Verlässliche Echtzeitsysteme

Fallstudien

Fabian Scheler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
www4.informatik.uni-erlangen.de

01. Juli 2013

Fragestellungen

- Wie sind kommerzielle verlässliche Systeme aufgebaut?
  - Welche Fehler gilt es zur Laufzeit zu tolerieren?
  - Welche Mechanismen werden für die Fehlertoleranz eingesetzt?
  - Welche Maßnahmen stellen die Korrektheit der Implementierung sicher?
- Betrachtung zweier Fallstudien:
  - Sizewell B: primäres Reaktorschutzsystem
  - Airbus A320/A330/A340: digitale „Fly-by-Wire“-Systeme
- Schwerpunkt der Fallstudien:
  - Grundverständnis der Funktion dieser Systeme
  - struktureller Aufbau der Systeme hinsichtlich Fehlertoleranz
  - Verifikation der eingesetzten Software

Gliederung

Sizewell B

Der derzeit einzige Druckwasserreaktor in Großbritannien

Standort Suffolk, UK

Betreiber EDF Energy

Erbauer u. a.

- Westinghouse
- Framatome
- Babcock Enegery
- GEC Alsthom

Laufzeit 2035

Leistungsdaten

- Netto: 1195 MW
- Brutto: 1257 MW
- thermisch: 3479 MW

(Quelle: John Brodrick)

Entstehungsgeschichte

1969 erste Ankündigung als Advanced Gas-cooled Reactor, (AGR)

1974 Steam Generating Heavy Water Reactor, (SGHWR)

- mit schwerem Wasser moderierter Siedewasserreaktor
  - (engl. *boiling water reator, BWR*)

1980 Ankündigung als Druckwasserreaktor

- (engl. *pressurized water reactor, PWR*)

1982 - 1985 Begutachtung des Sicherheitskonzepts

1987 Erteilung der Baugenehmigung

1988 Baubeginn am 18.07.1988

1995 Netzsynchronisation am 14.02.1995

- kommerzieller Betrieb seit 22.09.1995

2005 Erhöhung der thermischen Leistung auf 3479 MW

- die Nettoleistung erhöht sich von 1188 MW auf 1195 MW
- Leistungserhöhung hängt aber von der Temperatur des Meeres ab

Das Reaktorschutzsystem

Einzige Aufgabe: Fehlertoleranz

- **Zweck:** Durchführung einer Reaktorschnellabschaltung (RESA)
  - (engl. *reactor emergency shutdown, reactor trip, SCRAM*)
    - SCRAM = „Safety Cut Rope Axe Man“
    - manuelle Notabschaltung des ersten Kernreaktors 1942
  - falls ein unsicherer Reaktorzustand festgestellt wird
- **Funktionsweise** der Schnellabschaltung
  - Einschießen der Steuerstäbe (engl. *control rod*) in den Reaktorkern
    - in Druckwasserreaktoren werden diese von oben eingeschossen
    - Normalbetrieb: Magnete/Motoren pressen sie gegen vorgespannt Federn
  - zusätzlich: Einleiten von Neutronengiften, z. B. Borsäure

  ⇝ Einfangen freier Neutronen, Stoppen der Kettenreaktion
    - Reaktorleistung reduziert sich auf die Nachzerfallswärme (engl. *decay heat*)
    - diese beträgt ca. 5% der thermischen Leistung ⇝ ca. 174 MW (Sizewell B)
- **Sicherheitsanforderung:** fail-operational

  ⇝ den sicheren Zustand (engl. *fail-safe*) nimmt der Reaktor ein

Sizewell B Reaktorschutzsystem

- Ausschluss von **Gleichtaktfehlern**

  ⇝ verursacht durch Fehler im Entwurf oder der Implementierung

☞ **Diversitärer Aufbau** des Schutzsystems

- **primäres Schutzsystem** (engl. *primary protection sys., PPS*)
  - basierend auf digitaler Sicherheitsleittechnik
  - Überwachung von Reaktorparametern
    - Neutronenfluss im Reaktordruckbehälter
    - N_{16}-Gehalt im Primärkühlkreislauf
  - Überwachung der Steuerstäbe
  - Reaktorinstrumentierung (engl. *reactor instrumentation*)
  - Stromkreisunterbrecher (engl. *circuit breakers*) ⇝ SCRAM
- **sekundäres Schutzsystem** (engl. *secondary protection sys., SPS*)
  - basierend auf diskret aufgebauten, analogen Schaltungen

Primäres Reaktorschutzsystem

- **Zuverlässigkeitsanforderung:** Toleranz eines ausgefallenen Kanals
  - auch wenn ein Kanal aktuell gewartet wird
    - Wartungen/Tests während des Betriebs sind unumgänglich
    - der Reaktor wird nur zur Revision und zur Wiederbefüllung heruntergefahren

    ⇝ diese Revisionsintervalle betragen typischerweise 18 Monate

  ⇝ vierkanaliger, redundanter Aufbau des PPS
    - außerdem wird sichergestellt, dass maximal ein Kanal gewartet wird
- **zulässige Ausfallwahrscheinlichkeiten** des PPS
  - „failure upon demand“ ⇝ f/d
  - Ausfall eines einzelnen Kanals: $10^{-3} f/d$
  - insgesamt (das redundante System aus vier Kanälen): $10^{-4} f/d$
  - Ausfallwahrscheinlichkeit: $10^{-5} f/year$

☞ **jeder unsichere Zustand** führt zur RESA

- auch wenn das PPS nicht mehr aktiv in der Lage ist, dafür zu sorgen
  - z. B. weil der Strom für die Schutzsysteme komplett ausfällt

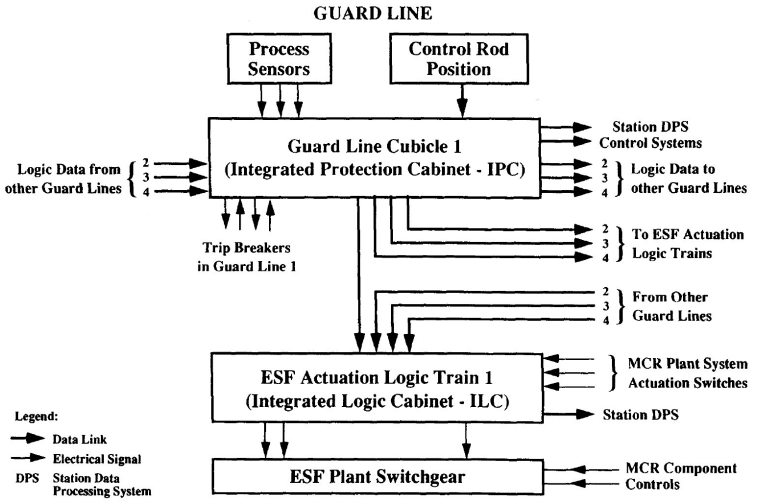
⇝ Passivität der Systeme hat Auslösung der Sicherheitsfunktionen zur Folge

Aufbau des primären Schutzsystems

- **4-fach redundante Sicherheitsleittechnik**
  - Redundanz umfasst jeweils Sensorik, Berechnung und Aktuatoren
  - ⇝ die Replikation umfasst also den kompletten Kontrollpfad
    - im Umfeld von Sizewell B sprach man „Guardlines“
  - einzelne Redundanzen sind räumlich separiert
    - Aufstellorte der Kontrollrechner, Kabelkanäle, Stromversorgung, ...
    - ⇝ Vermeidung von Gleichtaktfehlern durch Umwelteinflüsse
- **unabhängige Arbeitsweise** der einzelne Replikate
  - sie bestimmen eigenständig ob eine RESA vonnöten ist
  - ⇝ Durchführung der RESA wird durch Mehrheitsentscheid ermittelt
    - jedes Replikat führt den Mehrheitsentscheid selbst durch
    - die Logik des Mehrheitsentscheids bezieht sich auf einen Wahrheitswert
    - ⇝ Implementierung durch einen dedizierten Schaltkreis
  - ⇝ hierfür notwendige Kommunikation erfolgt über optische Medien
    - keine gegenseitige elektrische Beeinflussung
    - keine Störungen durch elektromagnetische Interferenz

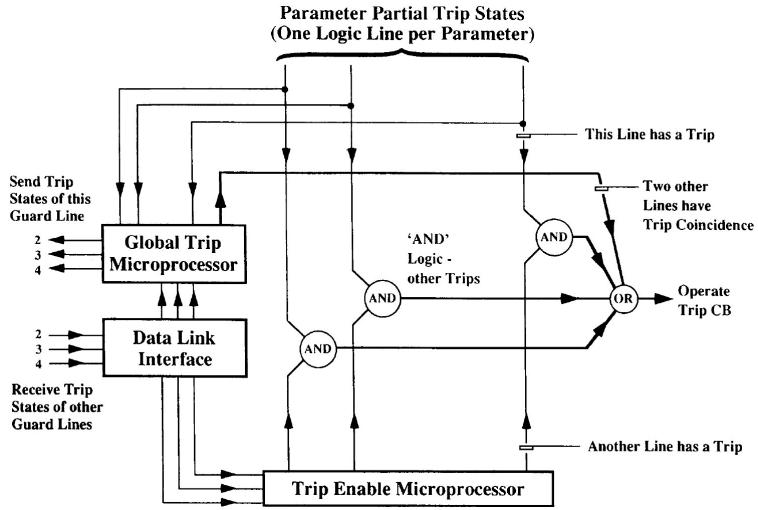
Eine „Guardline“ des primären Schutzsystems

Quelle Grafik: [4]



Implementierung des Mehrheitsentscheids

Quelle Grafik: [4]



Softwareverifikation

- Verifikation und Validierung bestand aus verschiedenen Aktivitäten:

  Engineering Confirmatory Analysis — NNC Ltd.
  - Begutachtung (engl. *review*) relevanter Entwicklungsdokumente
  - Anforderungen/Spezifikationen für System/Code, Quellcode und -daten

  Independent Design Assesment — Nuclear Electric
  - Überprüfung der Systemanforderungen in Systementwurf/-spezifikation
  - Einbeziehung von Software-Entwurf und -Spezifikation

  MALPAS Analysis — TA Consultancy Services Ltd.
  - formale Verifikation der Softwareimplementierung mit MALPAS

  Object/Sourcre Code Comparison — Nuclear Electric
  - Nachweis der Äquivalenz zwischen Binär- und Quellcode mit MALPAS

  Dynamic Testing — Rolls Royce and Associates Ltd.
  - Durchführung von ca. 55000 zufällig erzeugten Testfällen
- gesamter geschätzter Aufwand: 250 Mannjahre
  - in etwa derselbe Aufwand wurde bereits von Westinghouse investiert

MALPAS

MALvern **P**rogramming **A**nalysis **S**uite

- Entwicklung durch „Royal Signals and Radar Establishment“
  - Forschungseinheit des britischen Verteidigungsministeriums
  - Stationierung in Malvern (Worcestershire) ⇝ Namensgebung
- besteht aus folgenden Analysewerkzeugen

Kontrollflussanalyse ↦ Kontrollflussgraph . . .
  - Schleifen, Ein-/Ausstiegspunkte, Reduzierbarkeit, . . .

Datenflussanalyse ↦ erreichende Definitionen, . . .
  - Verwendung nicht initialisierter Daten, nie geschriebene Ausgaben

Informationsflussanalyse (engl. *program dependency graph*)
  - Daten- und Kontrollflussabhängigkeiten von Ausgabevariablen

semantische Analyse ↦ symbolische Ausführung
  - funktionale Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgaben

Einhaltung von Vor- und Nachbedingungen
  - (engl. *compliance analysis*)

Softwareverifikation mit MALPAS [8]

- **zu prüfen:** Softwareimplementierung des PPS
  - Implementierung in PL/M-86 und ASM86 bzw. PL/M-51 und ASM51
  - umfasst ingesamt ca. 100.000 *Lines of Code*
    - ca. 40.000 Zeilen für einen Hauptprozessor, ca. 10.000 bei Hilfsprozessoren
    - Anwendung, Betriebssystem, Kommunikation, Selbsttest, . . .
- **Referenz:** Anforderungs- und Entwurfsdokumente
  - „Software Design Requirements“ (SDR)
    - abstrakte Beschreibung der von der Software zu erbringenden Funktionalität
  - „Software Design Specification“ (SDS)
    - architekturelle Umsetzung der funktionalen Anforderungen
    - enthält detaillierte Information zur Funktion einzelne Softwarekomponenten
    - beschreibt bereits alle Programmvariablen, sowie Ein- und Ausgaben
- **Ablauf:** Verifikation erfolgt Prozedur für Prozedur (engl. *unit proof*)
  - aufgerufene Prozeduren werden durch geeignete Platzhalter ersetzt
  - beginnend bei Blattprozeduren

MALPAS-Analysis [8] (Forts.)

- MALPAS verwendet eine eigene Zwischensprache: MALPAS IL
  - für den PL/M-86-Code wurde ein eigener Übersetzer entwickelt

⇝ Problem: MALPAS IL unterstützt anders als PL/M-86 keine Zeiger
  - Implementierung von z. B. OUT- und INOUT-Parametern durch Zeiger

⇝ Lösung: Dereferenzierung per Zeiger angesprochener Objekte
  - Kodierrichtlinien ⇝ eingeschränkte Verwendung von Zeigern

⇝ Dereferenzierung erfolgt größtenteils automatisiert, teilweise manuell

- semantische Analyse ⇝ Extraktion funktionaler Zusammenhänge
  - Ergebnis ist der mathematische Zusammenhang: Eingabe ↦ Ausgabe

⇝ manueller Abgleich mit den Anforderungen/der Spezifikation

- Formulierung von Vor- und Nachbedingungen in MALPAS IL
  - Ansatz: primäre Quelle SDR, Verfeinerung mithilfe von SDS

⇝ schwierig wegen unterschiedlich detaillierter SDR/SDS
  - Analyse war sehr mühsam ⇝ alternative Formulierungen waren oft nötig
    - ungünstiger, schwer zu vereinfachender Ausdruck ließ Analyse scheitern

⇝ Neuformulierung „wies der algebraischen Vereinfachung den Weg“

Qualitätssicherung und Ergebnisse

- **Problem:** korrekte Formulierung von Vor-/Nachbedingungen

1. standardisierter Analyseprozess (ISO 9001)
2. detaillierte Vorgehensbeschreibung für die Durchführung (ca. 200 Seiten)
3. detaillierte Protokollierung der Analyse
   - Eingabe für die MALPAS-Analyse und ihre Ergebnisse
   - für jede Analyse wurden vorgefertigte Formulare ausgefüllt
   - Ableitung der math. Spezifikation, Interpretation der Ergebnisse, . . .
4. umfangreiche gegenseitige Begutachtung (engl. *peer-review*)
   - Einhaltung des Prozesses, Verständnis des PPS erweitern
   - Überprüfung von Terminierungsbeweisen, Termersetzungsregeln, . . .

- **Ergebnisse:** Abweichungen von der Spezifikation
  - diese wurden kommentiert und kategorisiert

⇝ Lieferung von insgesamt ca. 2000 Kommentaren an Nuclear Electric

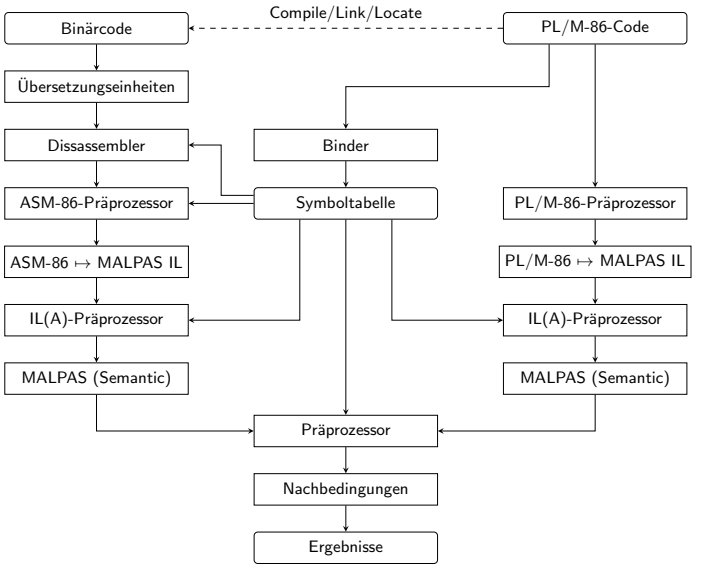
Kategorie 1	mögliche Fehlfunktion im PPS	⇝ keine
Kategorie 2	Änderungen in Anforderungen/Spezifikation	⇝ ca. 40%
Kategorie 3	nicht-kritische Änderungen am Quelltext	⇝ ca. 8%
Kategorie 4	keinerlei Änderung erforderlich	⇝ ca. 52%

Äquivalenz von Quell- und Binärcode [5]

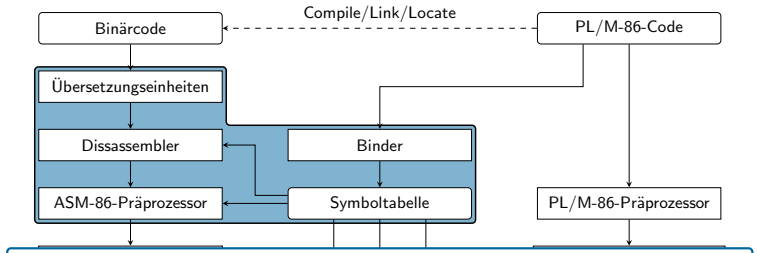
Traue Nichts und Niemandem, . . . auch nicht dem Übersetzer!

- **Problem:** Passt der Binärcode auch zum Quellcode?
  - Was hilft der korrekteste Quellcode, wenn der Übersetzer fehlerhaft ist?
  - bewiesenermaßen korrekte Übersetzer existierten damals nicht
    - nimmt man Assemblierer und Binder dazu, ist das auch heute noch so
  - Rekonstruktion des Quellcodes aus dem Binärcode ist nicht möglich
    - ⇝ kein Vergleich „originärer vs. rekonstruierter Quellcodes“
- ☞ **Idee:** man trifft sich in der Mitte ⇝ MALPAS IL
  - Übersetzer „PL/M-86 ⇝ MALPAS IL“ existiert bereits
  - Übersetzer „Binärcode ⇝ MALPAS IL“ entwickelt man noch
    - Rekonstruktion der Übersetzungseinheiten, Disassemblierung, . . .
  - Vergleich ↦ Verifikation der Nachbedingungen mit MALPAS
    - Quellcode ⇝ Extraktion von Nachbedingungen
    - Binärcode ⇝ Extraktion der Implementierung
  - ⇝ **zu zeigen:** die Implementierung erfüllt die Nachbedingung
    - ⇝ Quell- und Binärcode sind identisch

Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode

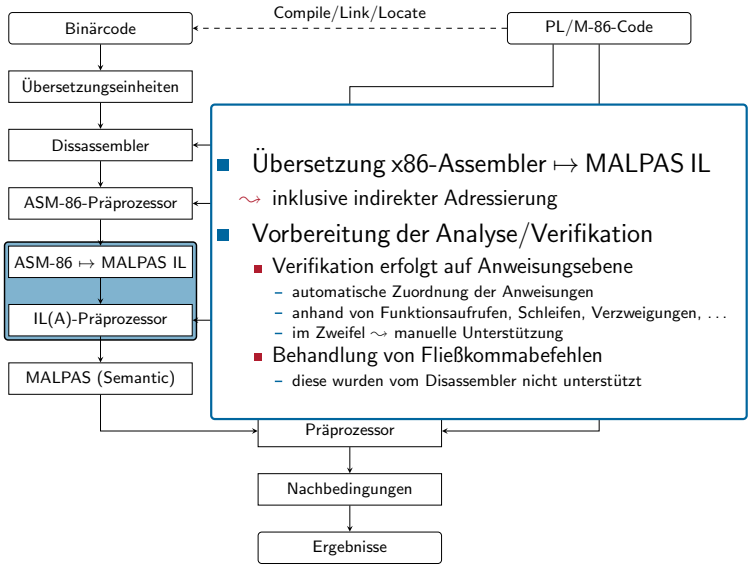


Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



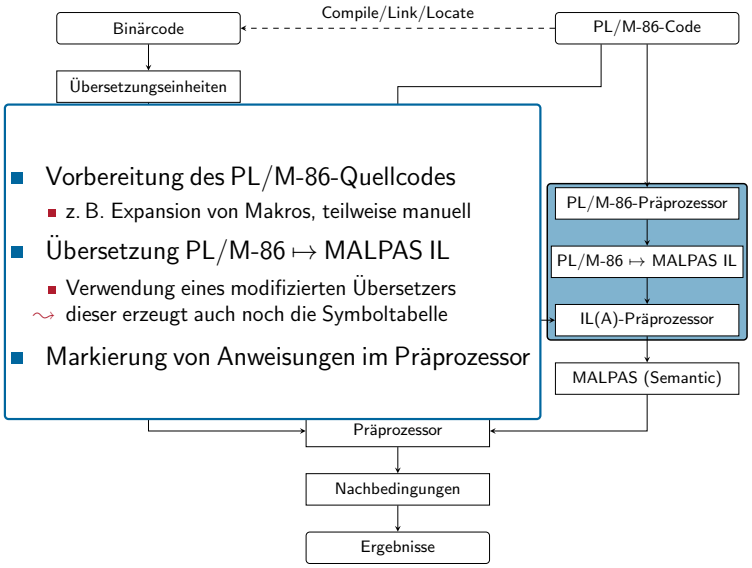
- Rekonstruktion von Text- und Datensektionen
  - ⇝ ursprüngliche Übersetzungseinheiten
- Dissassemblierung des Binärcodes
- Aufbereitung des Assemblercodes
  - unterstützt durch eine aus dem Quelltext bestimmte Symboltabelle
  - Bestimmung von globalen Variablen aus Adressen
  - Bestimmung von Funktionsparametern
  - Einfügen von Variablendeklarationen

Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



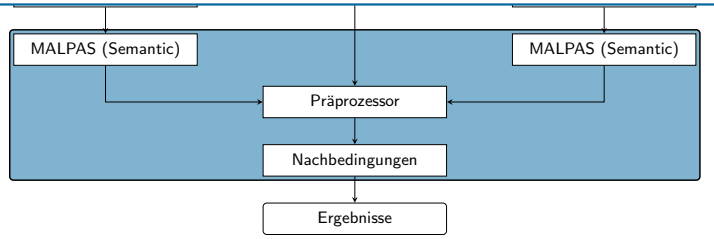
- Übersetzung x86-Assembler ↦ MALPAS IL
  - ⇝ inklusive indirekter Adressierung
- Vorbereitung der Analyse/Verifikation
  - Verifikation erfolgt auf Anweisungsebene
    - automatische Zuordnung der Anweisungen
    - anhand von Funktionsaufrufen, Schleifen, Verzweigungen, . . .
    - im Zweifel ⇝ manuelle Unterstützung
  - Behandlung von Fließkommabefehlen
    - diese wurden vom Disassembler nicht unterstützt

Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode

- funktionalen Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgabe
  - ⇝ Eingabe für die Prüfung der Nachbedingungen
    - MALPAS vergleicht nicht direkt den erzeugten MALPAS IL-Code
    - ⇝ es stellt die extrahierten math. Zusammenhänge gegenüber
- Formulierung des Verifikationsproblems in MALPAS IL
  - Eliminierung verbliebener, problematischer Konstrukte
    - Speicherreferenzen durch indirekte Adressierung, Registerzuweisungen, temporäre Variablen
  - Zuordnung der Anweisungen durchführen: ASM-86 ↔ PL/M-86
    - ASM-86-Anweisungen werden zu Prozedurimplementierungen in MALPAS IL
    - PL/M-86-Anweisungen werden zu Nachbedingungen in MALPAS IL
- Überprüfung der Nachbedingungen durch MALPAS
  - wurden keine Bedrohungen (engl. *threats*) gefunden, waren Binär- und Quellcode identisch



Ergebnisse und Bewertung des Ansatzes

- **insgesamt:** 11 Abweichungen zwischen Binär- und Quellcode [3]
  - eine davon stellte sich als ernsthafter Defekt des Übersetzers heraus
  - Ergebnisse wurde nicht offiziell veröffentlicht, „sickerten aber durch“
- **Bewertung des Ansatzes**

Generalisierbarkeit ⇝ Portierung für andere Programmiersprachen
- Ansatz ⇝ allgemein gehalten, Implementierung ⇝ sprachabhängig
- PL/M ist eine sehr einfache Sprache und erleichtert die Verifikation
  - komplexere Sprachen könnten dieses Vorhaben erschweren
  - Optimierungen wie das Ausrollen von Schleifen etc. gar unmöglich machen

Automatisierbarkeit war in weiten Teilen gegeben
- andere Teile erforderten aber signifikante manuelle Eingriffe
  - insbesondere die Markierung von Anweisungen war problematisch

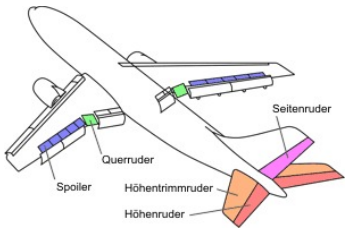
Formalität konnte nicht vollständig durchgehalten werden
- insbesondere war die Abbildung von Ganzzahlen nicht 100%-ig korrekt
  - alle Ganzzahlen wurden auf denselben MALPAS IL Ganzzahltyp abgebildet
  - unabhängig von der Bitbreite (8-,16- oder 32-Bit) der Ganzzahl
  - falls nötig, wurde diese Unterscheidung manuell eingebracht

Gliederung

Flugsteuerung (engl. *Flight Control*)

Die Lenkung eines Flugzeugs.

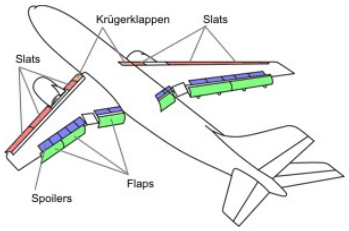
- umfasst Steuerflächen (engl. *control surfaces*) und ihre Ansteuerung
  - ⇝ Elemente um die Lage des Flugzeugs im Raum zu ändern
- **primäre Steuerflächen** eines Flugzeugs:



  - Querruder (engl. *ailerons*)
    - ⇝ Rollen um die Längsachse
  - Spoiler verringern den Auftrieb
    - ⇝ Landung, Querruder unterstützen
  - Seitenruder (engl. *rudder*)
    - ⇝ Gieren um die Hochachse
  - Höhenruder (engl. *elevator*)
    - ⇝ Kippen um die Querachse
- Höhentrimmruder (engl. *trimmable horizontal stabilizer, (THS)*)
  - ⇝ Höhensteuerung und Höhentrimmung

Flugsteuerung (engl. *Flight Control*) (Forts.)

- **sekundäre Steuerflächen** eines Flugzeugs:



  - Vorflügel (engl. *slats*)
    - ⇝ höherer Auftrieb durch mehr Wölbung
  - Krügerklappen (engl. *Kruger slats*)
    - ⇝ ähnlich dem Vorflügel, aber einfacher
  - Landeklappen (engl. *flaps*)
    - ⇝ Auftriebshilfen für den Landeanflug
    - ⇝ ermöglichen verminderte Geschwindigkeit beim Landen
- es gibt eine Reihe weitere sekundäre Steuerflächen
  - Kippnasen, Spalt, Fowler, Spreiz-Klappen, Junkers-Doppelflügel, ...
- Flugzeuge haben i. d. R. nur eine Auswahl sekundärer Steuerflächen
  - ein Airbus A310 hat z. B. Vorflügel, Krügerklappen und Spaltklappen

Ansteuerung der Steuerflächen

- **mechanische Systeme** ⇝ direkte Verbindung zur Steuerfläche
  - ein „Lenkgestänge“ verbindet Steuerknüppel und Steuerflächen direkt
    - am Steuerknüppel ist der Luftwiderstand an der Steuerfläche spürbar
    - ⇝ problematisch bei großen Flugzeugen/hohen Geschwindigkeiten
- **elektrische/hydraulische Systeme** ⇝ motorisierte Aktoren
  - der Pilot steuert nur noch die Aktoren an, nicht mehr die Steuerfläche
    - Lenkbefehle öffnen Ventile oder setzen Servomotoren in Gang
    - ⇝ „Force Feedback“ wird notwendig, um dem Piloten Rückmeldung zu geben
  - mechanische Ansteuerung ⇝ „Lenkgestänge“ zum Aktor
  - elektrische/elektronische Ansteuerung ⇝ „Fly-by-Wire“
    - analog ⇝ Steuerbefehle werden direkt auf elektrische Signale umgesetzt
    - digital ⇝ computergesteuerte Umsetzung der Steuerbefehle
  - digitale „Fly-by-Wire“-Systeme haben diverse Vorteile
    - Gewichtsersparnis im Vergleich zur Mechanik und zur Analogtechnik
    - Computerunterstützung: Autopilot, Erhöhung der Flugzeugstabilität, Absicherung des sicheren Flugbereichs (engl. *flight envelope*)

Historie: „Fly-by-Wire“

1930er Jahre **„Tupolev ANT-20 Maxim Gorky“**
- lange mechanische Steuerstrecken wurden elektrisch überbrückt

1958 **„Avro Canada CF-105 Arrow“**
- erstes militärische Serienflugzeug mit analogem „Fly-by-Wire“
- auch „Force Feedback“ (engl. *artificial feel*) wurde integriert

1969 **„Concorde“**
- erstes ziviles Verkehrsflugzeug mit analogem „Fly-by-Wire“

1972 **„F-8 Crusader“**
- Forschungsprojekt für digitales Fly-by-Wire“
  - eine digitale Flugsteuerung, drei analoge Backup-Systeme
- etwa zeitgleich: „Sukhoi T-4“ (UdSSR), „Hawker Hunter“ (GBR)

1977 **„Space Shuttle Orbiter“** ⇝ komplett digitale Flugsteuerung

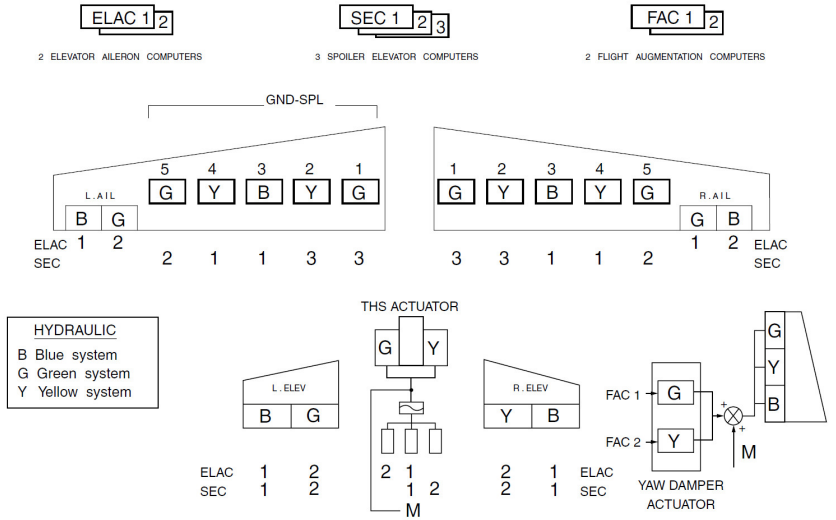
1984 **„Airbus A320“**
- erstes Verkehrsflugzeug mit vollständig digitaler Flugsteuerung
  - es existieren aber weiterhin elektrische Backup-Systeme

Flugsteuerung in A320/A330/A340 [2]

- **redundanter Aufbau** der Flugsteuerung
  - 7 (A320/321) bzw. 5 (A330/340) Computer zur Flugsteuerung
    - aktive Replikation und Implementierung von „fail-silent“-Verhalten
  - 3 Hydraulikkreisläufe zur Versorgung der Aktoren
  - > 2 getrennte Stromversorgungen durch Generatoren an den Triebwerken
    - Notstromversorgung (Windrad) falls alle Triebwerke ausfallen
- **diversitärer Aufbau** der Flugsteuerung
  - verschiedene Steuercomputer im A320/A321 [2]
    - 2 Elevator Aileron Computer (ELAC) ⇝ Motorola 68010 (Thomson-CSF)
    - 3 Spoiler Elevator Computer (SEC) ⇝ Intel 80186 (SFENA/Aerospatiale)
    - 2 Flight Augmentation Computer (FAC)
  - verschiedene Steuercomputer ab A330/A340 [7]
    - 3 Flight Control Primary Computers (PRIM) ⇝ Power PC
    - 2 Flight Control Secondary Computers (SEC) ⇝ Sharc
  - jeder Computer besteht aus einem Kontroll- und einem Monitor-Kanal
    - Verwendung unterschiedlicher Softwarepakete (z. B. Codegeneratoren)
    - ⇝ 4 Softwarepakete: 2 x ELAC, 2 x SEC im A320/321

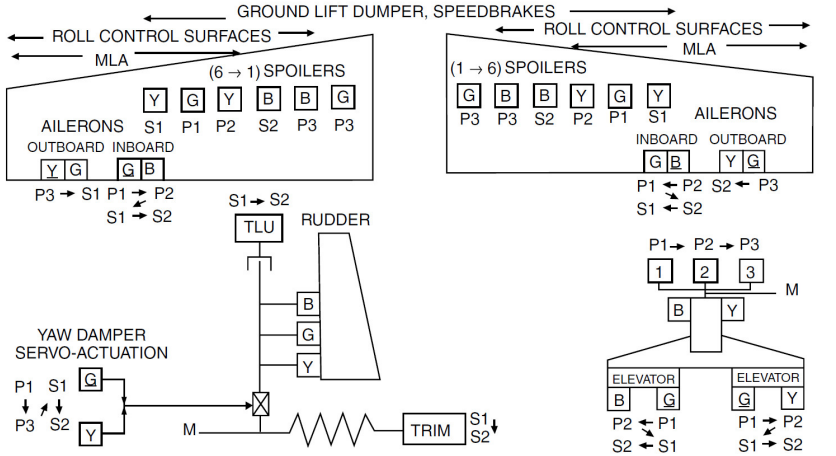
Flugsteuerung A320/A321

Quelle Grafik: [2]



Flugsteuerung A330/A340

Quelle Grafik: [2]

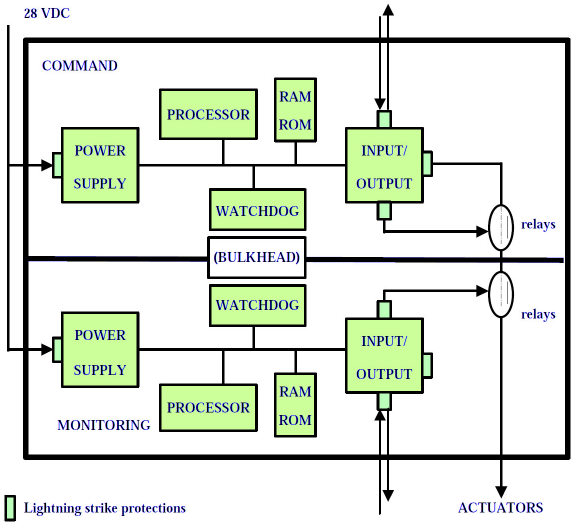


P : Flight controls primary computer
S : Flight controls secondary computer

B, G, Y : Blue, Green, Yellow hydraulic circuits

Aufbau eines Steuercomputers der Flugsteuerung

Quelle Grafik: [7]



Selbstüberwachung und Rekonfiguration

- **Selbstüberwachung** einzelner Steuercomputer
  - stetige gegenseitige Überwachung von Kontroll- und Monitor-Kanal
    - Vergleich von Ausgaben und ausgewählten Zustandsvariablen
    - übersteigt die Differenz einen gewissen Schwellwert $\rightsquigarrow$ Fehler
  - Selbsttests werden zumindest bei Systemstart durchgeführt
    - Flugzeuge werden anders als Kernkraftwerke öfters neu gestartet
- **Rekonfiguration** $\rightsquigarrow$ „Graceful Degradation“
  - Regelkreise zur Fluglageregelung sind auf Sensoren angewiesen
    - andernfalls kann der Zustand des Flugzeugs nicht mehr erfasst werden
  - im Fokus: „air data and inertial reference units“ (ADIRUs)
    - Nicken $\rightsquigarrow$ Unterstützung durch Beschleunigungssensoren und Gyroskope

  $\rightsquigarrow$ funktionale Redundanz

$\rightsquigarrow$ „Graceful Degradation“ $\rightsquigarrow$ Rückzug auf eine direkte Flugsteuerung
  - z. B. wenn alle ADIRUs ausgefallen sind

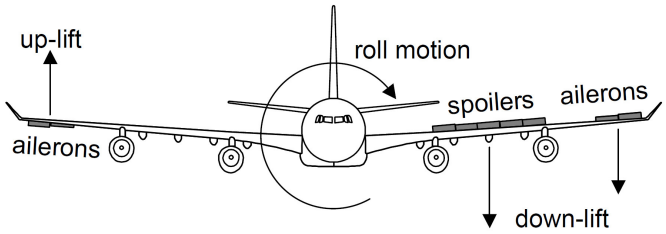
  $\rightsquigarrow$ keine computergestützte Fluglageregelung, kein gesicherter Flugbereich

Optimale Architektur der Flugsteuerung [1]

- **Status Quo:** Redundanz und Diversität
  - Steuercomputer, Stromversorgungen, Antriebsstränge, ...
- **aber:** Wie nutzt man das am besten aus?
  - Wieviele Aktoren hängen an den einzelnen Steuerflächen?
  - Aus welchen Antriebssträngen werden diese Aktoren gespeist?
  - Welche Steuercomputer kontrollieren diese Aktoren?
- **Herausforderung:** Optimiere diese Zuordnung
  - gewährleiste dabei die Einhaltung einer minimalen Funktionalität
    - die Ausfallwahrscheinlichkeit muss über einer bestimmten Schwelle liegen
  - und erziele ein möglichst geringes Gewicht
  - **bisher:** manuelle ad-hoc Herangehensweise
    - Entscheidungen basieren vor allem auf Expertenwissen
    - Optimierung der Architektur durch „Trial & Error“

Beispiel: Optimierung der Architektur für das Rollen

Quelle Grafik: [1]



- beteiligte Steuerflächen: Querruder und Spoiler

☞ eine Fehlfunktion der Steuerflächen verringert die Rollrate
  - verbleibende Rollrate im Anbetracht des Fehlers f sei $p_\infty(f)$
  - die geforderte Rollrate p_r hängt von der Fehlerwahrscheinlichkeit $\lambda(f)$ ab
    - häufige Fehler dürfen die Rollrate nur wenig beeinflussen

$\rightsquigarrow$ ausreichende Funktion falls $m = \min_f p_\infty(f)/p_r(\lambda(f)) \geq 1$
    - die geforderte Rollrate p_r wird immer erreicht, auch im Fehlerfall

Modellierung des Gewichts

- Gewicht $w(A)$ einer Architektur/Zuordnung A wird beeinflusst von
  - verwendete Aktoren, Verkabelung/-drahtung, Energieverbrauch
  - in frühen Entwicklungsstadien sind keine konkreten Werte verfügbar

$\rightsquigarrow$ Modell für die Abschätzung des Gewichts ist notwendig
- Gewichtsunterschied zwischen Architektur A und einer Referenz R:

$$\delta w(A) = w(A) - w(R) = w(a_i, \ldots, a_n) - w(r_i, \ldots, r_n)$$

  - Architektur A besteht dabei aus mehreren Architekturentscheidungen a_i
    - Welcher Typ Aktor wird verwendet? Welcher Computer steuert ihn? ...
  - der Gewichtseinfluss einer Entscheidung a_i wird bestimmt durch

$$\delta_i w(a_i) = w(r_1, \ldots, r_{i-1}, a_i, r_{i+1}, \ldots, r_n) - w(R)$$

  - summiert man diese Einflüsse auf, erhält man den Einfluss von A

$$\delta w(A) = \sum_{i=1}^{n} \delta_i w(a_i)$$

$\rightsquigarrow$ Abschätzung des Gewichtseinflusses einer kompletten Architektur

Resultierendes Optimierungsproblem

- **Minimiere den Gewichtseinfluss** $\delta w(A)$ der Architektur A
  - gewährleiste dabei die **geforderte Rollrate**: $m(A) \geq 1$
  - und beachte folgende **technische Nebenbedingungen**:
    - geeignete Energieversorgung für jeden Aktor (Elektrik/Hydraulik)
    - jeder Aktor muss an mind. einen Computer angeschlossen sein
    - die Daten- und Stromleitungen für jeden Aktor liegen auf derselben Route
    - ein Spoiler wird von einem Computer gesteuert
    - ein Querruder wird von zwei Aktoren bewegt
    - ein Querruder wird von mind. einem elektronischem Antrieb gesteuert, es werden keine hybriden Antriebe verwendet
    - Aktoren an den Querrudern haben verschiedene Architekturen (also verschiedene Energieversorgung oder Steuercomputer)
    - Aktoren an den Querrudern sind mit einer identischen Anzahl von Steuercomputer verbunden

Kombinatorische Komplexität

- für jeden Aktor gibt es N_{act} Konfigurationsmöglichkeiten

$$N_{act} = \underbrace{(n_h + n_e + n_h n_e)}_{\textit{Energie}} \cdot \underbrace{(n_c + n_c(n_c - 1))}_{\textit{Steuerrechner}}$$

- $N_s = N_{act}$ Möglichkeiten für einen Spoiler, $N_a \approx N_{act}^2$ für ein Querruder
- $N = N_a^{n_a} N_s^{n_s}$ Möglichkeiten für n_a Querruder und n_s Spoiler

☞ für reale Flugzeuge bedeutet das

		A320	$A340_{3H}$	$A340_{2H2E}$	A380
hydraulische Kreisläufe	n_h	3	3	2	2
elektrische Kreisläufe	n_h	0	0	2	2
Steuercomputer	n_c	5	5	6	6
Spoiler	n_s	8	10	10	12
Querruder	n_a	2	4	4	6
Kombinationen	N_{act}	75	75	288	288
Kombinationen Spoiler	N_s	75	75	288	288
Kombinationen Querruder	N_a	> 5000	> 5000	> 80000	> 80000
mögliche Architekturen	N	$> 10^{22}$	$> 10^{33}$	$> 10^{44}$	$> 10^{59}$

Reduktion der Kombinatorischen Komplexität

- Ausnutzung von Symmetrie bei den Spoilern $\rightsquigarrow n_s^n = n_s/2$
  - es wird immer nur ein Seite der Spoiler bewegt

  $\rightsquigarrow$ bei den Querrudern ist dies nicht möglich
- Ausnutzung der technischen Randbedingungen

  $\rightsquigarrow$ vorab werden infrage kommende Architekturen bestimmt
  - für Querruder $\rightsquigarrow$ APA, für Spoiler $\rightsquigarrow$ SPA

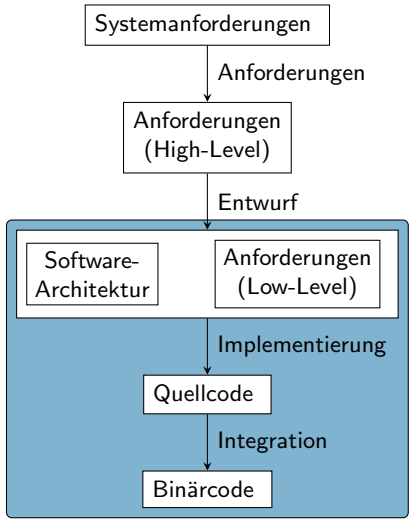
☞ signifikante Reduktion des Suchraums:

		A320	$A340_{3H}$	$A340_{2H2E}$	A380
Spoiler	n_s^n	4	5	5	6
Querruder	n_a	2	4	4	6
SPA	N_s	21	21	36	36
APA	N_a	54	54	70	70
mögliche Architekturen	N	$< 10^9$	$< 10^{14}$	$< 10^{16}$	$< 10^{21}$

- Lösung durch einen Branch&Bound-Algorithmus
  - 3 hydraulische Kreisläufe $\rightsquigarrow$ 3,1 kg Gewichtsersparnis
  - 2 hydraulische/2 elektrische Kreisläufe $\rightsquigarrow$ nur 1% Mehrgewicht
    - im Vgl. zu einem System, dass die geforderte Rollrate nicht erreicht

Softwareverifikation@AIRBUS [6]

- alle Erzeugnisse des Entwicklungsprozess müssen verifiziert werden



- Einsatz von formalen Methoden auf den tieferen Abstraktionsebenen
- geeignete/geforderte Methoden sind:
- deduktive Methoden
  - Caveat
  - Frama-C
- abstrakte Interpretation
  - Astrée
  - Absint aiT
  - Absint Stackanalyzer
  - Fluctuat
- „certified compilation“
  - „translation validation“
  - verifizierter Übersetzer

Status Quo

- **Unit Proof** anstelle von Unit Tests ⇝ Caveat
  - Beschreibung von Anforderungen (Low-Level) mit der Caveat-Sprache
    - Spezifikation der Funktion mit Caveat in der Entwurfsphase
  - ⇝ jede C-Funktion wird mit Caveat gegen ihre Spezifikation geprüft
  - Anwendung bis dato in drei Projekten
    - Anwendung von Caveat erfordert eine dreitägige Schulung
- **Berechnung der WCET** ⇝ aiT
  - Anwendungsstruktur unterstützt die statische Bestimmung von WCETs
    - statisch berechnete Ablaufpläne, nicht-verdrängbare Ausführung
  - Einsatz bis dato in sechs Projekten (mehr werden folgen)
  - Anwendung durch die Softwareentwickler selbst
    - kein spezielles Training erforderlich
    - eine Ansprechperson für die Optimierung der Analyse
- **Berechnung des Stackbedarfs** ⇝ Stackanalyzer
  - Ausschluss von Überläufen zur Laufzeit, Optimierung des Stackverbrauchs
  - Anwendung bei allen Projekten für eingebettete Systeme
    - derzeit zehn Projekte für A380 und A400M

Quo Vadis?

- **Integration Proof** ⇝ mehr als Unit Proof
  - Unit Proof bezieht sich nur auf die aktuelle Prozedur
  - Integration Proof auf einen kompletten Teilbaum des Aufrufgraphen
- **Absenz von Laufzeitfehlern** ⇝ Astrée
  - für aus SCADE-Modellen generierter Code funktioniert das schon
    - der Automatisierungsgrad ist hier auch schon sehr hoch
- **Fehlerabschätzung von Fließkommaberechnungen** ⇝ Fluctuat
  - bisher: manuelle Analyse von Rundungsfehlern und Fehlerfortpflanzung
  - ⇝ Fluctuat erlaubt dies bereits heute präzise und automatisch

Prioritäten bei der Verifikation

1. Sicherung der **Ausführbarkeit** der Implementierung
   - der Quellcode darf kein undefiniertes Verhalten hervorrufen
   - ⇝ unbedingte Einhaltung von
     - ISO/ANSI C Standard, IEEE 754 Floating-Point-Standard
     - Kodierungs- und Codegenerierungsrichtlinien
     - Zeitbeschränkungen
     - Anforderungen an die numerische Präzision
     - Synchronisation und Kommunikation
   - ⇝ ihre Verletzung kompromittiert benutzerdefinierte Eigenschaften
2. Sicherung **benutzerdefinierter Eigenschaften**
   - durch Unit Proof und/oder Integration Proof
3. **„Certified Compilation“**
   - der Quellcode muss auch korrekt auf die Hardware übertragen werden

Anforderungen

- der Einsatz formaler Methoden ist nicht nur „guter Wille“
  - solche Werkzeuge und Anstrengungen müssen sich auch bezahlt machen

☞ Airbus stellt folgende Anforderungen

- Korrektheit der Methode
  - man muss sich auf die Ergebnisse verlassen können
- direkte Anwendbarkeit auf den Quellcode der Anwendung
  - keine Entwicklung zusätzlicher Modelle, ...
- Benutzbarkeit durch normale Softwareentwickler
  - die Werkzeuge erfordern keine Gurus für formale Methoden
  - sie benötigen auch keine Super-Computer für ihre Ausführung
- Optimierung des Entwicklungsprozesses
  - formale Methoden müssen besser sein als bestehende Techniken
- Verbesserung der Zertifizierbarkeit
  - formale Methoden müssen die Zertifizierung erleichtern

Gliederung

Zusammenfassung

Sizewell B ⇝ primäres Reaktorschutzsystem
- einziger Zweck: sichere Abschaltung des Reaktors

Airbus ⇝ digitale „Fly-by-Wire“-Flugsteuerung
- die Lenkung moderner Verkehrsflugzeuge

Redundanz ⇝ Absicherung gegen Systemausfälle
- bis 7-fach redundante Systeme

Diversität ⇝ Abfedern von Software-Defekten
- unterschiedliche Hardware und Software

Isolation ⇝ Abschottung der einzelnen Replikate
- technisch ↦ optische Kommunikationsmedien
- zeitlich ↦ nicht-gekoppelte, eigenständige Rechner
- räumlich ↦ verschiedene Aufstellorte und Kabelrouten

Verifikation ⇝ umfangreiche statische Prüfung von Software
- vielschichtiger Prozess, Betrachtung von Quell- und Binärcode

Literaturverzeichnis

[1] Bauer, C. ; Lagadec, K. ; Bès, C. ; MONGEAU, M. :
Flight Control System Architecture Optimization for Fly-By-Wire Airliners.
In: *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 30 (2007), Jul., Nr. 4, S. 1023–1029.
http://dx.doi.org/10.2514/1.26311. –
DOI 10.2514/1.26311

[2] *Kapitel* 12.
In: Briere, D. ; Favre, C. ; Traverse, P. :
Electrical Flight Controls, From Airbus A320/A330/A340 to Future Military Transport Aircraft: A Family of Fault-Tolerant Systems.
CRC Press LLC, 2001 (The Electrical Engineering Handbook Series). –
ISBN 978–0849383489

[3] Buttle, D. L.:
Verification of Compiled Code.
Eindhoven, The Netherlands, University of York, Diss., Jan. 2001. –
262 S.

[4] Moutrey, G. ; Remley, G. :
Sizewell B power station primary protection system design application overview.
In: *International Conference on Electrical and Control Aspects of the Sizewell B PWR*, 1992. –
ISBN 0–85295–550–8, S. 221–231

Literaturverzeichnis (Forts.)

[5] Pavey, D. J. ; Winsborrow, L. A.:
Demonstrating Equivalence of Source Code and PROM Contents.
In: *The Computer Journal* 36 (1993), Apr., Nr. 7, S. 654–667.
http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/36.7.654. –
DOI 10.1093/comjnl/36.7.654

[6] Souyris, J. ; Wiels, V. ; Delmas, D. ; Delseny, H. :
Formal Verification of Avionics Software Products.
In: *Proceedings of the 2nd World Congress on Formal Methods (FM '09)*.
Heidelberg, Germany : Springer-Verlag, 2009. –
ISBN 978–3–642–05088–6, S. 532–546

[7] Traverse, P. ; Lacaze, I. ; Souyris, J. :
Airbus Fly-By-Wire: A Process Toward Total Dependability.
In: *Proceedings of the 25th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS '06)*, 2006

Literaturverzeichnis (Forts.)

[8] Ward, N. J.:
The Rigorous Retrospective Static Analysis of the Sizewell 'B' Primary Protection System Software.
In: Górski, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security (SAFECOMP '93).*
Heidelberg, Germany : Springer-Verlag, Okt. 1993. –
ISBN 3–540–19838–5, S. 171–181