

Ingenieurbauwerke – Qualitätssicherungs- und Betriebssicherheitskonzept zur messtechnischen Bauwerksdiagnostik

Messtechnische Bauwerksdiagnostik in ihrer Gesamtarchitektur mit ihren Funktionsgruppen am Bauwerk und in der Zentrale/beim Anwender kann mitunter eine umfangreiche mess- bzw. erfassungstechnische Anlage mit z. T. hohem Komplexitätsgrad darstellen. Soll diese über einen langen, möglicherweise sogar an das Bauwerk angegliederten Lebenszyklus anforderungskonform, betriebssicher und wirtschaftlich betrieben werden können, sind insbesondere auch weitergehende Anforderungen an Dauerhaftigkeit sowie Wartungs-, Aktualisierungs- und Erweiterungsfähigkeit zu berücksichtigen. Erforderlich ist vor diesem Hintergrund die Entwicklung eines Konzepts zur systematischen Erfassung und fortwährenden Sicherstellung erforderlicher Anforderungen in einem qualitätsgesicherten Planungs-, Entwurfs- und Entwicklungs-, Ausführungs- und Abnahmeprozess. Hierbei spielt zur Zielerreichung neben der Berücksichtigung vorhandener technischer Regeln und z. T. gesetzlicher technischer Auflagen ebenso die Nutzung strukturierter Entwurfs- und Entwicklungsverfahren mit ihren konsistenten Spezifikations- und Dokumentationsstrategien eine zentrale Rolle. Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Vorstellung von Ansätzen zu einem umfänglichen Qualitätssicherungs- und Betriebssicherheitskonzept, insbesondere im Hinblick auf eine perspektivische Erstellung konsistenter, belastbarer und flexibel anwendbarer vertraglicher Grundlagen für technologisch transparente Realisierungen derartiger Anlagen nach vereinheitlichten grundsätzlichen Gestaltungsmerkmalen. Hiermit soll eine künftige Ansammlung individueller/firmenspezifischer und prototypischer Umsetzungen im Infrastrukturbestand vermieden werden.

The overall architecture of measurement-based structural diagnostics with its functional groups on the structure and in the control center/at the user's site can sometimes represent an extensive measurement and data acquisition system with a high degree of complexity. If this is to be operated over a long life cycle, possibly even adapted to the building, in a way that is compliant with requirements, operationally reliable and economical, then further requirements for durability and the ability to be maintained, updated and expanded must also be taken into account. Against this background, it is essential to develop a concept for systematic inclusion and continuous securing of necessary requirements in a quality-assured planning, design and development, execution and acceptance process. In addition to the consideration of existing technical rules and partly legal technical requirements, the use of structured design and development procedures with their consistent specification and documentation strategies plays a central role in achieving these objectives. The aim of this article is to present approaches for a comprehensive quality assurance and operational safety concept, especially with regard to the prospective preparation of consistent, robust and flexibly applicable contractual bases for a technologically transparent realisation of such systems according to fundamental standardized design properties. This is intended to avoid a future accumulation of individual/company-specific and prototypical status implementation solutions in the infrastructure asset.

doi.org/10.53184/STA12-2022-3

1 Neue Ansätze im Erhaltungsmanagement

Das Bundesfernstraßennetz (BFStr), das mit seiner zentralen Lage in Europa die Hauptlast des europäischen Binnenmarktes mit zunehmend steigendem Verkehrsaufkommen zu tragen hat, beinhaltet nahezu 40.000 Brückenbauwerke mit einer Brückenfläche von ca. 32 Mio. m². Das Gesamtanlagevermögen dieser Bauwerke beträgt über 50 Mrd. Euro [1, 2].

Für die Erhaltung dieser Bauwerke ist die kontinuierliche Beobachtung und Prüfung des Bestandes eine wichtige Aufgabe der Straßenbauverwaltungen. Zustandsnoten ergeben sich aus regelmäßigen, handnah

durchgeführten (Sicht-)Prüfungen im Rahmen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 und berücksichtigen Schadensbewertungen hinsichtlich Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit. Die Straßenbauverwaltungen verwenden die Ergebnisse der Bauwerksprüfung als Grundlage für ihre Erhaltungsplanungen. Die derzeitige Vorgehensweise ist hier in erster Linie schadensbasiert und reaktiv, da Schäden im Rahmen von turnusmäßigen Überprüfungen erst entdeckt werden, wenn sie offensichtlich sind und zu diesem Zeitpunkt oftmals zu hohen Instandhaltungskosten führen.

Um auch perspektivisch unter begrenzten Budgetvorgaben eine zuverlässige Straßeninfrastruktur aufrechterhalten zu können, ist

es notwendig, neue innovative Ansätze in das Erhaltungsmanagement zu integrieren, die eine frühzeitige Schadenserkennerung ermöglichen. Dieses insbesondere hinsichtlich einer Zustandserfassung der Bauwerke, abhängig von Bauweise, Größe und Komplexität sowie Vorgeschichte bzw. vorliegender Schädigung des Bauwerks.

■ Verfasser

Dipl.-Ing. Eckhard Kempkens

kempkens@bast.de

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53
51427 Bergisch Gladbach

Bild 1: Konzept Intelligente Brücke – modular anpassbare Systeme zur Erfassung und ganzheitlichen Bewertung relevanter Informationen von Einwirkungs- und Widerstandsveränderungen an Brückenbauwerken [4]

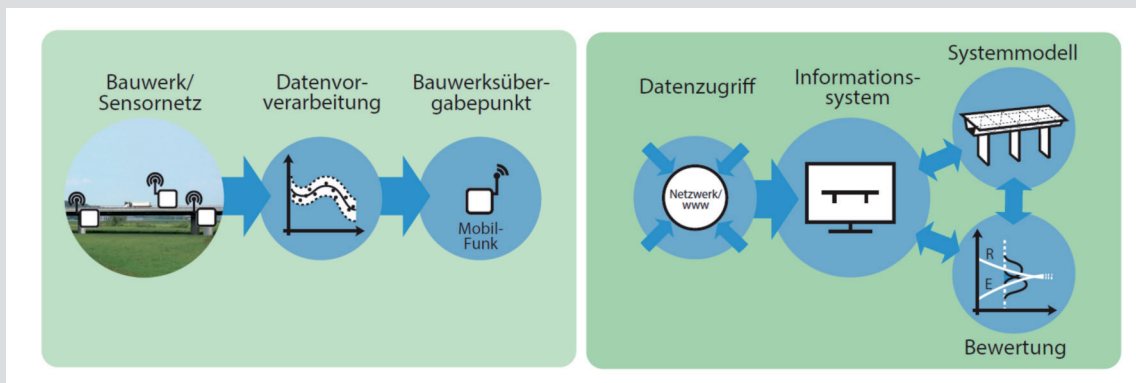


Bild 2: Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn - BAB 9/ BAB 3 [P. Haardt]



Fehlendes Regelwerk für eine technische Umsetzung

Parallel hierzu und auf Grundlage dieser Erfahrungen werden Vorbereitungen zur Überführung des bisher erreichten Erkenntnisstandes in ein Regelverfahren vorgenommen. Dies schafft technologische Transparenz und Berechenbarkeit – auch für den Markt. Neben grundsätzlichen konzeptionellen Überlegungen steht hiermit als weiterer Schritt perspektivisch die Erarbeitung vertraglicher Grundlagen für die technische Realisierung derartiger mess- und erfassungstechnischer Anlagen unter Einbeziehung aller erforderlichen Prozesse bzw. Funktionen an.

Die Aufgabe umfasst daher die Überführung des funktionalen und technischen Realisierungsniveaus von Versuchsaufbauten für Forschungszwecke, prototypischen Umsetzungen sowie zeitbegrenzten anlagentechnischen Lösungen von Dauerüberwachungen zu Auslegungen zu gelangen, die ggf. auch über den Lebenszyklus des Bauwerks hinweg betriebssicher, wartungs-, erhaltungs- und aktualisierungsfähig sowie gegenüber sich ggf. ändernden gesetzlichen technischen Vorgaben und Auflagen konform betrieben werden können.

Somit sind funktionale und technologische Ansätze, wie sie sich beim Monitoring bzw. bei der Dauerüberwachung etabliert haben, z. T. nur Ausgangspunkt weiterer Betrachtungen für einen ggf. geforderten Lebenszyklusansatz des Bauwerks. Dies wird insbesondere dann deutlich, wenn die Instrumentierung am Bauwerk zukünftig als *integraler Bestandteil* dessen verstanden werden kann – vergleichbar einer lebenszyklusorientierten technischen Gebäudeausstattung (TGA) im Hochbau, z. B. elektrische Installationen (Strom- und Telekommunikation-/Telemedierversorgung, Brandschutzanlagen u. s. w.). Entwurf und tech-

Notwendig ist daher die Entwicklung und Umsetzung eines bauwerksindividuell anpassbaren modularen Systems zur Bereitstellung relevanter Informationen über Einwirkungs- und Widerstandsveränderungen an Brückenbauwerken einschließlich einer bauwerksgerechten, zustandsparameterübergreifenden Bewertung der vorliegenden Situation und ihrer Prognose.

Forschungskonzepte wie die Intelligente Brücke (vgl. Bild 1) sind als standardisierter *lebenszyklusbasierter Ansatz* mit dem Schwerpunkt Neubau und Bestand unter *Einbeziehung sämtlicher relevanter Risiken* („all hazard“), der Validierung und Prognose mit Schädigungs- und Strukturmodellen sowie definierten Schnittstellen zum Erhaltungsmanagement gedacht worden, welche ein *prädiktives Erhaltungsmanagement* ermöglichen sollen. Methodische Weiterentwicklungen wie der digitale Zwilling (vgl. u. a. [3]) nutzen über den Lebenszyklus des Bauwerks hinweg – schon aus Wirtschaftlichkeitserwägungen – Erfassungsdaten von Bauwerkszuständen in hybrider Form – insbesondere aus festinstallierten messtechnischen Komponenten am Bauwerk sowie aus manuellen Erfassungsmethoden – ggf. auch phasenweise.

Die nachstehend beschriebenen Instrumente zur Qualitätssicherung bedienen grundsätzlich alle für die o. g. Konzepte benötigten technischen Anlagenformen einschließlich deren Prozesse insbesondere zu Daten-

speicherung, Auswertung, Bewertung, Prognose und Visualisierung. Sie decken hierbei hybride Vorgehensweisen mit ab, die nachfolgende Darstellung soll hier jedoch vornehmlich auf fest installierte Varianten fokussieren.

2 Ausgangslage

Bisherige Aktivitäten

Im Rahmen des Forschungsclusters „Intelligente Brücke“ der Bundesanstalt für Straßenwesen wurden vielschichtige Untersuchungen zu verschiedenen Teilbereichen der Intelligenten Brücke, insbesondere zu einsetzbarer Sensorik, Messdatenverarbeitung, Schadens- und Strukturmodellen von Ingenieurbauwerken sowie Energieautarkie vorgenommen (vgl. zur Übersicht u. a. Bericht F1100.2111013 „Intelligente Brücke – Qualitätsmanagement und Koordination des Themenschwerpunkts“ [5] bzw. die Website zur Intelligenten Brücke www.intelligentebruecke.de). Mit Umsetzung von ersten prototypischen Anlagen auf der BAB 9/BAB 3 im Rahmen des Digitalen Testfeldes Autobahn (Bild 2) bei einem zweistreifigen Ersatzbauwerk im Autobahnkreuz Nürnberg sowie dem Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal duraBAST im Autobahnkreuz Köln Ost (BAB 3 und BAB 4) werden derzeit erste praktische Erfahrungen gesammelt.

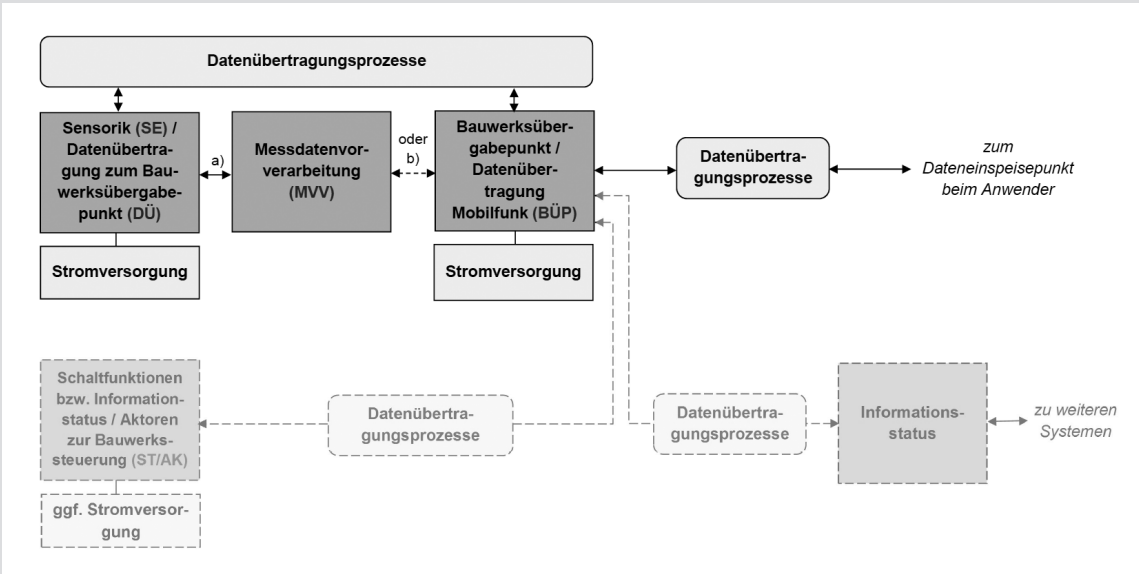


Bild 3: Blockschaltbild – mögliche Komponenten/ Funktionsgruppen am Bauwerk mit den zugehörigen Datenübertragungsprozessen

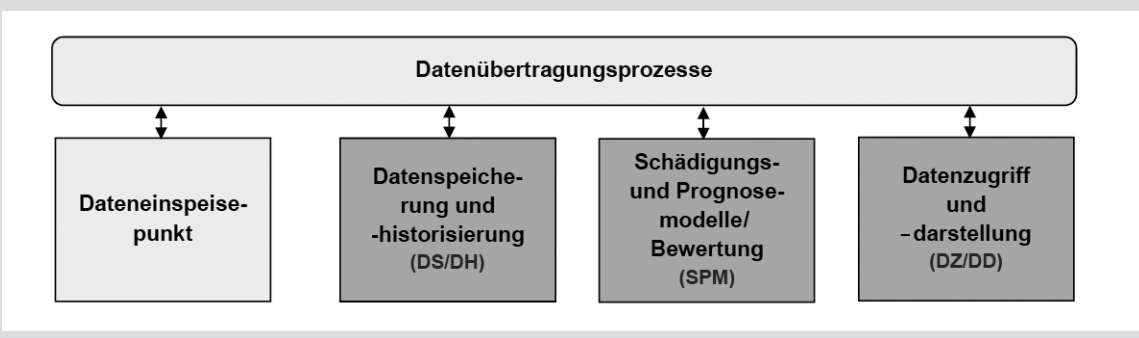


Bild 4: Blockschaltbild – mögliche Komponenten/ Funktionsgruppen beim Anwender/Zentrale mit den zugehörigen Datenübertragungsprozessen

nische Umsetzung sind daher auch im Hinblick hierauf in Teilen neu zu bewerten und fortzuentwickeln.

Funktionsspektrum der Anlagen

Werden z. B. fortlaufend Zustandsinformationen am Bauwerk erfasst und bereitgestellt, werden sich – auch vor dem Hintergrund steigender Vernetzung von Systemen (vgl. hier auch „Internet der Dinge“, „Industrie 4.0“) – erfahrungsgemäß rasch weitere Formen von Datennutzung etablieren.

Neben der zunächst ursprünglich angedachten Fernüberwachungs- sowie Analyse- und Prognosefunktion der Anlagen wären zudem (Verkehrs-)Statusinformationsfunktionen z. B. für den telematischen Bereich sowie Steuerungsfunktionen, z. B. automatisierte Auslösung von Aktionen, u. a. die zustandsgesteuerte Aktivierung von Kathodischem Korrosionsschutz als Schutzsystem (vgl. Projekt SMART-DECK, www.bast.de) bzw. Steuerung von Bauwerksparametern bzw. -funktionen mittels Aktoren, denkbar (vgl. beispielhaft Voruntersuchungen zu ersten Ansätzen in diese technologische Richtung FE 88.0107/2010 „Entwicklung einer adap-

tiven Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem“ [6]).

Ein Konzept zur Qualitätssicherung und zur Erreichung vorgegebener Betriebssicherheitsanforderungen sollte daher diese Betriebsfälle im Sinne eines Anforderungsbaukastens bereits fakultativ mit berücksichtigen.

Sicherheitsanforderungen und Echtzeitbetrieb

Gerade für letztgenannte Bereiche kann es ggf. zu einer deutlichen Erhöhung der betrieblichen Anforderungen an die Anlage, insbesondere der funktionalen Sicherheit kommen, da in diesem Fall Ausfälle und Betriebsstörungen das Steuergeschehen stark beeinflussen sowie ggf. zu Folgeschäden führen können (vgl. auch [7]). Auch werden für die letztgenannten Bereiche ggf. erhöhte Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit gestellt – diese wird üblicherweise definiert als Verzögerungen von erfassten Zuständen und zugehörigen Reaktionen der Anlage innerhalb weniger Millisekunden.

Zudem kann bei den zu realisierenden Anlagen als vernetztes System die IT-Sicherheit gefährdet sein z. B. durch Einrichtung einer

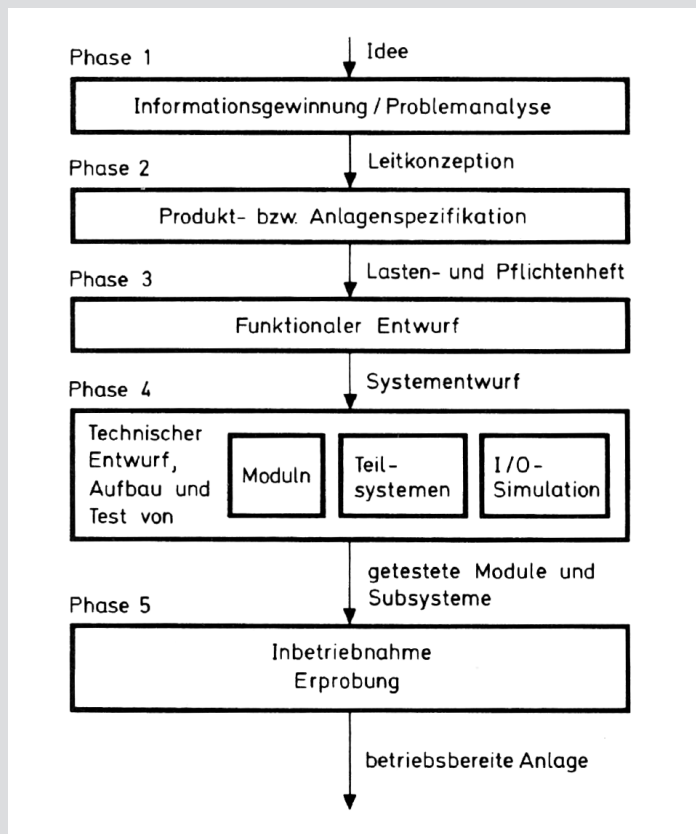
Fernwartungsmöglichkeit, so dass dies im Bedarfsfall ebenfalls zu berücksichtigen ist. Die Anlagen sind in der technischen Praxis daher im Regelfall nicht mehr als isolierte Funktionseinheiten zu betrachten.

3 Ziel und Nutzen

Grundlagen für Regelwerk

Übergeordnetes Ziel ist die Erarbeitung eines Regelwerks als Grundlage zur Umsetzung derartiger messtechnischer Anlagen. Regelwerke formulieren und definieren Regeln funktionaler und technischer Ausgestaltung und dienen der Festlegung von Mindestanforderungen in beiden Bereichen. Eine Entwicklung maßgeschneiderter objektbezogener Lösungen soll hierbei möglich sein. Als Werkzeug zur Ermittlung und Festlegung des bauwerksindividuell erforderlichen funktionalen und technischen Realisierungsniveaus sollen sie zudem dabei unterstützen, Leistungsbeschreibungen mit überprüfbareren Anforderungen zu erstellen sowie ausgeführte Anlagen auf ihre eingehaltene Spezifikation hin anhand zuvor erarbeiteter

Bild 5: Entwicklungsphasen einer Anlage (modifiziert nach [8])



Abnahmeverfahren und -kriterien zu überprüfen und abzunehmen.

Die Funktionsgruppen am Bauwerk (Bild 3) und beim Anwender/in der Zentrale (Bild 4) müssen darüber hinaus der jeweils aktuellen Vorschriftenlage entsprechen – sowohl zum Zeitpunkt der Errichtung – als auch während des Betriebs im Lebenszyklus der Anlage (ggf. durch Nachrüstung). Es kann hierbei im Bedarfsfall eine Angleichung des Lebenszyklus der zu erstellenden Anlage an die des Bauwerks erforderlich sein, was insbesondere Auswirkungen auf die Anforderungen an Dauerhaftigkeit sowie Wartungs-, Erhaltungs-, Aktualisierungs- und Erweiterungsfähigkeit hat.

Hierbei steht nun das Ziel der Bereitstellung von Mitteln zur Erzeugung standardisierter, ergebnissicherer Planung, Entwicklung und Umsetzung von Anlagen nach dem jeweiligen Stand der Technik als Regelprozess im Vordergrund. Die Ausgestaltung der Anlage soll hierbei zwar bauwerksindividuell, aber nach einheitlichen standardisierten funktionalen und technischen Gestaltungsgrundsätzen erfolgen.

Dies dient insbesondere dem Gesamtziel der technischen Beherrschbarkeit und Sicherstellung eines robusten Betriebs über den definierten Lebenszyklus der Anlage, insbe-

sondere auch bei den hierbei vorherrschenden Betriebseinflüssen („Einwirkungen“) bzw. Wechselwirkungen mit der Umgebung der Anlage („Widerstände“).

Einrichtung eines Qualitätssicherungskonzepts

Vor diesem Hintergrund ist ein Qualitätssicherungskonzept zu erarbeiten bzw. einzubeziehen, welches das Ziel einer regel- und anforderungsgerechten Auslegung der Anlage ermöglicht, insbesondere auch im Hinblick auf die Betriebssicherheit. Durch dieses auch als Standardisierung gedachte Instrument lassen sich festgelegte Spezifikationen einhalten und mögliche Planungs-, Entwurfs-, Entwicklungs-, Ausführungs- und Wartungsfehler sowie Schwächen hinsichtlich einer Aktualisierungsfähigkeit der Anlage gezielt vermeiden bzw. deutlich reduzieren. In der Folge lassen sich auch Aufwands-, Zeit- und Kostenpläne besser einhalten, was den Projektablauf stabilisiert.

Erzielter Nutzen für das Regelwerk

Die o. g., nachstehend zusammengefassten grundlegenden Anforderungen an Planung, Entwicklung, Ausführung, Wartung, Erhal-

tung, Aktualisierung, Erweiterung und Rückbau der Anlage,

- Standardisierung,
- Regelkonformität,
- Anforderungskonformität,
- Betriebssicherheit,
- Dauerhaftigkeit,
- Wartbarkeit/Aktualisierbarkeit/ Erweiterbarkeit sowie
- Wirtschaftlichkeit

sind auch gleichzeitig die wesentlichen Nutzenaspekte, die mit dem zu erstellenden Regelwerk verbunden sind.

4 Vorgehen

Nutzung vorhandener technischer Regeln und Verfahren

Die Funktionsgruppen in der Architektur werden als technische Anlage nahezu ausschließlich mit elektrischen, elektronischen, mechatronischen bzw. Mitteln der Informationstechnologie als Basistechnologien realisiert. Diese Bereiche sind erfahrungsgemäß bereits umfangreich von prozessbezogenen bzw. technischen Standardisierungen u. a. in Form von Qualitätssicherungs- bzw. Industriestandards sowie Fachgrund-, Produkt-, Prüf- oder Anforderungsnormen erfasst. Somit ist es schon aus Aufwandsgründen sowie zur Verschlankeung von Spezifikationsprozessen naheliegend, sich an bereits bestehenden, erprobten und bewährten Standardisierungen, Strategien/Verfahrenswesen und diesbezüglichen Vorgaben aus Bereichen mit vergleichbaren technischen Aufgabenstellungen im Sinne von Best Practice zu orientieren.

Bei der Analyse, Auswertung und Bewertung von bereits verfügbaren, sinnvoll verwendbaren Regeln für die bei den Anlagen technologisch abzudeckenden Fachgebiete sind somit nachstehende Bereiche mit einzubeziehen, u. a. verschiedene Arten von IT-gesteuerten Produkten, technischer Anlagenbau, industrielle Messtechnik, Prozesssteuerung bzw. Prozessleittechnik. Wesentlich ist hier eine aufgabenbezogene Übertragung bereits vorhandener und ausgearbeiteter Konzepte, Anforderungsvorgaben und Gestaltungsgrundsätze im Hinblick auf die zu realisierenden Anlagen.

Im Regelwerk zusammengestellte Anforderungen an die Anlage können hierbei situations- bzw. bauwerksbezogen im Sinne eines

(Anforderungs-)Baukastensystems einbezogen werden.

Entwurfs- und Entwicklungsverfahren
des Soft- und Hardware-Engineerings
als übergeordnetes Qualitätssicherungsinstrument

Die zu realisierende Anlage in ihrer Gesamtarchitektur kann mit ihren Funktionsgruppen am Bauwerk und in der Zentrale/beim Anwender, den vielzähligen zugehörigen physikalischen und logischen Schnittstellen sowie den vielfältigen Übertragungsprozessen eine umfangreiche technische Anlage mit z. T. hohem Komplexitätsgrad darstellen.

Dass erforderliche Eigenschaften und Merkmale in Form von Anforderungen – insbesondere auch Nutzungskriterien und Nutzungsdauer – bereits *vollständig* zu Beginn objektbezogener Planungen mitberücksichtigt und spezifiziert werden, ist insbesondere Aufgabe von *strukturierten Entwurfs- und Entwicklungsprozessen*, wie sie in o. g. technischen Bereichen gängige Praxis sind. Diese aus dem Bereich des (kombinierten) Soft- und Hardware-Engineerings stammenden Verfahren stellen ein wirksames und effizientes Werkzeug zur Erreichung zuvor spezifizierter Anforderungen technischer Anlagen dar (Bild 5). Auch können im Rahmen von Aktualisierungen Produkte/Baugruppen (z. B. Sensorik) nachentwickelt werden. Eine simultane Entwicklung von Prozeduren zur Überprüfung und Dokumentation der geforderten Spezifikationen ist ebenfalls integraler Bestandteil. Ebenso die Erzeugung einer autorisierten und damit belastbaren fortlaufenden Dokumentationslage als aktuelle „Aktenlage“ zur Entwicklung.

Durch Wahl und Vorgabe *vereinheitlichter Spezifikations- und Dokumentationsmittel* wird zudem das technische Niveau der Entwurfs- und Entwicklungsaktivitäten gesteuert. Der Entwurfs- und Entwicklungsprozess mit seinen Tätigkeiten und Ergebnissen bleibt für alle Projektbeteiligten dauerhaft transparent und somit auch für die Steuerung durch den Auftraggeber überprüf- und bewertbar.

Typische nutzbare Spezifikationsmittel (vgl. [8]) sind hierbei u. a. für

- Funktions- und Datenstrukturen
(d. h. dem „statischem Anlagenentwurf“)
→ Blockschaltbilder (Bilder 3, 4 und 6),
- die Darstellung von Folgen
→ Syntaxdiagramme,
- Zeit- und Kommunikationsabläufe
→ Strichdiagramme,
- Funktionsabläufe (d. h. die Erfassung der „Dynamik“ der Anlage):
→ Baumdiagramme und Struktogramme.

Als Zwischenergebnisse der einzelnen Entwurfsschritte zur „betriebsfertigen Anlage“ werden standardmäßig als entwurfsbegleitende (Produkt- bzw.) Anlagenentwicklungsdokumentation die überprüfbaren *verbindlichen Entwurfsprodukte* „Leitkonzeption“, „Lasten- und Pflichtenheft“, „Systementwurf“ und „getestete Module und Subsysteme“ erzeugt (Bild 5), welche durchgängig Transparenz erzeugen und technische Kommunikation erlauben sowie durch den Auftraggeber vor Einleitung der nächsten Entwicklungsphase z. T. freizugeben sind.



DeuSAT

10. Deutscher Straßenausstattertag

15.–16.03.2023 in Karlsruhe

Kongress mit Fachmesse

im Kongresszentrum
am Festplatz Karlsruhe

Unter der Schirmherrschaft des
Bundesministers für Digitales
und Verkehr



**Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr**

Aktuelle Kongressinformationen:
www.deusat.de
 per E-Mail: deusat@kirschbaum.de

Veranstalter



IVST
Industrieverband
Straßenausstattung e.V.

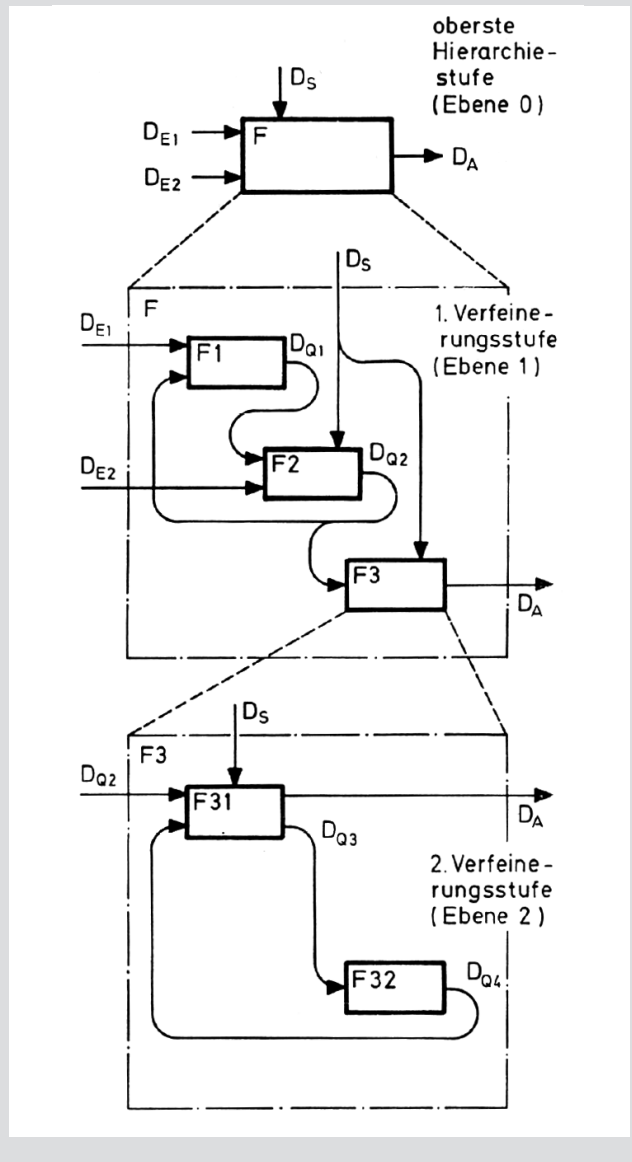





Seien Sie dabei!
Jetzt anmelden



Bild 6: Strukturanalyse mit grafischen Symbolen – SADT-Diagramm (Structured Analysis Design Technique) – Darstellung von Funktions- und Datenstrukturen – schrittweise Verfeinerung von Funktionsblöcken [8]



Auch ermöglichen und gewährleisten diese Mittel im Bedarfsfall einen einfachen *projektübergreifenden Austausch* von Informationen und Bearbeitungsständen mit verschiedenen Akteuren (z. B. das Teilen von Konzepten und Umsetzungen zur Etablierung von Anlagen zur messtechnischen Bauwerksdiagnostik). Zudem muss eine Interpretationsfähigkeit und Nachvollziehbarkeit der Dokumentation über den Lebenszyklus der Anlage gegeben sein.

Eine verfahrensbedingte Trennung von *funktionalem und technischem Entwurf* vereinfacht zudem eine technische Aktualisierung sowie funktionale Erweiterung zu späterem Zeitpunkt, da auf dem funktionalen Entwurf aufgesetzt werden kann (dieser ist von „zeitloserer Qualität“). Somit sind die Entwürfe vorrangig funktions/spezifikations- und nicht technologiegetrieben.

Üblicherweise noch angewendete aus-

schließlich technologie- und realisierungsorientierte Entwurfsansätze, oftmals auch bei Bauwerksmonitoring-Anlagen – welche den Zwischenschritt des funktionalen Entwurfs nicht vollziehen – sind aufgrund ihrer Unflexibilität, oftmals nicht ausreichender Übersichtlichkeit sowie des raschen Veralterns von Konzepten auf der technischen Ebene für Anlagen mit ggf. gefordertem langem Lebenszyklus grundsätzlich nachteilig bzw. nicht sinnvoll anwendbar.

Standardisierung unterstützt Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit

Der Aspekt der *Standardisierung* eines skalierbaren Anlagendesigns für deren Einsatz an individuellen Bauwerken unterstützt das Ziel der Erzeugung von Betriebssicherheit, Wartungs-, Erhaltungs- und Aktualisierungs- und Erweiterungsfähigkeit, da durch Anwendung von Standardelementen (z. B.

von Modulen), -architekturen und -prozessen Risiken wie bauwerksindividuelle Planungs-, Entwicklungs- und Ausführungsfehler reduziert werden können.

Vereinheitlichte Gestaltungsansätze sollen darüber hinaus sicherstellen, dass der Grad der Komplexität der Anlagen so gering wie möglich bleibt, gleichzeitig aber eine Skalierbarkeit hinsichtlich des Anlagenumfanges gegeben ist.

Die Vereinheitlichung von Architekturen, Bezeichnungen von Betriebsmitteln, Verkabelungen usw. unterstützt auch die Entstehung von Märkten (z. B. für Softwarelösungen) und hilft perspektivisch auch wirtschaftlich bei der Vereinheitlichung von z. B. Wartungs-, Erhaltungs- und Entstörungsleistungen.

In den Regelwerksbereichen der Verkehrstechnik und des Tunnelbaus (Verkehrserfassungs- und Verkehrsbeeinflussungsanlagen bzw. Leit-, Automatisierungstechnik und Überwachung in Straßentunneln) wurde ebenfalls der Ansatz umfangreicherer Standardisierung gewählt (vgl. [9], [10], [11], [12]).

Zusammenführung technischer und prozessbezogener Ressourcen zu einem Vorgehensmodell

Die ermittelten Ressourcen bzw. Instrumente *technische Regeln und Entwurfs- und Entwicklungsverfahren* (das „WAS“: welche Inhalte und Verfahren sind zu berücksichtigen) werden mit einem Ansatz zur *systematischen Einbeziehung in den Entwurfsprozess* (das „WIE“: wie sind diese zu berücksichtigen) zu einem Vorgehensmodell zusammenggeführt (Bild 7).

Das Modell dient hierbei als Werkzeug, im Regelwerk das technisch erforderliche Realisierungsniveau feststellen, festlegen und vertraglich formulieren zu können. Für das Modell werden die vorgeschlagenen *Blockschaltbilder* der Komponenten bzw. Funktionsgruppen am Bauwerk (Bild 3) und beim Anwender/Zentrale (Bild 4) mit den zugehörigen Datenübertragungsprozessen mit den potenziellen Funktionen zugrunde gelegt.

Bei komplexen Anlagenformen können entwurfsbedingt umfangreiche Aspekte der Betriebssicherheit und Qualitätssicherung nicht ‚pauschal‘ in einem singulären Entwicklungsschritt berücksichtigt bzw. umgesetzt werden. Vielmehr sind diese Aspekte umfanglich zu Beginn in jedem individuel-

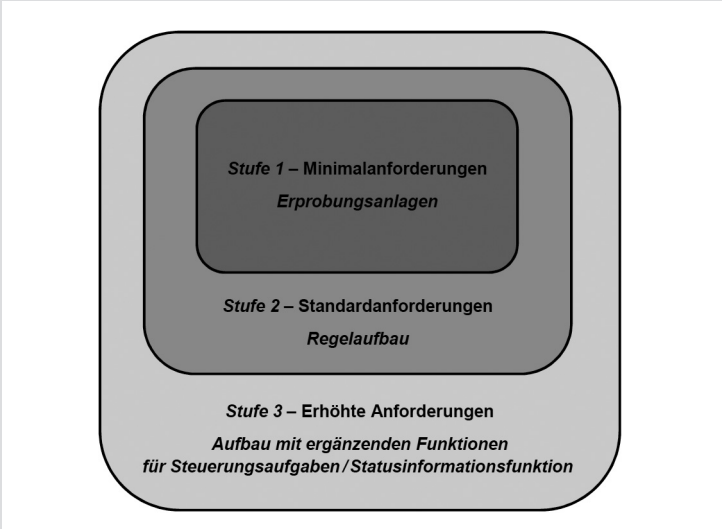
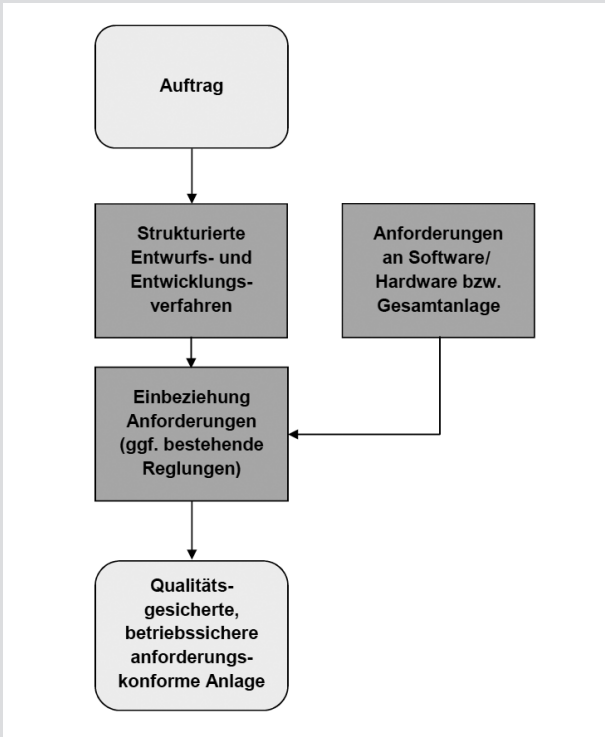


Bild 8: Schalenansatz mit Anforderungsstufen

Bild 7: Vorgehensmodell zur Einrichtung begleitender Qualitätssicherung und Sicherstellung von Betriebssicherheitsanforderungen

len Entwicklungsschritt von Funktionsgruppen bzw. der Anlage bis auf die untersten Funktionsebenen einzubeziehen. Diese Form der Berücksichtigung erzeugt in Summe in der Umsetzung des „Entwurfsprodukts“ Anlage dann ‚integrativ‘ die geforderten Eigenschaften („Secure by Design“). Hiermit kommt dem Entwurfs- und Entwicklungsverfahren eine Schlüsselrolle zu.

Berücksichtigung abgestufter Anforderungen

In diesem Modell sind erforderliche Anforderungen in abgestufter Weise fakultativ einbeziehbar. Mithilfe eines Schalenansatzes (vgl. Bild 8) wurde als *einordnendes Hilfsmittel* eine beispielhafte Zuordnung von Anforderungskategorien, welche inhaltsähnliche Anforderungen zusammenfassen, zu den drei nachstehenden Schalen bzw. Anforderungsstufen (in kursiver Schrift) vorgenommen. Die nachfolgende Stufe bezieht (fakultative) Anforderungen der vorhergehenden Stufen mit ein.

Es wird vorgeschlagen, dass sich ein zu erstellendes Regelwerk im ersten Schritt an der Anforderungsstufe 2 (Standardanforderungen – Regelaufbau) orientiert.

Schale/Stufe 1 – Minimalanforderungen (Erprobungsanlagen als Reallabore):

Einfache Anlagen für den zeitbegrenzten Einsatz, grundsätzliche verordnungsbezogene/gesetzliche technische Auflagen werden

erfüllt, nicht auf einfache Weise aktualisierungs- und erweiterungsfähig, vom funktionalen und technischen Niveau vergleichbar mit Dauerüberwachungskonzepten/Monitoring;

berücksichtigt u. a. (Tabelle 1):

allgemeine technische Standards zum Errichten elektrotechnischer Anlagen, Umgebungs- und Umwelteinflüsse, Funkanlagen und -module, Datenübertragung, Elektromagnetische Verträglichkeit der Komponenten und der Gesamtanlage, Verwendung gefährlicher Stoffe.

Schale/Stufe 2 – Standardanforderungen (Regelaufbau):

Hoher Standardisierungsgrad, erhöhte funktionale Sicherheit und Dauerhaftigkeit der Anlage, im Entwurf bereits erhaltungs- und aktualisierungsfähig gestaltet, vorgeschla-

genes Anforderungsniveau für ein bundeseinheitliches Konzept hinsichtlich der Umsetzung messtechnischer Bauwerksdiagnostik;

berücksichtigt zudem u. a. (Tabelle 1):

Softwareentwicklung, Softwaretesting, Hardwareentwicklung und -integration, Eigenschaften der Stromversorgung, Grundsätze zum Aufbau zuverlässiger Hardware, Erhaltungsgrundsätze – Verfügbarkeit und Austausch defekter/veralteter Komponenten, Elektromagnetische Umweltverträglichkeit, Grundsätze der Anlagendokumentation.

Schale/Stufe 3 – Erhöhte Anforderungen (Aufbau mit ergänzenden Funktionen für Steuerungsaufgaben/Statusinformationsfunktion):

Hohe Anforderungen an die funktionale Sicherheit und Dauerhaftigkeit der Anlage,

TEPE SYSTEMHALLEN

Pultdachhalle Typ PD3 (Breite: 20,00m, Tiefe: 8,00m + 2,00m Überstand)

- Höhe 4,00m, Dachneigung ca. 3°
- mit Trapezblech, Farbe: AluZink
- incl. imprägnierter Holzpfetten
- feuerverzinkte Stahlkonstruktion
- incl. prüffähiger Baustatik

Mehr Infos

Aktionspreis

€ 27.580,-

ab Werk Buldern, excl. MwSt.

ausgelegt für Schneelastzone 2, Windzone 2; Schneelast 85kg/qm

www.tepe-systemhallen.de · Tel. 0 25 90 - 93 96 40

Ergebnisse der Analyse bestehender Regelungen für die abzudeckenden technischen Bereiche	
Mögliche Anforderungskategorien	Recherchierte Regeln, Verfahren bzw. Anforderungen fakultativ, z. B. u. a. nach bzw. in Anlehnung an
Grundlegende Anforderungen an die Software	
Softwareentwicklung	ISO/IEC 25000 (vgl. z. B. auch [14])
Softwaretesting	ISO/IEC/IEEE 29119 (vgl. auch [15])
Grundlegende Anforderungen an die Hardware	
Hardwareentwicklung und -integration	in Anlehnung an VDE/VDI 2180, DIN EN 61499 (vgl. auch [16])
Allgemeine technische Standards zum Errichten elektrotechnischer Anlagen	DIN-VDE-Normen Reihe 0100 sowie u. a. 0105-100, 0185, 0805, 0832
Umgebungs- und Umwelteinflüsse	DIN EN 60721/IEC 721, DIN V 40046-721, IEC 60068,
Eigenschaften der Stromversorgung	EN 50155, in Anlehnung an LV 124 (vgl. auch [17], [18])
Elektromagnetische Verträglichkeit der Komponenten	EMV-Rili. 2014/30/EU, u. a. EN 61000-4
Grundsätze zum Aufbau zuverlässiger Hardware	nach Stand der Technik (vgl. auch [8], [13])
Anforderungen an die Gesamtanlage	
Funktionale Sicherheit	DIN EN IEC 61508, analog DIN EN 50556/ VDE 0832-100 (vgl. auch [19])
Elektromagnetische Verträglichkeit der Gesamtanlage	EMV-Leitfaden zu Rili. 2004/108/EG [20]
Elektromagnetische Umweltverträglichkeit	26. BImSchV (14.8.2013), Empf. d. Rates 1999/5/EG
Funkanlagen und -module	Rili. 2014/53/EU, FuAG (27.06.2017)
Datenübertragung	z. B. DIN EN 60870
IT-Sicherheit	BSI-KRITIS-V-Verordnung [21], BSI-GSK [22], ISO/IEC 27000, ISO/IEC 15408, DIN EN IEC 62443
Erhaltung – Verfügbarkeit und Austausch defekter/veralteter Komponenten	Gleichwertigkeit (bzw. Aufwärtskompatibilität) nach erstellter Spezifikation bzw. Austauschregeln (vgl. [13])
Verwendung gefährlicher Stoffe	Rili. 2011/65/EU (RoHS 2)
Grundsätze der Anlagen-dokumentation	z. B. in Anlehnung an DIN EN 81346
Bestehende Konzepte und Regelungen zu Gesamtanlagen (in der Straßenverkehrsinfrastruktur), u. a.	
DBV-Merkblatt Brückenmonitoring [23]	
Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen TLS 2012 [9]	
Leit-, Automatisierungstechnik und Überwachung in Straßentunneln (RABT [10], EABT-80/100 [11], ZTV-ING 5-4 [24])	
Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 2018) [12]	
Echtzeit-Sicherheitsmanagement-System (ESIMAS) in Tunnelleitzentralen [25]	
Leitfaden zum Projekt Cyber-Safe [26]	

Tabelle 1: Recherchierte Regeln, Verfahren bzw. Anforderungen zu verschiedenen Anforderungskategorien von Anlagen

aktualisierungsfähig bezogen auf funktionale Sicherheit/IT-Sicherheit, Nutzung zur Generierung von Steuerfunktionen und (Verkehrs-)Statusinformationsfunktionen für weitere Systeme;

berücksichtigt ergänzend u. a. (vgl. Tabelle 1):

Funktionale Sicherheit, IT-Sicherheit.

Ergebnisse der Analyse bestehender Regelungen für die abzudeckenden technischen Bereiche

Im Rahmen von [13] wurden relevante Regelungen sowie gesetzliche technische Vorgaben und Auflagen identifiziert und weitergehend für eine mögliche Berücksichtigung bzw. Nutzung eingeordnet. Tabelle 1 fasst hierbei im Überblick bereits vorhandene ggf. einbeziehbar technische Regeln und Dokumente beispielhaft zusammen.

Die verschiedenen *Anforderungskategorien* (siehe Spalte 1) unterteilen sich in grundlegende Anforderungen an die Software, *grundlegende Anforderungen an die Hardware* sowie *Anforderungen an die Gesamtanlage*. Auf ihre Regeln, Verfahren bzw. Anforderungen kann fakultativ im Rahmen der Spezifikation der Anlage Bezug genommen werden bzw. eine Inbezugnahme ist ggf. sogar obligatorisch. Zudem wurden Regelungen zu bestehenden Konzepten von Gesamtanlagen gesichtet.

Am Markt befindliche Produkte/Betriebsmittel besitzen oftmals bereits eine Konformitäts- bzw. Leistungserklärung und haben auf diese Weise bereits entsprechende Anforderungen nachgewiesen. Für die Betriebsmittel/Funktionsgruppen am Bauwerk ist zudem im Regelfall ein Schutz gegen Vandalismus zu berücksichtigen.

Projektablaufschema

Für die Projektentwicklung fasst Tabelle 2 wesentliche vom Auftraggeber (Bauherr) sowie Auftragnehmer (ausführendes Unternehmen) durchzuführende administrative und fachtechnische Projektschritte und Aufgaben zusammen.

Hierbei sind über die einzelnen *Phasen der Anlagenentwicklung* hinaus die *Phasen des gesamten Lebenszyklus* der Anlage einbezogen. Neben der Erstellung der betriebsfertigen Anlage sind daher auch Betrieb/Wartung, Erhaltung/Aktualisierung/Erweiterung sowie Rückbau und Recycling berücksichtigt.

Planung, Entwurf und Ausführung durch

einen federführenden Bearbeiter aus einer Hand bündelt die zentrale (Entwicklungs-) Verantwortung, insbesondere vor dem Hintergrund der Schuldung der generellen konzeptionellen Realisierbarkeit sowie dem Ziel der Übergabe einer betriebsbereiten Anlage unter Erfüllung aller zuvor vereinbarten Spezifikationsvorgaben. Unnötige Reibungsverluste an Schnittstellen von weiteren Beteiligten sollen somit minimiert werden. Zudem wird hiermit unterstützt, dass vorab funktionale und technologisch einengende Vorabfestlegungen in der Planungsphase durch weitere eingebundene Planungsbeteiligte unterbleiben.

Möglicherweise wird der entwickelnde Auftragnehmer später planmäßig auch selbst Wartung, Erhaltung, Aktualisierung und Erweiterung der Anlage durchführen.

Hinsichtlich der Qualität des Gesamtergebnisses der Ausführung sowie der Effektivität von Projektgruppen/Projektteams bzw. Konsortien erscheint hier die Berücksichtigung moderner Projektentwicklungsmodelle bzw. ferner von Prämiensystemen lohnend (vgl. [27], [28]).

Erarbeitung von Regelwerksdokumenten

Die Überlegungen hinsichtlich einer Standardisierung von Mindestanforderungen sowie eines skalierbaren Anlagendesigns wird maßgeblich unterstützt durch eine perspektivische Erarbeitung von Regelwerksdokumenten als Bausteine, die einen Zwischenschritt zur nachfolgenden Erarbeitung vertraglicher Grundlagen darstellen können. Tabelle 3 zeigt hierzu einen ersten Vorschlag. Diese Dokumente sind im Sinne der Regelwerkssystematik dem Stand der Technik sowie den gewonnenen Erfahrungen entsprechend regelmäßig fortzuschreiben.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden im Rahmen einer Studie [13] ermittelte Ergebnisse dargestellt, in welcher Instrumente für eine projektbegleitende Qualitätssicherung sowie weiterhin erste Ansätze zu einer standardisierten fachtechnischen Umsetzung messtechnischer Bauwerksdiagnostik unter aktuellen bzw. möglicherweise perspektivischen funktionalen und technischen Rahmenbedingungen vorgeschlagen werden. Es wurden hierzu aktuell relevante Vorschriften und technische Auflagen sowie unterstützende prozessbezogene und technische Re-

Projektschritt		Phasen Entwurfs-/Entwicklungsverfahren		
↓	AG	Aufgabenstellung	Informationsgewinnung/ Problemanalyse (Phase 1)	
		Vorplanung (Vorspezifikation)		
		Ausschreibungsplanung	Anlagenspezifikation (Phase 2)	
		Ausschreibung (VOF/VOL)		
	AN (AG)	Angebot	Informationsgewinnung/ Problemanalyse (Phase 1) Anlagenspezifikation (Phase 2)	
		Planung/Entwicklung	Anlagenspezifikation (Phase 2) Funktionaler Entwurf (Phase 3)	
		Umsetzung/Ausführung	Technischer Entwurf/Aufbau und Test der Funktionseinheiten (Phase 4) Inbetriebnahme/Erprobung (Phase 5)	
	AG (AN)	Abnahme	Inbetriebnahme/Erprobung (Phase 5)	
	Weitere Lebenszyklusphasen		Phasen Entwurfs-/Entwicklungsverfahren	
	AG (AN)	Betrieb/Wartung		
AG (AN)	Erhaltung/ Aktualisierung/ Erweiterung/	Informationsgewinnung/ Problemanalyse (Phase 1) bis Inbetriebnahme/Erprobung (Phase 5)		
	Rückbau/Recycling			

Tabelle 2: Projektablaufschema mit Einbettung der Phasen des Anlagen-Entwurfs-/Entwicklungsverfahrens in den Gesamtablauf der Projektentwicklung

ferenzen identifiziert und weitergehend analysiert.

Hierbei konnten verschiedene erprobte und bewährte Strategien, Verfahren und Lösungsansätze aus Bereichen mit vergleichbaren technischen Aufgabenstellungen als potenziell nutzbare Ressourcen aufgezeigt werden. Hiermit liegt nun in Summe eine einführende Behandlung in sowie Zusammenstellung von wesentlichen zu berücksichtigenden Themenbereichen für die Erarbeitung eines Regelwerkes als vertragliche Grundlage vor.

Weiteres Vorgehen

In einem nächsten Schritt sind nun aufbauend auf diesen Ergebnissen weitere Konkretisierungen vorzunehmen und in einem Regelwerksentwurf zur messtechnischen Bauwerksdiagnostik zusammenzuführen. Hierbei sind Regelwerksteile für die Planung, Entwicklung, Ausführung und Wartung, ferner perspektivisch auch für die Erhaltung, Aktualisierung, Erweiterung und den Rückbau der Anlage zu berücksichtigen.

Aufgrund des Aufwands, des erforderlichen

Regelungsumfangs sowie der großen Bandbreite der abzudeckenden technischen Bereiche ist vorgesehen, eine Zusammenführung der Ergebnisse zwecks Erstellung eines Regelwerkkonzepts sowie -entwurfs im Rahmen von Forschung erbringen zu lassen.

Literaturverzeichnis

- [1] Brückenstatistik der Bundesfernstraßen, Bundesanstalt für Straßenwesen, Stand 1.3.2022, www.bast.de
- [2] Der Elsner – Handbuch für Straßen und Verkehrswesen 2021, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg, 2020
- [3] Bednorz, J.; Nieborowski, S.; Windmann, S.; Hindersmann, I.: BIM – auf dem Weg zum Digitalen Zwilling, Straße und Autobahn, 11.2021, Kirschbaum Verlag, Bonn
- [4] www.intelligentebruecke.de
- [5] Neumann, T.; Kempkens, E.; Hardt, P.: Intelligente Brücke – Qualitätsmanagement und Koordination des Themenschwerpunkts“, AP-Projekt, F1100.2111013, BASt 2015
- [6] Schnellbach-Held, M.: „Entwicklung einer adaptiven Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem“, FE 88.0107/2010, Essen-2012
- [7] Kempkens, E.; Sawo, F.: „Ingenieur-

Dokument	Inhalt/Anmerkungen
Allgemeine Planungsgrundlagen zu Planung und Entwurf ¹	<ul style="list-style-type: none"> – grundsätzliche funktionale Varianten/ generelle Aspekte – Musterentwurfprozess – vorrangig zu verwendende Spezifikationsmittel – Gliederungssystematik
Standardisierte skalierbare Systemarchitektur der Informationstechnik (inkl. aller Funktionsgruppen/ Prozesse am Bauwerk bzw. beim Anwender/Zentrale, u. a. nach Bild 3 und 4) ¹	<ul style="list-style-type: none"> – Rechner auf verschiedenen Hierarchieebenen – Kommunikationssystem – funktionale Sicherheit – z. B. analog TLS 2012/MARZ 2018/wRABT
Schnittstellendokument ²	<ul style="list-style-type: none"> – Umsetzung bautechnischer Anforderungen in anlagentechnische Anforderungen – Vorspezifikation des Entwurfsprozesses – jeweils intern bzw. extern zu prüfen und freizugeben
Richtlinie Anlagendokumentation ²	einheitliche Bezeichnungssystematik von Betriebsmitteln, Baugruppen, Geräten usw.
Installation der Funktionsgruppen bzw. Betriebsmittel am Bauwerk ³	<p>Standardvorgaben Einbaulage</p> <ul style="list-style-type: none"> – Sensorik zur Erfassung verschiedener Parameter – Netzknoten – Bauwerksübergabepunkt – vandalismugeschützte Kabelführung – analog Richtzeichnungen zur ZTV-ING
Eignungsprüfung zwecks Integration in den Entwicklungsprozess ³	<p>standardisierte Vorgaben zu bereits entwickelten /am Markt vorhandenen Betriebsmitteln als Mindestanforderung, u. a.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Sensorik – Übertragungstechnik – Aktorik
Checkliste Abnahmekriterien ⁴	Hilfestellung zur Vervollständigung des anlagenspezifischen Abnahmedokuments (analog M-BÜ-ING)

- 1) im Sinne RE-ING (Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten)
- 2) im Sinne von Merkblatt
- 3) im Sinne ZTV-ING (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten) /RiZ-ING (Richtzeichnungen für Ingenieurbauten)
- 4) im Sinne M-BÜ-ING (Merkblatt für die Bauüberwachung von Ingenieurbauten)

Tabelle 3: Vorschlag für perspektivisch zu erstellende Regelwerksdokumente

- bauwerke – Konzepte zur Leistungsfähigen Sensordatenüberwachung“, Straße und Autobahn, 04.2016, Kirschbaum Verlag, Bonn
- [8] Piller, U.; Nüchel, W.: Entwurf MC-gesteuerter Produkte und Anlagen. VDE-Verlag GmbH, Berlin und Offenbach 1988
 - [9] Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, Ausgabe 2012 (TLS 2012), BMVI, Berlin
 - [10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Ausstattung von und den Betrieb von Straßentunneln, RABT, FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2016
 - [11] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h, EABT-80/100, FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2019
 - [12] Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Untereentralen (MARZ 2018), BAST 2018, www.bast.de
 - [13] Kempkens, E.: „Qualitätssicherungskon-

zept Intelligente Brücke – Betriebssicherheit des ganzheitlichen lebenszyklusbasierten Bauwerksmonitorings“, AP Projekt, F1100. 2115003, BAST 2021, www.intelligentebruecke.de; www.bast.de

- [14] Franz, K.: Handbuch zum Testen von Web- und Mobile-Apps – Testverfahren, Werkzeuge, Praxistipps. Springer 2015
- [15] Wendland, M.-F.: Teststandardfamilie – Einblick in den ISO 29119 „Software Testing Standard“. Online-Themenspecial Testing 2014, www.objektspektrum.de
- [16] „HIL – Hardware-in-the-Loop im Maschinen- und Anlagenbau“, Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern, 2016
- [17] „LV 124 in der Praxis – Test Strategien“, Ravensburg, Oktober 2014, www.wks-informatik.de
- [18] Hofmann, L.; Huisinga, H.; Mohrmann, M.: „Intelligente Bauwerke - Konzepte und Verfügbarmachung intelligenter Energieversorgung am Bauwerk - die energieautarke Brücke“, Schlussbericht Projekt FE 29.0326/2013/BAST, Mai 2014, www.bast.de
- [19] Einführung und Begriffe zur funktionalen Sicherheit von Maschinen und Anlagen – Nachschlagewerk 2013. Siemens AG Fürth
- [20] Leitfaden zur Anwendung der Richtlinie 2004/108/EG des Rates vom 15.12.2004 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV-Leitfaden), Stand 21.5.2007, Deutsche Übersetzung, Bundesnetzagentur
- [21] Verordnung zur Bestimmung kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritischerverordnung – BSI-KRITIS V), 22.4.2016
- [22] IT-Grundschutz-Kataloge. 15. Ergänzungslieferung, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Bonn, Stand 2016
- [23] DBV-Merkblatt „Brückenmonitoring – Planung, Ausschreibung, Umsetzung“, Deutscher Beton- und Bautechnik Verein, Berlin, August 2018
- [24] ZTV-ING 5-4 „Tunnelbau – Betriebstechnische Ausstattung“, FGSV, Köln, Ausgabe 2007
- [25] Broschüre „Echtzeit-Sicherheitsmanagement-System (ESI-MAS) in Tunnelleitzentralen - Einsatzmöglichkeiten, Systembestandteile und Integration“. BAST 2015, www.bast.de
- [26] Schutz von Tunnelzentralen vor Cyber-Angriffen – Leitfaden zur Beurteilung und Verbesserung der IT-Sicherheit. Cyber-Save Verbundpartner, BAST, Bergisch Gladbach 2018, Cyber-Safe@bast.de
- [27] Jünger, H. C.; Scharpf, S.: „Effektivität in Projektteams integrierter Projektentwicklungsmodelle mit Mehrparteienverträgen gegenüber konventionellen und partnerschaftlichen Modellen“. Bauingenieur 09.2020, VDI Fachmedien, Düsseldorf
- [28] Simon, N.; Racky, P.: „Entwicklung eines Prämiensystems zu Berücksichtigung der Bauprozessqualität in Bauverträgen“. Bauingenieur 11.2021, VDI Fachmedien, Düsseldorf