

# Verlässliche Echtzeitsysteme

## Fallstudie: Reaktorschutzsystem

**Peter Ulbrich, Peter Wägemann**

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://sys.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

# 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 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)
- 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



## 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
  - $^{16}\text{N}$ -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)  $\sim f/d$
- 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 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



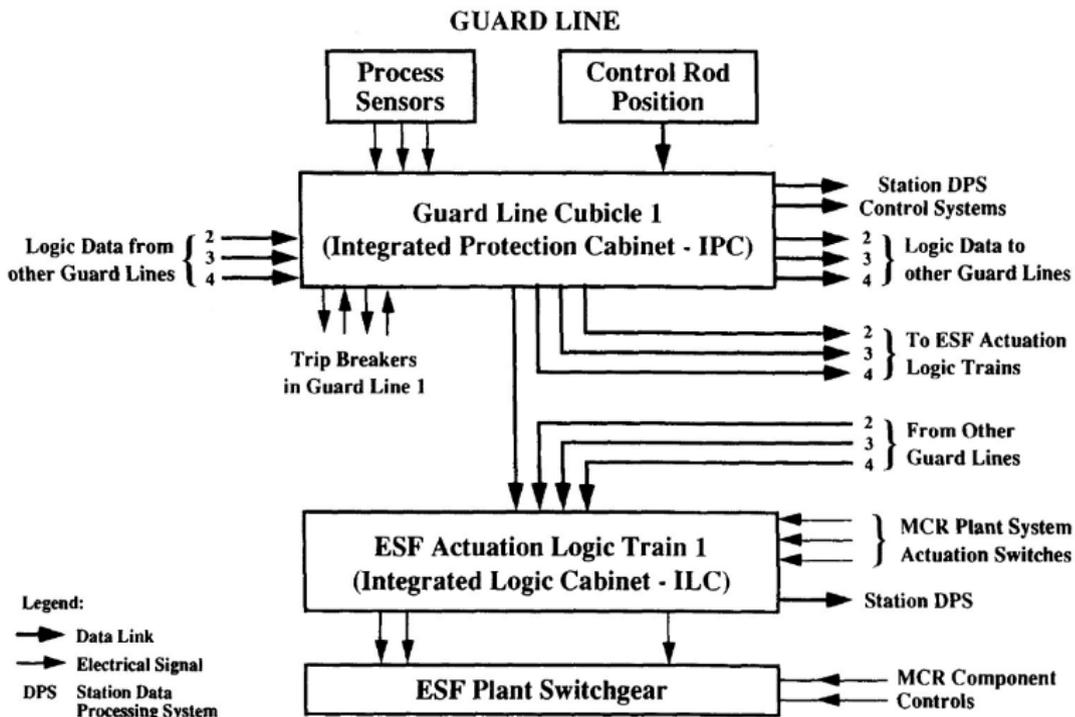
Notwendige Kommunikation erfolgt über **optische Medien**

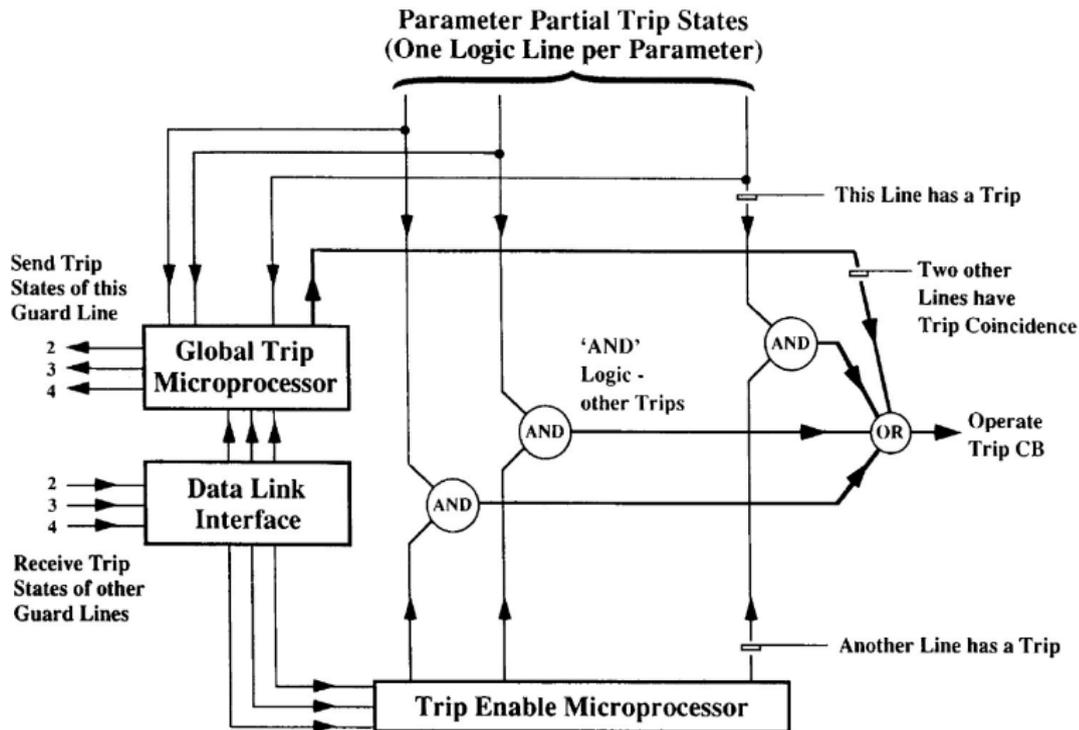
- Keine gegenseitige **elektrische Beeinflussung**
- Keine Störungen durch **elektromagnetische Interferenz**



# 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 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/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!

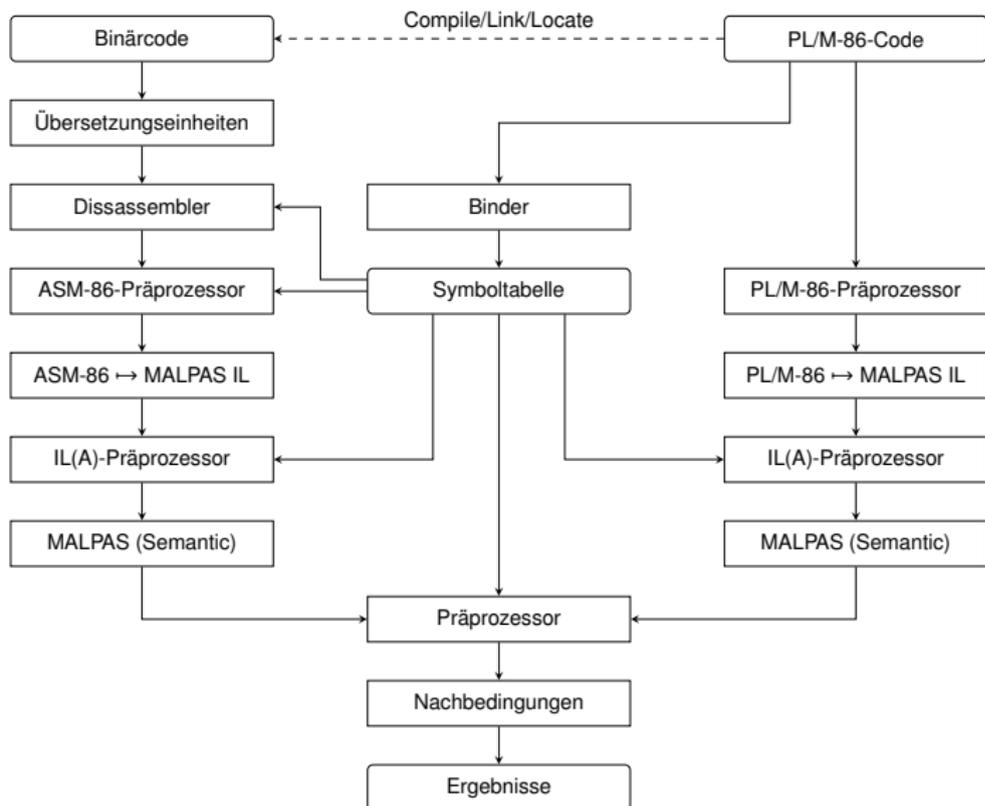
- **Problem:** Passt der Binärcode auch zum Quellcode?
  - Was hilft der korrekteste Quellcode, wenn der Übersetzer fehlerhaft ist?
  - Bewiesenermaßen korrekte Übersetzer existierten damals nicht
    - Nimmt man Assemblierer und Binder dazu, ist das auch heute noch so
  - Rekonstruktion des Quellcodes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

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

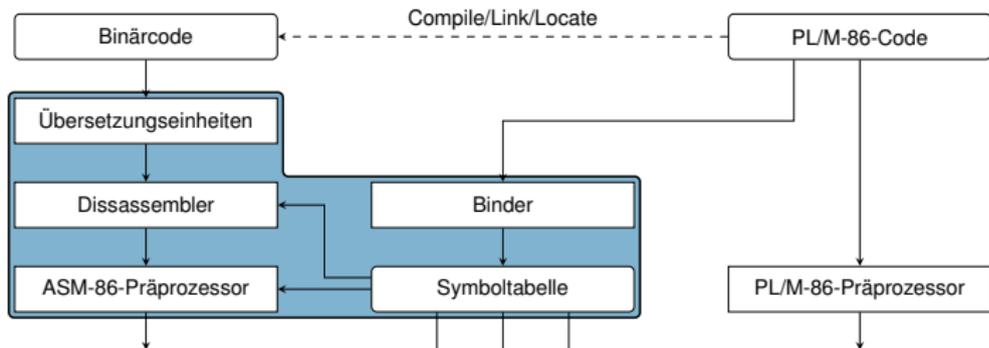
- Übersetzer PL/M-86  $\rightsquigarrow$  MALPAS IL existiert bereits
  - Übersetzer Binärcode  $\rightsquigarrow$  MALPAS IL entwickelt man noch
    - Rekonstruktion der Übersetzungseinheiten, Disassemblierung, ...
  - Vergleich  $\mapsto$  Verifikation der Nachbedingungen mit MALPAS
    - Quellcode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



# Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



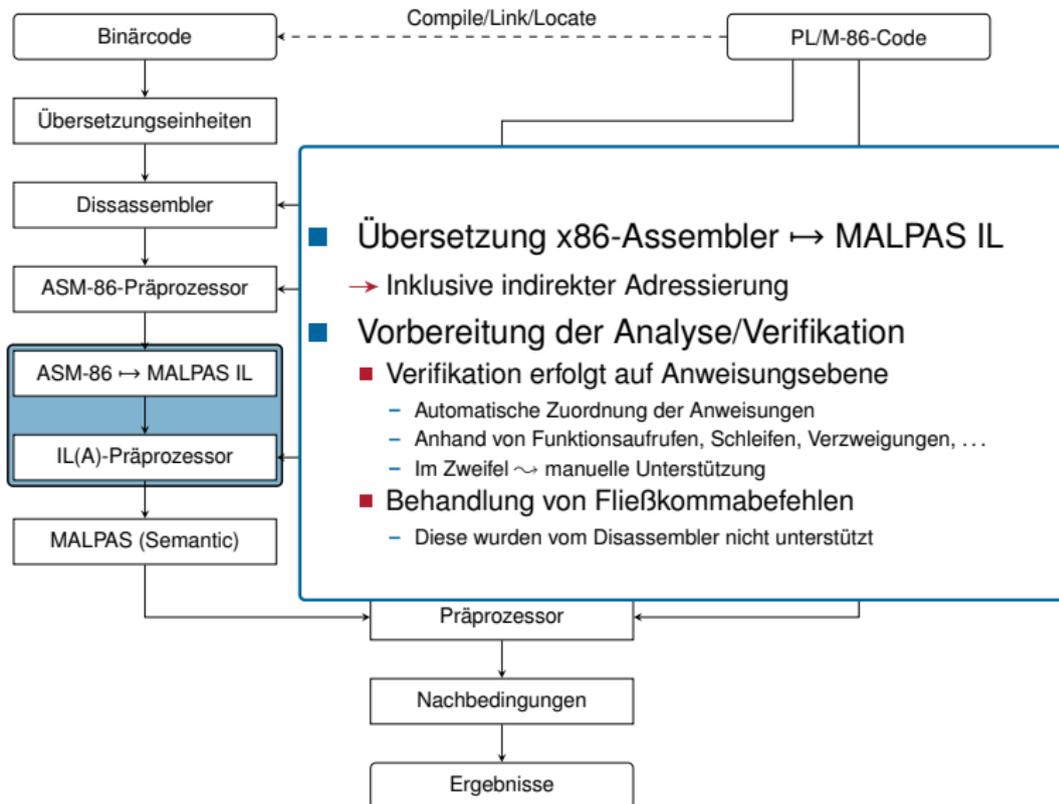
# Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



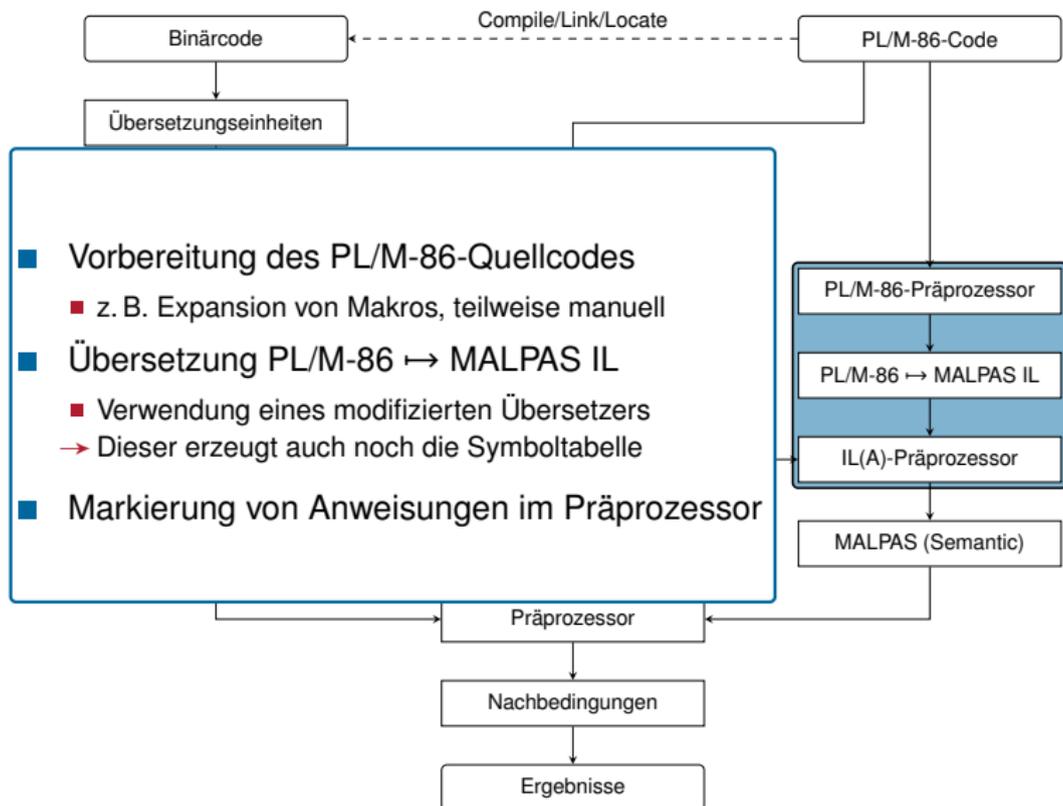
- Rekonstruktion von Text- und Datensektionen
  - Ursprüngliche Übersetzungseinheiten
- Dissassemblierung des Binärcodes
- Aufbereitung des Assemblercodes
  - Unterstützt durch eine aus dem Quelltext bestimmte Symboltabelle
  - Bestimmung von globalen Variablen aus Adressen
  - Bestimmung von Funktionsparametern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



# Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode

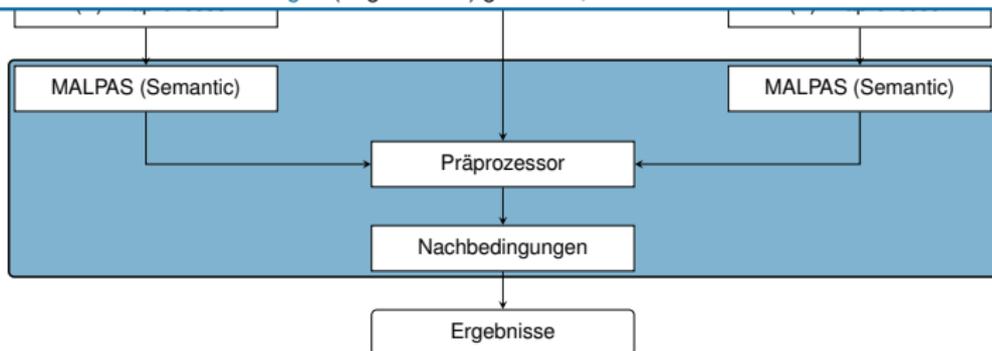


# Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



# 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**  $\rightsquigarrow$  Portierung für andere Programmiersprachen

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

