

Verlässliche Echtzeitsysteme

Fallstudie: Reaktorschutzsystem

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

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

20. Juli 2017



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



Fallstudie: Primäres Reaktorschutzsystem Sizewell B



Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Sizewell B
 - Überblick
 - Reaktorschutzsystem
 - Softwareverifikation
- 3 Zusammenfassung



Sizewell B

Der derzeit einzige Druckwasserreaktor in Großbritannien



(Quelle: John Brodrick)

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



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 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 Netzsynchrisation 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



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 \sim ca. 174 MW (Sizewell B)
 - Einschließen 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



Sizewell B Reaktorschutzsystem



- 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*) \sim 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 $\sim f/d$
 - 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



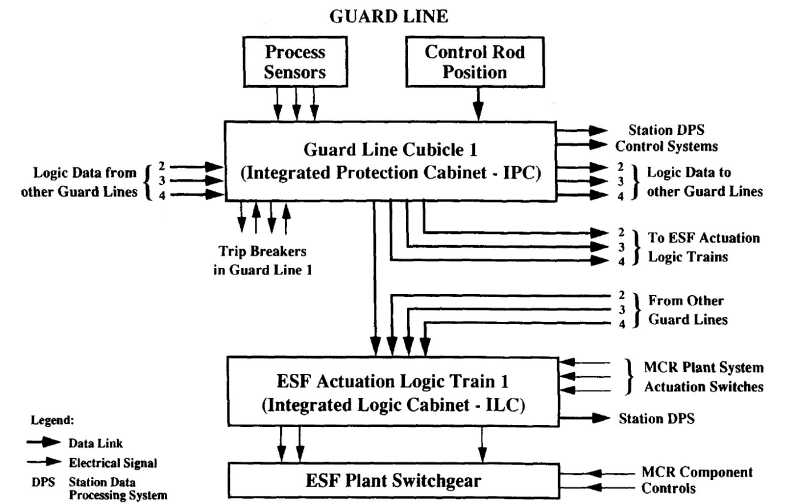
Aufbau des primären Schutzsystems

- 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 Replikat
 - 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**



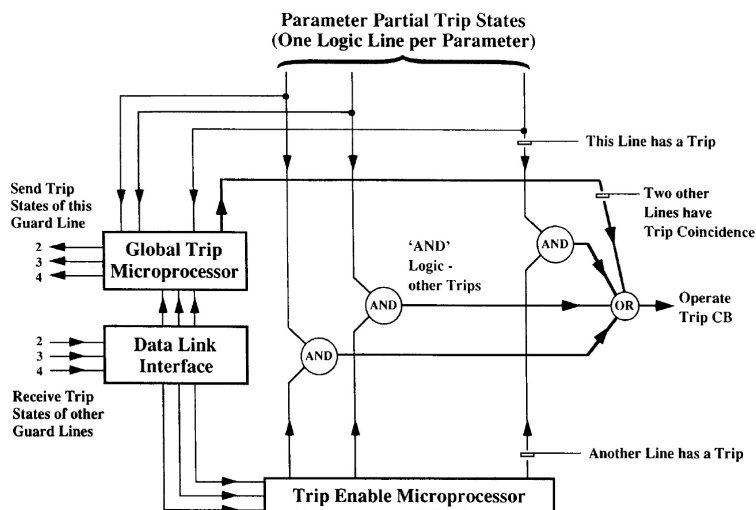
Eine Guardline des primären Schutzsystems

Quelle Grafik: [2]



Implementierung des Mehrheitsentscheids

Quelle Grafik: [2]



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 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) ~ 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*)



- **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** ~ 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



- **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%

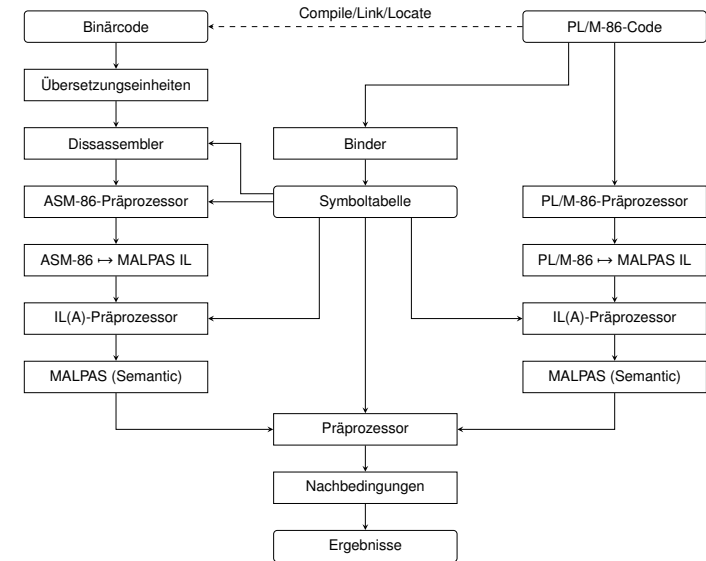


Äquivalenz von Quell- und Binärcode [3]

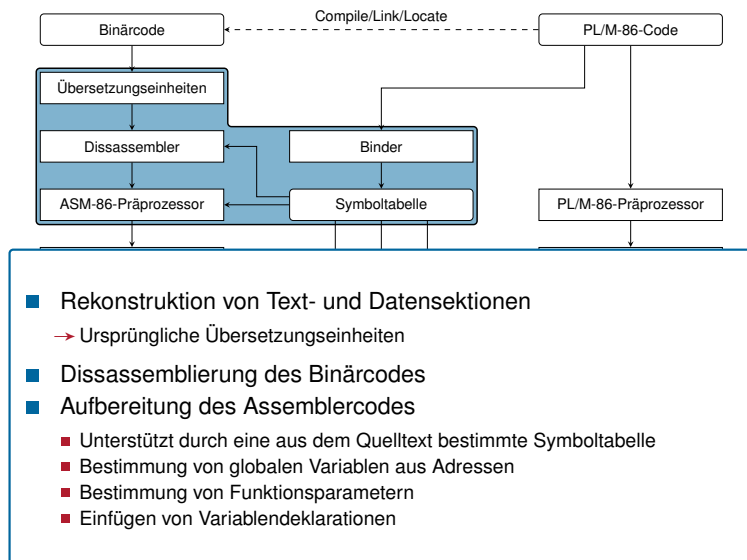
Traue Nichts und Niemandem, ... auch nicht dem Übersetzer!

- **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 Assembler 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

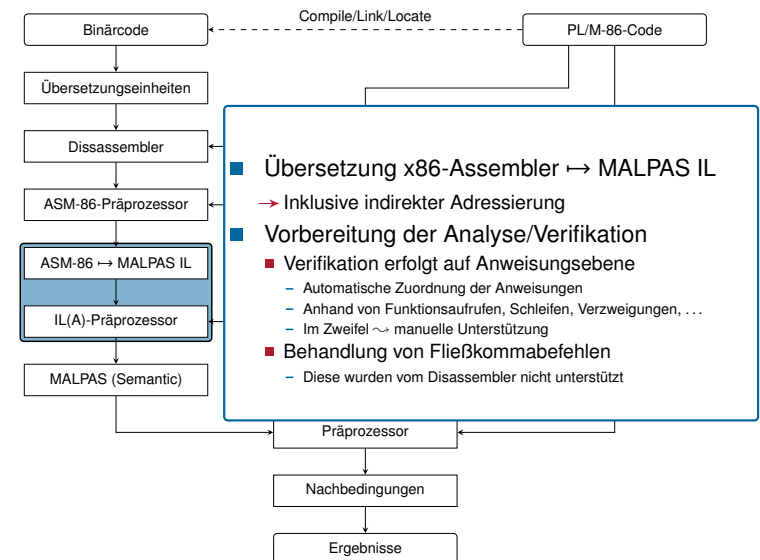
Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



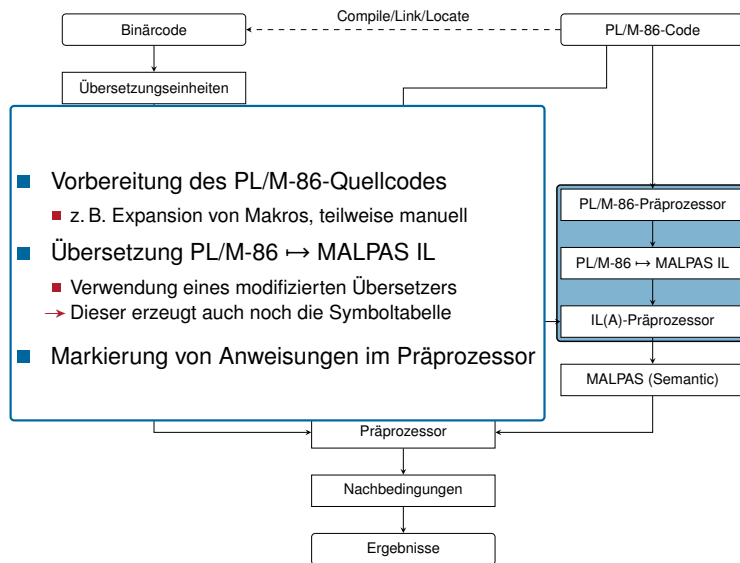
Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



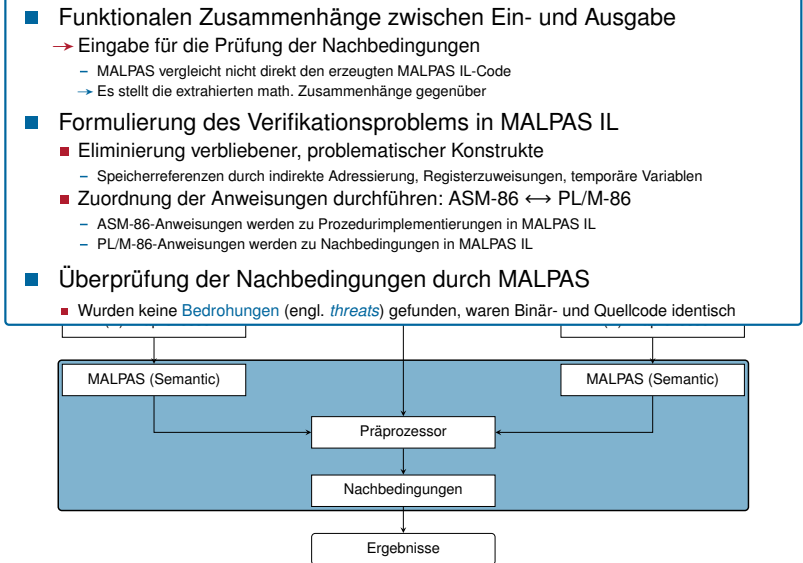
Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



- Vorbereitung des PL/M-86-Quellcodes
 - z. B. Expansion von Makros, teilweise manuell
- Übersetzung PL/M-86 → MALPAS IL
 - Verwendung eines modifizierten Übersetzers
 - Dieser erzeugt auch noch die Symboltabelle
- Markierung von Anweisungen im Präprozessor



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

- ⚠ 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 → 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

- 1 Überblick
 - Überblick
 - Reaktorschutzsystem
 - Softwareverifikation
- 3 Zusammenfassung



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 Replikate

- 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



Literaturverzeichnis

- [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

