
Ingenieurbauwerke

Messtechnische Bauwerksdiagnostik – Intelligente Brücke – Digitaler Zwilling

Beitrag zu Entwurfsphasen von Entwurfs- und Entwicklungsprozessen für technische Anlagen, Produkte und Systeme

Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Ingenieurbauwerke

Messtechnische Bauwerksdiagnostik – Intelligente Brücke – Digitaler Zwilling

Beitrag zu Entwurfsphasen von Ent- wurfs- und Entwicklungsprozessen für technische Anlagen, Produkte und Systeme

von
E. Kempkens

Fachveröffentlichung
Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen

Impressum

Referat:

Betonbau

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen

Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach

Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Gestaltungskonzept:

MedienMélange:Kommunikation

Bergisch Gladbach, April 2023

Entwurfsphasen bei Entwurfs- und Entwicklungsprozessen für technische Anlagen, Produkte und Systeme¹

Einordnung

→ nutzbar sowohl für individuell zu entwerfende als auch nach vereinheitlichten Gestaltungsmerkmalen generalisiert zu entwerfende technische Anlagen bzw. Systeme

Spezifikation = fortlaufende (verfeinerte) Festlegung von Eigenschaften während des Entwurfs- bzw. Entwicklungsprozesses

Benötigt werden hierfür insbesondere: (grafische) Spezifikationsmittel mit Verfeinerungstechnik als aufeinander abgestimmtes Methodenbündel für diesen.

Phase 1: Informationsgewinnung / Problemanalyse

- **systematische Sammlung von Informationen zur gestellten Aufgabe / kritische Analyse aller Problemaspekte für Angabe der Technischen Leitkonzeption für weiteren Entwurfsprozess**
- Hauptziel: Umsetzung Anlagenidee in Technische Leitkonzeption
- technische Hauptfunktionen festlegen
- **präzisierte Funktionsbeschreibung, einen / mehrere Lösungsvorschläge mit Empfehlungen für Bedienung, Test, Entstörung, Verwendung von entwickelten / zugekauften Komponenten / Modulen**
- Berücksichtigung von: personeller Entwicklungskapazität, materiellen Hilfsmitteln, Erfahrung mit ähnlichen Anlagen, physikalische Grenzwerte / Umweltbedingungen, Vorschriften / Richtlinien, Schutzrechte, Marktangebot

¹ Ursprünglich aus dem (kombinierten) Soft- und Hardware-Engineering stammend, hier inhaltliche Kurzzusammenstellung (modifiziert) vornehmlich unter Auswertung von [1], vgl. hierzu ggf. auch [3].

- sachlich begründete Entscheidungsprozesse unter Einbezug von Fachzeitschriften, Forschungsberichten, Patentschriften, Fachmessen, Seminaren, Veröffentlichungen aus benachbarten Gebieten
- effiziente Bewertung von Lösungsalternativen durch Erfassung, Ordnung, Reduzierung sowie Auswertung- und Aufbereitung anlagenrelevanter Informationen
- Lebenszyklus der Anlage beginnt mit Anlagenidee
- Anlagenidee: aus kreativen Ideenreize spontan / systematisch durch gezieltes Fragen
- Anlass: Neukonzeption, Weiterentwicklung, Erschließung neuer Anwendungsbereiche, Systemmigration
- je weniger Erfahrungen vorliegen, desto weniger konkret ist die Formulierung der Anlagenidee, Frage nach technischer Realisierbarkeit
- Kreativitätstechniken helfen: Gedanken ordnen / bewerten, Tendenzen frühzeitig berücksichtigen, Parallelentwicklung vermeiden, umfassendes ‚Know-how‘ in Entwurf einfließen lassen
- enge Kooperation zwischen AG und AN
- Schöpfer der Anlagenidee kann auch der Entwickler der Anlage sein

Teilphase 1-1: Klären der Aufgabenstellung

- Konkretisierung der Anlagenidee, Beschreibung der Aufgabenstellung in ihrer Hauptfunktion, Festlegen der Hauptentwicklungsziele
- Abgrenzung der Anlage zum äußeren Umfeld / Schnittstellen zur Anlagenumgebung

Teilphase 1-2: Erfassen des IST-Zustandes

→ Fragestellung: **Was gibt es bereits** mit welchem Leistungsumfang?

- Beschreibung der IST-Funktionen
- Analyse des IST-Zustands (Zustandsanalyse): Informationen zu Bekanntem / auf dem Markt Befindlichem, in Betrieb Vorhandenem / Machbarem, technisch und wirtschaftlich Möglichem
- Anlegen einer Informationssammlung
- Trennen von Haupt- und Nebenfunktionen
- Verbesserung bestehender Anlagen durch Überprüfung dieser nach ihrer funktionalen Zerlegung, Erkennen von Schwachstellen, Anregungen für Verbesserungen

Teilphase 1-3: Aufstellen eines Leistungsprofils

→ *erfolgt für Idealanlage*

- Suche nach dem technisch Machbaren
- Einbeziehung von Forschungsergebnissen, Berücksichtigung modernster Konzepte / Technologien
- Setzen optimaler Ziele / Beschreibung einer technischen Idealanlage
- Leistungsprofil umfasst alle Funktionen sowie alle auf die Funktionen bezogenen qualitativen und quantitativen Anforderungen
- optimale Anlagen-Gestaltung durch Loslösung von vorfixierten Lösungen (!)
- Leistungsprofil mit Maximalforderungen, aber nicht unrealistisch

Teilphase 1-4: Festlegen des SOLL-Konzepts (Konzept-Entwurf)

→ *erfolgt für zu realisierendes Anlagenkonzept*

- Reduzierung (des Leistungsprofils) der Idealanlage auf realisierbares SOLL-Konzept
- Festlegung realisierbarer Anlagenfunktionen
- Festlegungen zur Anlage noch in recht grobem Rahmen mit genügend Freiraum für Entwickler
- Fixierung SOLL-Konzept in einer Anforderungsliste
- Aufteilung der Funktionen nach: Festanforderungen / Mindestanforderungen / optional gewünschte Anforderungen

Teilphase 1-5: Analyse des SOLL-Konzepts (Konzept-Analyse)

→ *Durchführbarkeits- und Nutzenbetrachtung für zu realisierendes Anlagenkonzept*

- Durchführbarkeitsstudie, ob SOLL-Konzept technisch und wirtschaftlich durchführbar ist
- funktionale Anlagenzerlegung
- Vorversuche
- Überschlagsrechnungen
- Untersuchung von Problemschwerpunkten,
- Nutzwertanalyse
- steht in enger Wechselwirkung zur Festlegung des SOLL-Konzepts

Teilphase 1-6: Festlegen der technischen Leitkonzeption

→ **Festlegung auf ein umzusetzendes **Lösungskonzept****

- als Grundlage für die Anlagenspezifikation
- Erarbeitung grundsätzlicher Lösungsansätze
- Empfehlungen zu Bedienung / Tests / Entstörung / Verwendung von Baugruppen / Modulen
- Treffen von Vorauswahlen (aus einer Vielzahl an denkbaren Lösungskonzepten bzw. ggf. aus mehreren konkurrierenden Vorschlägen / Varianten)
- Freigabe eines Vorschlags für die weitere Entwicklung
- technische Leitkonzeption ist das Ergebnis einer Auswahlentscheidung (!)

Phase 2: Anlagenspezifikation

- **Ziel / Endergebnis: Erstellung eines Lasten- und Pflichtenhefts**
- **Festlegung der Eigenschaften der Anlage**
- **Abgrenzung der Anlage zur Umgebung durch Definition aller physikalischen / logischen Schnittstellen**
- Beschreibung Statik („statische Funktionsblöcke“) der Anlage → Blockschaltbild (z. B. mit SADT-Methode)
- Benennung aller auszutauschender Objekte mit Anlagenumgebung
- Zeit- und Ablaufverhalten ist so weit wie möglich zu spezifizieren (u. a. von Signal-/Prozess- und Bedienungsschnittstellen)
- Abnahme durch den AN (Eindeutigkeit und Vollständigkeit)

Phase 3: Funktionaler Entwurf

- **Ziel / Endergebnis: Erstellung eines Systementwurfs**
- **Zerlegung des Inneren der Anlage in überschaubare, handhabbare Module nach rein funktionalen Gesichtspunkten / Darstellung der funktionalen Bindungen → im „Top-down“**
- **vollständige Beschreibung von Statik, Objektstruktur, Zeitverhalten und Funktionsablauf**
- Festlegung Datenstrukturen / Planung gesamte Modulkommunikation
- Verifikation durch Übersicht mittels transparenter grafischer Spezifikation / auch gute Basis für Zusammenarbeit
- oftmals Steuermodule auf der obersten Hierarchieebene
- Einsatz (grafischer) Spezifikationsmittel mit Verfeinerungstechnik

- stark vernetztes Netz von Zuständen → Zustandsdiagramm
- Synchronisation parallel laufende / konkurrierende Prozesse / Kommunikation (zwischen Funktionsblöcken) → Strichdiagramm

Phase 4: Technischer Entwurf

- **Ziel / Endergebnis: getestete Module / Subsysteme**
- **Entwurf der Module des Blockschaltbilds im Detail**
- funktionale Detailierung mittels Programmablaufplan, Stuktogramm, Funktionsplan usw.
- **sofortige Realisierung und Erprobung als Hard-/Software (ggf. simulierte Modul-Umgebung) → im „Bottom-up“**

Phase 5: stufenweise Inbetriebnahme

- **Ziel / Endergebnis: betriebsbereite Anlage**
- **Montage der einzelnen Module und Abprüfung der Spezifikation mit Hilfe von Entwicklungswerkzeugen**
- **Überprüfung möglichst vieler Betriebsfälle / aller Wege im Hauptsteuerprogramm (hinsichtlich Fehlbedienung, Störsituationen, Worst-Case-Szenarien usw.)**
- Teststrategie nach Spezifikation der Entwurfsphase (!)

Übergreifende Entwurfs- und Entwicklungskriterien

Die beschriebene Methodik unterstützt als fortwährend qualitätsgesicherter strukturierter Prozess funktional und technologisch konsistente Entwürfe und Entwicklungen auch von komplexen Gesamtsystemen. U. a. sind hierbei folgende generellen Kriterien als grundsätzliche Gestaltungsmerkmale des Designs bedeutsam:

- **Standardisierung**
- **Regelkonformität**
- **Anforderungskonformität**
- **Betriebssicherheit („Secure by Design“)**
- **Dauerhaftigkeit**
- Modularität / Skalierbarkeit / Komplexitätsreduktion
- Nutzerfreundlichkeit / Konfigurierbarkeit / Parametrierbarkeit / Kalibrierbarkeit
- **Wartbarkeit / Erhaltbarkeit, Aktualisierbarkeit / Erweiterbarkeit**
- Rückbaubarkeit / Recyclingfähigkeit sowie
- **Wirtschaftlichkeit bzw. Nachhaltigkeit**

Literatur

[1] U. Piller, W. Nüchel: Entwurf MC-gesteuerter Produkte und Anlagen. VDE-Verlag GmbH, Berlin und Offenbach 1988.

[2] E. Kempkens: Ingenieurbauwerke - Qualitätssicherungs- und Betriebssicherheitskonzept zur messtechnischen Bauwerksdiagnostik, Straße und Autobahn 12.2022, Kirschbaum Verlag Bonn, www.intelligentebruecke.de

[3] E. Kempkens: Qualitätssicherungskonzept Intelligente Brücke – Betriebssicherheit des ganzheitlichen lebenszyklusbasierten Bauwerksmonitorings, AP-Projekt F1100. 2115003, BASt 2021, www.intelligentebruecke.de; www.bast.de

[4] Digitaler Zwilling von Brücken – Wegweiser zur Einführung im Bundesfernstraßennetz, BMDV, August 2022.

[4] Masterplan BIM Bundesfernstraßen – Digitalisierung des Planens, Bauens, Erhaltens und Betriebens im Bundesfernstraßenbau mit der Methode des Building Information Modeling, BMDV, September 2021.

[5] V-Modell XT Bund - Das Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte in der Bundesverwaltung, Version: 2.3. Beauftragter der Bundesregierung für die Informationstechnik, BMI.

[6] Architekturrichtlinie für die IT des Bundes – Version 2022. Beauftragter der Bundesregierung für die Informationstechnik, BMI.

Anhang

Beispiel für grafische Spezifikationsmittel mit Verfeinerungstechnik:

Transparenter Funktionaler Entwurf (und seine Verifikation) auf Grundlage von Funktionsblöcken / Blockschaltbildern mittels grafischer Spezifikation unter Anwendung mittels SADT-Diagrammen (Structured Analysis and Design Technique, Strukturanalyse mit grafischen Symbolen).

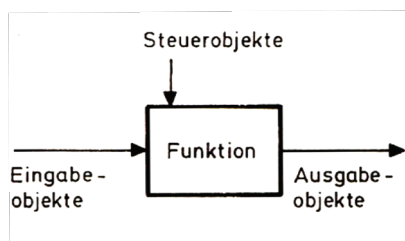


Bild 1: SADT-Diagramm – Funktions-Block mit Eingabe-, Ausgabe- und Steuerobjekten [1]

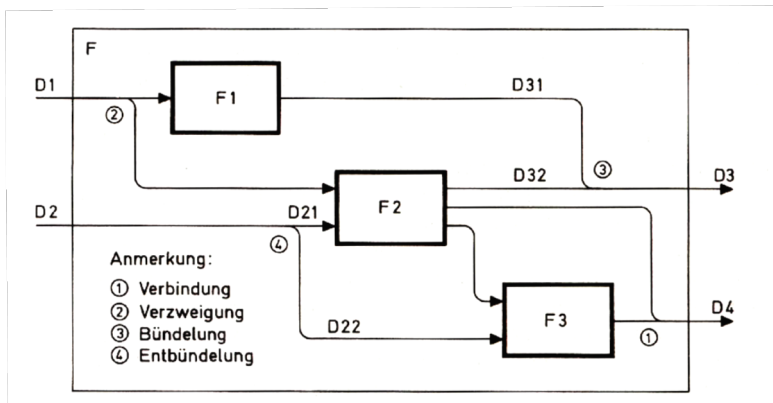


Bild 2: SADT-Diagramm mit Verbindungen, Verzweigung und Bündelungen [1]

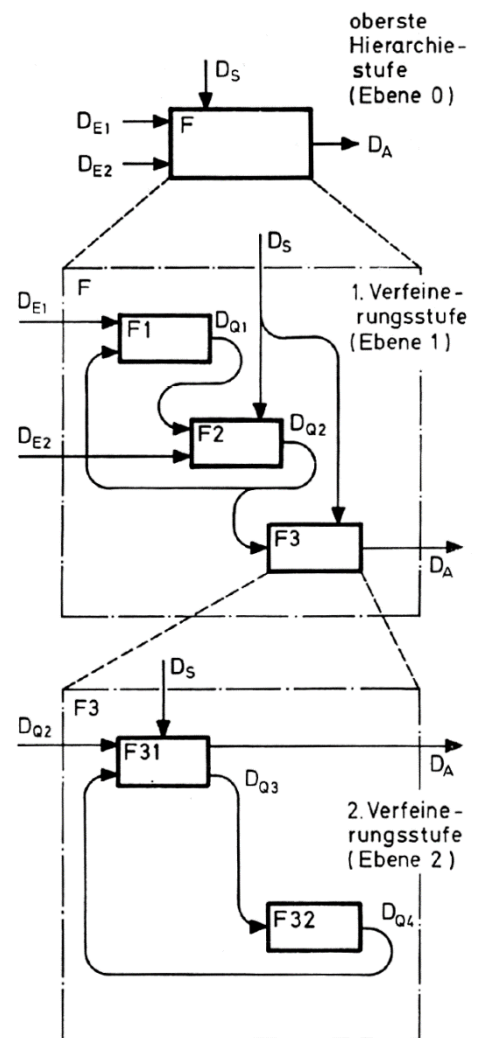


Bild 3: SADT-Diagramm – schrittweise Verfeinerung von Funktionsblöcken [1]

