergebnisses (d.h. der Wirkung der Anlage) mit positiver Wahrscheinlichkeit kein Fehler zu beobachten. Es ist selbstverständlich, dass diese Wahrscheinlichkeit nicht durch technische Fehlerraten o.ä. SBA-intern beeinflusst ist, sondern lediglich von externen Faktoren abhängt, nämlich wie wahrscheinlich es ist, dass für den relevanten Streckenabschnitt bestimmte Verkehrszustände über einen längeren Zeitraum erhalten bleiben bzw. dass ein der Default-Schaltung entsprechender, normaler Verkehrszustand vorliegt.

Ein anderer Fall einer auf den ersten Blick möglicherweise kontra-intuitiven Behandlung der Fehlerwahrscheinlichkeiten im Qualitätsmodell findet sich z.B. im Prozess „Datenaggregation“, der die Ergebnisse der Verkehrsdatenerfassung, der Helligkeitserfassung, der Sichtweitenerfassung und der Niederschlagserfassung bündelt und an die Unterzentrale kommuniziert. Ist nun nur nach den Auswirkungen einer z.B. ausgefallenen Verkehrsdatenerfassung gefragt (vgl. Tab. 16), könnte man verleitet sein anzunehmen, dass auch in der Datenaggregation mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% keine Funktionserfüllung möglich ist. Tatsächlich ist die

Wahrscheinlichkeit für Fehlerart 1 jedoch sehr gering, da hierzu unter Berücksichtigung des Funktionsnetzes in Wirklichkeit alle vier Erfassungsprozesse gleichzeitig ausfallen müssten. In den meisten Fällen dürfte daher stattdessen von einer „nur“ unvollständigen Datenaggregation in dem Sinne, dass benötigte Daten nur unvollständig an die Unterzentrale weitergegeben werden, auszugehen sein.

Verkehrsdatenerfassung	Datenaggregation			
	Fehler 1	Fehler 2	Fehler 3	Kein Fehler
Fehler 1	0,5%	79,5%	0%	20%
Fehler 2	0%	80%	0%	20%
Fehler 3	0%	0%	80%	20%
Kein Fehler	0%	0%	0%	100%

**Tab. 16: Bedingte Wahrscheinlichkeiten für den Prozess „Datenaggregation“ unter Berücksichtigung des jeweiligen Zustandes im Prozess „Verkehrsdatenerfassung“**

Darüber hinaus wird in Tab. 16 unterstellt, dass fehlerhafte oder unvollständige Daten gelegentlich auch zu keinem Fehler in der Datenaggregation bzw. in deren Ergebnis führen. Dies wird unter anderem damit begründet, dass gegebenenfalls nicht alle erfassten oder erfassbaren Daten auch immer relevant sind im Hinblick auf den operativen Betrieb einer SBA. Sollten diese Daten also fehlen oder falsch sein, ist dennoch keine negative Wirkung in weiteren Prozessschritten zu erwarten.

Im Übrigen wird durch die hier – und an anderen Stellen im Qualitätsmodell – unterstellte Option, dass Fehler sich nicht notwendig automatisch auf die jeweiligen Folgeprozesse auswirken, eine übermäßige Fehlerverstärkung vermieden (vgl. Kapitel 3.4). Ein wichtiges Beispiel ist in diesem Zusammenhang auch der Prozess „Konfiguration Hardware & Software“ in der Lebenszyklusphase Bau, der grundsätzlich alle Prozesse im Betrieb unmittelbar beeinflusst. Dennoch dürfte ein konkreter Fehler dort jeweils nur einen oder wenige der Folgeprozesse beeinträchtigen. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine fehlerhafte oder unvollständige Funktionserfüllung im Prozess „Konfiguration Hardware & Software“ auf einen ganz bestimmten Betriebsprozess negativ auswirkt, ist demnach eher gering (vgl. Tab. 17).

Konfiguration Hardware & Software	Anzeige			
	Fehler 1	Fehler 2	Fehler 3	Kein Fehler
Fehler 1	---	---	---	---
Fehler 2	2%	2%	2%	94%
Fehler 3	2%	2%	2%	94%
Kein Fehler	0%	0%	0%	100%

**Tab. 17: Bedingte Wahrscheinlichkeiten für den Prozess „Anzeige“ unter Berücksichtigung des jeweiligen Zustandes im Prozess „Konfiguration Hardware & Software“**

In der jeweils letzten Zeile von Tab. 15 bis Tab. 17 erkennt man ferner die für alle Prozesse zutreffende Grundannahme, dass bei einer fehlerfreien Funktionserfüllung im Elternprozess unter Wegfall weiterer Fehlerquellen immer von einer ebenfalls fehlerfreien Funktion im jeweils betrachteten Prozess ausgegangen wird. Dies erscheint plausibel, da Fehler im System ansonsten „quasi aus dem Nichts“ entstehen könnten. Tatsächlich unterstellt das Qualitätsmodell stattdessen, dass letztlich nur die im Rahmen der FMEA identifizierten Fehlerursachen zu einem Fehler in den Prozessen der SBA führen können.

Es sei abschließend noch einmal explizit darauf hingewiesen, dass bei der Interpretation der Wahrscheinlichkeiten wie in Tab. 15 bis Tab. 17 die angegebenen Fehler immer aus Sicht des Prozessergebnisses zu verstehen sind. Eine „fehlerhafte Betriebsüberwachung“ bedeutet in diesem Sinne also nicht in erster Linie, dass es im Ablauf der Betriebsüberwachung zu Problemen kommt (Prozessqualität), sondern lediglich, dass am Ende des Prozesses auftretende Störungen im System der SBA nicht korrekt erkannt werden (Ergebnisqualität). Hintergrund ist, dass allein diese Information relevant dafür ist, ob bzw. mit welchen Wahrscheinlichkeiten in den nachfolgenden Prozessen (in diesem Fall im Prozess „Wartung und Instandsetzung“) – ebenfalls aus Ergebnissicht – eine fehlerfreie, eine unvollständige, eine fehlerhafte oder gar keine Funktionserfüllung möglich ist.

**3.3.3 Quantifizierung des Qualitätsmodells**

Mit den Ergebnissen der FMEA sowie den zusätzlich geschätzten Parametern aus Kapitel 3.3.1 und Kapitel 3.3.2 liegen nun alle Informationen vor, die unter Berücksichtigung weiterer, im Folgenden näher beschriebener Annahmen zur vollständigen Ka-

librierung des Qualitätsmodells, d.h. zu einer vollständigen Festlegung der relevanten Wahrscheinlichkeitstabellen (vgl. Kapitel 3.1.2), benötigt werden.

**3.3.3.1 Fehlerursachenknoten**

Bezüglich der Fehlerursachenknoten im Modell (vgl. Bild 32) wurde das Vorgehen mittels Verstärkungsfaktoren bereits in Kapitel 3.3.1 ausführlich beschrieben. Tab. 18 zeigt daher exemplarisch direkt die vollständige Wahrscheinlichkeitstabelle (einschließlich der verwendeten Verstärkungsfaktoren) für einen solchen Knoten, falls dieser von genau einem Sonderprozess abhängt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit im Fall einer fehlerfreien Funktionserfüllung beim relevanten Sonderprozess ergibt sich dabei unter Berücksichtigung von Tab. 3 direkt aus den FMEA-Ergebnissen.

Wartung & Instandsetzung	Stromausfall	
	Ja	Nein
Fehler 1	0,06%	99,94%
Fehler 2	0,045%	99,955%
Fehler 3	0,045%	99,955%
Kein Fehler	0,03%	99,97%

Auftrittswahrscheinlichkeit A laut FMEA: 3 (→ 0,03%)	
Verstärkungsfaktor im Fall „Fehler 1“:	2
Verstärkungsfaktor im Fall „Fehler 2“:	1,5
Verstärkungsfaktor im Fall „Fehler 3“:	1,5

**Tab. 18: Wahrscheinlichkeitstabelle für den Fehlerursachenknoten „Stromausfall“ im Prozess „Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse“ (inkl. Angabe der Verstärkungsfaktoren)**

Der Fall, dass eine Fehlerursache von mehr als einem Sonderprozess abhängt, wird ferner durch eine einfache multiplikative Verknüpfung der jeweils zutreffenden Verstärkungsfaktoren abgebildet (vgl. Tab. 19).

Bauüberwachung	Vergabe	Fehlerhafte Parametrierung	
		Ja	Nein
Fehler 1	Fehler 1	---	---
	Fehler 2	45%	55%
	Fehler 3	81%	19%
	Kein Fehler	45%	55%
Fehler 2	Fehler 1	---	---
	Fehler 2	30%	70%
	Fehler 3	54%	46%
	Kein Fehler	30%	70%
Fehler 3	Fehler 1	---	---
	Fehler 2	30%	70%
	Fehler 3	54%	46%
	Kein Fehler	30%	70%
Kein Fehler	Fehler 1	---	---
	Fehler 2	15%	85%
	Fehler 3	27%	73%
	Kein Fehler	15%	85%

Auftretenswahrscheinlichkeit A laut FMEA: 4 (→ 15%)
Verstärkungsfaktor im Fall „Fehler 1“ (Bauüberwachung): 3
Verstärkungsfaktor im Fall „Fehler 2“ (Bauüberwachung): 2
Verstärkungsfaktor im Fall „Fehler 3“ (Bauüberwachung): 2

Verstärkungsfaktor im Fall „Fehler 1“ (Vergabe):	---
Verstärkungsfaktor im Fall „Fehler 2“ (Vergabe):	1
Verstärkungsfaktor im Fall „Fehler 3“ (Vergabe):	1,8

**Tab. 19: Wahrscheinlichkeitstafel für den Fehlerursachenknoten „Fehlerhafte Parametrierung“ im Prozess „Konfiguration Hardware und Software“ (inkl. Angabe der Verstärkungsfaktoren)**

Tab. 20 stellt ferner der Vollständigkeit halber den trivialen Fall dar, dass die betrachtete Fehlerursache unabhängig von irgendwelchen Sonderprozessen auftritt oder nicht.

Versäumnis des Personals	
Ja	Nein
0,5%	99,5%

Auftretenswahrscheinlichkeit A laut FMEA: 4 (→ 0,5%)
--

**Tab. 20: Wahrscheinlichkeitstafel für den Fehlerursachenknoten „Versäumnis des Personals“ im Prozess „Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse“**

### 3.3.3.2 Prozessknoten

Prozessknoten – einschließlich Sonderprozesse – können im Weiteren sowohl Fehlerursachenknoten als auch andere Prozessknoten als Eltern haben (vgl. Bild 32). Die bedingten Auftretenswahrscheinlichkeiten der möglichen Fehlerzustände unter Berücksichtigung isoliert betrachteter Elternprozesse liegen dabei gemäß Kapitel 3.3.2 vor (vgl. Tab. 15). Bezüglich der mit dem jeweiligen Prozess verknüpf-

ten Fehlerursachenknoten wird ferner angenommen, dass eine eingetretene Fehlerursache unter Vernachlässigung möglicher weiterer Fehlerquellen automatisch, d.h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% auch die ihr zugeordnete Fehlerart im Prozess auslöst. Tab. 21 zeigt die in diesem Fall trivialen, bedingten Wahrscheinlichkeiten anhand eines Beispiels, bei dem die betrachtete Fehlerursache konkret die Fehlerart 1 induziert. Eine nicht eingetretene Fehlerursache führt unter dem Wegfall sonstiger Fehlerquellen umgekehrt natürlich auch zu keinem Fehler im zugeordneten Prozess.

Schleifendraht defekt	Verkehrsdaterfassung			
	Fehler 1	Fehler 2	Fehler 3	Kein Fehler
Ja	100%	0%	0%	0%
Nein	0%	0%	0%	100%

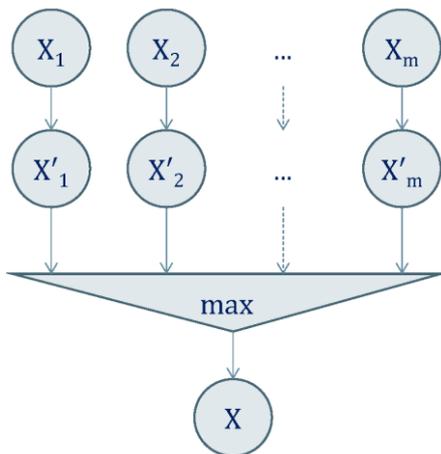
**Tab. 21: Bedingte Wahrscheinlichkeiten für den Prozess „Verkehrsdaterfassung“ in Abhängigkeit des Vorliegens der zugeordneten Fehlerursache „Schleifendraht defekt“**

Die oben skizzierte, isolierte Betrachtung einzelner Elternknoten (vgl. Tab. 15 und Tab. 21) reicht zur vollständigen Kalibrierung eines gegebenen Prozessknotens jedoch nicht aus. Tatsächlich ist genauer zu klären, wie sich jede einzelne Kombination von Zuständen der Elternknoten auf die Wahrscheinlichkeit der Zustände im betrachteten Prozess auswirkt. Da die direkte Festlegung der benötigten Wahrscheinlichkeiten in der Form  $P(X_i|Pa(X_i))$  aufgrund der Größe und Komplexität des Modells nicht möglich ist (vgl. Kapitel 3.3.2), wird stattdessen ein sogenannter Noisy-MAX-Ansatz (vgl. HENRION, 1989) gewählt, der die bereits beschriebenen, bedingten Wahrscheinlichkeiten aus der isolierten Betrachtung nach plausiblen Regeln miteinander verknüpft.

Die vereinfachende Grundannahme hierbei ist, dass jeder Elternknoten für sich allein – und nicht erst eine Kombination von Fehlerursachen – einen Fehler im betrachteten Prozess auslöst bzw. auslösen kann. Im Sinne einer logischen ODER-Verknüpfung reicht also grundsätzlich eine einzelne, vorliegende Fehlerursache, um den entsprechenden Fehler im Prozess, d.h. eine der drei Fehlerarten („keine Funktionserfüllung“, „unvollständige Funktionserfüllung“, „fehlerhafte Funktionserfüllung“) zu induzieren. Im Fall des gleichzeitigen Auftretens mehrerer Fehlerursachen wird darüber hin-

aus angenommen, dass sich stets der schwerwiegendste Fehler durchsetzt. Die entsprechende Rangfolge der Fehlerarten pro Prozess ergibt sich dabei für das hier beschriebene Qualitätsmodell unmittelbar aus den Schätzwerten zur Bedeutung B der Fehlerarten aus der FMEA (vgl. Kapitel 2.3.6).

Formal lässt sich der Noisy-MAX-Ansatz als eine spezielle Form sogenannter lokaler, probabilistischer Modelle (vgl. KOLLER/FRIEDMAN, 2009) folgendermaßen beschreiben (vgl. TAKIKAWA/D'AMBROSIO, 1999): Sei  $X$  ein beliebiger Prozessknoten im Qualitätsmodell und seien  $X_k$  für  $k=1, \dots, m$  die zugehörigen Elternknoten von  $X$ , d.h.  $\text{Pa}(X) = \{X_k \mid k=1, \dots, m\}$ . Ist ferner  $X'_k$  für  $k=1, \dots, m$  der jeweils isoliert durch  $X_k$  induzierte Fehlerzustand entsprechend einer der bereits bekannten, bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Form  $P(X'_k|X_k)$  (vgl. Tab. 15 bzw. Tab. 21), so ergibt sich der tatsächliche Zustand von  $X$  im Kontext der nicht-isolierten Betrachtung der einzelnen Fehlerursachen sozusagen als Maximum der  $X'_k$ . Bild 33 stellt die Zusammenhänge zur Verdeutlichung graphisch dar.



**Bild 33:** Noisy-MAX (schematische Darstellung)

Die zur vollständigen Kalibrierung des Prozessknotens  $X$  im Bayes'schen Modell letztlich benötigte Wahrscheinlichkeitsverteilung  $P(X|\text{Pa}(X))$  berechnet sich aus den bereits ermittelten bedingten Wahrscheinlichkeiten (vgl. Tab. 15 bzw. Tab. 21) schließlich konsequenterweise gemäß der Formel:

$$\begin{aligned} P(X|\text{Pa}(X)) &= P(X|X_1, \dots, X_m) \\ &= \sum_{\max\{X'_1, \dots, X'_m\}=X} \prod_{k=1}^m P(X'_k|X_k) \end{aligned}$$

Die Festlegung der Parameter für die Prozessknoten im Qualitätsmodell ist somit abgeschlossen.

### 3.3.3.3 Wirkungsknoten

Bezüglich der noch nicht diskutierten Kalibrierung der Wirkungsknoten (Top Events) im Qualitätsmodell wird im Folgenden ein vereinfachender, qualitativer Ansatz gewählt. Dies hängt damit zusammen, dass eine vollständige Analyse der Wirkung einer SBA inkl. Befolungsraten etc. den Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts weit übersteigen würde. Aus diesem Grund wurden bereits in Kapitel 3.2.2 mit den Optionen

- „Maximale Wirkung“,
- „Eingeschränkte Wirkung“,
- „Keine Wirkung“,
- „Negative Wirkung“

eher abstrakt formulierte Wirkungszustände festgelegt, die ihrerseits laut Funktionsnetz (vgl. Anhang 2) in erster Linie vom Prozess „Anzeige“ abhängen.

Konkret wird bei einer (inhaltlich und technisch) fehlerfreien Anzeige im Grundsatz von einer maximalen Wirkung der SBA ausgegangen, ohne dass diese hier näher spezifiziert wäre. Eine unvollständige Anzeige führt tendenziell zu einer eingeschränkten Wirksamkeit der Anlage, während eine fehlerhafte Anzeige im Modell sogar eine negative Wirkung induziert. Diese könnte sich z.B. in erhöhten Reisezeiten aufgrund einer unnötig restriktiven Geschwindigkeitsbegrenzung oder in Form eines erhöhten Unfallrisikos aufgrund falscher Warnhinweise äußern.

Die Wahrscheinlichkeiten der Wirkungszustände in den einzelnen Top Events (SBA-Funktionen) wird entsprechend dem zugrunde liegenden Funktionsnetz (s. Kapitel 3.2.1) ferner davon mit beeinflusst, ob die für die jeweilige Funktion benötigten Erfassungsprozesse im konkreten Fall fehlerfrei, unvollständig, fehlerhaft oder gar nicht zur Verfügung stehen. Ein (Teil-)Ausfall oder ein Fehler der Verkehrsdatenerfassung beeinträchtigt in diesem Sinne beispielsweise unmittelbar die Harmonisierungsfunktion der SBA, während die Funktion der Baustellenwarnung nicht direkt betroffen ist.

Die sinnhafte Verknüpfung der Erfassungsprozesse mit den Knoten der Top Events ermöglicht bei der Beschreibung der Auswirkungen des Prozesses

„Anzeige“ somit – zumindest ansatzweise – eine angemessene Differenzierung der verschiedenen SBA-Funktionen, welche aufgrund der technisch bedingten, starken Aggregationstendenzen im vorliegenden Qualitätsmodell ansonsten nicht möglich wäre. Über geeignete Differenzierungsfaktoren  $\lambda > 1$  wird ferner qualitativ berücksichtigt, dass der über den pauschalisierten Effekt einer unvollständigen oder fehlerhaften Anzeige hinausgehende, negative Einfluss einer unvollständigen oder fehlerhaften Erfassung zum einen sichtbar wird, dabei zum anderen jedoch weniger stark ausfällt als beispielsweise ein Totalausfall.

Ansonsten ist zu beachten, dass einzelne SBA-Funktionen auch dann eine maximale Wirkung aufweisen können, wenn für den Elternprozess „Anzeige“ im Modell formal ein Fehler vorliegt. Dies hängt damit zusammen, dass das Qualitätsmodell die verschiedenen SBA-Funktionen nicht über die gesamte Prozesskette hinweg detailliert abbildet und nachverfolgt, sodass ein (nicht näher aufgelöster) Fehler in der Anzeige für das jeweils betrachtete Top Event gegebenenfalls gar nicht relevant ist.

SBA-Funktion	Geschätzter prozentualer Anteil relevanter Schaltvorgänge ( $\rho$ )
Stauwarnung	7,7%
Harmonisierung	46,0%
Nebelwarnung	3,1%
Nässewarnung	15,3%
LKW-Überholverbot	23,0%
Unfallwarnung	1,5%
Baustellenwarnung	3,1%
Glättewarnung	0,4%
Grundzustand	50,0 %

Tab. 22: Geschätzter prozentualer Anteil relevanter Schaltvorgänge pro SBA-Funktion

Seltene SBA-Schaltungen sind demnach – zumindest in absoluten Zahlen betrachtet – viel weniger von Fehlern im Prozess „Anzeige“ betroffen. Der Anteil der verschiedenen SBA-Schaltungen im Falle der im Projekt betrachteten Standard-SBA wird dabei für das vorliegende Qualitätsmodell gemäß Tab. 22 abgeschätzt. Darüber hinaus wird ein Zeitanteil

T in Höhe von 50% berücksichtigt, wo die Anlage aufgrund fehlender verkehrlicher Notwendigkeit auch ohne explizite Schaltungen eine „maximale Wirkung“ erzielt. D.h. technische Fehler innerhalb der SBA beeinträchtigen während dieser Zeiten grundsätzlich nicht die verkehrliche Wirksamkeit der Anlage.

Tab. 23 zeigt abschließend schematisch den Aufbau der Wahrscheinlichkeitstafel eines Wirkungsknotens mit genau einem zugeordneten Erfassungsprozess im Qualitätsmodell. Die weiter oben bereits angesprochenen Differenzierungsfaktoren sind  $\lambda_1$  für den Fall, dass keine Erfassung vorliegt,  $\lambda_2$  bei unvollständiger Erfassung und  $\lambda_3$  bei fehlerhafter Erfassung;  $\rho$  ist der jeweilige Anteil an relevanten Schaltvorgängen aus Tab. 22. Der Fall mit mehr als einem zugeordneten Erfassungsprozess pro Top Event sieht im Übrigen sehr ähnlich aus, wobei die Differenzierungsfaktoren der verschiedenen Erfassungsprozesse lediglich multiplikativ verknüpft werden. Für Details sei an dieser Stelle auf die vollständige, technische Dokumentation des finalen Qualitätsmodells verwiesen (vgl. Kapitel 4).

Erfassung	Anzeige	Top Event			
		Negative Wirkung	Keine Wirkung	Eingeschränkte Wirkung	Maximale Wirkung
Fehler 1	Fehler 1	0%	$(1-T)\rho\lambda_1$	0%	$1-(1-T)\rho\lambda_1$
	Fehler 2	0%	$(1-T)\rho\lambda_1$	0%	$1-(1-T)\rho\lambda_1$
	Fehler 3	0%	$(1-T)\rho\lambda_1$	0%	$1-(1-T)\rho\lambda_1$
	Kein Fehler	0%	$(1-T)\rho\lambda_1$	0%	$1-(1-T)\rho\lambda_1$
Fehler 2	Fehler 1	0%	$(1-T)\rho\lambda_2$	0%	$1-(1-T)\rho\lambda_2$
	Fehler 2	0%	0%	$(1-T)\rho\lambda_2$	$1-(1-T)\rho\lambda_2$
	Fehler 3	$(1-T)\rho\lambda_2$	0%	0%	$1-(1-T)\rho\lambda_2$
	Kein Fehler	0%	0%	0%	100%
Fehler 3	Fehler 1	0%	$(1-T)\rho\lambda_3$	0%	$1-(1-T)\rho\lambda_3$
	Fehler 2	0%	0%	$(1-T)\rho\lambda_3$	$1-(1-T)\rho\lambda_3$
	Fehler 3	$(1-T)\rho\lambda_3$	0%	0%	$1-(1-T)\rho\lambda_3$
	Kein Fehler	0%	0%	0%	100%
Kein Fehler	Fehler 1	0%	$(1-T)\rho$	0%	$1-(1-T)\rho$
	Fehler 2	0%	0%	$(1-T)\rho$	$1-(1-T)\rho$
	Fehler 3	$(1-T)\rho$	0%	0%	$1-(1-T)\rho$
	Kein Fehler	0%	0%	0%	100%

Tab. 23: Schematische Wahrscheinlichkeitstafel für Wirkungsknoten mit genau einem zugeordneten Erfassungsprozess

Das rechnerisch angenommene „virtuelle Wirkungspotenzial“ U einer SBA in Bezug auf die einzelnen SBA-Funktionen ergibt sich somit unmittelbar als Differenz des Minimalwerts aus der rechten Spalte in Tab. 23 zu 100%, d.h.

$$U = (1 - T)\rho \cdot \max\{1, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\}.$$

Dabei soll das daraus resultierende, aufgrund der rein zeitlichen Betrachtung als nur sehr gering mo-

dellierte Wirkungspotenzial für seltene SBA-Schalungen (z.B. Unfallwarnung) natürlich nicht darüber hinwegtäuschen, dass gerade auch diese, meist sicherheitsrelevanten Funktionen eine wesentliche Bedeutung im Betrieb und Nutzen einer SBA haben.

**3.3.3.4 Entdeckungsknoten**

Als letztes ergeben sich die bedingten Wahrscheinlichkeiten für die optionalen Entdeckungsknoten im Qualitätsmodell ähnlich wie im Fall der Fehlerursachen unmittelbar aus den Schätzwerten der FMEA. Hierzu ist lediglich der Punktwert E (vgl. Kapitel 2.3.8) gemäß Tab. 4 in eine „echte“ Wahrscheinlichkeit zu übertragen. Unter der Annahme, dass die verwendeten Entdeckungsmaßnahmen und Prüfroutinen nur dann einen Fehler ausweisen, wenn dieser tatsächlich vorliegt (d.h. keine „Fehlalarme“), und unter Berücksichtigung, dass jeder Entdeckungsknoten im Modell genau einen Elternknoten – nämlich die zugeordnete Fehlerursache – besitzt (vgl. Bild 32), ergeben sich die benötigten Wahrscheinlichkeitstabellen der Form  $P(X_i|Pa(X_i))$  stets nach demselben Muster. Tab. 24 zeigt exemplarisch den Fall der Fehlerursache „Verschmutzung des Sensors“ im Prozess „Erfassung Sichtweiten“.

Verschmutzung des Sensors	Entdeckung: Verschmutzung des Sensors	
	Test positiv	Test negativ
Ja	99,7%	0,3%
Nein	0%	100%

Entdeckungswahrscheinlichkeit E laut FMEA: 6 (→ 99,7%)

**Tab. 24:** Wahrscheinlichkeitstafel für die Entdeckung der Fehlerursache „Verschmutzung des Sensors“ im Prozess „Erfassung Sichtweiten“

**3.3.4 Technische Realisierung**

Die effiziente Berechnung Bayes'scher Netze erfordert in der Regel spezielle Algorithmen (vgl. KOLLER/FRIEDMAN, 2009). Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde daher zur prototypischen Implementierung des Qualitätsmodells auf die für akademische Forschungszwecke kostenlos verfügbare, ursprünglich an der Universität Pittsburgh entwickelte und seit Ende 2015 von der Firma Bayes-Fusion, LLC vertriebene Software „GeNie Modeler 2.1“ (s. BAYESFUSION, 2016) zurückgegriffen. Die Software umfasst dabei einen graphischen Editor zur Erstellung Bayes'scher Netze und zur interaktiven Berechnung aller Zustandswahrscheinlichkeiten der Netzknoten in Fällen mit und ohne Evidenz. Weiterführende Funktionen erlauben zudem z.B. sehr detaillierte Analysen hinsichtlich der Sensitivitäten oder der topologischen Eigenschaften der Modelle. Mittels entsprechender Programmbibliotheken (z.B. jSMILE) ist darüber hinaus die Einbindung in eigene Softwaretools möglich.

Bild 34 zeigt exemplarisch einen Auszug des implementierten Qualitätsmodells als Screenshot. Das vollständige Modell umfasst – ohne die optionalen Entdeckungsknoten – insgesamt 300 Knoten (davon 34 Noisy-MAX-Knoten), welche über 526 Kanten miteinander verbunden sind. In finaler Version wird es zusammen mit dem vorliegenden Bericht in digitaler Form als GeNie-Datei zur Verfügung gestellt. Für weitere Details zur Bedienung der Software (insbesondere zum Setzen und Löschen von Evidenzen und zur Neuberechnung der Wahrscheinlichkeiten) im Fall der konkreten Anwendung des Qualitätsmodells sei auf Kapitel 4 bzw. auf die entsprechende Online-Dokumentation (s. GENIE, 2016) verwiesen.

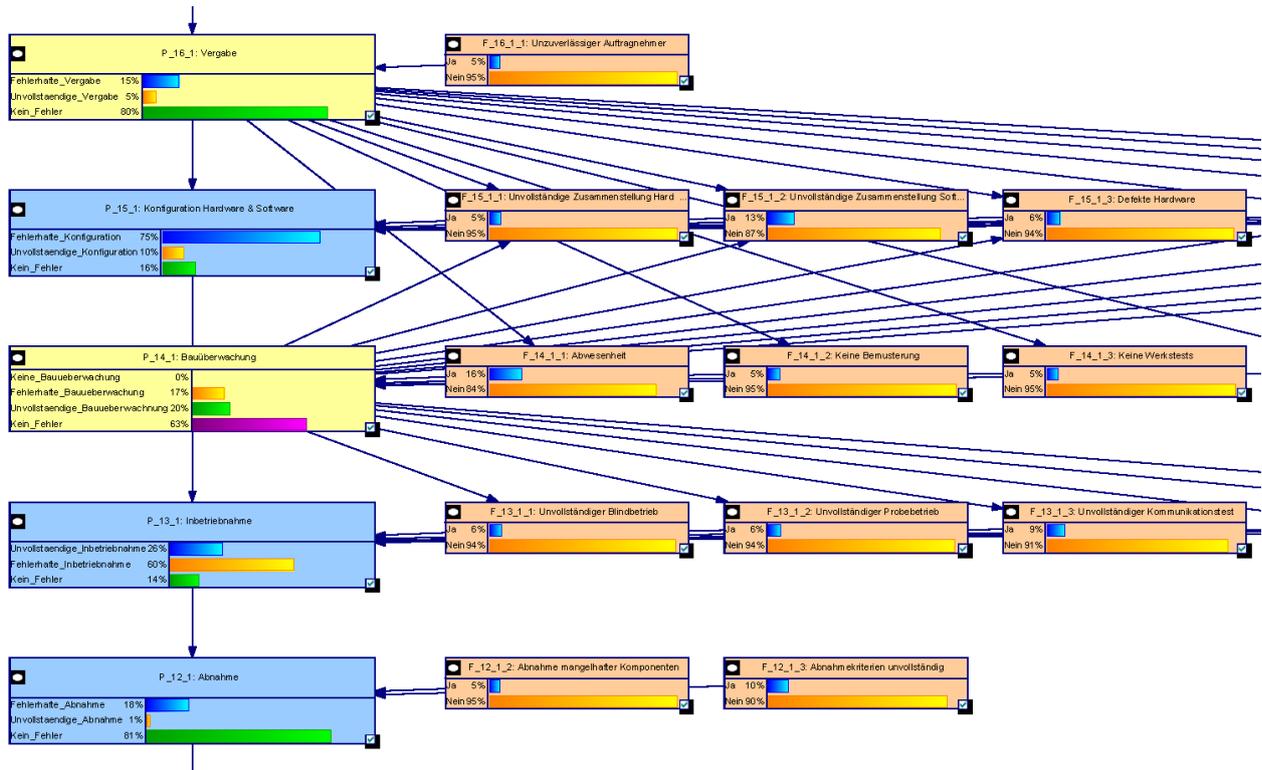


Bild 34: Screenshot des Qualitätsmodells (Auszug)

### 3.4 Optimierung des Qualitätsmodells

Erste Auswertungen des gemäß Kapitel 3.3 kalibrierten Qualitätsmodells belegen dessen grundsätzliche Funktionalität sowohl aus technischer als auch aus inhaltlicher Sicht. Ein Blick auf die Fehlerwahrscheinlichkeiten der Prozesse und Top Events zeigt aber auch, dass z.B. im A-priori-Fall ohne Evidenzen deutlich zu hohe Fehlerraten geschätzt werden (vgl. Bild 35). Im Ergebnis wird unter anderem nur mit 71,5% Wahrscheinlichkeit ein fehlerfreier Zustand im Prozess „Anzeige“, d.h. an der aus verkehrlicher Sicht relevanten Schnittstelle zwischen Anlage und Verkehrsteilnehmer erreicht. Ferner be trägt beispielsweise die modellierte A-priori-Wahrscheinlichkeit einer maximalen Harmonisierungswirkung trotz der Annahmen aus Kapitel 3.3.3.3 gerade einmal 86,8% (vgl. Bild 36).

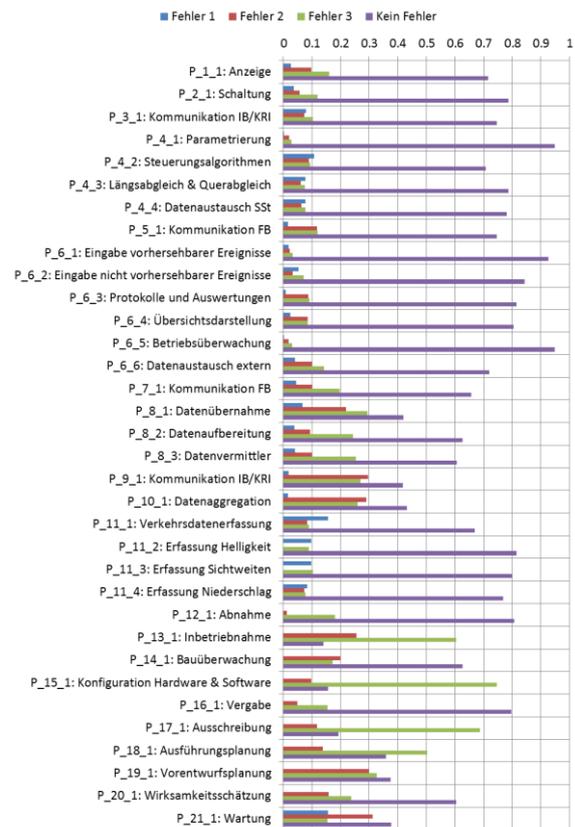
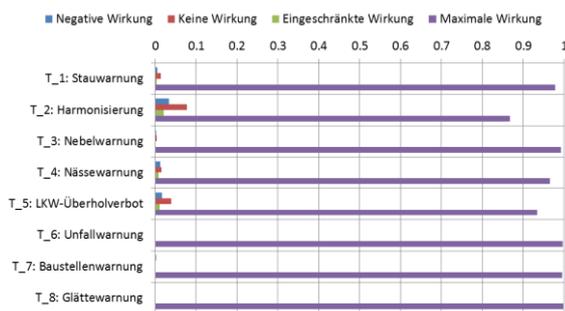


Bild 35: A-priori-Fehlerraten der Prozesse im nicht optimierten Qualitätsmodell



**Bild 36:** A-priori-Wirkungswahrscheinlichkeiten der einzelnen SBA-Funktionen im nicht optimierten Qualitätsmodell

Zur Vermeidung von Missverständnissen sei an dieser Stelle vorab noch einmal darauf hingewiesen (vgl. Kapitel 3.3.2), dass die angegebenen Fehleraten stets im Sinne des Ergebnisses des jeweils betrachteten Prozesses zu interpretieren sind. Eine hohe Fehlerrate auf der Ebene eines bestimmten Prozessknotens bedeutet folglich nicht notwendig (bzw. sogar sehr selten), dass genau in diesem Prozess ein technischer Fehler vorliegt. Vielmehr dürfte das fehlerhafte oder unvollständige Ergebnis – vor allem im Betrieb – in der Regel die Auswirkung eines Fehlers in einem gemäß Funktionsnetz vorgelegerten Knoten sein. In Bild 35 ist beispielsweise sehr gut erkennbar, wie ein möglicherweise nicht fehlerfreies Ergebnis des Prozesses „Steuerungsalgorithmen“ über die Prozesse „Längs- & Querabgleich“, „Datenaustausch SSt“, „Kommunikation IB/KRI“ und „Schaltung“ bis hin zur Anzeige „durchgereicht“ wird.

Als Gründe für die relativ hohen Fehlerraten in Bild 35 können nun mehrere Punkte genannt werden:

- Durch die Aggregation zu relativ groben Fehlerarten in den Prozessknoten kann es vorkommen, dass vergleichsweise geringe oder unbedeutende Fehlerursachen bereits im Sinne einer unvollständigen oder fehlerhaften Funktionserfüllung interpretiert werden. Da bei der Modellierung der Fehlerfortpflanzung anschließend nur noch diese allgemeinen Fehlerarten betrachtet werden, besteht somit die Gefahr, dass hier eine Vermischung mit schwerwiegenderen, jedoch auf dieselbe Fehlerart wirkenden Fehlern auftritt. Geringfügige Fehler bekommen dadurch im Modell potentiell zu viel Gewicht bzw. werden übermäßig verstärkt.

- Die aus Gründen der Komplexitätsreduktion erforderliche Verknüpfung verschiedener Fehlerursachen in den Prozessknoten über einen lokalen Noisy-MAX-Ansatz (vgl. Kapitel 3.3.3.2) hat zur Folge, dass manche Korrelationen zwischen den Fehlerursachen im vorliegenden Qualitätsmodell nicht abgebildet werden. Da folglich jede Fehlerursache für sich allein eine entsprechende Fehlerart im zugeordneten Prozess induziert, bleibt der Fall unberücksichtigt, dass manche Fehler erst durch die Kombination mehrerer Fehlerursachen ausgelöst werden, wobei das gleichzeitige Vorliegen der jeweiligen Einzelursachen naturgemäß unwahrscheinlicher ist als ein unabhängiges Auftreten. Auch dies führt zu erhöhten Fehlerraten.
- Manche Fehlerursachen (z.B. Stromausfall) kommen entsprechend der grundlegenden Netztopologie (vgl. Bild 32) im vorliegenden Qualitätsmodell – teilweise sogar innerhalb derselben Systemkomponente – mehrfach vor, da sie für mehrere Prozesse relevant sind. Dies führt jedoch dazu, dass die zugehörigen Auftretenswahrscheinlichkeiten im Rahmen der FMEA-Ergebnisse (vgl. Kapitel 2.4) ebenfalls mehrfach vorliegen und dadurch letztlich übermäßig stark in die Modellrechnungen eingehen. In Summe ergibt sich folglich eine rechnerisch zu hohe Auftretenswahrscheinlichkeit für derartige Fehlerursachen.
- Es ist ein bekanntes Phänomen, dass Personen häufig Schwierigkeiten haben, vor allem kleine Wahrscheinlichkeiten subjektiv korrekt einzuschätzen (vgl. EISENFÜHR/WEBER, 2003). Unter Berücksichtigung des gewählten Vorgehens bei der Kalibrierung des Qualitätsmodells auf Grundlage von Expertenschätzungen sowie angesichts der verwendeten, eher groben Punkteskalen (vgl. Tab. 3) kann somit davon ausgegangen werden, dass bei einer Vielzahl von Fehlerursachen tendenziell eine Überschätzung der zugehörigen Auftretenswahrscheinlichkeiten vorliegt.

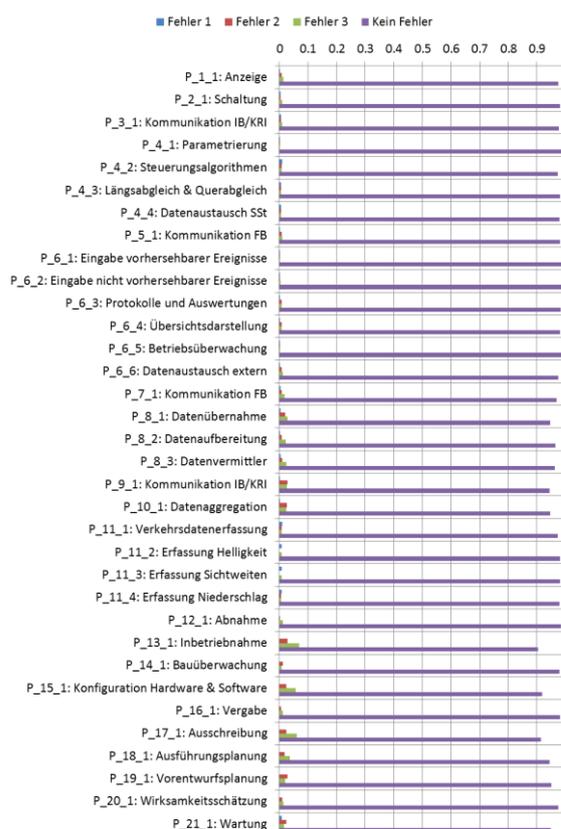
Die genannten Punkte deuten darauf hin, dass eine systematische Modifikation (d.h. Verringerung) der

Auftretenswahrscheinlichkeiten der modellierten bzw. geschätzten Fehlerursachen im Rahmen einer (numerischen) Optimierung zu einer wesentlichen Modellverbesserung führen dürfte. Sowohl die modelltechnisch bedingten Fehlerverstärkungseffekte als auch die möglichen Auswirkungen der subjektiven Parameterschätzung lassen sich auf diese Weise effektiv kompensieren.

### 3.4.1 Skalierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten für Fehlerursachen

Konkret erfolgt die Optimierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten mittels einer einfachen linearen Skalierung in Form eines Korrekturfaktors  $\mu$ , welcher pauschal auf alle Fehlerursachenknoten angewendet wird. Ist also  $p$  die ursprüngliche Auftretenswahrscheinlichkeit einer bestimmten Fehlerursache, so nimmt sie im optimierten Modell den Wert  $\mu \cdot p$  an. Die Bestimmung des optimalen Faktors  $\mu$  erfolgt dabei so, dass am Ende eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für die fehlerfreie Funktionserfüllung im Prozess „Anzeige“ (A-priori-Fall ohne Evidenzen) erreicht wird. In Abstimmung mit dem weiter oben bereits mehrfach erwähnten Expertengremium wurde in diesem Zusammenhang ein Zielwert von 97,5% festgelegt.

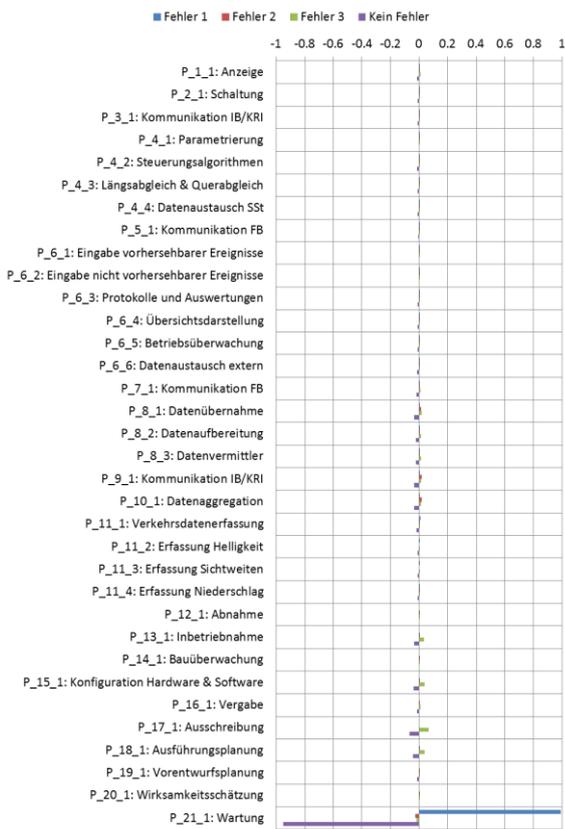
Bild 37 zeigt die A-priori-Fehlerraten des entsprechend modifizierten Qualitätsmodells. Man erkennt im Vergleich zu den Ergebnissen aus Bild 35 leicht die deutlich realistischeren Werte. Darüber hinaus ergibt sich automatisch auch für die Wirkungsknoten ein wesentlich besseres Bild (vgl. Bild 38).



**Bild 37:** A-priori-Fehlerraten der Prozesse im modifizierten Qualitätsmodell mit reduzierten Auftretenswahrscheinlichkeiten bei den Fehlerursachen



**Bild 38:** A-priori-Wirkungswahrscheinlichkeiten der einzelnen SBA-Funktionen im modifizierten Qualitätsmodell mit reduzierten Auftretenswahrscheinlichkeiten bei den Fehlerursachen



**Bild 39:** Änderungen der Fehlerraten pro Prozess im modifizierten Qualitätsmodell mit reduzierten Auftretenswahrscheinlichkeiten bei den Fehlerursachen im Fall „Keine Wartung“

Eine genauere Betrachtung der Ergebnisse des modifizierten Qualitätsmodells offenbart jedoch eine weitere (kleinere) Schwäche. Diese bezieht sich auf die laut Modell nur sehr geringe Wirkung des Zustandes „Keine Wartung“ (Fehlerart 1) im Prozess „Wartung & Instandsetzung“ auf den Betrieb. Tatsächlich widersprechen die Ergebnisse der intuitiven Erwartung, dass ohne Wartung und Instandsetzung mittel- bis langfristig mit signifikanten Leistungseinbußen der betrachteten Anlage zu rechnen ist. Bild 39 zeigt zur Veranschaulichung die Änderungen der Fehlerraten pro Prozess im Vergleich zu den Werten aus Bild 37. Dabei deuten erhöhte Fehlerraten bei einzelnen Planungs- und Bauprozessen – insbesondere beim Prozess „Ausschreibung“ – in grundsätzlich nachvollziehbarer Art auf mögliche (nicht-lokale) Fehlerursachen für die als Evidenz angenommene Nichtdurchführung von Wartung- und Instandsetzung hin.

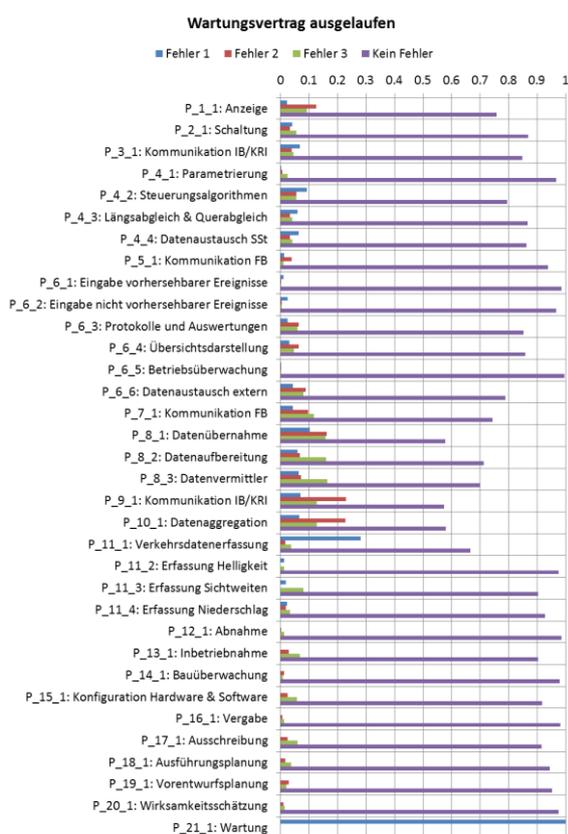
### 3.4.2 Skalierung der Verstärkungsfaktoren im Prozess „Wartung & Instandsetzung“

Die geringe Wirkung der Wartung und Instandsetzung im gemäß Kapitel 3.4.1 modifizierten Qualitätsmodell impliziert im Folgenden die Notwendigkeit einer Anpassung der entsprechenden Verstärkungsfaktoren aus Tab. 14. Ähnlich wie bei den Auftretenswahrscheinlichkeiten der Fehlerursachen wird hier für jeden der drei möglichen Fehlerzustände im Prozess „Wartung und Instandsetzung“ (d.h. keine Wartung, unvollständige Wartung und fehlerhafte Wartung) eine erneut lineare Skalierung der Parameter aus Tab. 14 vorgenommen. Dabei werden die in Tab. 25 genannten, bedingten Wahrscheinlichkeiten als Zielwerte für eine fehlerfreie Anzeige im jeweiligen Evidenzfall vorgegeben.

Bedingte Wahrscheinlichkeit	Zielwert
P(Fehlerfreie Anz.   Keine Wartung)	75%
P(Fehlerfreie Anz.   Unvollst. Wartung)	92,5%
P(Fehlerfreie Anz.   Fehlerhafte Wartung)	95%

**Tab. 25:** Zielwerte für die Optimierung der Verstärkungsfaktoren im Prozess „Wartung und Instandsetzung“

Das resultierende, final optimierte Qualitätsmodell unterscheidet sich hinsichtlich der A-priori-Fehlerraten (vgl. Kapitel 3.5.1) kaum von dem aus Kapitel 3.4.1, jedoch werden nun auch die Effekte der Wartung besser abgebildet. Bild 40 zeigt exemplarisch die Modellergebnisse im Fall eines ohne Verlängerung ausgelaufenen Wartungsvertrages. Man erkennt deutlich die Auswirkungen der dadurch induzierten Fehlerart 1 im Prozess „Wartung & Instandsetzung“ auf den Betrieb. Zugleich erklärt die lokale Fehlerursache des ausgelaufenen Wartungsvertrages bereits die Nichtdurchführung von Wartung und Instandsetzung soweit, dass die Änderungen der Fehlerraten in der Planungs- und Bauphase anders als im Beispiel aus Bild 39 nur minimal ausfallen. Man erkennt folglich gut den in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Effekt des „Explaining Away“ bei Bayes’schen Netzen.



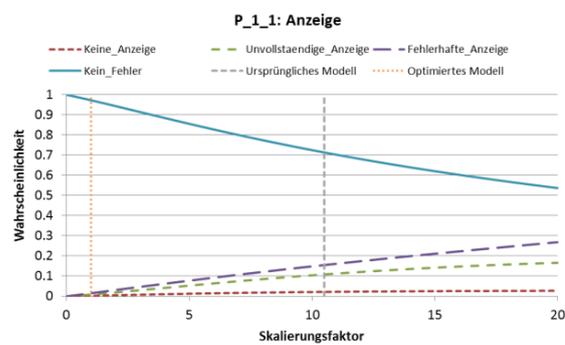
**Bild 40:** Fehlerraten der Prozesse im optimierten Qualitätsmodell im Fall eines ausgelaufenen Wartungsvertrages bei sonst keinen weiteren Evidenzen

Abschließend sei kurz erwähnt, dass mit der beschriebenen Optimierung der Verstärkungsfaktoren natürlich auch eine Änderung der A-priori-Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Anzeige einhergeht bzw. einhergehen kann. Im konkreten Fall ergibt sich mit 97,3% ein geringfügig von den ursprünglich festgelegten 97,5% (vgl. Kapitel 3.4.1) abweichender Wert. Die Differenz ist unter Berücksichtigung der allgemeinen Modellgenauigkeit jedoch so klein, dass eine weitere Betrachtung an dieser Stelle entfallen kann.

### 3.4.3 Sensitivitätsanalyse

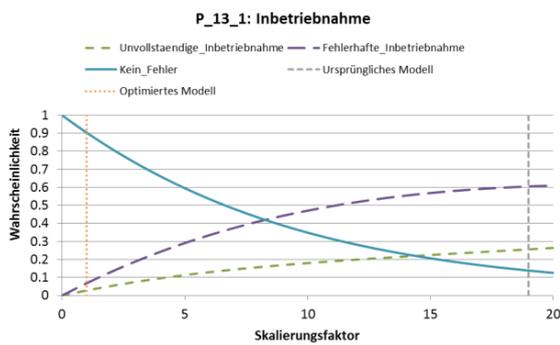
Die Optimierung in Kapitel 3.4.1 hat gezeigt, dass die Skalierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten für die Fehlerursachen im Modell einen massiven Einfluss auf die Höhe der Fehlerraten der einzelnen Prozesse hat. Wie stark der Zusammenhang pro Prozess ist, wird im Folgenden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse näher beleuchtet.

Grundlage hierfür bildet das final optimierte Qualitätsmodell aus Kapitel 3.4.2, wobei analog zum Optimierungsansatz aus Kapitel 3.4.1 die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Fehlerursachen pauschal und gleichzeitig für alle Prozesse linear mit einem Faktor zwischen 0 und 20 skaliert werden. Bild 41 zeigt exemplarisch die Auswirkungen auf die Fehlerraten im Prozess „Anzeige“. Das final optimierte Modell entspricht dabei per Definition dem Faktor 1. Zur Veranschaulichung ist darüber hinaus auf Basis der A-priori-Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Funktionserfüllung im betrachteten Prozess die Lage des ursprünglichen Modells mit nicht optimierten Parametern gemäß Kapitel 3.3 eingezeichnet.



**Bild 41:** Sensitivität des optimierten Qualitätsmodells gegenüber einer pauschalen Skalierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten bei den Fehlerursachen (Prozess „Anzeige“)

Besonders groß sind die Unterschiede zwischen ursprünglichem und optimiertem Modell in diesem Zusammenhang bei einzelnen Prozessen der Lebenszyklusphasen Planung und Bau (vgl. Bild 42). Dies hängt vor allem damit zusammen, dass hier bereits die in der FMEA geschätzten und in der Sensitivitätsanalyse multiplikativ verstärkten Grundwahrscheinlichkeiten (vgl. Tab. 3) sehr viel höher sind als bei den Prozessen der Betriebsphase.



**Bild 42:** Sensitivität des optimierten Qualitätsmodells gegenüber einer pauschalen Skalierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten bei den Fehlerursachen (Prozess „Inbetriebnahme“)

Darüber hinaus sind zwangsläufig auch solche Prozesse stärker von der Skalierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten bei den Fehlerursachen betroffen, die entsprechend der Topologie des Qualitätsmodells direkt oder indirekt und vor allem ohne zwischenzeitliche Fehlerkompensation von sehr vielen Fehlerursachen abhängen. Dies sind bezogen auf die Betriebsphase – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – z.B. die Prozesse der Verkehrsdatenerfassung, der Datenaggregation oder der Datenübernahme. Für Details sei auf die vollständige Darstellung der Sensitivitätsdiagramme aller Prozesse in Anhang 3 verwiesen.

### 3.5 Evaluierung des Qualitätsmodells

Ziel der Evaluierung des final optimierten Qualitätsmodells aus Kapitel 3.4.2 ist es, dessen grundsätzliche Plausibilität anhand ausgewählter Anwendungsfälle (vgl. Kapitel 2.5) nachzuweisen. Dabei soll geprüft werden, inwieweit die im Modell berechneten Fehlerraten in den verschiedenen Evidenzszenarien zumindest qualitativ mit den Erwartungen eines Fachmanns übereinstimmen. Ist dies der Fall, so kann davon ausgegangen werden, dass das entwickelte Qualitätsmodell in den wesentlichen Grundzügen tatsächlich das in die Kalibrierung eingeflossene Expertenwissen in dessen struktureller Komplexität korrekt abbildet. Eine Anwendung des Modells zur (groben) Fehlerfortpflanzungsrechnung bzw. als Diagnosewerkzeug wäre demnach mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in anderen Evidenzszenarien sinnvoll möglich.

Es soll in diesem Zusammenhang noch darauf hingewiesen werden, dass die Gefahr eines „Overfitting“ bei der Kalibrierung des Qualitätsmodells mit

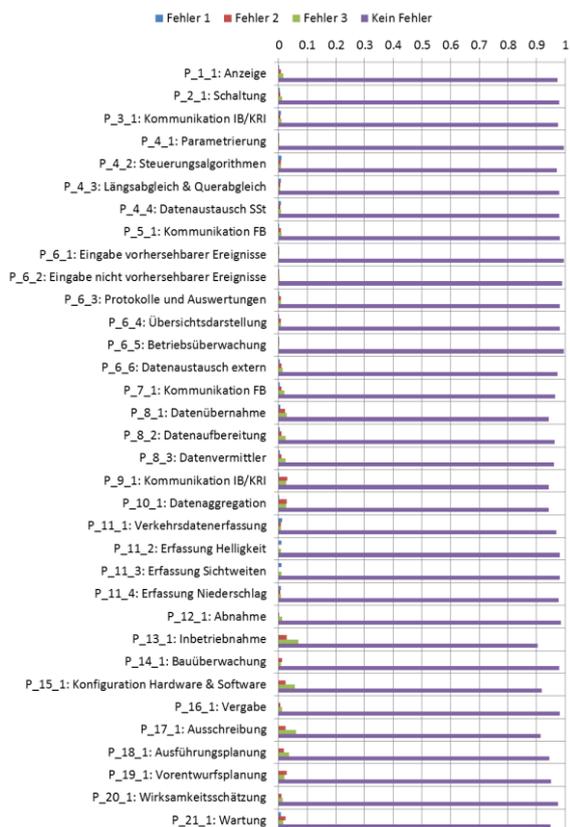
ziemlicher Sicherheit ausgeschlossen werden kann, da keiner der im weiteren Verlauf analysierten Beispielfälle (s. Kapitel 3.5.2 und 3.5.3) – ggf. mit Ausnahme von Evidenzfall 10 (s. Kapitel 3.5.2.10) – explizit in die Optimierung eingeflossen ist. Insbesondere wurde auch keine stark messwertbasierte, sondern eine lediglich auf (groben) Schätzwerten aufbauende Kalibrierung vorgenommen.

Folglich liegen natürlich auch der Evaluation derzeit keine echten Messdaten oder Ähnliches zugrunde, sodass an dieser Stelle strenggenommen bestenfalls von einem plausibilisierten, qualitativen Modell gesprochen werden kann. Entsprechend sind die präsentierten Ergebnisse (s. Kapitel 3.5.1 bis 3.5.3) grundsätzlich sehr differenziert zu interpretieren. Gerade bei kleinen Verschiebungen der berechneten Fehlerraten ist sorgfältig zu unterscheiden, ob es sich dabei tatsächlich um einen realen Effekt oder lediglich um ein modelltechnisches Artefakt handelt. Die Entwicklung und der Nachweis eines auch quantitativ korrekten Modells würden jedoch einen wesentlich höheren Aufwand erfordern, der den Rahmen des vorliegenden Projekts deutlich übersteigt.

#### 3.5.1 Referenzfall ohne Evidenzen

Bereits in Kapitel 3.4.2 wurde erwähnt, dass sich das final optimierte Qualitätsmodell auf Prozessebene hinsichtlich der A-priori-Fehlerraten kaum von dem aus Kapitel 3.4.1 unterscheidet. Bild 43 und Bild 44 zeigen die Ergebnisse, die im Folgenden (s. Kapitel 3.5.2 und 3.5.3) als Vergleichsgrundlage bei der Betrachtung verschiedener Evidenzszenarien dienen. Leichte Fehlerschwerpunkte sind in den Lebenszyklusphasen Planung und Bau – vor allem in den Prozessen „Ausschreibung“, „Konfiguration Hardware & Software“ sowie „Inbetriebnahme“ – erkennbar, jedoch werden Fehler hier durch nachfolgende Prozesse oft auch kompensiert. Weitere Fehlerhäufungen im Sinne fehlerhafter oder unvollständiger Outputs ergeben sich im Prozess der „Datenaggregation“ – und damit automatisch bei den entsprechenden Folgeprozessen – infolge der Zusammenführung aller vier Datenerfassungsprozesse mit ihren individuellen Fehlerraten in einem Modellknoten. Als A-priori-Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Anzeige ergibt sich ferner ein Wert von 97,3% (vgl. Kapitel 3.4.2). Darüber hinaus

stellt sich im Referenzfall ohne Evidenzen hinsichtlich der maximalen Harmonisierungswirkung ein Prozentwert von 98,8% ein. Gemittelt über alle Top Events beträgt die Wirkungswahrscheinlichkeit unter Beachtung der Ausführungen aus Kapitel 3.3.3.3 sogar 99,7%.



**Bild 43: A-priori-Fehlerraten der Prozesse im optimierten Qualitätsmodell**



**Bild 44: A-priori-Wirkungswahrscheinlichkeiten der einzelnen SBA-Funktionen im optimierten Qualitätsmodell**

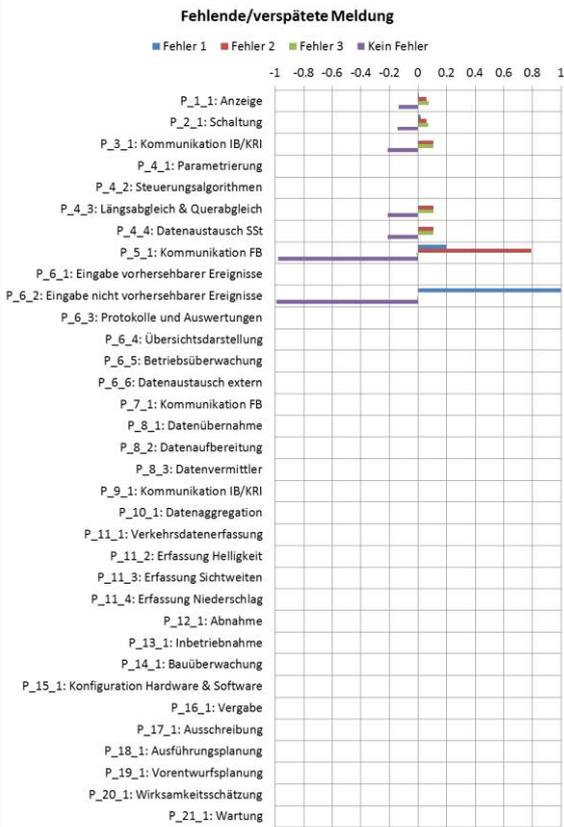
### 3.5.2 Anwendung als Fehlerfortpflanzungsmodell

Die folgenden Unterkapitel 3.5.2.1 bis 3.5.2.11 stellen die absoluten Änderungen der prozessbezogenen Fehlerraten sowie der daraus resultierenden Wirkungen im Top Event für den Fall des Vorliegens jeweils einer bestimmten Fehlerursache im System bzw. im Lebenszyklus der betrachteten Standard-SBA dar, wobei sonst (in der Regel) keine weiteren Evidenzen einfließen. Ergänzend wird in Kapitel 3.5.2.12 der rein auf den Betrieb ausgerichtete Fall betrachtet, dass in den Lebenszyklusphasen Planung und Bau keine Fehler auftreten.

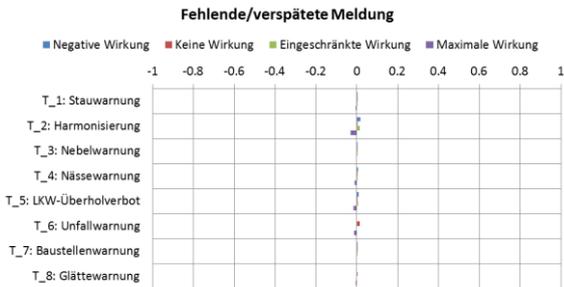
In allen Evidenzfällen werden dabei die Änderungen der Wirkungswahrscheinlichkeiten in den Top Events sowohl absolut als auch relativ bezogen auf die in Kapitel 3.3.3.3 beschriebenen, virtuellen Wirkungspotenziale pro SBA-Funktion angegeben. Gerade die relative Betrachtung lässt in diesem Zusammenhang eine Einschätzung der Auswirkungen von Fehlern auch auf seltene SBA-Schaltungen zu.

#### 3.5.2.1 Evidenzfall 1: Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse (Fehlerart 1)

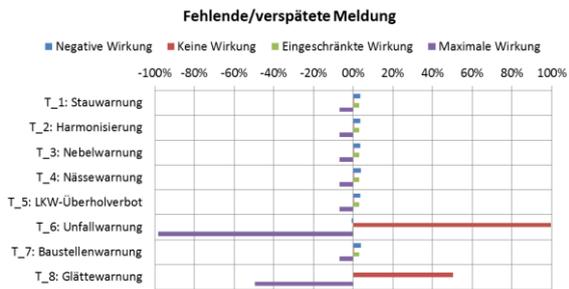
Die relevanten Diagramme (s. Bild 45 bis Bild 47) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Fehlende/verspätete Meldung“, wodurch im Prozess „Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse“ die Fehlerart 1 („Keine Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.



**Bild 45:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Fehlende/verspätete Meldung“ im Prozess „Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse“



**Bild 46:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Fehlende/verspätete Meldung“ im Prozess „Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse“



**Bild 47:** Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Fehlende/verspätete Meldung“ im Prozess „Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial

Man erkennt, wie die fehlende Eingabe dazu führt, dass als Ergebnis der Fernbus-Kommunikation mit hoher Wahrscheinlichkeit nur unvollständige Daten bei der Unterzentrale ankommen. Der wesentlich weniger wahrscheinliche Fall, dass keine Daten ankommen, entsteht hierbei entweder durch einen technischen Fehler im Prozess der Kommunikation direkt oder vor allem bei zeitgleichem Ausfall der manuellen Eingabe vorhersehbarer Ereignisse.

Die per Evidenz getroffene Annahme einer fehlenden oder verspäteten Meldung verhindert zugleich, dass für die induzierte Fehlerart 1 im Prozess „Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse“ technische Probleme als Fehlerursache vermutet werden, die wiederum ihren Ursprung beispielsweise in einer fehlerhaften bzw. unvollständigen Wartung oder Konfiguration der Hardware und Software haben könnten. Die Änderungen der Fehlerraten gegenüber dem Referenzfall konzentrieren sich im vorliegenden Evidenzszenario demnach wie erwartet auf die in der Modelltopologie aus Sicht der manuellen Eingabe nachfolgenden Prozesse.

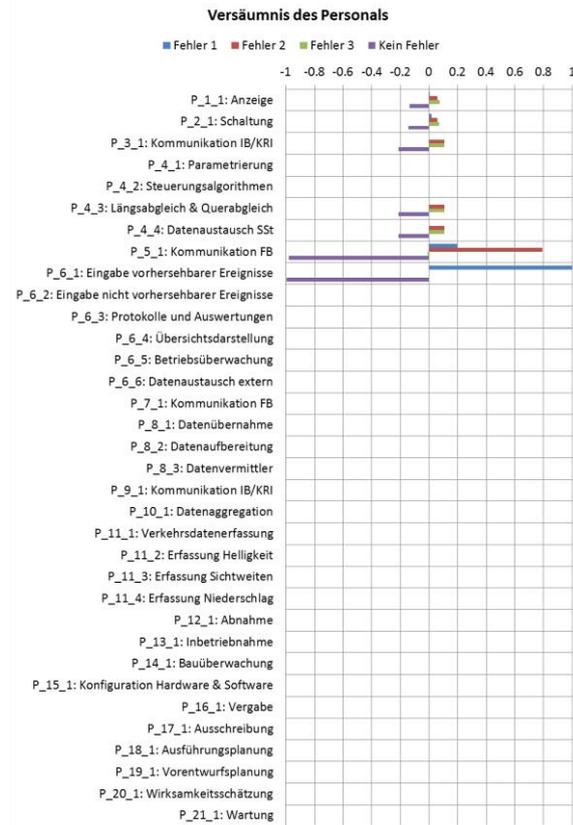
Die Zusammenführung mit den automatischen SBA-Schaltungen im Prozess „Längs- & Querabgleich“ bewirkt schließlich, dass der Einfluss der betrachteten Fehlerursache auf das Gesamtsystem der SBA auf ein gewisses Maß beschränkt bleibt. Die Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Anzeige (aggregiert über alle SBA-Funktionen) reduziert sich in diesem Sinne beispielsweise um 13,7 Prozentpunkte (s. Bild 45).

In der Folge zeigen sich Auswirkungen auf die verschiedenen SBA-Funktionen, die relativ zum jeweiligen, virtuellen Wirkungspotenzial für die Unfallwar-

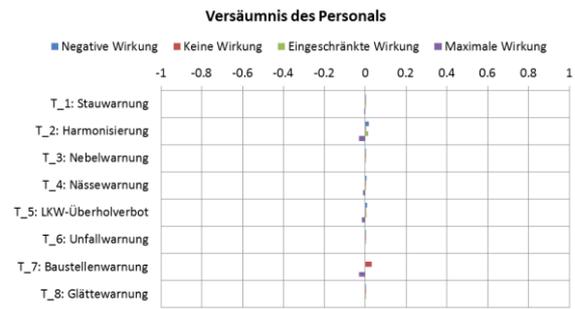
nung und die Glättewarnung wie erwartet sehr deutlich ausfallen (s. Bild 47). Die Beeinträchtigung der übrigen Top Events ist ferner modelltechnisch bedingt und ergibt sich letztlich aus der nicht nach SBA-Funktionen differenzierten Aggregation zu allgemeinen Fehlerarten in den betrachteten Prozessen bis hin zur Anzeige. Die leichten Verschiebungen bei Stauwarnung, Harmonisierung etc. sind demnach sehr vorsichtig zu interpretieren bzw. können als reine Modelleffekte klassifiziert werden.

**3.5.2.2 Evidenzfall 2: Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse (Fehlerart 1)**

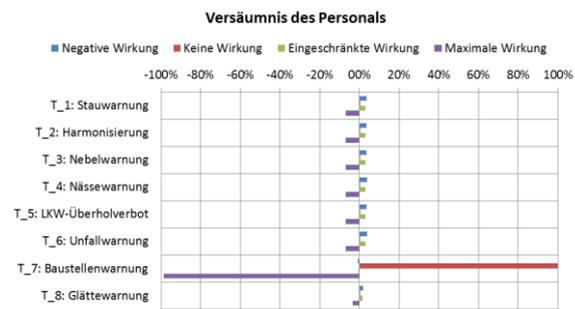
Die relevanten Diagramme (s. Bild 48 bis Bild 50) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Versäumnis des Personals“, wodurch im Prozess „Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse“ die Fehlerart 1 („Keine Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.



**Bild 48:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Versäumnis des Personals“ im Prozess „Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse“



**Bild 49:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Versäumnis des Personals“ im Prozess „Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse“

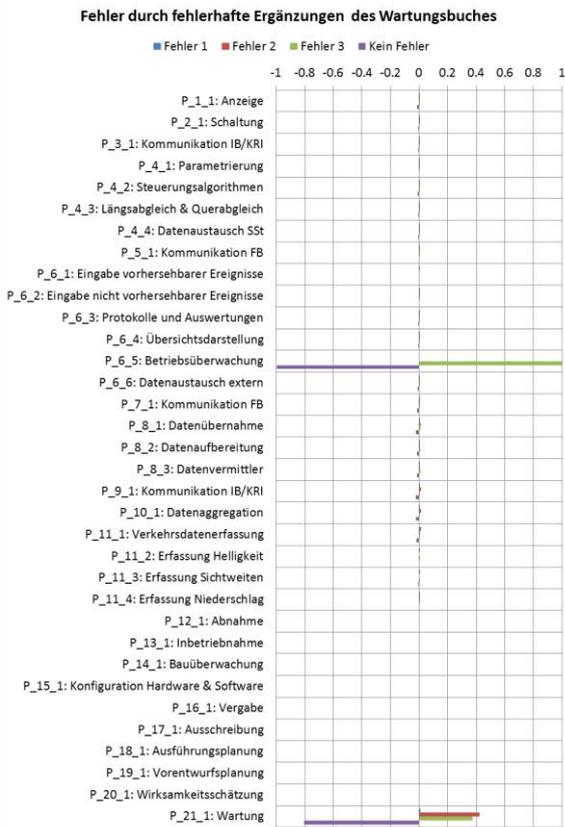


**Bild 50:** Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Versäumnis des Personals“ im Prozess „Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial

Für die Interpretation der Ergebnisse gelten die gleichen Aussagen wie zuvor in Kapitel 3.5.2.1 mit der einzigen Ausnahme, dass hinsichtlich der Top Events in diesem Fall die Funktion der Baustellenwarnung in besonderer und zugleich plausibler Weise beeinträchtigt ist (s. Bild 50).

**3.5.2.3 Evidenzfall 3: Betriebsüberwachung (Fehlerart 3)**

Die relevanten Diagramme (s. Bild 51 bis Bild 53) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Fehlerhafte Ergänzungen des Wartungsbuches durch einen Bediener“, wodurch im Prozess „Betriebsüberwachung“ die Fehlerart 3 („Fehlerhafte Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.



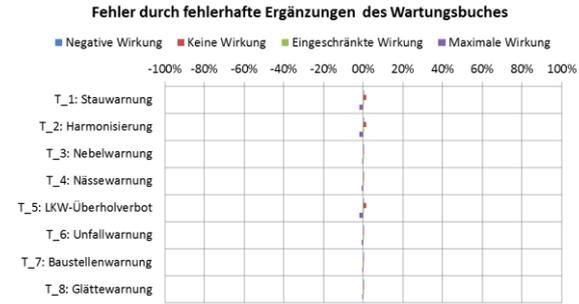
**Bild 51:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Fehlerhafte Ergänzungen des Wartungsbuches durch einen Bediener“ im Prozess „Betriebsüberwachung“



**Bild 52:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Fehlerhafte Ergänzungen des Wartungsbuches durch einen Bediener“ im Prozess „Betriebsüberwachung“

Man erkennt sofort den direkten Einfluss einer fehlerhaften Betriebsüberwachung auf die Wartung und Instandsetzung. Die Fehlerrate erhöht sich hier um insgesamt über 80 Prozentpunkte, verteilt auf die 3 Fehlerarten „Keine Wartung & Instandsetzung“ (+1 Prozentpunkt), „Unvollständige Wartung & Instandsetzung“ (+42,4 Prozentpunkte) sowie „Fehlerhafte Wartung & Instandsetzung“ (+37,3 Prozentpunkte). Für die übrigen Prozesse der Be-

triebsphase ergeben sich in der Folge durchschnittliche Einbußen bezüglich einer jeweils fehlerfreien Funktionserfüllung in der Größenordnung von etwa einem Prozentpunkt pro Prozess. Die Wahrscheinlichkeit in Höhe von 96,0% für eine fehlerfreie Anzeige bedeutet in diesem Zusammenhang beispielsweise eine Verringerung um 1,3 Prozentpunkte gegenüber dem Referenzfall.



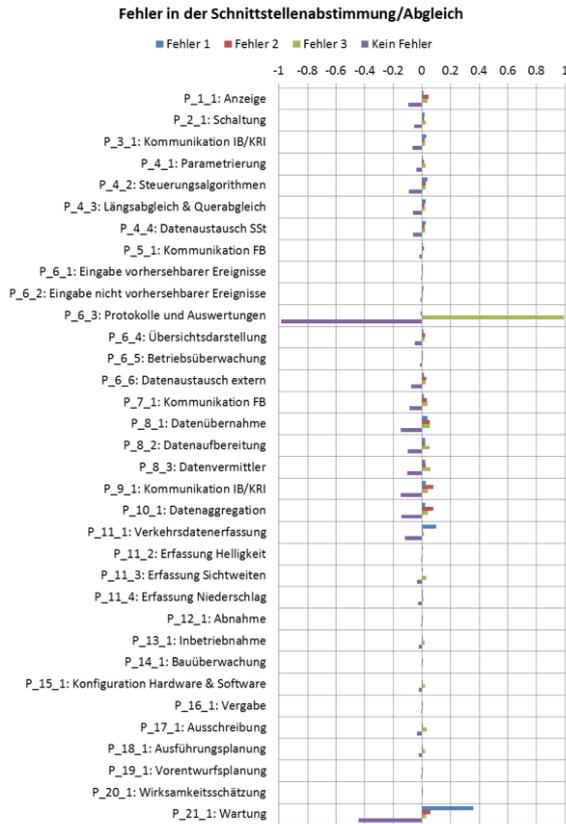
**Bild 53:** Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Fehlerhafte Ergänzungen des Wartungsbuches durch einen Bediener“ im Prozess „Betriebsüberwachung“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial

Dass die Unterschiede einschließlich der resultierenden Auswirkungen auf die Wirksamkeit in den Top Events nicht größer ausfallen, hängt vor allem damit zusammen, dass eine unvollständige oder fehlerhafte Wartung, wie sie im vorliegenden Beispiel deutlich an Wahrscheinlichkeit gewinnt, auch im optimierten Qualitätsmodell verglichen mit einer grundsätzlichen Nichtdurchführung der Wartung nach wie vor einen eher geringen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit und Wirkung der SBA hat (vgl. Tab. 25). Tatsächlich steckt dahinter die Annahme, dass eine unvollständige oder fehlerhafte Wartung schlimmstenfalls vorübergehend zu Leistungseinbußen führt, wenn fehlerhafte Komponenten z.B. nicht präventiv im Rahmen zyklischer Wartungen ausgetauscht, sondern erst bei Ausfall kurzfristig ersetzt werden. Der möglicherweise entstehende, personelle und finanzielle Mehraufwand bleibt im vorliegenden Qualitätsmodell dabei natürlich unberücksichtigt.

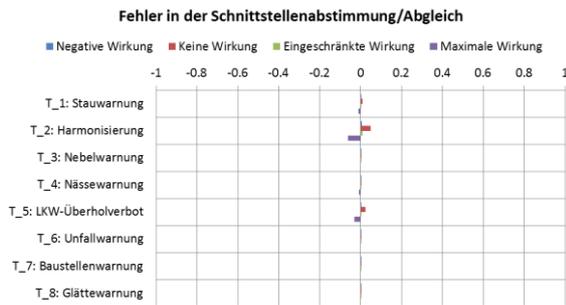
**3.5.2.4 Evidenzfall 4: Protokolle & Auswertungen (Fehlerart 3)**

Die relevanten Diagramme (s. Bild 54 bis Bild 56) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Fehler in der Schnittstellenabstimmung/Abgleich“, wodurch im

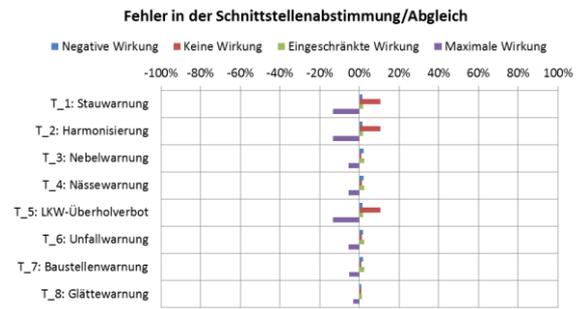
Prozess „Protokolle und Auswertung“ die Fehlerart 3 („Fehlerhafte Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.



**Bild 54:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Fehler in der Schnittstellenabstimmung/Abgleich“ im Prozess „Protokolle und Auswertungen“



**Bild 55:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Fehler in der Schnittstellenabstimmung/Abgleich“ im Prozess „Protokolle und Auswertungen“



**Bild 56:** Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Fehler in der Schnittstellenabstimmung/Abgleich“ im Prozess „Protokolle und Auswertungen“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial

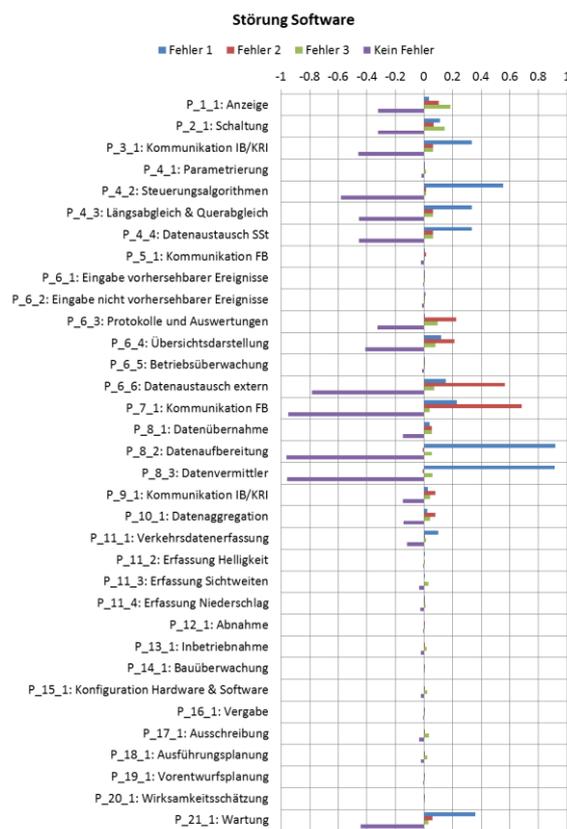
Im Vergleich zu Kapitel 3.5.2.3 (Fehlerhafte Betriebsüberwachung) wird stärkere Einfluss der konkret betrachteten Fehlerursache deutlich. Dies hängt in erster Linie damit zusammen, dass ein Fehler in der Schnittstellenabstimmung als *technische* Fehlerursache – anders als die *nicht-technische* Fehlerursache aus Evidenzfall 3 – entsprechend der gewählten Topologie des Qualitätsmodells (vgl. Bild 32) unmittelbar vom Zustand des Prozesses „Wartung & Instandsetzung“ beeinflusst wird. Im Sinne diagnostischen Schlussfolgerns (vgl. Kapitel 3.1.2) erhöhen sich somit durch die angenommene Evidenz im vorliegenden Beispiel die Wahrscheinlichkeiten der Fehlerzustände bei der Wartung, wobei der Anstieg für Fehlerart 1 infolge der Optimierung aus Kapitel 3.4.2 mit den vorgegebenen Zielwerten aus Tab. 25 besonders drastisch ausfällt. Es ist zu bezweifeln, ob der Effekt in Wirklichkeit tatsächlich so groß ist, zumindest im Sinne einer qualitativen Betrachtung ist die Erhöhung der Fehlerwahrscheinlichkeiten im Prozess „Wartung & Instandsetzung“ aber durchaus plausibel.

In der weiteren Konsequenz ergeben sich erhöhte Fehlerraten für die übrigen Prozesse der Betriebsphase (vgl. Bild 54), die damit erklärt werden können, dass grundlegende Versäumnisse bei der Wartung und Instandsetzung (d.h. deren Nichtdurchführung) in der Regel natürlich nicht nur auf den Prozess „Protokolle und Auswertungen“ beschränkt bleiben, sondern letztlich alle Prozesse betreffen. Die ermittelten, durchaus signifikanten Änderungen bei den Wirkungswahrscheinlichkeiten (vgl. Bild 55 bzw. Bild 56) sind somit vorrangig als *indirekte* Folge der betrachteten Fehlerursache „Fehler in der Schnittstellenabstimmung/Abgleich“

über den Umweg der rechnerisch induzierten Fehlerart 1 im Prozess „Wartung & Instandsetzung“ zu erklären.

**3.5.2.5 Evidenzfall 5: Datenaufbereitung (Fehlerart 1)**

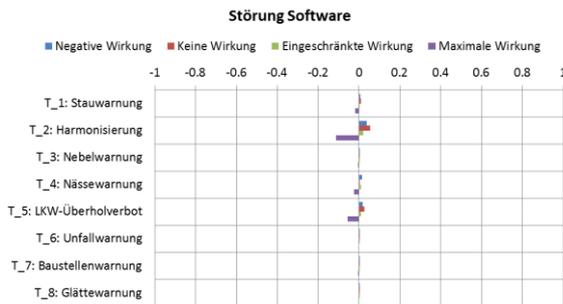
Die relevanten Diagramme (s. Bild 57 bis Bild 59) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Störung Software“, wodurch im Prozess „Datenaufbereitung“ die Fehlerart 1 („Keine Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.



**Bild 57: Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Störung Software“ im Prozess „Datenaufbereitung“**

Man erkennt leicht, wie der durch die angenommene Softwarestörung induzierte Ausfall der Datenaufbereitung unmittelbar auch die Funktion des darauf folgenden Datenvermittlers beeinträchtigt. Insbesondere ergeben sich daraus in plausibler Weise auch signifikante Einbußen im Bereich der direkt auf UZ-Ebene durchgeführten, automatischen Steuerungsalgorithmen, die sich trotz möglicher Fehlerkompensationen durch Schaltungen aus Längs- und Querabgleich bzw. Ausfallbehandlung o.ä. bis

zur Anzeige und damit bis zu den Top Events hin auswirken (vgl. Bild 59).



**Bild 58: Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Störung Software“ im Prozess „Datenaufbereitung“**



**Bild 59: Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Störung Software“ im Prozess „Datenaufbereitung“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial**

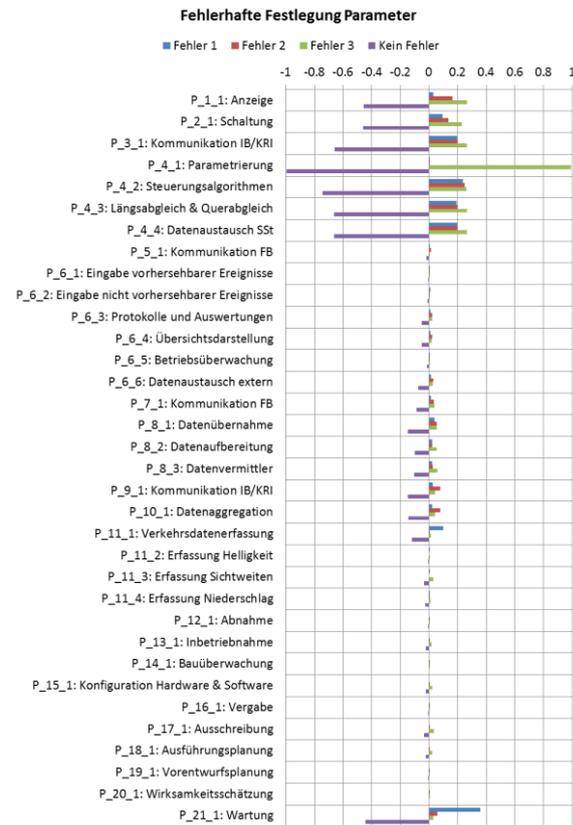
Darüber hinaus sind durch den weitgehenden Ausfall des Datenvermittlers – als indirekte Folge der betrachteten Fehlerursache – auch die Prozesse in der VZ deutlich betroffen. Allerdings existieren hier teilweise zusätzliche Möglichkeiten der Fehlerkompensation, wie z.B. dass bestimmte Daten zu einem späteren Zeitpunkt unter Umständen noch „nachgeholt“ und verarbeitet werden können, weshalb auch die Kommunikation zwischen UZ und VRZ in diesem Zusammenhang in vielen Fällen lediglich als verzögert (bzw. unvollständig) anstatt als nicht verfügbar betrachtet wird (vgl. Bild 57). Entsprechend sind somit auch die Auswirkungen auf die weniger zeitkritischen Prozesse wie „Protokolle und Auswertungen“ oder „Übersichtsdarstellung“ in der Regel geringer als die unmittelbar auf den aktuellen Daten basierenden Steuerungsalgorithmen.

Im Übrigen sei abschließend noch auf den Effekt hingewiesen, dass das Vorliegen der technischen Fehlerursache „Störung Software“ durch das Qualitätsmodell wie im Evidenzfall 4 (Fehlerhafte Proto-

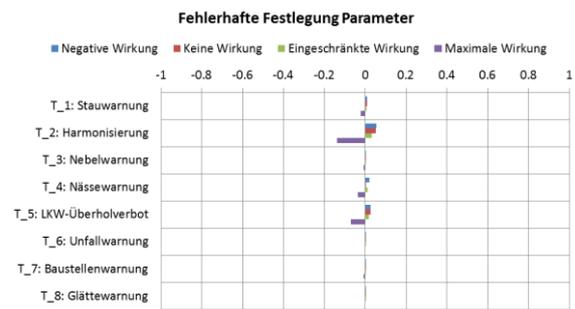
kolle & Auswertungen) auch im vorliegenden Beispielfall offenbar zu einem großen Teil mit der Nichtdurchführung von Wartung und Instandsetzung erklärt wird. Für weitere Details in diesem Punkt sei zur Vermeidung unnötiger Wiederholungen auf Kapitel 3.5.2.4 verwiesen.

**3.5.2.6 Evidenzfall 6: Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus VRZ (Fehlerart 3)**

Die relevanten Diagramme (s. Bild 60 bis Bild 62) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Fehlerhafte Festlegung Parameter“, wodurch im Prozess „Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus VRZ“ die Fehlerart 3 („Fehlerhafte Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.



**Bild 60:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Fehlerhafte Festlegung Parameter“ im Prozess „Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus VRZ“



**Bild 61:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Fehlerhafte Festlegung Parameter“ im Prozess „Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus VRZ“



**Bild 62:** Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Fehlerhafte Festlegung Parameter“ im Prozess „Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus VRZ“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial

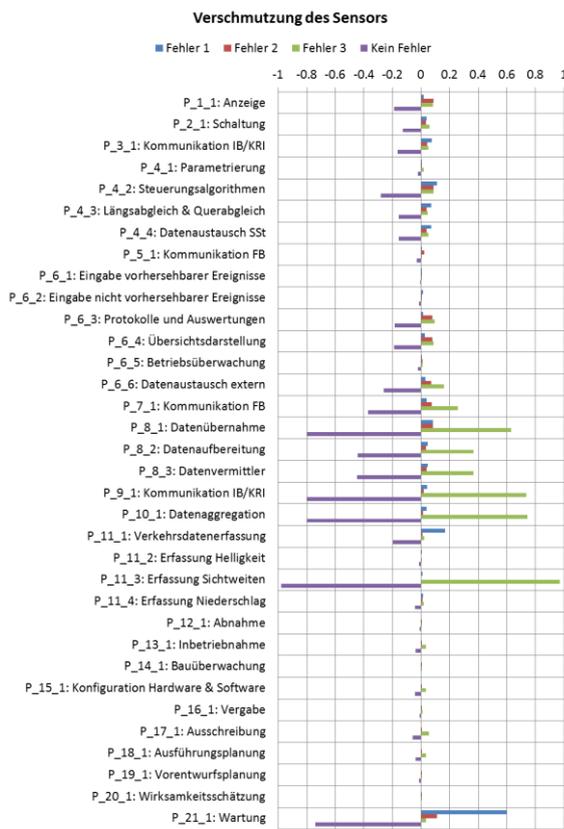
Man erkennt unmittelbar den Einfluss auf die von der Parametrierung direkt betroffenen Prozesse „Durchführung Steuerungsalgorithmen“ und „Längs- & Querabgleich“ mit einer Reduzierung der Wahrscheinlichkeiten für die jeweils fehlerfreie Funktionserfüllung um 74,4 bzw. 66,1 Prozentpunkte. Für den Prozess „Anzeige“ ergibt sich ferner nach möglicher Fehlerkompensation durch Schaltungen aus Längs- und Querabgleich o.ä. eine Erhöhung der Fehlerraten um insgesamt 45,6 Prozentpunkte. In der Folge sind somit auch die Top Events durchgängig von signifikanten Wirkungseinbußen gekennzeichnet (vgl. Bild 62).

Die Änderungen der Fehlerraten in den übrigen Betriebsprozessen sind abschließend erneut über den Umweg vor allem einer Nichtdurchführung von Wartung und Instandsetzung zu erklären, welche ihrerseits im Modell als vermutete Hauptursache für den betrachteten, technischen Fehler im Prozess „Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus

VRZ“ ermittelt wird. Für weitere Details sei wiederum auf die entsprechenden Ausführungen in Kapitel 3.5.2.4 verwiesen.

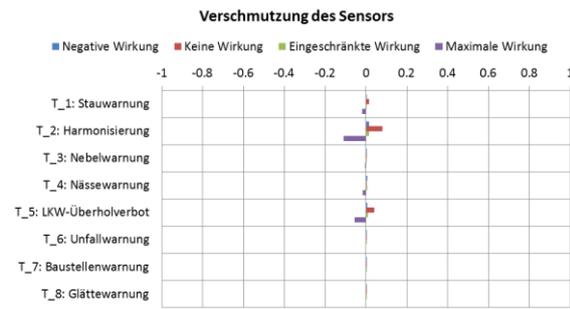
### 3.5.2.7 Evidenzfall 7: Erfassung Sichtweiten (Fehlerart 3)

Die relevanten Diagramme (s. Bild 63 bis Bild 65) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Verschmutzung des Sensors“, wodurch im Prozess „Erfassung Sichtweiten“ die Fehlerart 3 („Fehlerhafte Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.

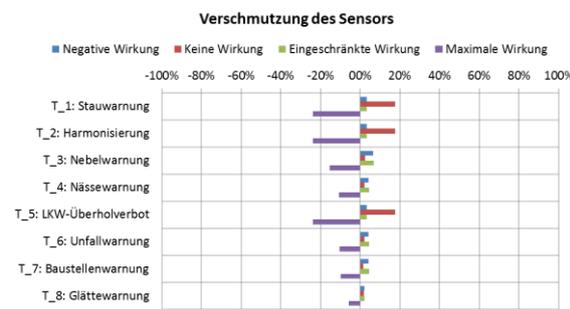


**Bild 63:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Verschmutzung des Sensors“ im Prozess „Erfassung Sichtweiten“

Ähnlich wie im Evidenzfall 5 (Keine Datenaufbereitung) ist zu erkennen, wie sich der Fehler im Erfassungsprozess auf die nachfolgenden Prozesse fortpflanzt, wobei in diesem Fall in plausibler Weise vor allem Erhöhungen bei den Fehlerraten für Fehlerart 3 (Fehlerhafte Funktionserfüllung) zu beobachten sind. Im Ergebnis berechnet das Qualitätsmodell eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Anzeige um 18,8 Prozentpunkte mit durchaus signifikanten Auswirkungen auf die Top Events.



**Bild 64:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Verschmutzung des Sensors“ im Prozess „Erfassung Sichtweiten“

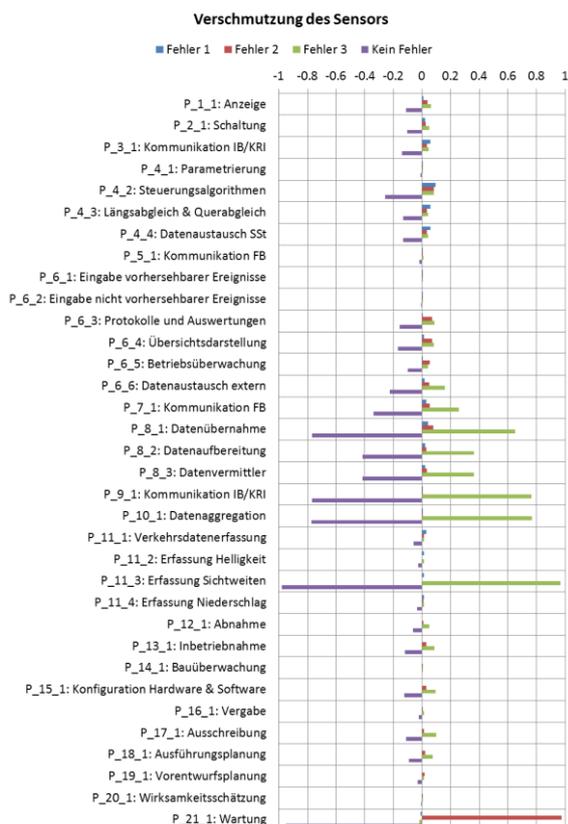


**Bild 65:** Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Verschmutzung des Sensors“ im Prozess „Erfassung Sichtweiten“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial

Auffällig ist, dass dabei jedoch nicht wie erwartet die Nebelwarnung, sondern vor allem die Funktionen „Stauwarnung“, „Harmonisierung“ und „LKW-Überholverbot“ betroffen sind. Ursächlich hierfür ist erneut die im Modell ausgehend von der angenommenen Verschmutzung des Sichtweitesensors mittels diagnostischen Schlussfolgerns berechnete, hohe Wahrscheinlichkeit, dass es keine Wartung und Instandsetzung gibt (vgl. Kapitel 3.5.2.4). Dies wiederum führt zu der Annahme, dass insbesondere auch die Verkehrsdatenerfassung hohe Ausfallraten aufweist (vgl. Bild 63), welche letztlich für die ermittelten Einbußen bei den zuvor genannten SBA-Funktionen verantwortlich gemacht werden können. Wie schon bei mehreren Beispielen zuvor ist somit vor allem die starke Abhängigkeit zwischen bestimmten Fehlerursachenknoten und dem Prozess „Wartung & Instandsetzung“ kritisch zu bewerten bzw. bei der Interpretation der Ergebnisse sorgfältig zu berücksichtigen.

Unter der zusätzlichen Annahme, dass eine unvollständige Wartung und Instandsetzung (anstelle ei-

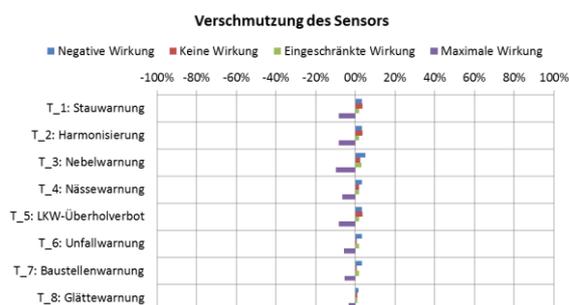
ner Nichtdurchführung) zur beobachteten Verschmutzung des Sichtweitensensors führt, verringern sich im Übrigen die Auswirkungen auf die Fehlerraten in der Verkehrsdatenerfassung drastisch. Statt um 19,8 Prozentpunkte (vgl. Bild 63) nimmt die Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Funktionserfüllung diesmal nur um 6,0 Prozentpunkte ab (vgl. Bild 66).



**Bild 66:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Verschmutzung des Sensors“ im Prozess „Erfassung Sichtweiten“ unter der Zusatzannahme einer unvollständigen Wartung und Instandsetzung

Die nach wie vor deutlichen Wirkungseinbußen bei allen Top Events (vgl. Bild 67), d.h. nicht nur bei der Nebelwarnung, sind in diesem Fall weniger dem „Wartungseffekt“ anzulasten, sondern vor allem der ebenfalls bereits mehrfach erwähnten Tatsache, dass in den einzelnen Prozessknoten des vorliegenden Qualitätsmodells keine explizite Differenzierung bezüglich der verschiedenen SBA-Funktionen erfolgt. Dennoch zeigt Bild 67 zumindest ansatzweise, dass im Zuge einer relativen, auf die jeweiligen virtuellen Wirkungspotenziale bezogenen Betrachtung eine Verschmutzung des Sichtweitensensors – im Zusammenhang mit einer unvollständigen Wartung und Instandsetzung – tatsächlich die

Funktion der Nebelwarnung am stärksten beeinträchtigt.



**Bild 67:** Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Verschmutzung des Sensors“ im Prozess „Erfassung Sichtweiten“ bezogen auf die jeweiligen virtuellen Wirkungspotenziale unter Berücksichtigung der Zusatzannahme einer unvollständigen Wartung und Instandsetzung

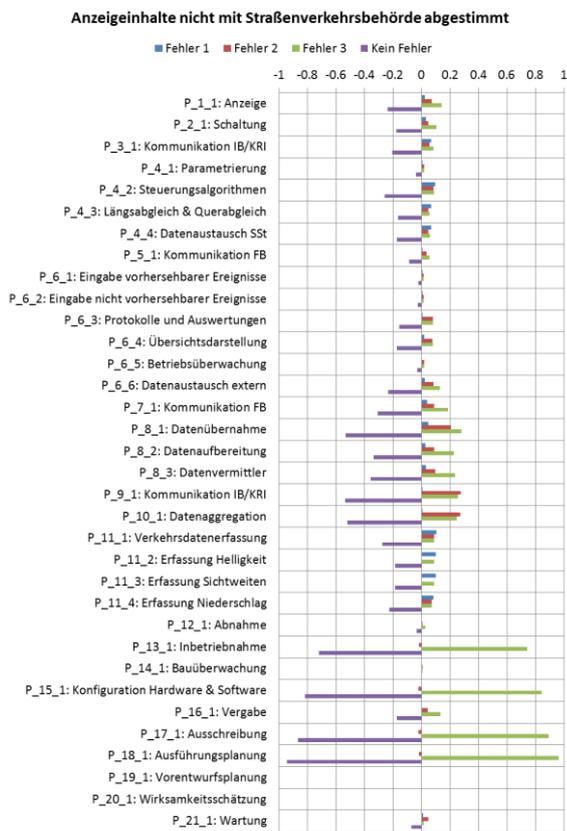
### 3.5.2.8 Evidenzfall 8: Ausführungsplanung (Fehlerart 3)

Die relevanten Diagramme (s. Bild 68 bis Bild 70) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Anzeigeinhalte nicht mit Straßenverkehrsbehörde abgestimmt“, wodurch im Prozess „Ausführungsplanung“ die Fehlerart 3 („Fehlerhafte Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.

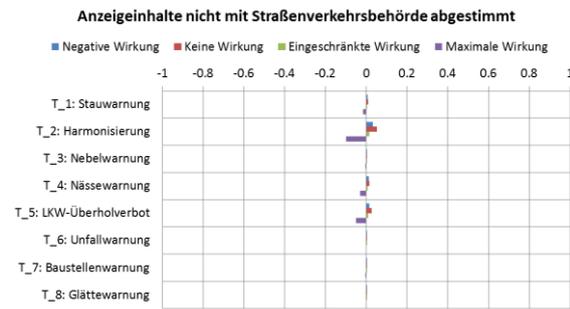
Das Beispiel zeigt deutlich, wie sich eine fehlerhafte Ausführungsplanung prinzipiell in einer fehlerhaften Ausschreibung (z.B. im Sinne fehlerhafter, beigefügter Planungsunterlagen) auswirkt, was in der Folge zu Fehlern beim Bau und bei der Inbetriebnahme der Anlage führen kann. Die in Bild 68 dargestellten Qualitätseinbußen bei den Betriebsprozessen sowie die daraus rechnerisch resultierenden, reduzierten Wirkungen (vgl. Bild 70) sind in diesem Fall nur konsequent.

Es darf aber bezweifelt werden, dass die Erhöhung der einzelnen Fehlerraten im betrachteten Evidenzszenario mit nicht abgestimmten Anzeigeinhalten in der Realität wirklich so groß ausfällt wie vom vorliegenden Qualitätsmodell vorhergesagt. Tatsächlich tritt hier die bereits zu Beginn von Kapitel 3.4 beschriebene Schwäche des Modells zutage, dass die Aggregation der einzelnen, prozessbezogenen Fehlerursachen zu lediglich drei allgemeinen Fehlerarten insgesamt zu einer massiven Verstärkung der negativen Wirkung bestimmter Fehlerursachen führen kann. Im vorliegenden Fall findet etwa eine

implizite Vermischung von planungsbedingten Fehlern mit z.B. der möglichen Installation defekter Gerätekomponenten im Prozess „Konfiguration Hardware und Software“ statt. Somit beeinflusst die fehlende Abstimmung der Anzeigehalte im betrachteten Evidenzfall nicht nur die inhaltliche Richtigkeit der auftretenden SBA-Schaltungen, sondern beeinträchtigt im Modell fälschlicherweise auch die technische Verfügbarkeit bestimmter Anlagenteile – insbesondere im Bereich der Erfassung – mit den entsprechenden Auswirkungen auf die zugehörigen Folgeprozesse.



**Bild 68:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Anzeigehalte nicht mit Straßenverkehrsbehörde abgestimmt“ im Prozess „Ausführungsplanung“



**Bild 69:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Anzeigehalte nicht mit Straßenverkehrsbehörde abgestimmt“ im Prozess „Ausführungsplanung“

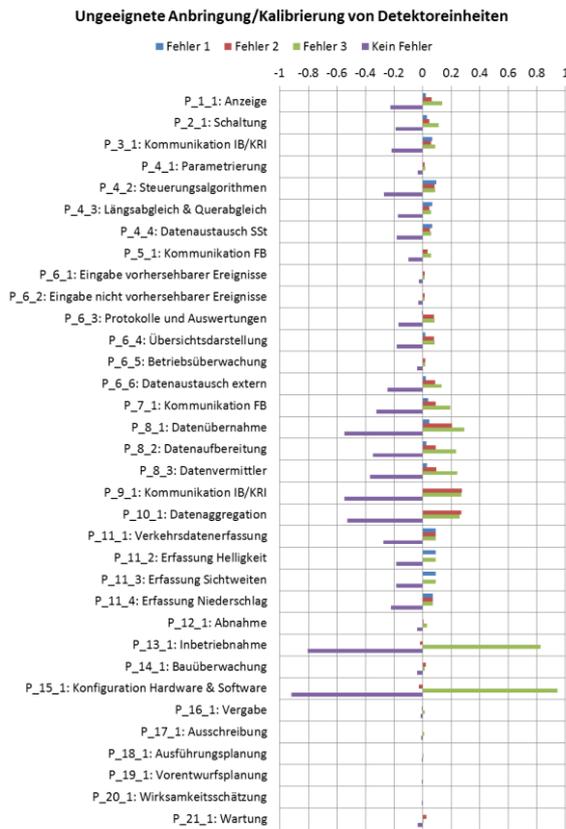


**Bild 70:** Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Anzeigehalte nicht mit Straßenverkehrsbehörde abgestimmt“ im Prozess „Ausführungsplanung“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial

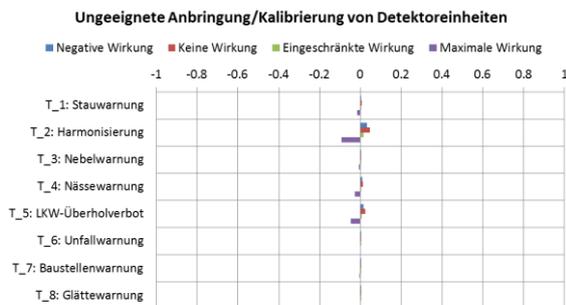
### 3.5.2.9 Evidenzfall 9: Konfiguration Hardware & Software (Fehlerart 3)

Die relevanten Diagramme (s. Bild 71 bis Bild 73) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Ungeeignete Anbringung/Kalibrierung von Detektoreinheiten“, wodurch im Prozess „Konfiguration Hardware und Software“ die Fehlerart 3 („Fehlerhafte Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.

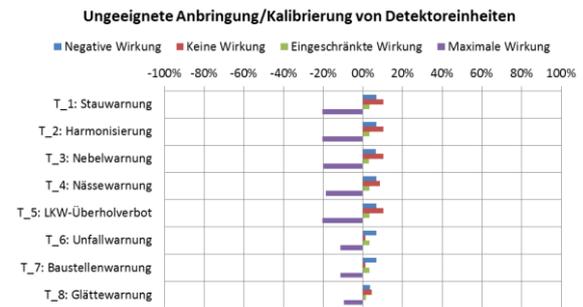
Anders als im vorangegangenen Evidenzfall 8 (s. Kapitel 3.5.2.8) ist in diesem Fall die vom vorliegenden Qualitätsmodell berechnete Beeinträchtigung der Erfassungsprozesse bis hin zum möglichen Ausfall (bzw. der völligen Unbrauchbarkeit) einzelner Erfassungskomponenten weitgehend plausibel. Gleiches gilt – zumindest qualitativ – für die daraus über die verschiedenen Betriebsprozesse hinweg abgeleitete Reduktion der Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Anzeige um 22,4 Prozentpunkte sowie die sich (aufgrund fehlender Differenzierung nach SBA-Funktionen) für alle Top Events ergebenden Wirkungseinbußen (vgl. Bild 73).



**Bild 71: Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Ungeeignete Anbringung/Kalibrierung von Detektoreinheiten“ im Prozess „Konfiguration Hardware und Software“**



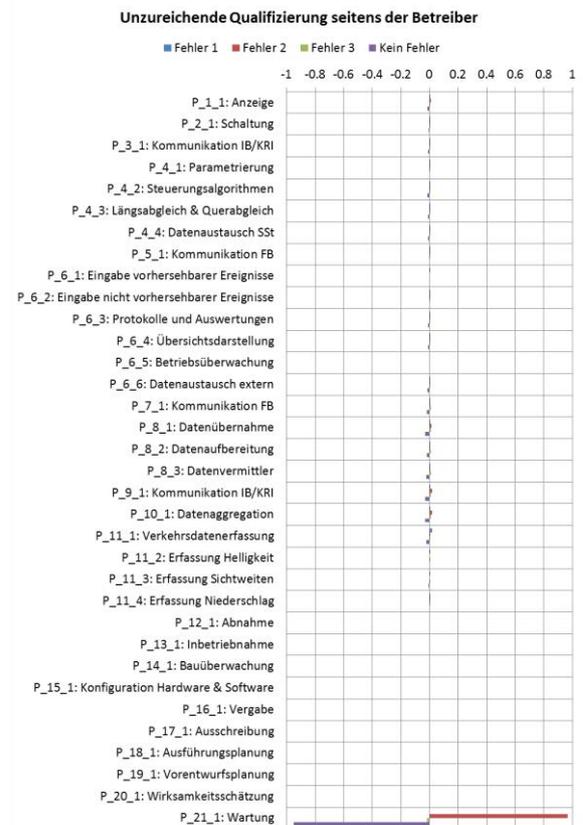
**Bild 72: Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Ungeeignete Anbringung/Kalibrierung von Detektoreinheiten“ im Prozess „Konfiguration Hardware und Software“**



**Bild 73: Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Ungeeignete Anbringung/Kalibrierung von Detektoreinheiten“ im Prozess „Konfiguration Hardware und Software“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial**

**3.5.2.10 Evidenzfall 10: Wartung & Instandsetzung (Fehlerart 2)**

Die relevanten Diagramme (s. Bild 74 bis Bild 76) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Unzureichende Qualifizierung seitens der Betreiber“, wodurch im Prozess „Wartung & Instandsetzung“ die Fehlerart 2 („Unvollständige Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.



**Bild 74: Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Unzureichende Qualifizierung seitens der Betreiber“ im Prozess „Wartung & Instandsetzung“**



**Bild 75:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Unzureichende Qualifizierung seitens der Betreiber“ im Prozess „Wartung & Instandsetzung“



**Bild 76:** Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Unzureichende Qualifizierung seitens der Betreiber“ im Prozess „Wartung & Instandsetzung“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial

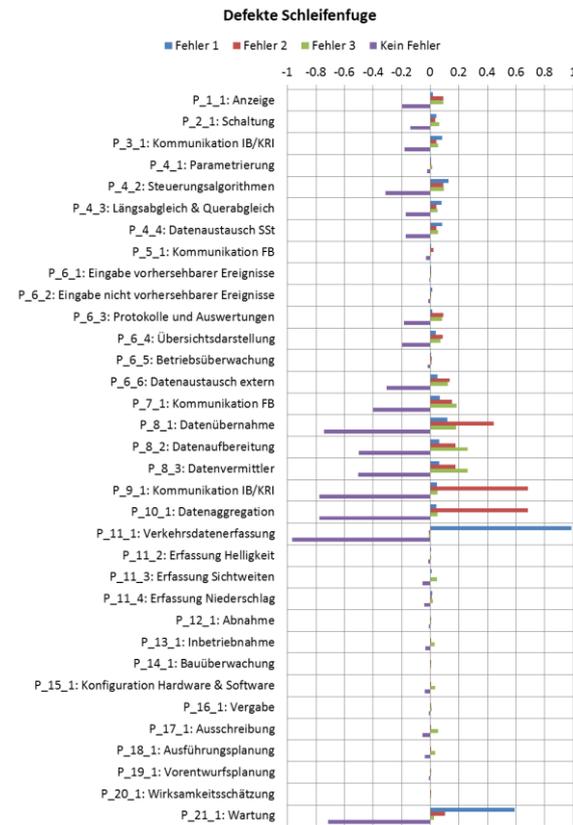
Man erkennt in Übereinstimmung mit den Zielvorgaben bei der Optimierung der Verstärkungsfaktoren aus Tab. 25, dass eine unvollständige Wartung im vorliegenden Qualitätsmodell Auswirkungen auf praktisch alle Betriebsprozesse hat, wengleich diese – wie bereits im Zuge der Kalibrierung (vgl. Kapitel 3.4.2) unterstellt – nur relativ gering ausfallen. Die Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Funktionserfüllung reduziert sich gegenüber dem Referenzfall (s. Kapitel 3.5.1) dabei pro Prozess im Schnitt um 1,2 Prozentpunkte, bei der Anzeige sind es konkret 1,6 Prozentpunkte.

Dass in diesem Zusammenhang mit einer berechneten Wahrscheinlichkeit in Höhe von 95,6% für den Zustand einer fehlerfreien Anzeige nicht die in Tab. 25 angegebenen 92,5% getroffen werden, hängt in nachvollziehbarer Weise damit zusammen, dass angesichts der unterstellten (lokalen) Fehlerursache einer fehlenden Qualifizierung seitens der Betreiber weitere Fehlerursachen aus den Lebenszyklusphasen Planung und Bau (z.B. eine fehlerhafte Ausschreibung), die ihrerseits zusätzliche ne-

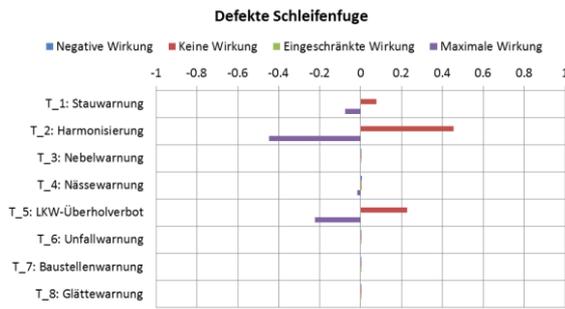
gative Auswirkungen auf die Prozesse im Betrieb induzieren würden, als Erklärung für die unvollständige Wartung wegfallen („Explaining Away“). In diesem Sinne ist das Ergebnis im vorliegenden Beispielfall einschließlich der nur geringen Wirkungsänderungen bei den Top Events unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen (s. Kapitel 3.4.2) durchaus plausibel.

**3.5.2.11 Evidenzfall 11: Verkehrsdatenerfassung (Fehlerart 1)**

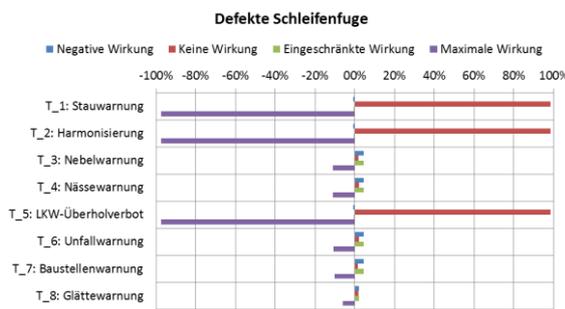
Die relevanten Diagramme (s. Bild 77 bis Bild 79) zeigen die Ergebnisse des optimierten Qualitätsmodells für den Fall der Fehlerursache „Defekte Schleifenfuge“, wodurch im Prozess „Verkehrsdatenerfassung“ die Fehlerart 1 („Keine Funktionserfüllung“) ausgelöst wird.



**Bild 77:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Defekte Schleifenfuge“ im Prozess „Verkehrsdatenerfassung“



**Bild 78:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Defekte Schleifenfuge“ im Prozess „Verkehrsdaterfassung“



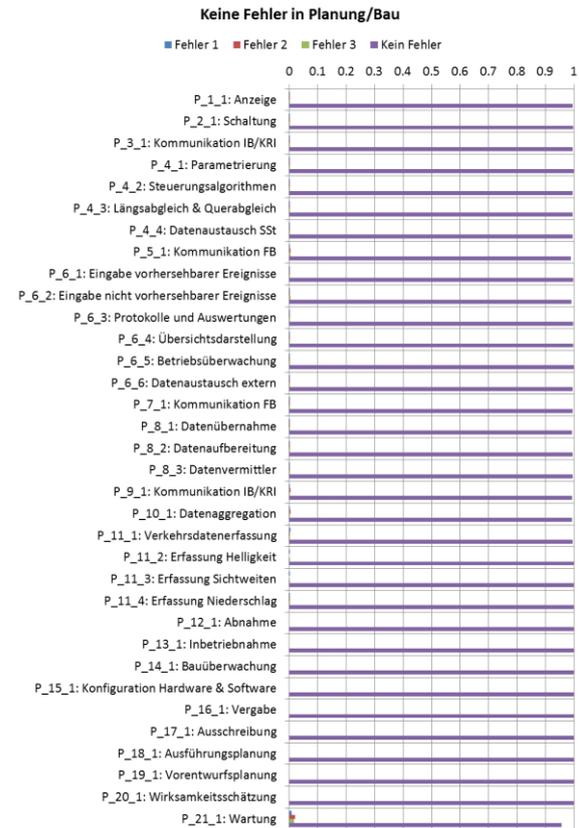
**Bild 79:** Relative Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Defekte Schleifenfuge“ im Prozess „Verkehrsdaterfassung“ bezogen auf das jeweilige virtuelle Wirkungspotenzial

Man erkennt ähnlich wie in früheren Beispielen (s. z.B. Kapitel 3.5.2.7) die unmittelbaren Auswirkungen auf die nachfolgenden Prozesse, die sich aus Sicht der jeweiligen Prozessergebnisse nachvollziehbar vor allem in einer Erhöhung der Fehlerraten für Fehlerart 2 im Bereich der Datenaggregation und der Kommunikation zur UZ äußern. Darüber hinaus macht das Modell erneut eine fehlende Wartung und Instandsetzung (vgl. Kapitel 3.5.2.4) als Hauptursache für den angenommenen Schleifendefekt aus. Im Ergebnis folgt in plausibler Weise eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Anzeige auf 77,7% für den (räumlichen) Einflussbereich der betroffenen Schleife mit massiven Wirkungseinbußen bei den unmittelbar von der Verkehrsdaterfassung abhängenden SBA-Funktionen „Stauwarnung“, „Harmonisierung“ und „LKW-Überholverbot“.

**3.5.2.12 Evidenzfall 12: Keine Planungs-/Baufehler**

Der Evidenzfall 12 unterscheidet sich insofern von den bisherigen, als dass anstelle des Vorliegens ei-

ner einzelnen Fehlerursache nun per Evidenz in allen Planungs- und Bauprozessen eine fehlerfreie Funktionserfüllung angenommen wird. Die Diagramme in Bild 80 und Bild 81 zeigen analog zu den Grafiken aus Kapitel 3.5.1 die absoluten Fehlerraten der einzelnen Prozesse sowie die daraus resultierenden Wirkungswahrscheinlichkeiten pro Top Event im konkreten Evidenzfall.



**Bild 80:** Fehlerraten pro Prozess im Fall „Keine Fehler in Planung/Bau“



**Bild 81:** Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Keine Fehler in Planung/Bau“

Man erkennt wie erwartet in allen Prozessen sehr niedrige Fehlerraten einschließlich einer zusätzlichen Abnahme gegenüber dem Referenzfall. Im Schnitt ergibt sich in diesem Zusammenhang pro

Prozess als Summe über alle drei Fehlerarten eine Restfehlerrate von 0,4%. Rein bezogen auf den Betrieb sind es 0,5%. Die Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Anzeige liegt entsprechend mit 99,5% deutlich über dem Referenzwert von 97,3% aus Kapitel 3.5.1.

Eine fehlerfreie Planung und Bauausführung hat demnach einen signifikanten Einfluss auf die korrekte Funktion einer SBA und deren langfristige Wirksamkeit im Betrieb und ist verglichen mit den Betriebsprozessen laut Qualitätsmodell zu mehr als zwei Drittel für die im Referenzfall beobachteten Wirkungsbeschränkungen (gemessen an einer theoretischen Wirkung von 100%) verantwortlich. Die berechnete, durchschnittliche Wirkungswahrscheinlichkeit pro Top Event (vgl. Bild 81) liegt übereinstimmend mit 99,9% noch einmal 0,2 Prozentpunkte über dem ohnehin schon hohen Referenzwert von 99,7% (vgl. Kapitel 3.5.1).

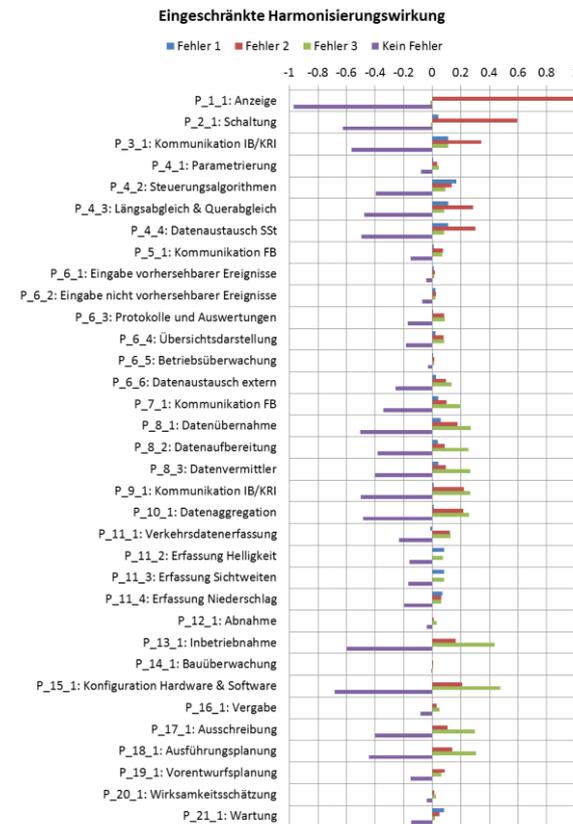
### 3.5.3 Anwendung als Diagnosewerkzeug

Das vorliegende Qualitätsmodell kann entsprechend seiner Struktur nicht nur zur Fehlerfortpflanzungsrechnung eingesetzt werden. Bereits einzelne Evidenzfälle aus Kapitel 3.5.2 haben gezeigt, wie das Modell stellenweise zu Einschätzungen über mögliche Ursachen bei konkret beobachteten Fehlern im System der Anlage beitragen kann. Entsprechend werden im Folgenden exemplarisch spezifische Defizite bei den Top Events – konkret bei der Harmonisierungswirkung – angenommen und daraus im Sinne diagnostischen Schlussfolgerns Aussagen über die Fehlerraten in den einzelnen SBA-Prozessen abgeleitet. Eine detaillierte Aufschlüsselung nach Einzelfehlerursachen erfolgt im Rahmen der Analysen angesichts der begrenzten, quantitativen Genauigkeit des vorliegenden, vorrangig qualitativen Modells nicht.

#### 3.5.3.1 Evidenzfall: Eingeschränkte Harmonisierungswirkung

Der Fall einer beobachteten, eingeschränkten Harmonisierungswirkung führt rechnerisch zu deutlichen Änderungen bei den Fehlerraten der einzelnen Prozesse (s. Bild 82). Dabei sticht als unmittelbare Ursache zunächst eine unvollständige Anzeige hervor, welche ihrerseits mit durchaus hohen Wahrscheinlichkeiten über Fehler im Bereich der UZ bis

hin zu Defiziten in der Erfassung zurückverfolgt werden kann.

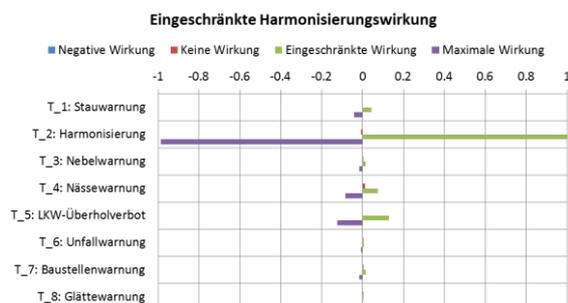


**Bild 82:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Eingeschränkte Harmonisierungswirkung“

Tatsächlich deuten die Ergebnisse des Qualitätsmodells sogar darauf hin, dass letztlich auch (ggf. auf Planungsfehler zurückzuführende) Mängel im Prozess „Konfiguration Hardware und Software“ während der Lebenszyklusphase Bau im betrachteten Evidenzfall wesentlich zur eingeschränkten Wirkung der Anlage beitragen. Abgesehen vom Prozess „Anzeige“ fällt die Reduktion der Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Funktionserfüllung laut vorliegendem Modell im Prozess „Konfiguration Hardware und Software“ mit 68,2 Prozentpunkten tatsächlich am stärksten aus (vgl. Bild 82).

Fehlerursachen für eine eingeschränkte Harmonisierungswirkung liegen somit voraussichtlich nicht nur im Betrieb, sondern sind mit einiger Wahrscheinlichkeit auch im Bereich der Planung und des Baus zu suchen. Dabei soll nicht verschwiegen werden, dass die rechnerisch identifizierten Fehlerquellen, d.h. die jeweils erhöhten Fehlerraten in der Regel natürlich nicht nur auf die SBA-Funktion „Harmonisierung“ wirken. Vielmehr gibt es laut Modell

zusätzliche, indirekte Effekte, die auch bei den anderen Top Events zu merklichen Wirkungseinbußen führen (vgl. Bild 83).

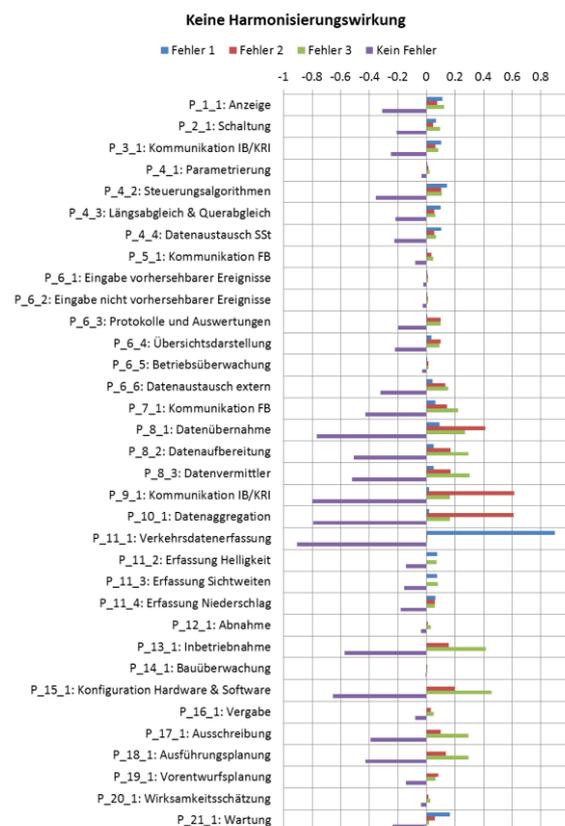


**Bild 83:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Eingeschränkte Harmonisierungswirkung“

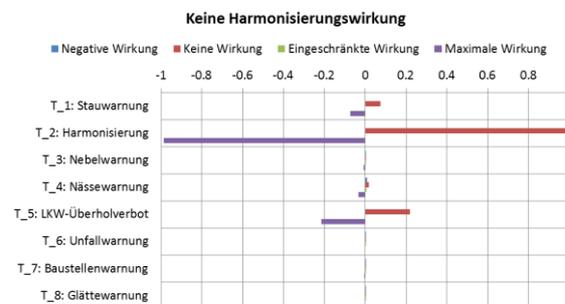
### 3.5.3.2 Evidenzfall: Keine Harmonisierungswirkung

Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Evidenzfall aus Kapitel 3.5.3.1 resultiert der Fall, dass keine Harmonisierungswirkung vorliegt, laut Modell rechnerisch vor allem in einer massiven Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der Verkehrsdatenerfassung um 90,6 Prozentpunkte (vgl. Bild 84), welcher sich natürlich automatisch auch auf die Fehlerraten der nachfolgenden Prozesse auswirkt.

Die Ursachen für eine vollständig ausbleibende Harmonisierungswirkung einer SBA sind demnach vorrangig auf technischer Ebene während der Betriebsphase, ggf. bei den Prozessen der Wartung und Instandsetzung zu suchen, wenngleich das vorliegende Qualitätsmodell auch planerische oder bautechnische Fehler nicht ausschließt (vgl. Bild 85). Im Übrigen sind neben der Harmonisierung wie zuvor natürlich auch die weiteren SBA-Funktionen betroffen, wenn sich infolge der angenommenen Evidenz im Modell die Fehlerraten bei einer Mehrzahl der abgebildeten Prozesse erhöhen (vgl. Bild 85).



**Bild 84:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Keine Harmonisierungswirkung“

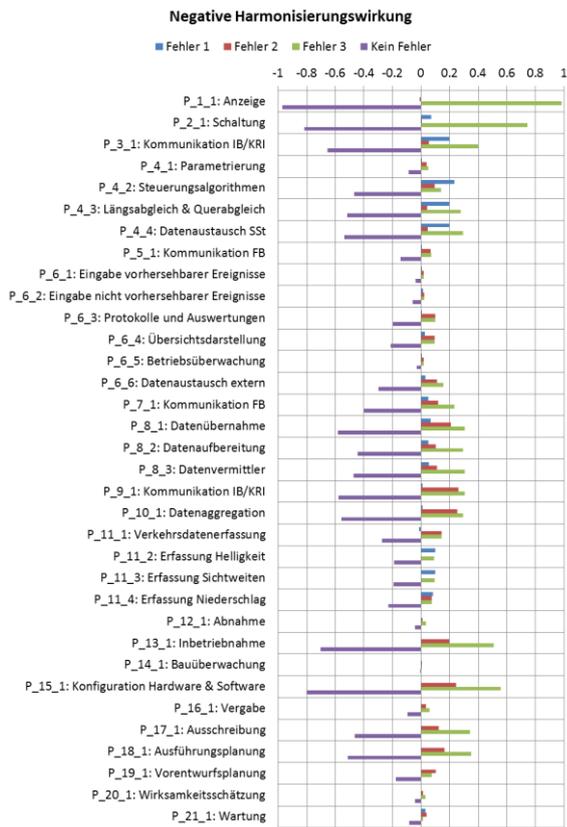


**Bild 85:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Keine Harmonisierungswirkung“

### 3.5.3.3 Evidenzfall: Negative Harmonisierungswirkung

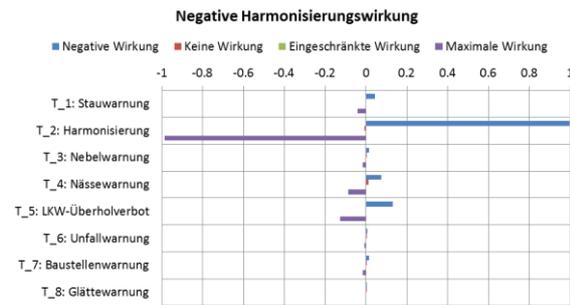
Der Fall einer negativen Harmonisierungswirkung verhält sich sehr ähnlich zu dem einer eingeschränkten Wirkung (s. Kapitel 3.5.3.1). Die einzige signifikante Änderung besteht in plausibler Weise darin, dass es im Bereich der Prozesse „Anzeige“ und „Schaltung“ sowie auf Ebene der UZ – insbesondere bei den Prozessen „Durchführung Steuerungsalgorithmen“, „Längs- & Querabgleich“ und „Datenaustausch SSt“ – mehr oder weniger nur zu

einer Vertauschung der Fehlerarten 2 und 3 bei der Höhe der rechnerisch ermittelten Fehlerraten kommt (vgl. Bild 86). Während also eine *unvollständige* Schaltung bzw. Anzeige tendenziell eine eingeschränkte Harmonisierungswirkung induziert, ist eine negative Wirkung vor allem auf eine *fehlerhafte* Schaltung bzw. Anzeige zurückzuführen.



**Bild 86:** Änderung der Fehlerraten pro Prozess im Fall „Negative Harmonisierungswirkung“

Ansonsten sind im Vergleich der beiden genannten Evidenzfälle (eingeschränkte vs. negative Harmonisierungswirkung) kaum qualitative Unterschiede zu erkennen (vgl. Bild 82). In Bezug auf die Identifizierung wahrscheinlicher Fehlerursachen für die angenommene, negative Harmonisierungswirkung einschließlich relevanter Prozesse und Lebenszyklusphasen sei daher lediglich auf die entsprechenden Ausführungen in Kapitel 3.5.3.1 verwiesen. Dasselbe gilt für die indirekten Auswirkungen auf die übrigen Top Events (vgl. Bild 87).



**Bild 87:** Änderung der Wirkungswahrscheinlichkeiten pro SBA-Funktion im Fall „Negative Harmonisierungswirkung“

### 3.5.4 Zusammenfassung und Bewertung der Evaluationsergebnisse

Die Ergebnisse der Evaluation des vorliegenden Qualitätsmodells demonstrieren dessen grundsätzliche Eignung, wenn es darum geht, qualitative Aussagen hinsichtlich der Auswirkung von Fehlern im System einer SBA über alle relevanten Lebenszyklusphasen hinweg zu treffen. Wesentliche Zusammenhänge und Wirkungsketten werden auf allgemeine Fehlerarten komprimiert korrekt abgebildet.

Die Beispiele aus Kapitel 3.5.2 und 3.5.3 zeigen aber auch die strukturellen Schwächen des Modells, welche sich vor allem auf der Detailebene bei der Betrachtung bestimmter Evidenzszenarien offenbaren. Kritisch ist insbesondere die starke Verknüpfung zwischen dem Prozess „Wartung und Instandsetzung“ und den spezifischen, technischen Fehlerursachen auf Ebene der einzelnen Prozesse im Betrieb (vgl. Kapitel 3.5.2.4). Dabei ist der hier modellierte Zusammenhang durchaus sachlich korrekt, führt im Modell mit der derzeitigen Kalibrierung bei Annahme einer konkreten Fehlerursache als Evidenz jedoch zu einer Überschätzung der mittelbaren Auswirkungen der jeweils per diagnostischen Schlussfolgerns abgeleiteten Erhöhung der Fehlerraten im Prozess „Wartung & Instandsetzung“. Es wird daher dazu geraten, bei Anwendung des Qualitätsmodells in seiner vorliegenden Form – wie beispielsweise in Kapitel 3.4.2 oder 3.5.2.12 – Evidenzen vorrangig auf Ebene der Prozessknoten (d.h. eher nicht bei den Fehlerursachenknoten) ansetzen zu lassen, um die oben dargestellten Effekte möglichst zu vermeiden bzw. deren Auswirkungen auf die Modellergebnisse zu minimieren.

---

Die getroffene Empfehlung korrespondiert im Übrigen sehr gut mit der Tatsache, dass das vorliegende Modell aus Komplexitätsgründen bei der Verknüpfung der Prozessknoten nur aggregierte Fehlerarten anstelle detaillierter Fehlerzustände berücksichtigt, d.h. einzelne Fehlerursachen können bezüglich ihrer spezifischen Auswirkungen auf nachfolgende Prozesse nicht im Detail nachverfolgt werden. Dies ist bei der Bewertung konkreter Modellergebnisse stets zu bedenken, da sich nur so Fehlinterpretationen vermeiden lassen, die sich z.B. aus einer übermäßigen Verstärkung eher unbedeutender Fehler infolge einer Vermischung mit gravierenderen und inhaltlich abweichenden Fehlerursachen im selben Fehlerzustand eines gegebenen Prozesses ergeben (vgl. Kapitel 3.4 bzw. 3.5.2.8).

Insbesondere die fehlende Differenzierung bezüglich der verschiedenen SBA-Funktionen innerhalb der prozessbezogenen Fehlerarten führt ferner dazu, dass sich die Wirkungen in den beschriebenen Top Events in der Regel nur grob abschätzen lassen (vgl. Kapitel 3.5.2.1). Deshalb sind mit dem vorliegenden Qualitätsmodell quantitative Aussagen nur eingeschränkt möglich.

Hinsichtlich der Diagnosefähigkeit des vorliegenden Modells ist abschließend anzumerken, dass auch hier wesentliche Abhängigkeiten korrekt beschrieben werden (vgl. Kapitel 3.5.3). Je nach angenommenem Fehler bzw. Wirkungsdefizit der Anlage lassen sich wahrscheinliche Fehlerursachen sowie relevante Prozesse und Lebenszyklusphasen durchaus sinnvoll identifizieren. Die fehlende Detailmodellierung spezifischer Fehlerzustände und prozessübergreifender Fehlerketten aufgrund der bereits genannten Aggregation zu allgemeinen Fehlerarten verhindert jedoch auch hier genauere quantitative Ergebnisse.

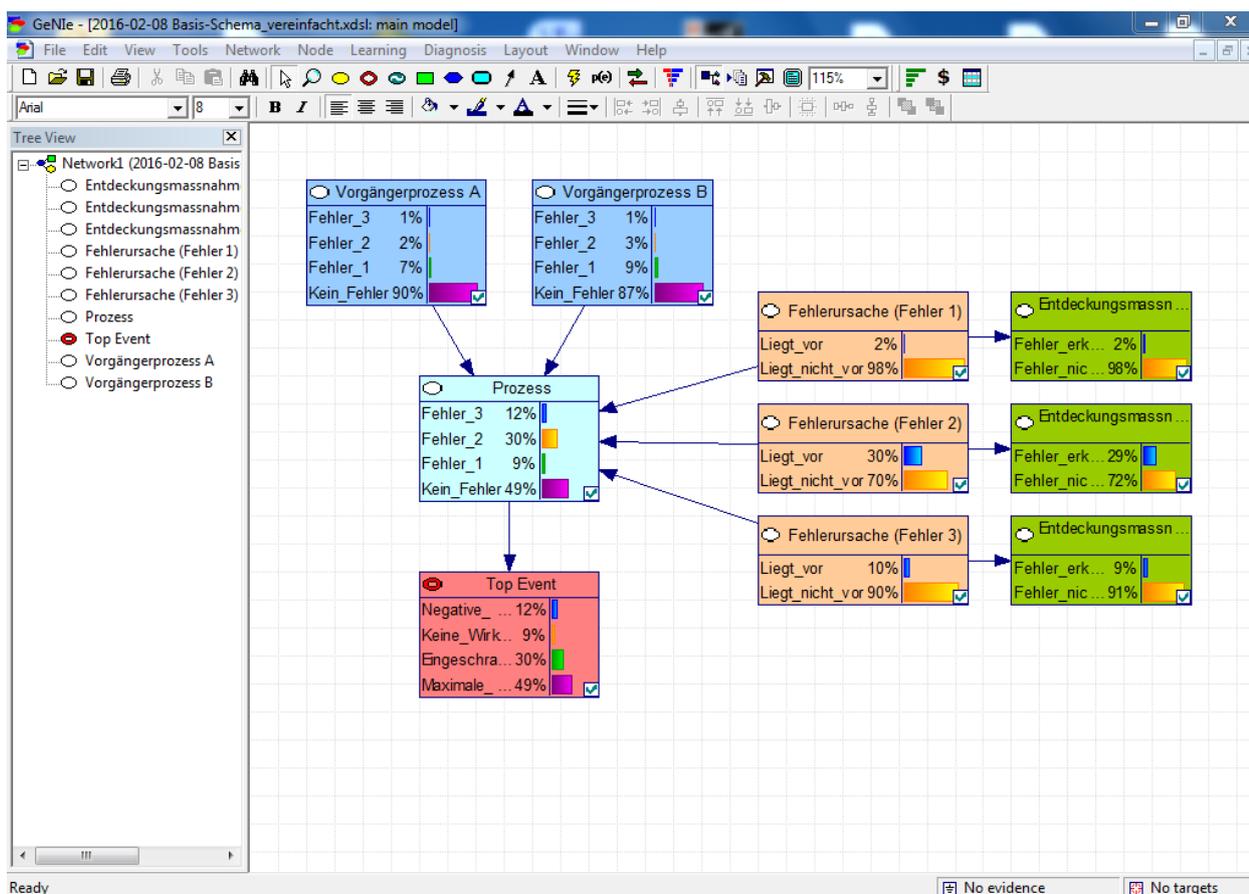
Zukünftige Verbesserungen am Modell sollten sich demnach vor allem darauf richten, differenziert nach einzelnen SBA-Funktionen unter Berücksichtigung der damit einhergehenden Komplexitätssteigerungen die relevanten Fehlerfortpflanzungseffekte über die verschiedenen SBA-Prozesse hinweg präziser als bisher abzubilden. Neben detaillierteren Fehlerzuständen in den Prozessknoten wären dazu unter anderem auch systematische Modifikationen der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Modelltopologie zu prüfen, was die Möglichkeiten des vorliegenden

Projekts jedoch übersteigt. Vorteilhaft wäre in diesem Zusammenhang – soweit möglich – auch die Ersetzung der subjektiv geschätzten Modellparameter (z.B. Auftretenswahrscheinlichkeiten) durch eine systematische Kalibrierung auf Grundlage empirischer Daten aus der Praxis.

## 4 Funktionale Beschreibung

Die funktionale Beschreibung des Qualitätsmodells aus Kapitel 3 bezieht sich in erster Linie auf dessen Anwendbarkeit sowohl zur Fehlerfortpflanzungsrechnung als auch zu Diagnosezwecken. In beiden Fällen sind unter Verwendung der beigefügten GeNie-Datei (vgl. Kapitel 3.3.4) lediglich die gewünschten Evidenzen über den grafischen Editor

(vgl. Bild 88) der verwendeten Software (BAYES-FUSION, 2016) per Mausklick auf das Feld des entsprechenden Knotenzustandes zu setzen. Die Berechnung der neuen Knotenwahrscheinlichkeiten, d.h. der Fehlerraten und Wirkungswahrscheinlichkeiten erfolgt je nach Programmeinstellung im Anschluss automatisch oder mittels der Taste „F5“.



**Bild 88:** Screenshot des grafischen Editors der verwendeten GeNie-Software.

Selbstverständlich ist es möglich, die mitgelieferte, digitale Version des Qualitätsmodells unter Verwendung entsprechender Programmbibliotheken (z.B. jSMILE) auch in eigene Softwaretools zu integrieren. Für ausführlichere Erläuterungen sei auf die zugehörige Dokumentation in (GENIE, 2016) verwiesen.

Für etwaige Detailanalysen des Qualitätsmodells sowie im Hinblick auf mögliche weitergehende Implementierungsbestrebungen gehören zum vorliegenden Bericht ansonsten noch drei weitere Dokumente, die aufgrund ihres Charakters als rein technische Dokumentation sowie teilweise wegen ihres

Umfangs lediglich digital als separate PDF-Dateien beigefügt sind. Diese sind:

- Gesamtübersicht Prozesse (Anhang 4)
- Gesamtübersicht Fehlerursachen (Anhang 5)
- Gesamtübersicht Top Events (Anhang 6)

Darin ist jeder im Modell abgebildete Knoten differenziert nach den Typen „Prozess“, „Fehlerursache“ und „Top Event“ in Form eines vollständigen Steckbriefes beschrieben. Bild 89 zeigt exemplarisch dessen Aufbau.

FE 03.0464/2010/IGB – Knotenspezifikation

<ID>: **<Kurzbezeichnung>**

<b>ID<sup>1</sup></b>	<ID>	
<b>Name</b>	<Name des Knotens>	
<b>Kurzbezeichnung</b>	<Kurzbezeichnung>	
<b>Lebenszyklusphase</b>	<input type="checkbox"/> Planung <input type="checkbox"/> Bau <input type="checkbox"/> Betrieb	
<b>Typ</b>	<input type="checkbox"/> Prozess <input type="checkbox"/> Fehlerursache <input type="checkbox"/> Entdeckung <input type="checkbox"/> Top Event	
<b>Elternknoten</b>	<ID1>, <ID2>, ..., <IDn>	
<b>Knotenausprägungen</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Fehlerart<sup>2</sup></b>
	<Ausprägung 1>	
	<Ausprägung 2>	
	<Bei Bedarf: Ausprägung 3>	
	<Bei Bedarf: Ausprägung 4>	
<b>Wahrscheinlichkeitstafel</b>	<input type="checkbox"/> deterministisch <input type="checkbox"/> Noisy-MAX <sup>3</sup> <input type="checkbox"/> Standard <input type="checkbox"/> Sonstige:	
Wahrscheinlichkeitstafel(n) hier nach Bedarf einfügen!		
<b>Zusätzliche Anmerkungen</b>		

<sup>1</sup> Format bei Prozessen, Fehlerursachen und Entdeckungen: „X\_a\_b\_c“ mit

- X = P(rozess), F(ehlerursache), E(ntdeckung)
- \_a = Nummer der Systemkomponente (1, ..., 21)
- \_b = Nummer des Prozesses (1, ..., n) in Systemkomponente a
- Nur bei Knotentyp „Fehlerursache“ und „Entdeckung“:  
   \_c = Nummer der zugehörigen Fehlerursache in Prozess b der Systemkomponente a

Format bei Top Events: „T\_a“ mit \_a = Nummer des Top Events

<sup>2</sup> Nur bei Prozessen! Zulässige Werte:

- „Fehler 1“ (= Keine Funktion)
- „Fehler 2“ (= Unvollständige Funktion)
- „Fehler 3“ (= Fehlerhafte Funktion)
- „Kein Fehler“.

<sup>3</sup> Statt einer vollständigen Wahrscheinlichkeitstafel werden im Noisy-MAX-Fall standardmäßig die bedingten Wahrscheinlichkeiten gegeben einzelne Elternknoten angegeben. Die erforderliche Gewichtung der Zustände der Elternknoten wird über die Priorisierung I, II, III, IV angegeben und ergibt sich aus den in der FMEA geschätzten Bedeutungen B der verschiedenen Fehlerarten.

**Bild 89: Aufbau der Steckbriefe für die einzelnen Knoten im vorliegenden Qualitätsmodell**

Jedem Knoten ist dabei nach einem festen Schema eine jeweils eindeutige ID zugeordnet. Darüber hinaus erhält jeder Knoten zusätzlich zu seinem vollständigen Namen aus der ursprünglichen FMEA-Auflistung eine vereinfachte Kurzbezeichnung. Zu Dokumentationszwecken erfolgt ferner eine Kategorisierung nach Lebenszyklusphase (Planung, Bau, Betrieb) und Typ, d.h. ob es sich um einen Prozess-, einen Fehlerursachen- oder einen Wirkungsknoten (Top Event) handelt. Die Option „Entdeckungsknoten“ (vgl. Kapitel 3.3.3.4) ist im Steckbriefformular ebenfalls vorgesehen, wird jedoch im Fall des vorliegenden Qualitätsmodells bisher nicht genutzt.

Wichtig ist im Weiteren die Auflistung aller Elternknoten in Form der zugehörigen Knoten-IDs, da hierdurch letztlich die vollständige Topologie des Qualitätsmodells im Sinne der zugrundeliegenden Graphenstruktur beschrieben wird. Die möglichen Zustände pro Knoten einschließlich ihrer Bezeichnungen werden ferner im Feld „Knotenausprägungen“ tabellarisch erfasst. Bei Prozessknoten erfolgt in diesem Zusammenhang auch die Zuordnung zu den drei betrachteten, allgemeinen Fehlerarten bzw. zum Zustand „Kein Fehler“.

Zuletzt werden die benötigten Wahrscheinlichkeitstabellen (vgl. Kapitel 3.1.2) im Modell vollständig dokumentiert. Hierbei wird zunächst unterschieden, ob es sich bei dem jeweiligen Knoten um einen gewöhnlichen oder einen Noisy-MAX-Knoten handelt. Die Optionen „deterministisch“ und „Sonstige“ (vgl. Bild 89) werden im vorliegenden Qualitätsmodell nicht benötigt. Abhängig von der getroffenen Auswahl werden im darunterliegenden Tabellenfeld schließlich alle relevanten Wahrscheinlichkeitstabellen gemäß den Darstellungen aus Kapitel 3.3 aufgelistet. Grün markierte Zellen entsprechen dabei den an verschiedenen Stellen im Projektverlauf geschätzten Werten. Dies beinhaltet insbesondere die Schätzwerte für die bedingten Wahrscheinlichkeiten zur Quantifizierung der Abhängigkeiten der Prozessknoten untereinander (vgl. Kapitel 3.3.2), aber auch die Verstärkungsfaktoren gemäß Kapitel 3.3.1 sowie bei den Top Events die zusätzlichen Parameter (Zeitanteil ohne SBA-Schaltung, prozentualer Anteil an relevanten Schaltvorgängen, Differenzierungsfaktoren) aus Kapitel 3.3.3.3. Das Feld „Zusätzliche Anmerkungen“ bietet Raum für weitere Kommentare.

---

## 5 Handlungsempfehlungen

Basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Kapitel wurden im weiteren Verlauf des Projekts Handlungsempfehlungen für die Praxis erstellt. Ziel dieser Zusammenstellung war die Erarbeitung von Maßnahmen zur Reduzierung der Fehlerwahrscheinlichkeiten im Lebenszyklus von SBA im Rahmen eines konkreten Qualitätsmanagements. Die bewerteten und priorisierten Handlungsempfehlungen sind in Form eines Katalogs zusammengestellt worden.

Bei der Erarbeitung der Handlungsempfehlungen sind die Zwischenergebnisse des Projektes einbezogen worden. So stellten die aus der FMEA entstandenen Liste der kritischen Fehler und die abgeleiteten Vermeidungs- und Erkennungsmaßnahmen die Grundlagen für die Handlungsempfehlungen dar. Die in der FMEA nur grob umrissenen Maßnahmen wurden um mehr Details zur praktischen Umsetzung der Maßnahmen, Abschätzungen bezüglich deren Aufwand zur der Einführung und Durchführung sowie der Effektivität hinsichtlich des Fehlervermeidungs- und Erkennungspotentials erweitert.

Die Handlungsempfehlungen sind den Elementen aus der bereits vorgestellten Prozesslandschaft zugeordnet und anhand der Lebenszyklus- und Prozessaufteilung strukturiert worden. Dabei wurden auch die Zielgruppe(n) der jeweiligen Handlungsempfehlung – Betreiber und/oder Planer – angegeben. Dadurch wird beschrieben, ob der Aufwand bei der Einführung und Durchführung der Maßnahme bei den Betreibern einer SBA oder bei den begleitenden Planungsbüros liegt.

Die erarbeiteten Handlungsempfehlungen wurden in zwei Workshops mit einem Betreiber und einem Planungsbüro diskutiert. Anhand dieser Workshops wurden die Handlungsempfehlungen angepasst und weiter detailliert. Die erarbeiteten Ergebnisse wurden mit dem Betreuerkreis abgestimmt, woraus sich weitere Anpassungen des Kataloges ergeben haben.

Zu weiteren Details bezüglich des Aufbaus und der Inhalte des Katalogs wird auf das im Rahmen dieses FE-Projekts erarbeitete Dokument „Einfluss von

Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen - Handlungsempfehlungen“ verwiesen (Schwietering, et al., 2016).

## 6 Vorgehensweise zur Ermittlung des Nutzens von QM-Maßnahmen

### 6.1 Einführung

Durch die Ableitung von Handlungsempfehlungen ist ein Katalog von konkreten Maßnahmen entstanden, die von Betreibern von SBA umgesetzt werden können, um die Fehlerwahrscheinlichkeit ihrer Anlagen zu reduzieren. Um eine zielgerichtete und effiziente Allokation von Haushaltsmitteln sicherstellen zu können, werden Konzepte für eine Kosten-Nutzwert-Analyse aufgestellt und beispielhaft durchgeführt. Hierbei wird auch die Ableitung und tabellarische Auflistung des Nutzens und der Kosten von Handlungsempfehlungen durchgeführt.

Für die Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Qualitätserhöhung von SBA spielen sowohl die betreiberspezifischen Anforderungen, Gegebenheiten und Vorerfahrungen als auch die verfügbaren Ressourcen eine besondere Rolle. Die Betreiber von SBA sollen somit in die Lage versetzt werden, die unterschiedlichen Nutzen der Handlungsempfehlungen anhand von betreiberspezifischen Prioritäten zu bewerten, um eine auf den jeweiligen Betreiber angepasste Liste der potentiellen Maßnahmen zu erhalten. Darüber hinaus ist für eine objektive und effiziente Wahl von Maßnahmen eine Gegenüberstellung des Nutzens zu den jeweiligen Kosten unabdingbar. Das Vorgehen soll dabei den Effekt von Mehrfach-Nutzen einzelner Maßnahmen in Betracht ziehen. So könnten einzelne Maßnahmen die Fehlerwahrscheinlichkeit mehrerer unterschiedlicher Komponenten der SBA reduzieren und somit den effizienten Einsatz von Ressourcen ermöglichen.

In den folgenden Kapiteln wird das Konzept einer Kosten-Nutzwert-Analyse vorgestellt, die als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl effizienter QM-Maßnahmen notwendig ist.

### 6.2 Nutzenermittlung

Zur einfachen Ableitung der für eine konkrete Anlage geeigneten QM-Maßnahmen wurde eine Tabelle von unterschiedlichen Nutzenarten der Handlungsempfehlungen zusammengestellt. Dabei sind im ersten Schritt aus dem Katalog der Handlungsempfehlungen jeweils konkrete Nutzen der vorgeschlagenen Maßnahmen ermittelt worden. Um den Entscheidungsaufwand bei gleichzeitiger Erhöhung der Übersichtlichkeit zu reduzieren, sind die ermittelten Nutzen zu einer geringen Anzahl von Nutzenarten zusammengefasst worden. Die Gruppierung der Nutzen ist dabei anhand der logischen Zuordnung in die Prozesslandschaft erfolgt. So sind unterschiedliche Nutzen, die sich auf die Erhöhung der Informationsqualität, -aktualität und -zuverlässigkeit in der Datenerfassung beziehen, zu der Nutzenart „Erhöhung der Datenintegrität“ zusammengefasst worden. Dadurch werden für eine Nutzenart mehrere Handlungsempfehlungen aus unterschiedlichen Prozessen und die dazugehörigen Maßnahmen aufgelistet.

Darüber hinaus ist es möglich, dass einzelne Handlungsempfehlungen mehreren Nutzenarten zugeordnet werden.

Die verschiedenen Nutzenarten können der Tab. 26 entnommen werden. Die Werte in der Spalte Effektivität („Eff.“) stellen dabei eine Überführung der Handlungsempfehlungen dar, welche im Rahmen der Aufstellung des Handlungsempfehlungskataloges (siehe Dokument „Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen - Handlungsempfehlungen“) geschätzt worden sind. Eine im Ampelsystem mit hoch, mittel und niedrig geschätzte Effektivität (grün, gelb und rot) wurde entsprechend mit einem Einzelnutzenwert von 1,0, 0,7 und 0,3 bewertet.

Nutzenart	Beschreibung	Prozess/ Handlungsempfehlung	Eff.	Maßnahme
Prozessoptimierung der Ausführungsplanung	Sicherstellung der Richtigkeit und Vollständigkeit der Dokumente, Fehlervermeidung in der Ausführungsplanung sowie Erleichterung von Kontrollen und einer besseren Nachvollziehbarkeit	Ausführungsplanung (Prozess 18) /Freigabeprozess für die Ausführungsplanung	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kontrollinstanz (Audit) einzuführen, die vor der Freigabe der Ausführungsplanung eine Kontrolle durchführen</li> <li>Einführen von Standards (Planungshandbücher, s. z.B. <a href="http://www.asfinag.net">www.asfinag.net</a>)</li> <li>Vereinheitlichung der Planungsdokumente (Standardisierung)</li> <li>Prozesse sollten in einem Projekthandbuch definiert werden</li> <li>Planungsschritte transparent gestalten und kontinuierlich dokumentiert</li> </ul>
Prozessoptimierung der Ausschreibung	Sicherstellung der Vollständigkeit, Richtigkeit und Aktualität der Ausschreibungsunterlagen. Fehlervermeidung im Ausschreibungsprozess. Aufwandsoptimierung im Ausschreibungsprozess.	Ausschreibung (Prozess 17)/ Standards für die Ausschreibung	0,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausschreibung soll anhand der EVB-IT und der HVA B-StB erfolgen</li> <li>eindeutige Beschreibung der Schnittstellen</li> <li>Die Ausschreibung sollte ausreichend definierte Anforderungen beinhalten</li> <li>Ausschreibungsmustervorlagen und Standardleistungstexte erstellen</li> <li>Zur Kostenermittlung sollten die Anweisungen zur Kostenberechnung von Straßenbaumaßnahmen (AKS) genutzt werden</li> <li>Checklisten erstellen: diese sollten sämtliche Tests und Prüfungen (z.B. Probebetrieb), deren Umfang und Leistungen, sowie die Erstellung der zugehörigen Prüfzeugnisse durch den Arbeitnehmer beinhalten</li> <li>Angebotspreise dokumentieren und für zukünftige Projekte in einer Datenbank speichern</li> <li>Abweichungen von den festgelegten Standards dokumentieren</li> </ul>
		Ausschreibung (Prozess 17)/ Audit für die Leistungsbeschreibung	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prüfungen des Werktests im Beisein des Planers</li> <li>vorgelegte Protokolle der Auftragnehmer müssen vom Planer geprüft werden</li> <li>Eine ausführliche Dokumentation über den Werktest von den Herstellern fordern</li> <li>Probleme und Störungen müssen vom zuständigen Planer dokumentiert werden</li> </ul>
Erhöhung der Datenintegrität (Verkehrsdaten)	Erhöhung der Aktualität, Zuverlässigkeit und Richtigkeit der noch nicht aggregierten und verarbeiteten Verkehrsdaten, die mittels Induktionsschleifen oder Überkopfsensoren gemessen werden.	Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15)/ QS-Maßnahmen während des Werktests	0,3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Checklisten erstellen</li> <li>Erfahrene Kontrollinstanz (Audit) einsetzen</li> <li>4-Augen-Prinzip</li> </ul>
		Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15)/ QS-Maßnahmen während des Probebetriebs	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prüfung, ob Sensoren mit dem richtigen Fahrstreifen verbunden sind</li> <li>Prüfung, ob Sensoren der richtigen Fahrtrichtung zugeordnet sind</li> <li>Plausibilisierung der Umfelddaten</li> <li>Prüfung auf Vollständigkeit der verkehrstechnischen Versorgung</li> </ul>
		Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Einsatz von erfahrener Personal	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfahrenes Personal einsetzen</li> <li>Prüfungen und Tests durchführen</li> <li>Für das Personal ein „Drehbuch“ erstellen</li> </ul>

Tab. 26 Nutzenarten der Handlungsempfehlungen

		Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Prüfung der Testprotokolle	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standardisierte Testprotokolle erstellen</li> <li>• Nach der Durchführung der Tests und Prüfungen hat der Auftragnehmer die Durchführung zu dokumentieren und die Testprotokolle dem Planer vorzulegen</li> <li>• Entstehen Fehler bei der Durchführung der Tests, sind diese vom Hersteller zu beseitigen</li> </ul>
		Verkehrsdatenerfassung-Überkopfsensor (Prozess 11.1.1)/ Prüfung der Messdaten nach Montage / Kalibrierung / Inbetriebnahme	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung anhand der Messgenauigkeit</li> <li>• Fehlerausgleichsmaßnahmen und -beseitigungsmaßnahmen bei „unbekannten“ Ausfällen</li> </ul>
		Verkehrsdatenerfassung-Überkopfsensor (Prozess 11.1.1)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung der Messwerte</li> <li>• Automatische Ausfallüberwachung</li> <li>• Prüfung durch Fachpersonal</li> </ul>
		Verkehrsdatenerfassung-Induktionsschleife (Prozess 11.1.2)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
		Verkehrsdatenerfassung-Induktionsschleife (Prozess 11.1.2)/ Durchführung von Wartungsmaßnahmen	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empfehlungen zum Erstellen von Vertragsunterlagen beachten</li> </ul>
Erhöhung der Datenintegrität (Umfelddaten)	Erhöhung der Aktualität, Zuverlässigkeit und Richtigkeit der noch nicht aggregierten und verarbeiteten Umfelddaten, wie z.B. die Helligkeit-, die Sichtweiten- oder die Niederschlagsdaten.	Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15)/ QS-Maßnahmen während des Werktests	0,3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Checklisten erstellen</li> <li>• Erfahrene Kontrollinstanz (Audit) einsetzen</li> <li>• 4-Augen-Prinzip</li> </ul>
		Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15)/ QS-Maßnahmen während des Probebetriebs	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung, ob Sensoren der richtigen Fahrtrichtung zugeordnet sind</li> <li>• Plausibilisierung der Umfelddaten</li> <li>• Prüfung auf Vollständigkeit der verkehrstechnischen Versorgung</li> </ul>
		Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Einsatz von erfahrener Personal	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfahrenes Personal einsetzen</li> <li>• Prüfungen und Tests durchführen</li> <li>• Für das Personal ein „Drehbuch“ erstellen</li> </ul>

Tab. 26 Forts.

		Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Prüfung der Testprotokolle	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standardisierte Testprotokolle erstellen</li> <li>• Nach der Durchführung der Tests und Prüfungen hat der Auftragnehmer die Durchführung zu dokumentieren und die Testprotokolle dem Planer vorzulegen</li> <li>• Entstehen Fehler bei der Durchführung der Tests, sind diese vom Hersteller zu beseitigen</li> </ul>
		Erfassung Sichtweiten (Prozess 11.3)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung der Messwerte</li> <li>• Automatische Ausfallüberwachung</li> <li>• Prüfung durch Fachpersonal</li> </ul>
		Erfassung Niederschlag (Prozess 11.4)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
		Kommunikation (Prozesse 9/7/5/3)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
		Erfassung Sichtweiten (Prozess 11.3)/ Reinigung der Sensorik	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rahmenbedingungen zur Installation der Sensorik befolgen</li> </ul>
Verbesserung der Datenverarbeitung	Erhöhung der Qualität Aggregation und Verarbeitung der Verkehrs- und Umfelddaten, bevor diese für eine Entscheidungsfindung genutzt werden  Reduktion der Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Verarbeitung der Daten	Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Einsatz von erfahrener Personal	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfahrenes Personal einsetzen</li> <li>• Prüfungen und Tests durchführen</li> <li>• Für das Personal ein „Drehbuch“ erstellen</li> </ul>
		Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Prüfung der Testprotokolle	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standardisierte Testprotokolle erstellen</li> <li>• Nach der Durchführung der Tests und Prüfungen hat der Auftragnehmer die Durchführung zu dokumentieren und die Testprotokolle dem Planer vorzulegen</li> <li>• Entstehen Fehler bei der Durchführung der Tests, sind diese vom Hersteller zu beseitigen</li> </ul>
		Datenübernahme (Prozess 8.1)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung der Messwerte</li> <li>• Automatische Ausfallüberwachung</li> <li>• Prüfung durch Fachpersonal</li> </ul>

Tab. 26 Forts.

		Datenaufbereitung (Prozess 8.2)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
		Datenvermittler (Prozess 8.3)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
		Kommunikation (Prozesse 9/7/5/3)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
		Datenaufbereitung (Prozess 8.2)/ Offline-Prüfung von Daten auf Plausibilität	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tool-gestützte Offline Prüfung von Daten</li> </ul>
		Datenaufbereitung (Prozess 8.2)/ Kontrolle der Konfiguration und Parametrierung	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festlegen von Prüfzyklen pro Parameter- und Konfigurationsart</li> </ul>
		Datenaufbereitung (Prozess 8.2)/ Durchführung von Wartungsmaßnahmen	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empfehlungen zum Erstellen von Vertragsunterlagen beachten</li> </ul>
		Datenvermittler (Prozess 8.3)/ Implementierung einer Systemüberwachung	0,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementierung des Watchdogs</li> </ul>
Effektivitätssteigerung der Schaltung	Erhöhung der Qualität der Schaltdurchführung nach abgeschlossener Schaltungsentscheidung. Hierbei liegt der Fokus in der Reduktion der Fehlerwahrscheinlichkeit in der Weiterleitung des Schaltbefehls und in der konkreten	Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15)/ QS-Maßnahmen während des Werktests	0,3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Checklisten erstellen</li> <li>• Erfahrene Kontrollinstanz (Audit) einsetzen</li> <li>• 4-Augen-Prinzip</li> </ul>
		Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15)/ QS-Maßnahmen während des Probebetriebs	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung, ob Sensoren mit dem richtigen Fahrstreifen verbunden sind</li> <li>• Prüfung, ob Sensoren der richtigen Fahrtrichtung zugeordnet sind</li> <li>• Plausibilisierung der Umfelddaten</li> <li>• Prüfung auf Vollständigkeit der verkehrstechnischen Versorgung</li> </ul>

Tab. 26 Forts.

	Durchführung am Anzeigequerschnitt.	Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Einsatz von erfahrener Personal	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfahrenes Personal einsetzen</li> <li>Prüfungen und Tests durchführen</li> <li>Für das Personal ein „Drehbuch“ erstellen</li> </ul>
		Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Prüfung der Testprotokolle	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standardisierte Testprotokolle erstellen</li> <li>Nach der Durchführung der Tests und Prüfungen hat der Auftragnehmer die Durchführung zu dokumentieren und die Testprotokolle dem Planer vorzulegen</li> <li>Entstehen Fehler bei der Durchführung der Tests, sind diese vom Hersteller zu beseitigen</li> </ul>
		Datenaustausch extern (Prozess 6.6)/ Durchführung von Wartungsmaßnahmen	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Empfehlungen zum Erstellen von Vertragsunterlagen beachten</li> </ul>
		Datenaustausch SSt (Prozess 4.1)/ Hinweise für Abnahmetests	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prüfung der Datenübertragung</li> <li>Durchführung von Langzeittests</li> <li>Prüfung der Installation der Detektoren und Geräte</li> <li>Prüfung der Funktionsfähigkeit</li> <li>Kalibrierung der einzelnen Sensoren</li> <li>Prüfung der Datenübertragung</li> <li>Prüfungen der VRZ-/UZ Software</li> </ul>
		Datenaustausch SSt (Prozess 4.1)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prüfung der Messwerte</li> <li>Automatische Ausfallüberwachung</li> <li>Prüfung durch Fachpersonal</li> </ul>
		Schaltung (Prozess 2)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
		Anzeige (Prozess 1)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
		Datenaustausch extern (Prozess 6.6)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
	Datenaustausch extern (Prozess 6.6)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0		

Tab. 26 Forts.

		Kommunikation (Prozesse 9/7/5/3)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
		Durchführung Steuerungsalgorithmen (Prozess 4.3)/ Monitoring von Schaltungen durch operatives Personal	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Überwachung der Schaltung durch das operative Personal</li> </ul>
		Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus VRZ (Prozess 4.4)/ Monitoring von Schaltungen durch operatives Personal	1,0	
		Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus VRZ (Prozess 4.4)/ Prüfung der verkehrstechnischen Konfiguration	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Allgemeine Prüfungen durchführen</li> </ul>
Qualitätserhöhung der Schaltentscheidung	Erhöhung der Qualität der Überführung der gesammelten Verkehrs- und Umfelddaten zu einem konkreten Schaltbefehl. Hierbei spielen sowohl die automatischen als auch die manuellen Schaltbefehle eine Rolle.	Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse (Prozess 6.1)/ Schulung und Vorgaben für das operative Personal	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standard-Schulungs-Material erstellen</li> <li>Erfahrungen mit anderen Zentralen austauschen</li> <li>Schwerpunkte für Nachschulungen erfassen</li> </ul>
		Manuelle Eingabe vorhersehbarer Ereignisse (Prozess 6.2)/ Schulung des operativen Personals	1,0	
		Betriebsüberwachung (Prozess 6.5)/ Schulung des operativen Personals	1,0	
		Protokolle und Auswertungen (Prozess 6.3)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prüfung der Messwerte</li> <li>Automatische Ausfallüberwachung</li> <li>Prüfung durch Fachpersonal</li> </ul>

Tab. 26 Forts.

		Betriebsüberwachung (Prozess 6.5)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	
		Protokolle und Auswertungen (Prozess 6.3)/ Hinweise für Abnahmetests	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung der Datenübertragung</li> <li>• Durchführung von Langzeittests</li> <li>• Prüfung der Installation der Detektoren und Geräte</li> <li>• Prüfung der Funktionsfähigkeit</li> <li>• Kalibrierung der einzelnen Sensoren</li> <li>• Prüfung der Datenübertragung</li> <li>• Prüfungen der VRZ-/UZ Software</li> </ul>
		Übersichtsdarstellung (Prozess 6.4)/ Hinweise für Abnahmetests	1,0	
		Übersichtsdarstellung (Prozess 6.4)/ Durchführung von Wartungsmaßnahmen	1,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empfehlungen zum Erstellen von Vertragsunterlagen beachten</li> </ul>
		Betriebsüberwachung (Prozess 6.5)/ Durchführung von Wartungsmaßnahmen	1,0	
		Betriebsüberwachung (Prozess 6.5)/ Implementierung einer Systemüberwachung (Watchdog)	0,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementierung des Watchdogs</li> </ul>

Tab. 26 Forts.

### 6.3 Kostenermittlung

Für die Ermittlung der Kosten sind die einzelnen Handlungsempfehlungen tabellarisch aufgelistet worden (s. Tab. 27). Aus dem Katalog der Handlungsempfehlungen sind die Kostenarten zusammengefasst abgeleitet worden. Dabei unterscheidet man zwischen internen Kosten beim Aufwand für den bereits bestehenden Personalstamm und externen Kosten bei notwendigen Investitionen bzw. externen Dienstleistungen.

Des Weiteren sind für die Handlungsempfehlungen grobe zeitliche Zuordnungen der Kosten eingetragen. Dabei wird auch unterschieden, ob der Aufwand in der Einführung oder in der kontinuierlichen Durchführung der QM-Maßnahmen anfällt.

Durch die geschätzte Größenordnung der Kosten in Verbindung mit der ermittelten Prioritätenliste der Handlungsempfehlungen können die vorgesehenen Ressourcen effizient eingeteilt werden.

Prozess / Handlungsempfehlung	Kostenart, Kurzbeschreibung	Zeitliche Zuordnung	Größenordnung
Ausführungsplanung (Prozess 18) / Freigabeprozess für die Ausführungsplanung	(Interne) Personalkosten: Vereinheitlichung der Planungsdokumente	Einführung	mittel
	Interne oder externe Personalkosten: Durchführung des Audits	Durchführung	mittel
Ausschreibung (Prozess 17) / Standards für die Ausschreibung	(Interne) Personalkosten: Erstellung von Mustervorlagen und Checklisten	Einführung	hoch
	Interne Personalkosten: Kontrolle der Ausschreibung	Durchführung	gering
Ausschreibung (Prozess 17) / Audit für die Leistungsbeschreibung	(Interne) Personalkosten: Erstellung von Checklisten	Einführung	gering
	Interne Personalkosten: Schaffung einer Kontrollinstanz (zus. Ressource)	Durchführung	hoch
Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15) / QS-Maßnahmen während des Werktests	Interne Personalkosten: Erstellung von Checklisten	Einführung	gering
	Interne Personalkosten: Kontrolle der Prüfprotokolle	Durchführung	mittel
Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15) / QS-Maßnahmen während des Probebetriebs	Interne Personalkosten: Erstellung von Checklisten	Einführung	gering
	Externe Personalkosten für Prüfungen durch HOAI LPH 8 abgedeckt	Durchführung	keine
Inbetriebnahme (Prozess 13) / Einsatz von erfahrenem Personal	Interne Personalkosten: Ersterstellung des Drehbuchs	Einführung	gering
	Interne Personalkosten: Einsatz von erfahrenem Personal	Durchführung	hoch
Inbetriebnahme (Prozess 13) / Prüfung der Testprotokolle	Interne Personalkosten: Ersterstellung von Testprotokolltemplates	Einführung	gering
	(Externe) Personalkosten: Prüfung und Freigabe der Protokolle	Durchführung	mittel
Abnahme (Prozess 12) / Hinweise für Abnahmetests	Interne Personalkosten: Ersterstellung einer Checkliste	Einführung	gering
	Interne Personalkosten: Durchführung von Kontrollen	Durchführung	mittel
Erfassung Sichtweiten (Prozess 11.3) / Reinigung der Sensorik	Personalkosten: Erarbeitung und Einführung zusätzlicher Wartungsmaßnahmen	Einführung	gering
	Personalkosten: zusätzlicher Aufwand bei der Wartung durch erweiterte Maßnahmen	Durchführung	mittel
Verkehrsdatenerfassung/Überkopfsensor (Prozess 11.1.1) / Prüfung der Messdaten nach Montage/Kalibrierung/Inbetriebnahme	(Interne) Personalkosten: Erarbeitung und Checklisten	Einführung	mittel
	(Externe) Personalkosten: Durchführung erweiterter Prüfungen	Durchführung	mittel
Prozesse der Lebenszyklusphase Betrieb / Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	Investitionskosten: weitere Aufbereitung und Aggregation von Daten	Einführung	gering
	(Interne) Personalkosten: regelmäßige Kontrolle und Auswertung der gemeldeten Fehler	Durchführung	mittel
Datenaufbereitung (Prozess 8.2) / Offline-Prüfung von Daten auf Plausibilität	Investitionskosten: Implementierung bzw. Kauf von Tools	Einführung	hoch
	Personalkosten: regelmäßige Kontrolle und Auswertung durch Fachpersonal oder externes Personal	Durchführung	mittel
Datenaufbereitung (Prozess 8.2) / Kontrolle der Konfiguration und Parametrierung	Keine Tools notwendig, ggf. Erarbeitung und Checklisten	Einführung	kein
	Interne Personalkosten: Einsatz von erfahrenem Personal, rein manuelle Kontrollen	Durchführung	hoch
Betriebsüberwachung (Prozess 6.5) / Implementierung einer Systemüberwachung (Watchdog)	Investitionskosten: Übernahme/Implementierung herstellerspezifischer Überwachungstools	Einführung	gering
	Personalkosten: Kontrolle der Meldungen des Überwachungstools	Durchführung	gering
Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse (Prozess 6.1) / Schulung des/Vorgaben für das operative Personal	Personalkosten: Erstellung von Schulungsmaterial	Einführung	hoch
	Interne Personalkosten: Freistellung des Personals für Schulungen unter Berücksichtigung des Schichtplans	Durchführung	mittel
	Interne Personalkosten: Einführung in das System	Einführung	gering

Tab. 27 Kostenarten der Handlungsempfehlungen

Manuelle Eingabe nicht vorhersehbarer Ereignisse (Prozess 6.1) / Verifikation von verkehrlichen Situationen via Video innerhalb von Streckenbeeinflussungsanlagen	Interne Personalkosten: Erweiterung des Monitoringprozesses	Durchführung	hoch
Konfiguration, Parametrierung und Optimierung aus VRZ (Prozess 4.4) / Prüfung der verkehrstechnischen Konfiguration	Interne Personalkosten: Erstellung von Checklisten	Einführung	gering
	Interne Personalkosten: Prüfung bedeutet hohen manuellen Aufwand	Durchführung	hoch
Durchführung Steuerungsalgorithmen (Prozess 4.3) / Monitoring von Schaltungen durch operatives Personal	Interne Personalkosten: Erstellung von Checklisten	Einführung	gering
	Interne Personalkosten: laufende Prüfung von Schaltungen	Durchführung	hoch
Wartung und Instandsetzung (Prozess 21) / Durchführung von Wartungsmaßnahmen	Nutzung eines Standard-Wartungsvertrags	Einführung	keine
	(externe) Kosten: erhöhter Aufwand in der Wartung	Durchführung	hoch
Wartung und Instandsetzung (Prozess 21) / Nutzung des Standard-Wartungsvertrags	Personalkosten: Erstellung bzw. Adaptierung eines Standard-Wartungsvertrags	Einführung	gering
	Personalkosten: Erweiterter Leistungsumfang im Wartungsvertrag gefordert	Durchführung	mittel

Tab. 27 Forts.

## 6.4 Vorgehensweise zur Nutzen-Kosten-Ermittlung

Da für die erarbeiteten Handlungsempfehlungen die jeweiligen Kosten und Nutzen nicht bzw. nur schwer monetär bewertbar sind, kann an dieser Stelle keine quantitative Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden. Es soll jedoch für die Betreiber die Möglichkeit geschaffen werden, anhand der betreiberspezifischen Anforderungen eine Prioritätenliste der Handlungsempfehlungen aufzustellen, die an die Notwendigkeiten der konkreten Anlage angepasst ist und somit den effizienten Einsatz von Ressourcen ermöglicht. Hierzu soll die Kosten-Nutzwert-Analyse zur Anwendung kommen. Tab. 26 und Tab. 27 stellen die Grundlage für diese Methodik dar.

Im ersten Schritt der Analyse muss der Betreiber der Anlage die Liste von Nutzenarten anhand der spezifischen Notwendigkeiten und Wünsche gewichten. Dabei sind die Gewichtungsfaktoren Zahlenwerte zwischen 0 und 1, wobei die Summe dieser Gewichtungen 1 ergeben muss. Die weiteren Werte, die in die Analyse einfließen, sind bereits in der erarbeiteten Nutzentabelle (s. Tab. 26) eingepflegt, können aber auch durch den Anwender angepasst werden. Dabei handelt es sich um die Bewertung des Einflusses der Handlungsempfehlungen auf die einzelnen Nutzenarten, hier auch als Einzelnutzenwerte der Handlungsempfehlungen bezeichnet. Auch hier handelt es sich um Zahlenwerte zwischen 0 und 1, die jedoch keiner weiteren Bedingung bezüglich ihrer Summe unterliegen. Die Werte stellen dabei eine Überführung der Effektivität der Handlungsempfehlungen dar, welche im

Rahmen der Aufstellung des Handlungsempfehlungskataloges (siehe Dokument „Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen - Handlungsempfehlungen“) geschätzt worden sind. Eine im Ampelsystem mit hoch, mittel und niedrig geschätzte Effektivität (grün, gelb und rot) wurde entsprechend mit einem Einzelnutzenwert von 1,0, 0,7 und 0,3 bewertet. Der Einzelnutzenwert 0 entspricht sinngemäß der Nichtumsetzung einer Handlungsempfehlung.

Die vom Betreiber gesetzten Gewichtungsfaktoren werden mit den zugeordneten Einzelnutzenwerten multipliziert. Die Produkte werden dann pro Handlungsempfehlung aufsummiert. Somit erhält jede Handlungsempfehlung einen gesamten Nutzenwert, der beschreibt, wie hoch die Handlungsempfehlung für die konkreten Betreiber priorisiert werden sollte.

Mathematisch wird die Methode durch folgende Formel ausgedrückt:

$$N = \sum w_i N_i,$$

mit

$N_i$ - Einzelnutzenwert der Handlungsempfehlungen auf die Nutzenart,

$w_i$ - Gewichtung der Nutzenarten, geschätzt durch Betreiber,

$N$  – Gesamtnutzenwert der Handlungsempfehlung.

Durch die Sortierung der Handlungsempfehlungen anhand der Nutzenwerte kann die Prioritätenliste der Handlungsempfehlungen ermittelt werden.

Anschließend erfolgt die Zuweisung konkreter Kosten zur Umsetzung der Handlungsempfehlung (einmalige Kosten zur Einführung, i.d.R. fortlaufende Kosten zur Durchführung). Hierzu kann die Zusammenstellung von Angeboten und Aufwandsabschätzungen notwendig werden.

Die konkrete Auswahl der umzusetzenden Handlungsempfehlungen kann anhand der Prioritätenlisten durch sukzessive Einordnung der Summe der Kosten der Maßnahme in das vorhandene Budget erfolgen.

Die konkrete Auswahl der Handlungsempfehlungen kann durch sukzessive Einordnung der Summe der

Kosten der Maßnahmen in das vorhandene Budget erfolgen.

### 6.5 Beispiel

Entsprechend der Beschreibung der Methodik wird hier für eine fiktive SBA eine Nutzwert-Analyse durchgeführt.

In diesem Beispiel werden die Nutzenarten „Erhöhung der Datenintegrität“ der Verkehrs- und der Umfelddaten entsprechend mit 0,7 und 0,3 (Summe ergibt 1) gewichtet. In der Tab. 28 sind diese Gewichtungen in der zweiten Spalte ( $w_i$ ) eingetragen. Die letzte Spalte (Prod) beinhaltet die Multiplikation zwischen dem Gewichtungsfaktor und dem Einzelnutzwert ( $N_i$ ) der Handlungsempfehlung aus Tab. 26.

Nutzenart	$w_i$	Prozess/ Handlungsempfehlung	$N_i$	Prod
Erhöhung der Datenintegrität (Verkehrsdaten)	0,7	Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15)/ QS-Maßnahmen während des Werktests	0,3	0,21
		Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15)/ QS-Maßnahmen während des Probebetriebs	1,0	0,7
		Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Einsatz von erfahrenem Personal	1,0	0,7
		Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Prüfung der Testprotokolle	1,0	0,7
		Verkehrsdatenerfassung-Überkopfsensor (Prozess 11.1.1)/ Prüfung der Messdaten nach Montage/Kalibrierung/Inbetriebnahme	1,0	0,7
		Verkehrsdatenerfassung-Überkopfsensor (Prozess 11.1.1)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	0,7
		Verkehrsdatenerfassung-Induktionsschleife (Prozess 11.1.2)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	0,7
		Verkehrsdatenerfassung-Induktionsschleife (Prozess 11.1.2)/ Durchführung von Wartungsmaßnahmen	1,0	0,7
Erhöhung der Datenintegrität (Umfelddaten)	0,3	Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15)/ QS-Maßnahmen während des Werktests	0,3	0,09
		Konfiguration Hardware & Software (Prozess 15)/ QS-Maßnahmen während des Probebetriebs	1,0	0,3
		Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Einsatz von erfahrenem Personal	1,0	0,3
		Inbetriebnahme (Prozess 13)/ Prüfung der Testprotokolle	1,0	0,3
		Erfassung Sichtweiten (Prozess 11.3)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	0,3
		Erfassung Niederschlag (Prozess 11.4)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	0,3
		Kommunikation (Prozesse 9/7/5/3)/ Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	1,0	0,3
		Erfassung Sichtweiten (Prozess 11.3)/ Reinigung der Sensorik	1,0	0,3

Tab. 28 Bewertete Nutzenartentabelle

Die ermittelten Produkte werden pro Handlungsempfehlung gruppiert und aufsummiert. So beinhaltet Tab. 28 vier Einträge der Handlungsempfehlung „QS-Maßnahmen während des Werktests“ mit den

Werten 0,21, 0,7, 0,09 und 0,3. Aus der Summe dieser Werte ergibt sich der Gesamtnutzenwert N dieser Handlungsempfehlung für diesen konkreten Betreiber zu 1,3.

Tab. 29 enthält die sortierte Liste der Handlungsempfehlungen und deren Gesamtnutzenwerte. Die Reihenfolge ergibt sich aus der Höhe der Gesamtnutzenwerte. Es ist ersichtlich, dass für diesen Betreiber die Handlungsempfehlung „Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System“ den größten Nutzen bringt. Für diese konkreten Maßnahmen können Angebote für Dienstleistungen, Hardware und Software eingeholt und Einschätzungen für die internen Personalaufwände

durchgeführt werden um festzustellen, ob die Handlungsempfehlung mit dem vorgegebenen Budget durchgeführt werden kann. Falls das Budget die Kosten für die Umsetzung dieser Handlungsempfehlung nicht übersteigt, können gegebenenfalls weitere Handlungsempfehlungen aus Tab. 29, deren Kosten natürlich vorher abzuschätzen sind, umgesetzt werden. Je nach Kostengrößenordnung sollte die Reihenfolge der umzusetzenden Handlungsempfehlungen ggf. angepasst werden.

Handlungsempfehlung	$\Sigma$ (N-Wert)
Automatische Analyse und Auswertung erkannter Plausibilitätsfehler und gemeldeter Fehler an das VRZ/UZ System	2,3
QS-Maßnahmen während des Werktests	1,3
Einsatz von erfahrenem Personal	1,0
Prüfung der Testprotokolle	1,0
Verkehrsdatenerfassung-Überkopfsensor (Prozess 11.1.1)/ Prüfung der Messdaten nach Montage/Kalibrierung/Inbetriebnahme	0,7
Verkehrsdatenerfassung-Induktionsschleife (Prozess 11.1.2)/ Durchführung von Wartungsmaßnahmen	0,7
Erfassung Sichtweiten (Prozess 11.3)/ Reinigung der Sensorik	0,3

**Tab. 29** Prioritätenliste der Handlungsempfehlungen

## 7 Fazit und Ausblick

Die Forschungsarbeit hatte die Erarbeitung eines vollständigen Prozess- und Qualitätsmodells für die Lebenszyklusphasen Planung, Bau und Betrieb von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) und von praxistauglichen Handlungsempfehlungen zur Einführung und Durchführung von Qualitätsmanagementmaßnahmen zum Ziel.

Zur Erfassung des komplexen Systems einer SBA wurden die Prozessketten der Lebenszyklusphasen Planung, Bau und Betrieb, sowie der den Betrieb unterstützenden Prozess Wartung & Instandsetzung in einem Prozessmodell graphisch dargestellt. Die Schaltanforderungen (z.B. Stauwarnung, Nebelwarnung etc.) wurden in sog. Top Events, den Funktionen einer SBA, aufgeführt und bilden im Prozessmodell den Endpunkt der Fehlerfortpflanzung.

Im Rahmen des Projekts wurden die Grundlagen zur Gestaltung eines auf Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) bezogenen Qualitätsmanagementsystems herangezogen. Die wichtigsten Qualitätsmanagementansätze und ihre Anwendung im Straßen- und Verkehrswesen wurden untersucht und beschrieben. Zur Analyse der kritischsten Qualitätsprobleme einer SBA wurde die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) gewählt, da sie eine frühzeitige Fehlererkennung und -beseitigung durch qualitätsverbessernde Maßnahmen erlaubt und alle relevanten Prozesse des Systems berücksichtigt.

Die FMEA wurde auf Grundlage des Prozessmodells erstellt, sodass anhand verfügbaren Expertenwissens die kritischsten Qualitätsprobleme einer SBA ermittelt werden konnten. Die kritischsten Prozesse ergeben sich hierbei aus der Bedeutung, Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehler. Es zeigte sich, dass die 10 kritischsten Fehler ausschließlich in der Lebenszyklusphase Betrieb auftreten. Diese waren vermehrt in den Prozessen „Datenaufbereitung“ und „Manuelle Eingabe von nicht vorhersehbaren Ereignissen“ zu finden. Anhand der Betrachtung der einzelnen Lebenszyklusphasen konnten außerdem die kritischsten Prozesse der jeweiligen Phasen identifiziert werden. Als kritische Prozesse haben sich in der Lebenszyklusphase Planung die Prozesse „Ausführungsplanung“ und „Ausschreibung“, in der

Lebenszyklusphase Bau der Prozess „Konfiguration Hardware & Software“ herausgestellt.

Auf Basis der Ergebnisse des Prozessmodells und der FMEA wurden in einem Qualitätsmodell die Auswirkungen der Fehler auf nachfolgende Prozesse modelliert. Anhand eines Bayes'schen Netzes konnten somit die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Fehler und die Fehlerfortpflanzung unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Prozesse untereinander dargestellt und berechnet werden. Des Weiteren kann das entwickelte Qualitätsmodell als Diagnosewerkzeug zur Identifizierung möglicher Fehlerursachen bei Fehlern im Lebenszyklus einer SBA genutzt werden. Das auf der Theorie Bayes'scher Netze basierende Qualitätsmodell erwies sich als geeignetes Konzept zur Modellierung des komplexen Systems einer SBA.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden schließlich anhand der Ergebnisse des Prozessmodells praxisorientierte, ressourcenschonende Handlungsempfehlungen abgeleitet und in einem eigenständigen Dokument für die Zielgruppen Planer und Betreiber von Streckenbeeinflussungsanlagen zusammengestellt. Zudem wurde eine Methode zur Abschätzung des Nutzens der Maßnahmen zur Verfügung gestellt und anhand eines praxisnahen Beispiels illustriert, um die erforderlichen Investitionen zur Qualitätssicherung zu begründen.

Zukünftige Forschungsaktivitäten sollten sich mit der weiteren Optimierung des beschriebenen Qualitätsmodells in Form von Anpassungen der Modelltopologie sowie der datenbasierten Schätzung der benötigten Modellparameter beschäftigen.

Des Weiteren sollten die Ergebnisse des Prozess- und Qualitätsmodells in der Praxis anhand einer VBA getestet werden. Jedoch ist zu beachten, dass das Prozessmodell auf einer musterhaft konzipierten SBA basiert und daher bei Anwendung in der Praxis auf andere Typen von Verkehrsbeeinflussungsanlagen (z.B. Netzbeeinflussungsanlagen oder Knotenpunktbeeinflussungsanlagen) bzw. auf eine konkret betrachtete SBA angepasst werden muss.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden Maßnahmen und Werkzeuge für den gesamten Lebenszyklus von SBA entwickelt, die zur Steigerung der Qualität von SBA einen wichtigen Beitrag leisten können.

## 8 Literatur

- BALMBERGER ET AL., 2014: Balmberger, M.; Maibach, W.; Schüller, H.; Dahl, A.; Schäfer, T.: Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen über den gesamten Lebenszyklus, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V243, Bergisch Gladbach 2014
- BARNAGHI ET AL., 2015: Barnaghi, P.; Bermudez-Edo, M.; Tönjes, R.: Challenges for Quality of Data in Smart Cities, In: ACM Journal of Data and Information Quality 6 (2-3), 2015
- BAYESFUSION, 2016: BayesFusion, LLC: GeNIe Modeler 2.1 (Download), <http://www.bayesfusion.com>, letzter Zugriff: 11.02.2016
- BMV, 1993: Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), Bonn 1993
- BMVBS, 2015: Entwurf des Muster-RE-Entwurf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Arbeitsstand 2011 (unveröffentlicht) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Berlin 2015
- BOLTZE ET AL., 2014: Boltze, M.; Rainer, H.; Roos, R.; Balluff, J.: Konzeption eines integrierten Qualitätsmanagements für das Straßen- und Verkehrswesen, Straßenverkehrstechnik 9. 2014, S. 607-613
- BUSCH ET AL., 2009: Busch, F.; Grošanić, S.; Dinkel, A.; Schieferstein, A.; Stadler, M.: Begleitforschung und Ergänzung des Merkblatts „Ermittlung der Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen“, Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), München 2009
- CHARNIAK, 1991: Charniak, E.: Bayesian Networks without Tears, In: AI Magazine, Winter 1991, S. 50-63, 1991
- DGQ, 2012: FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Frankfurt 2012
- DIN EN 60812, 2006: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und –auswirkungsanalyse (FMEA), Beuth Verlag, Berlin 2006
- DIN EN ISO 9000, 2005: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe, Beuth Verlag, Berlin 2005
- DIN EN ISO 9001, 2008: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen, Beuth Verlag, Berlin 2008
- DIN 1960, 2012: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil A: Allgemeine Bestimmung für die Vergabe von Bauleistungen, Beuth Verlag, Berlin 2012
- DONABEDIAN, 1988: Donabedian, A.: The Quality of Care – How Can It Be Assessed? In: JAMA 260 (12), S. 1743-1748, 1988
- ECTN, 2010: Beschreibung Systemkonzept VEMAS, 2010 EXTN AG, Buchos, Schweiz, 2010
- EBERHARDT, 2013: Eberhardt, O.: Risikobeurteilung mit FMEA, Expert Verlag, 2013
- EISENFÜHR/WEBER, 2003: Eisenführ, F.; Weber, M.: Rationales Entscheiden, 4. Auflage, Springer, Berlin, 2003
- FELDGES ET AL., 2012: Feldges, M.; Katzler, R.; Ackermann, M.; Grimm, J.: Neue Verfahren und Qualitätssicherung in der Verkehrsdatenerfassung, In: Straßenverkehrstechnik 10.2012, S. 639-648
- FGSV, 2006: Hinweise zur Qualitätsanforderung und Qualitätssicherung der lokalen Verkehrsdatenerfassung für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln 2006
- FGSV, 2007a: Hinweise zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln 2007
- FGSV, 2007b: Hinweise zur Anwendung von Qualitätsmanagement in kommunalen Verkehrsplanungsprozessen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln 2007
- FGSV, 2010: Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln 2010
- FGSV, 2012: Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung,

- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln 2012
- GENIE, 2016: Decision Systems Laboratory: GeNle Documentation, [https://dslpitt.org/genie/wiki/GeNle\\_Documentation](https://dslpitt.org/genie/wiki/GeNle_Documentation), letzter Zugriff: 11.02.2016
- GLOWALLA/SUNYAEV, 2014: Glowalla, P.; Sunyaev, A.: Process-Driven Data Quality Management: A Critical Review on the Application of Process Modelling Languages, In: ACM Journal of Data and Information Quality 5 (1-2), 2014
- HECKERMAN ET AL., 1992: Heckerman, D. E.; Horvitz, E. J.; Nathwani, B. N.: Toward normative expert systems: Part I. The Pathfinder Project, In: Methods of Information in Medicine 31 (2), S. 90-105, 1992
- HECKERMAN/NATHWANI, 1992: Heckerman, D. E.; Nathwani, B. N.: Toward normative expert systems: Part II. Probability-based representations for efficient knowledge acquisition and inference, In: Methods of Information in Medicine 31 (2), S. 106-116, 1992
- HENRION, 1989: Henrion, M: Some Practical Issues in Constructing Belief Networks, In: Uncertainty in Artificial Intelligence 3, S. 161-173, 1989
- KAMISKE, 2012: Kamiske, G. F.: Handbuch QM-Methoden – Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen, Hanser, München 2012
- KAPPICH ET AL., 2010: Kappich, G.; Westermann, C.; Schmitz, R.; Reitenberger, S.; Volkenhoff, T.; Kemper, D.; Brake, M. Steinauer, B.: Echtzeitbeurteilung und –optimierung der Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1040, Bonn 2010
- KIRSCHFINK/ARETZ, 2009: Kirschfink, H.; Aretz, C.: Qualitätsmanagementkonzept für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 187, Bergisch Gladbach 2009
- KOLLER/FRIEDMAN, 2009: Koller, D.; Friedman, N.: Probabilistic graphical models – principles and techniques, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2009
- KRIEGER, 2011: Krieger, O.: Wahrscheinlichkeitsbasierte Fahrzeugdiagnose mit individueller Prüfstrategie, Dissertation, TU Braunschweig, Braunschweig, 2011
- LAUFER, 2011: Laufer, R.: Prozedurale Qualitätsmodellierung und -management für Daten – ingenieurgeodätische und verkehrstechnische Anwendungen, Dissertation, Institut für Ingenieurgeodäsie, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2011
- LAURITZEN/SPIEGELHALTER, 1988: Lauritzen, S. L.; Spiegelhalter, D. J.: Local Computations with Probabilities on Graphical Structures and their Application to Expert Systems, In: Journal of the Royal Statistical Society B 50 (2), S. 157-224, 1988
- MARZ, 1999: Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen, Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Bergisch Gladbach 1999
- MUSTER-QMH: Muster-Qualitätsmanagement-Handbuch für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes, Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Bergisch Gladbach 2008
- NEUMANN, 2014: Neumann, T.: Qualitätsmodellierung und –bewertung im Verkehr mittels eines probabilistischen Rahmenkonzepts, In: Straßenverkehrstechnik 7.2014, S. 450-457
- NEUMANN ET AL., 2014: Neumann, T.; Dalaff, C.; Niebel, W.: Was ist eigentlich Qualität? - Versuch einer begrifflichen Konsolidierung und Systematik im Verkehrsmanagement, In: Straßenverkehrstechnik 9.2014, S. 601-606
- RIEGELHUTH/GLATZ, 2015: Riegelhuth, G.; Glatz, M.: Zuverlässiger Betrieb von Streckenbeeinflussungsanlagen auf Basis einer antizipierenden, regelbasierten Steuerung, In: Straßenverkehrstechnik 4.2015, S. 245-258
- SCHWIETERING ET AL, 2016: Schwietering, C.; Neumann, T.; Volkenhoff, T.; Fazekas, A.; Jakobs, E.; Oeser, M.: Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen –Handlungsempfehlungen-, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur vertreten

- durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, Aachen/Bergisch Gladbach, 2016
- SEELEN/VRANCKEN, 2013: Seelen, P. A. G.; Vrancken, J. L. M.: What is required to guarantee data quality for regional traffic management? – Implementation of traffic data quality management in the Middle Netherlands, In: ITS World Congress, Tokyo, 2013
- SIEMON, 2014: Siemon, K. D.: Die HOAI 2013 verstehen und richtig anwenden, Springer Verlag, Wiesbaden 2014
- STEINHOFF, 2006: Steinhoff, C.: Online-Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver Maßnahmen durch Streckenbeeinflussungsanlagen. Dissertation, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung. TU München, München 2006
- STRASSEN.NRW, 2015: Durchblick Prozesslandschaft der Straßen.NRW, Landesbetrieb Straßenbau NRW (Hrsg.), Gelsenkirchen 2015
- TAKIKAWA/D'AMBROSIO, 1999: Takikawa, M.; D'Ambrosio, B.: Multiplicative Factorization of Noisy-Max, In: Uncertainty in Artificial Intelligence 15, S. 622-630, 1999
- TLS, 2012: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, Ausgabe 2012, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Berlin 2012
- TODORAN ET AL., 2013: Todoran, I. G.; Lecornu, L.; Khenchaf, A.; Le Caillec, J. M.: Information quality evaluation in fusion systems, In: FUSION, Istanbul, 2013
- RWVA, 1997: Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen, Ausgabe 1997, Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), Bonn 1997
- VDA, 2012: Verband der Automobilindustrie e.V.: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie – Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft, Berlin 2012
- VON DER RUHREN et al., 2011: von der Ruhren, S.; Schimandl, F.; Gabloner, S.; Spangler, M.; Weisheit, T.; Kühnel, C.; Maier, P.; Landwehr, M.; Ludwig, A.; Zingsem, A.; Förster, G.; Ryssel, T.: Traffic IQ - Pilotprojekt Informationsqualität im Verkehrswesen, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2011
- WERDICH, 2012: Werdich, M.: FMEA – Einführung und Moderation, Springer Vieweg, Wanger 2012
- WILTSCHKO, 2001: Wiltschko, T.: Einsatz eines Geo-Informationssystems zur Analyse des Unfallgeschehens im Ballungsraum, In: Straßenverkehrstechnik 6.2001, S. 277-286
- WILTSCHKO, 2004: Wiltschko, T.: Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten, Fortschr.-Ber. VDI-Reihe 12, Nr. 570, VDI-Verlag, Düsseldorf 2004
- WILTSCHKO/KAUFMANN, 2005: Wiltschko, T.; Kaufmann, T.: Modellierung und Bewertung der Qualität in Prozessen der Geodatenverarbeitung am Beispiel von Straßendaten, AGIT Symposium und Fachmesse Angewandte Geoinformatik 2005, Salzburg, 2005
- WÖHE, 2000: Wöhe, G.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre, Franz Vahlen Verlag, München 2000

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2014

V 246: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen

Kathmann, Roggendorf, Kemper, Baier

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 247: Befahrbarkeit plangleicher Knotenpunkte mit Lang-Lkw

Lippold, Schemmel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 248: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw – Grundlagentermittlung

Burg, Röhling

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2015

V 249: Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längsgerichteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Landstraßen

Schlag, Voigt, Lippold, Enzfelder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 250: Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen mit Lang-Lkw

Lippold, Schemmel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 251: Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen von Straßenumgestaltungen nach dem „Shared Space“-Gedanken

Baier, Engelen, Klemps-Kohnen, Reinartz

€ 18,50

V 252: Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen

Gündra, Barron, Henrichs, Jäger, Höfle, Marx,

Peters, Reimer, Zipf

€ 15,00

V 253: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen

Baier, Kemper

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 254: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw

Wellner, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 255: Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw

Zimmermann, Riffel, Roos

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 256: Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagenteile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Voraussetzung eines umfassenden Asset Managements

Zander, Birbaum, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 257: Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen

Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier

Hantschel, Otto € 18,00

V 258: Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten

Holldorb, Streich, Uhlig, Schäufele

€ 18,00

V 259: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten

Geistefeldt, Sievers

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 260: Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst

Hausmann

€ 15,50

V 261: Nutzung von Radwegen

in Gegenrichtung – Sicherheitsverbesserungen

Alrutz, Bohle, Busek

€ 16,50

V 262: Verkehrstechnische Optimierung des Linksabbiegens vom nachgeordneten Straßennetz auf die Autobahn zur Vermeidung von Falschfahrten

Maier, Pohle, Schmotz, Nirschl, Erbsmehl

€ 16,00

V 263: Verkehrstechnische Bemessung von Landstraßen – Weiterentwicklung der Verfahren

Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff

€ 16,50

V 264: Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen

Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff

€ 17,00

V 265: Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken

Bark, Kutschera, Resnikow, Baier, Schuckließ

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 266: Verfahren zur Bewertung der Verkehrs- und Angebotsqualität von Hauptverkehrsstraßen

Baier, Hartkopf

€ 14,50

V 267: Analyse der Einflüsse von zusätzlichen Textanzeigen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen

Hartz, Saighani, Eng, Deml, Barby

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 268: Motorradunfälle – Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur

Hegewald, Fürneisen, Tautz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

V 269: Identifikation von unfallauffälligen Stellen motorisierter Zweiradfahrer innerhalb geschlossener Ortschaften

Pohle, Maier

€ 16,50

V 270: Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)

Holldorb, Rumpel, Biberach, Gerstengarbe,

Österle, Hoffmann

€ 17,50

V 271: Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur

Offergeld, Funke, Eschenbruch, Fandrey, Röwekamp

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

- V 272: Einsatzkriterien für Baubetriebsformen  
Göttgens, Kemper, Volkenhoff, Oeser,  
Geistefeldt, Hohmann € 16,00
- V 273: Autobahnverzeichnis 2016  
Kühnen € 25,50
- V 274: Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen  
Schulz, Zimmermann, Roos € 18,00
- V 275: Modellversuch für ein effizientes Störfallmanagement auf Bundesautobahnen  
Grahl, Skottke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 276: Psychologische Wirkung von Arbeitsstellen auf die Verkehrsteilnehmer  
Petzoldt, Mair, Krems, Roßner, Bullinger € 30,50
- V 277: Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen  
Kathmann, Roggendorf, Scotti  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 278: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014  
Fitschen, Nordmann € 30,50
- V 279: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen  
Geistefeldt, Giuliani, Busch, Schendzielorz, Haug,  
Vortisch, Leyn, Trapp € 23,00
- ## 2017
- V 280: Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien  
Pollack, Schulz-Ruckriegel € 15,50
- V 281: Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen – Weiterentwicklung der Verfahren  
Maier, Berger, Kollmus € 17,50
- V 282: Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen  
Lippold, Vettors, Steinert € 19,50
- V 283: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten  
Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen,  
Schuckließ, Maier, Berger € 19,50
- V 284: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten  
Geistefeldt, Sievers  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 285: Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz  
Kamptner, Thümmeler, Ohmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 286: Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen und Entwicklung  
Kleine, Lehmann € 16,50
- V 287: Werkzeuge zur Durchführung des Bestandsaudits und einer erweiterten Streckenkontrolle  
Bark, Kutschera, Resnikow,  
Follmann, Biederbick € 21,50
- V 288: Überholungen von Lang-Lkw - Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf  
Roos, Zimmermann, Köhler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 289: Verkehrsqualität an verkehrabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen  
Geistefeldt, Giuliani, Vieten, Dias Pais in Vorbereitung
- V 290: Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung  
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz,  
Kuhnimhof, Köhler € 19,00
- V 291: Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko  
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz,  
Kuhnimhof, Köhler € 18,50
- V 292: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw  
Burg, Schrempp, Röhling, Klaas-Wissing, Schreiner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 293: Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen  
Geistefeldt, Hohmann, Estel  
Unterauftragnehmer: Manz € 17,50
- V 294: Wirtschaftlichkeitsbewertung besonderer Parkverfahren zur Lkw-Parkkapazitätserhöhung an BAB  
Maibach, Tacke, Kießig in Vorbereitung
- V 295: Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss  
Grotehusmann, Lambert, Fuchs, Graf in Vorbereitung
- V 296: Parken auf Rastanlagen mit Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Übergröße  
Lippold, Schemmel, Kathmann, Schroeder  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 297: Sicherheitstechnische Überprüfung von Elementen plangleicher Knotenpunkte an Landstraßen  
Zimmermann, Beeh, Schulz, Roos  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 298: Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalyseysteme  
Balck, Schüller, Balmberger, Rossol  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 299: Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen  
Schwietering, Neumann, Volkenhoff, Fazekas, Jakobs, Oeser  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- 
- Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:
- Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH**  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. + (0)421/3 69 03-53 · Fax + (0)421/3 69 03-63
- Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
- [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)