

Verlässliche Echtzeitsysteme

Fallstudie: Reaktorschutzsystem

Peter Ulbrich, Peter Wägemann

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://www4.cs.fau.de>

KW05 2022



- 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?
- Schwerpunkt:
 - Grundverständnis der Funktion
 - Struktureller Aufbau hinsichtlich Fehlertoleranz
 - Verifikation der eingesetzten Software

 Fallstudie: Primäres Reaktorschutzsystem Sizewell B



1 Überblick

2 Sizewell B

- Überblick
- Reaktorschutzsystem
- Softwareverifikation

3 Zusammenfassung





(Quelle: John Brodrick)

- Standort: Suffolk, UK
- Betreiber: EDF Energy
- Erbauer (u.a.):
 - Westinghouse
 - Framatome (Areva)
 - Babcock Energy
 - GEC-Alsthom
- Entwurf: 1980-82
- Bau: 1988-95
- Laufzeit: 2035
- Leistungsdaten:
 - Elektrisch: 1195 MW
 - Thermisch: 3479 MW

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

1974 **Steam Generating Heavy Water Reactor, (SGHWR)**

- Mit schwerem Wasser moderierter Siedewasserreaktor
 - (engl. *Boiling water reactor, 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: Der **kritische** Kern der Leittechnik

■ **Zweck:** Durchführung einer **Reaktorschnellabschaltung (RESA)**

- Auch **SCRAM**, reactor emergency shutdown, reactor trip
- Falls ein **unsicherer Reaktorzustand** festgestellt wird

■ **Funktionsweise** der Schnellabschaltung

- Einfangen freier Neutronen, **Stoppen der Kettenreaktion**
 - Reaktorleistung reduziert sich auf die **Nachzerfallswärme** (engl. *decay heat*)
 - Diese beträgt ca. 5% der thermischen Leistung $\leadsto$ ca. 174 MW (Sizewell B)
- 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



Sicherheitsanforderung: **fail-operational**

→ Den **sicheren Zustand** (engl. *fail-safe*) nimmt der Reaktor ein





Ausschluss: **Anticipated Transient without Scram (ATWS)**

- Verursacht durch Fehler im Entwurf oder der Implementierung
- Äußere Störeinflüsse

→ **Gleichtaktfehler** sind in jedem Fall zu vermeiden!



Diversitärer Aufbau des Schutzsystems

■ Primäres Schutzsystem (engl. *primary protection sys., PPS*)

- Basierend auf digitaler Sicherheitsleittechnik
- Überwachung von Reaktorparametern
 - Neutronenfluss im Reaktordruckbehälter
 - ^{16}N -Gehalt im Primärkühlkreislauf
- Überwachung der Steuerstäbe
- Reaktorinstrumentierung (engl. *reactor instrumentation*)
- Stromkreisunterbrecher (engl. *circuit breakers*) $\leadsto$ 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

■ Zulässige Ausfallwahrscheinlichkeiten des PPS

- Failure upon demand (PFD) $\leadsto f/d$
- Ausfall eines einzelnen Kanals: $10^{-3}f/d$
- Insgesamt (das redundante System aus vier Kanälen): $10^{-4}f/d$
- Ausfallwahrscheinlichkeit: $10^{-5}f/a (\equiv 100\,000a)$

Vierkanaliger, redundanter Aufbau des PPS

- Außerdem wird sichergestellt, dass maximal ein Kanal gewartet wird

Darüber hinaus: Jeder unsichere Zustand führt zur RESA

- Auch wenn das PPS nicht mehr aktiv in der Lage ist, dafür zu sorgen
- 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 den **kompletten Kontrollpfad** (engl. *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



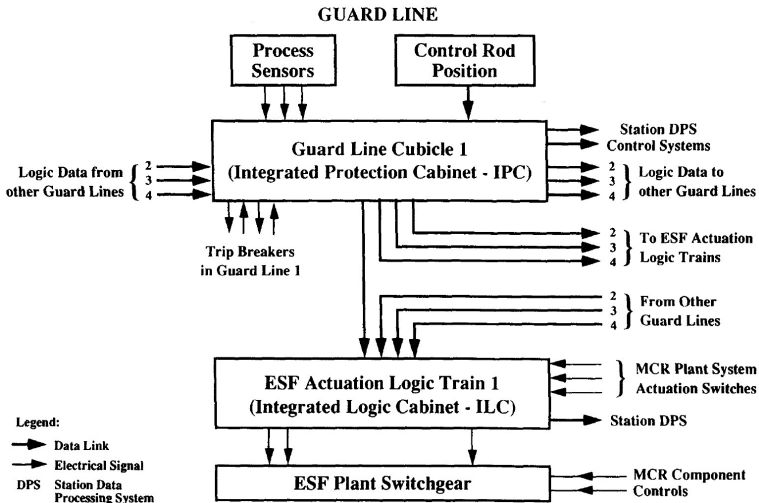
Notwendige Kommunikation erfolgt über **optische Medien**

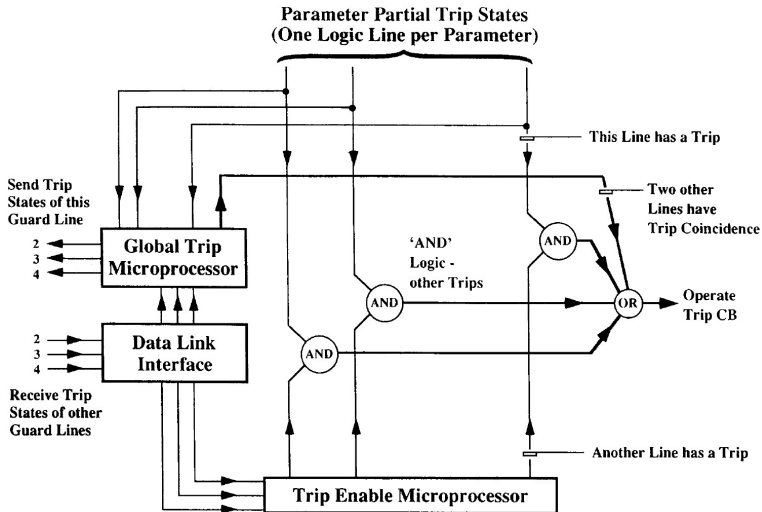
- Keine gegenseitige **elektrische Beeinflussung**
- Keine Störungen durch **elektromagnetische Interferenz**



Eine Guardline des primären Schutzsystems

Quelle Grafik: [2]





- 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 Assessment 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/Source Code Comparison Nuclear Electric
 - Nachweis der Äquivalenz zwischen Binär- und Quellcode mit MALPAS
 - Dynamic Testing Rolls Royce and Associates Ltd.
 - Durchführung von ca. 55 000 zufällig erzeugten Testfällen
- **Geschätzter Aufwand:** 250 Mannjahre
- In etwa derselbe Aufwand wurde bereits von Westinghouse investiert



- Entwicklung durch Royal Signals and Radar Establishment
 - Forschungseinheit des britischen Verteidigungsministeriums
 - Stationierung in Malvern (Worcestershire) $\leadsto$ Namensgebung
- besteht aus folgenden Analysewerkzeugen

Kontrollflussanalyse $\mapsto$ Kontrollflussgraph ...

- Schleifen, Ein-/Ausstiegspunkte, Reduzierbarkeit, ...

Datenflussanalyse $\mapsto$ erreichende Definitionen, ...

- Verwendung nicht initialisierter Daten, nie geschriebene Ausgaben

Informationsflussanalyse (engl. *program dependency graph*)

- Daten- und Kontrollflussabhängigkeiten von Ausgabevariablen

Semantische Analyse $\mapsto$ symbolische Ausführung

- Funktionale Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgaben

Einhaltung von Vor- und Nachbedingungen

- (engl. *compliance analysis*)



- **Zu prüfen:** Softwareimplementierung des PPS
 - Implementierung in PL/M-86 und ASM86 bzw. PL/M-51 und ASM51
 - Umfasst insgesamt 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 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**
- **Lösung:** **Dereferenzierung** per Zeiger angesprochener Objekte
 - **Kodierrichtlinien** $\leadsto$ eingeschränkte Verwendung von Zeigern
 - Dereferenzierung erfolgt **größtenteils automatisiert**, **teilweise manuell**

- **Semantische Analyse** $\leadsto$ Extraktion funktionaler Zusammenhänge
 - Ergebnis ist der mathematische Zusammenhang: Eingabe $\mapsto$ 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** $\leadsto$ alternative Formulierungen waren oft nötig
 - Ungünstiger, schwer zu vereinfachender Ausdruck ließ Analyse scheitern
 - Neuformulierung wies der algebraischen Vereinfachung den Weg



- **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 [3]

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

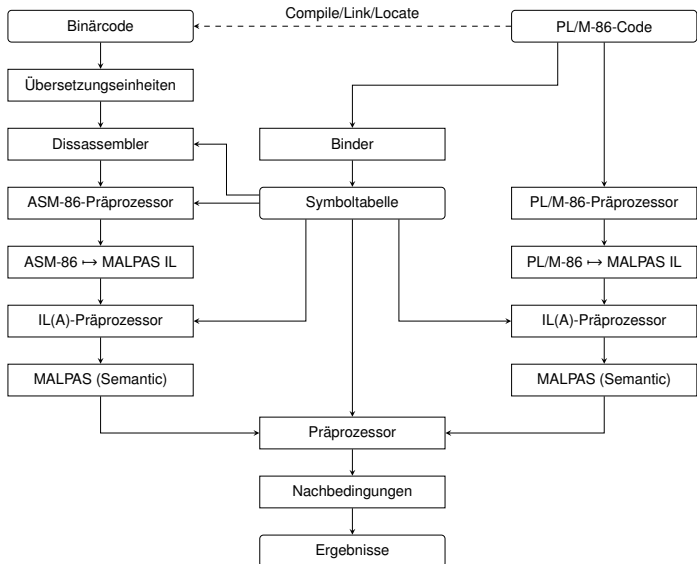
- **Problem:** Passt der Binärcode auch zum Quellcode?
 - Was hilft der korrekteste Quellcode, wenn der Übersetzer fehlerhaft ist?
 - Bewiesenermaßen korrekte Übersetzer existierten damals nicht
 - Nimmt man Assemblierer und Binder dazu, ist das auch heute noch so
 - Rekonstruktion des Quellcodes aus dem Binärcode ist nicht möglich
 - Kein Vergleich originärer vs. rekonstruierter Quellcodes

☞ **Idee:** Man trifft sich in der Mitte $\leadsto$ MALPAS IL

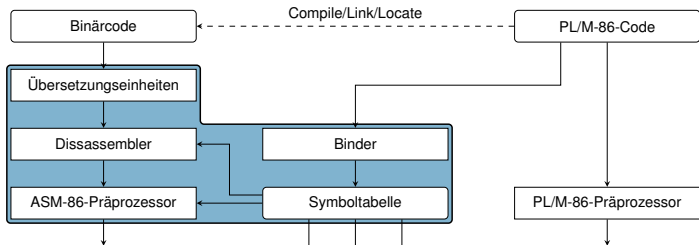
- Übersetzer PL/M-86 $\leadsto$ MALPAS IL existiert bereits
 - Übersetzer Binärcode $\leadsto$ MALPAS IL entwickelt man noch
 - Rekonstruktion der Übersetzungseinheiten, Disassemblierung, ...
 - Vergleich $\mapsto$ Verifikation der Nachbedingungen mit MALPAS
 - Quellcode $\leadsto$ Extraktion von Nachbedingungen
 - Binärcode $\leadsto$ Extraktion der Implementierung
- **Zu zeigen:** die Implementierung erfüllt die Nachbedingung
- Quell- und Binärcode sind identisch



Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



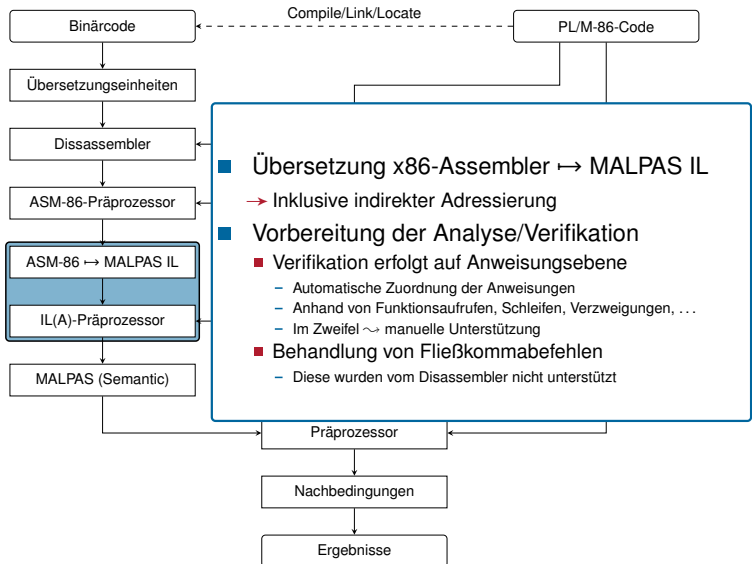
Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



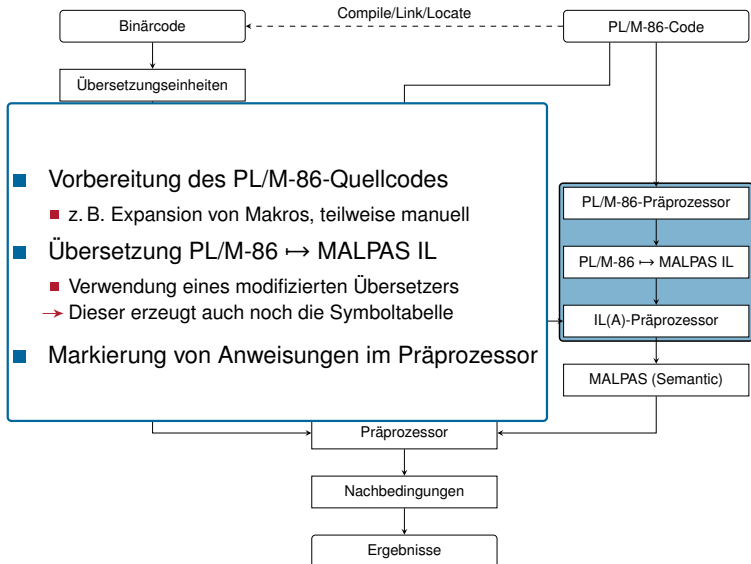
- **Rekonstruktion von Text- und Datensektionen**
 - Ursprüngliche Übersetzungseinheiten
- **Dissassemblierung des Binärcodes**
- **Aufbereitung des Assemblercodes**
 - Unterstützt durch eine aus dem Quelltext bestimmte Symboltabelle
 - Bestimmung von globalen Variablen aus Adressen
 - Bestimmung von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



Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode

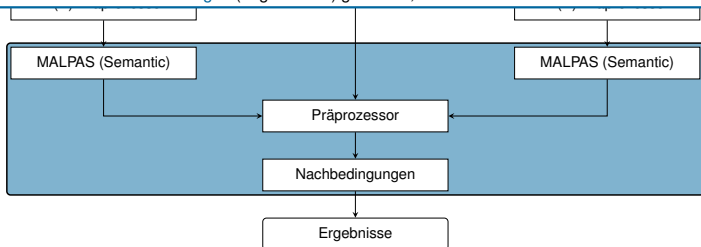


Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



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





11 Abweichungen zwischen Binär- und Quellcode [1]

- Eine davon stellte sich als **ernsthafter Defekt** des Übersetzers heraus
- Ergebnisse wurde nicht offiziell veröffentlicht, sickerten jedoch durch

■ Bewertung des Ansatzes

Generalisierbarkeit $\leadsto$ Portierung für andere Programmiersprachen

- Ansatz $\leadsto$ allgemein gehalten, Implementierung $\leadsto$ 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



1 Überblick

2 Sizewell B

- Überblick
- Reaktorschutzsystem
- Softwareverifikation

3 Zusammenfassung



Sizewell B $\leadsto$ primäres Reaktorschutzsystem

- Einziger Zweck: sichere Abschaltung des Reaktors

Redundanz $\leadsto$ Absicherung gegen Systemausfälle

- 4-fach redundante Systeme

Diversität $\leadsto$ Abfedern von Software-Defekten

- Unterschiedliche Hardware und Software

Isolation $\leadsto$ Abschottung der einzelnen Replikat

- Technisch $\mapsto$ optische Kommunikationsmedien
- Zeitlich $\mapsto$ nicht-gekoppelte, eigenständige Rechner
- Räumlich $\mapsto$ verschiedene Aufstellorte und Kabelrouten

Verifikation $\leadsto$ umfangreiche statische Prüfung von Software

- Vielschichtiger Prozess, Betrachtung von Quell- und Binärcode



- [1] Buttle, D. L.:
Verification of Compiled Code.
Eindhoven, The Netherlands, University of York, Diss., Jan. 2001. –
262 S.
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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

