Verlässliche Echtzeitsysteme

Fallstudie: Reaktorschutzsystem

Wintersemester 2024/25

Peter Wägemann

Lehrstuhl für Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

https://sys.cs.fau.de

Funktionale Sicherheit @ Siemens

- Was ist eine Industriesteuerung?
  - Reliability, Maintainability, Availability, Safety, Security, ...
- Functional Safety in Industrieanlagen
  - Risikoanalyse, Safety Integrity Level (SIL), Maschinenverordnung, Der Faktor Mensch
- Komponenten
  - Sichere Sensoren und Aktoren
  - Sichere Steuerungen
  - Antriebe mit integrierten Sicherheitsfunktionen
  - Programmierung und Konfiguration
- Funktional sichere Kommunikation / PROFIsafe
  - Black Channel vs. White Channel
  - Generisches Fehlermodell
  - Maßnahmen
  - Evaluation und Sicherheitsnachweis

Gliederung

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

Hinweise: Gefahren der Atomkraft

- Einsatz von Atomkraft ist problematisch
  1. **Endlagerung** ungelöst (Bundesgesellschaft für Endlagerung bge.de)
     - Halbwertszeiten von teilweise über einer Million Jahren
     - BGE: Suche nach Standort mit bestmöglicher Sicherheit für eine Million Jahre für die hochradioaktiven Abfälle in Deutschland
     - enorme **Langzeitfolgen der Technologie**
  2. **technische Defekte** (z.B. Tschernobyl 1986, Fukushima 2011)
- Google: Investition in Atomreaktoren, um KI-Tech. zu unterstützen[1]
- Abschaltung der letzten Kernkraftwerke in Deutschland: 15. April 2023
- Existenz alternativer Technologien[2]
- Reaktorschutzsystem dient im Rahmen der VEZS-Lehrveranstaltung als **Beispiel für sicherheitkritische Systeme**

[1] https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/google-kairos-power-nuclear-energy-agreement/

[2] Fraunhofer ISE (15. April 2024): Ein Jahr ohne Kernkraft: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2024/1124_ISE_d_PI_Bilanz_Atomausstieg.pdf

Sizewell B

Der derzeit einzige Druckwasserreaktor in Großbritannien

(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 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

Das Reaktorschutzsystem

Einzige Aufgabe: Fehlertoleranz

- ☞ Das Reaktorschutzsystem: Der kritische Kern der Leittechnik
  - ***Zweck:*** Durchführung einer *Reaktorschnellabschaltung (RESA)*
    - Auch *SCRAM*[3], *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
    - → Einschießen der *Steuerstäbe* (engl. *control rod*) in den Reaktorkern
      - *Normalbetrieb: Magnete/Motoren pressen gegen vorgespannte Federn*
      - → *Physik der Mechanik* funktioniert auch bei Stromausfall
    - Aktive Maßnahmen für Betrieb notwendig, sonst Schnellabschaltung (ähnlich Bewegungslosmelder)
- ⚠ **Sicherheitsanforderung**: **fail-operational**

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

[3] safety cut rope axe man

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* & *Steuerstäben*
  - *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
    - Reaktor nur zur Revision und Wiederbefüllung heruntergefahren
    - → Diese Revisionsintervalle betragen typischerweise *18 Monate*
- *Zulässige Ausfallwahrscheinlichkeiten* des PPS
  - Failure upon demand (PFD) $\rightsquigarrow f/d$
  - 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$100 000 Jahre)

☞ 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 d. Systeme hat Auslösung d. Sicherheitsfunktionen zur Folge

Aufbau des primären Schutzsystems

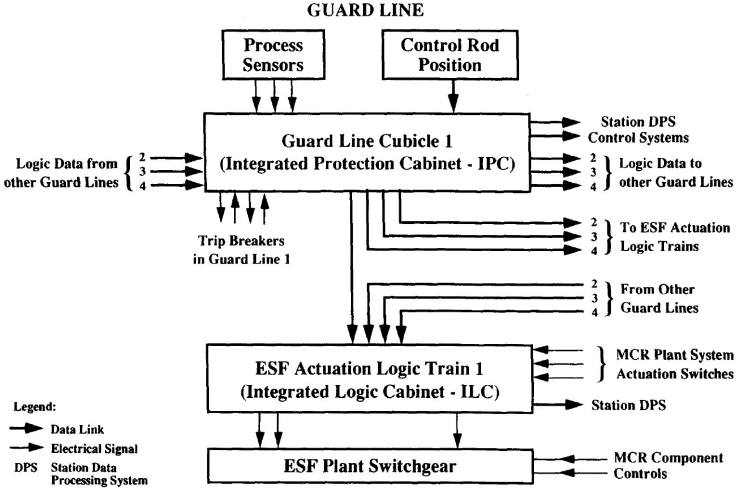
- *4-fach redundante Sicherheitsleittechnik*
  - Redundanz umfasst jeweils Sensorik, Berechnung und Aktuatoren
  - → Die Replikation umfasst den *kompletten Kontrollpfad* (engl. *guardlines*)
  - Einzelne Redundanzen sind *räumlich separiert* (über Gelände)
  - Aufstellorte der Kontrollrechner, Kabelkanäle, Stromversorgung, …
  - → Vermeidung von Gleichtaktfehlern durch Umwelteinflüsse
- *Unabhängige Arbeitsweise* der einzelnen Replikate
  - Sie bestimmen eigenständig ob eine RESA vonnöten ist
  - → Durchführung der RESA wird durch *Mehrheitsentscheid* ermittelt
  - Jedes Replikat führt den Mehrheitsentscheid selbst durch
  - Logik des Mehrheitsentscheids bezieht sich auf einen Wahrheitswert
  - → Implementierung durch einen *dedizierten, diskreten Schaltkreis*

⚠ Notwendige Kommunikation erfolgt über ***optische Medien***

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

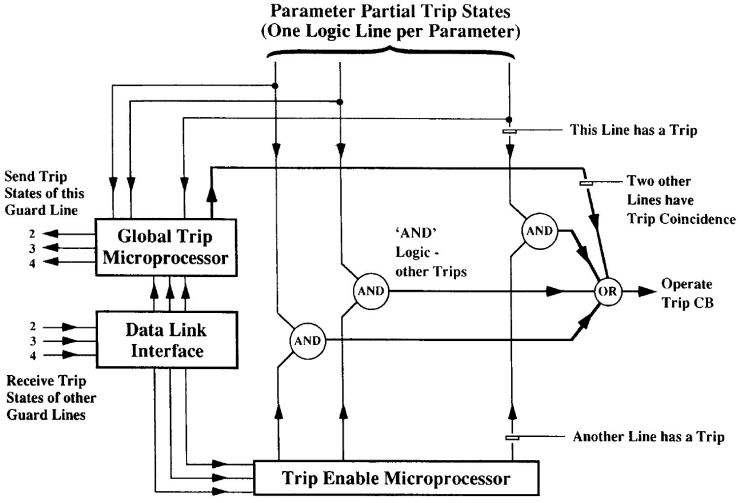
Eine Guardline des primären Schutzsystems

Quelle Grafik: [3]



Implementierung des Mehrheitsentscheids

Quelle Grafik: [3]



Softwareverifikation

- Verifikation und Validierung bestand aus verschiedenen Aktivitäten:

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

  Independent Design Assesment Nuclear Electric
  - Überprüfung der Anforderungen 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 Personenjahre**

- Entwicklung durch Royal Signals and Radar Establishment
  - Forschungseinheit des britischen Verteidigungsministeriums
  - Stationierung in Malvern (Worcestershire) $\rightsquigarrow$ 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/mathematische Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgaben

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

Softwareverifikation mit MALPAS [5]

- *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*
    - Verwendung von Hauptprozessor und Hilfsprozessoren
    - Anwendung, Betriebssystem, Kommunikation, Selbsttest, …
- *Referenz:* Anforderungs- und Entwurfsdokumente
  - *Software Design Requirements* (SDR)
    - Abstrakte Beschr. der von Software zu erbringenden *Funktionalität*
  - *Software Design Specification* (SDS)
    - *Architekturelle* Umsetzung der funktionalen Anforderungen
    - Enthält detaillierte Information zur Funktion einzelner 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 [5] (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

→ 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*[4]: 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 sehr mühsam ⇝ alternative Formulierungen oft nötig
    - Ungünstiger, schwer zu vereinfachender Ausdruck ließ Analyse scheitern

    → Neuformulierung wies der algebraischen Vereinfachung den Weg

[4] Satisfiability Modulo Theories: `https://en.wikipedia.org/wiki/Satisfiability_modulo_theories`

Qualitätssicherung und Ergebnisse

- Problem: korrekte Formulierung von Vor-/Nachbedingungen
  1. *Standardisierter Analyseprozess* (ISO 9001)
  2. *Detaillierte Vorgehensbeschreibung* für 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

→ 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 (z.B. Fehlalarm)	⇝ ca. 52%

Äquivalenz von Quell- und Binärcode [4]

Traue Nichts und Niemandem, …auch nicht dem Übersetzer!

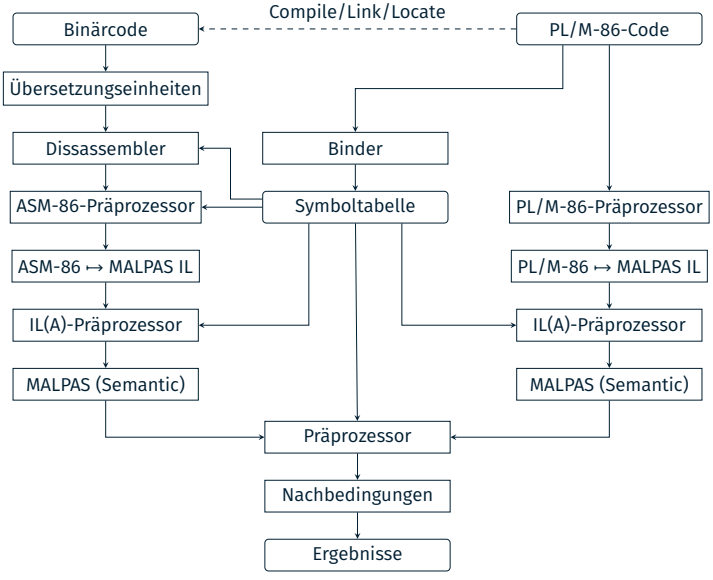
- Problem: Passt der Binärcode auch zum Quellcode?
  - Was hilft der korrekteste Quellcode, wenn der Übersetzer fehlerhaft ist?
  - Bewiesenermaßen korrekte Übersetzer existierten damals nicht
    - Nimmt man Assemblierer und Binder dazu, ist das auch heute noch so
  - Rekonstruktion des Quellcodes aus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

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

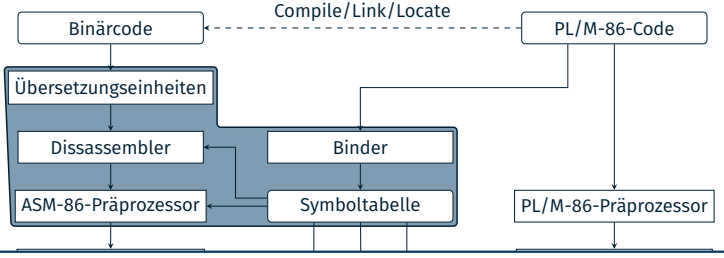
  - Übersetzer PL/M-86 $\rightsquigarrow$ MALPAS IL existiert bereits
  - Übersetzer Binärcode $\rightsquigarrow$ MALPAS IL entwickelt man noch
    - Rekonstruktion der Übersetzungseinheiten, Disassemblierung, …
  - Vergleich $\mapsto$ Verifikation der Nachbedingungen mit MALPAS
    - Quellcode $\rightsquigarrow$ 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

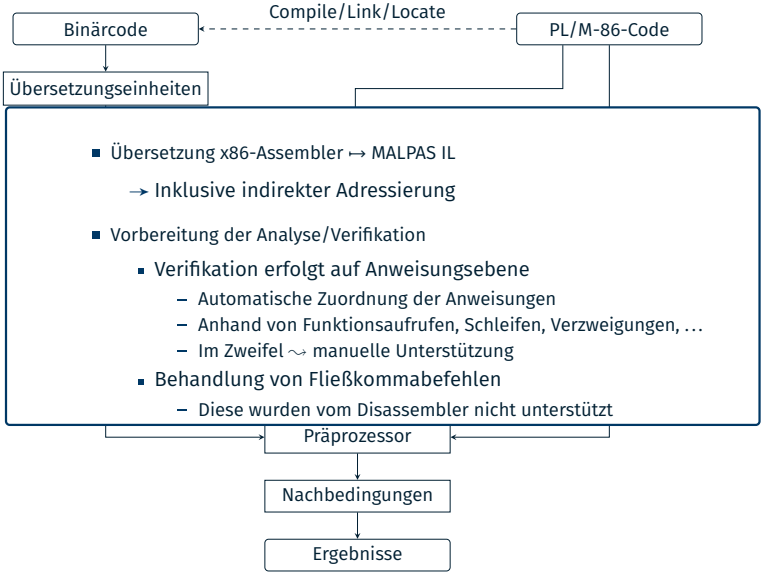


Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode

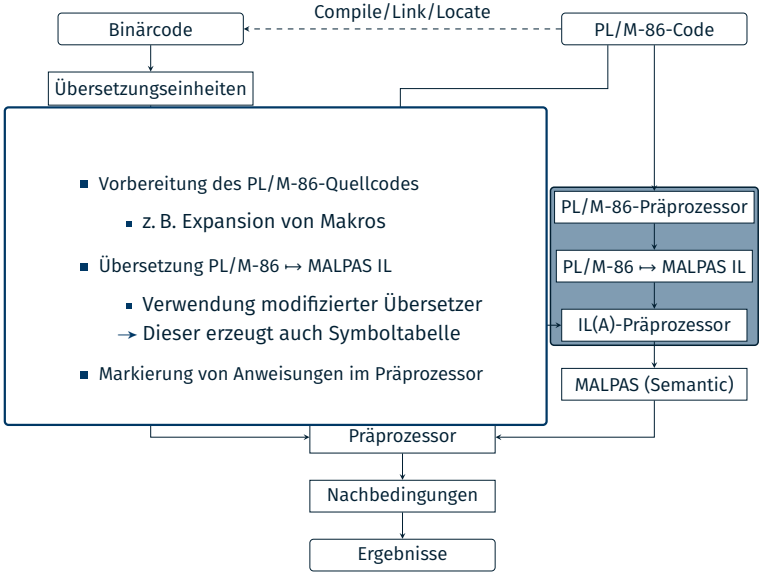


- Rekonstruktion von Text- und Datensektionen
  - → Ursprüngliche Übersetzungseinheiten
- Dissassemblierung des Binärcodes
- Aufbereitung des Assemblercodes
  - Unterstützt durch Symboltabelle (aus Quelltext)
  - Bestimmung von globalen Variablen aus Adressen
  - Bestimmung von Funktionsparametern
 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

Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode

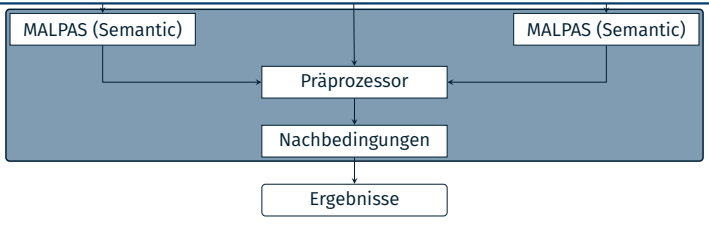


Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode



Ablauf des Vergleichs: Quell- vs. Binärcode

- Funktionale 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 nicht vollständig durchgehalten (also unsound)
  - Insbesondere war 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

CompCert formally-verified C compiler

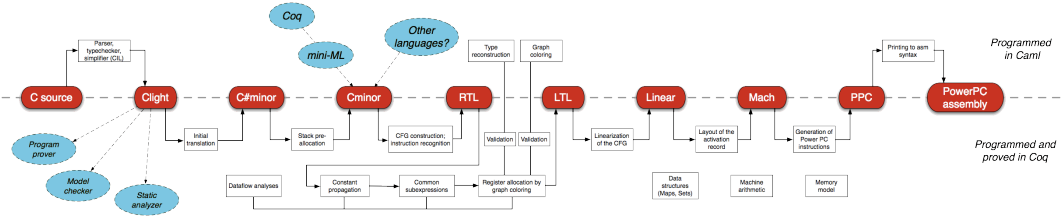


Abbildung 1: CompCert [2] Ablauf[5]

- Verwendung des Theorembeweiser Coq (in CAML implementiert)
- Zwischensprache (z.B. RTL, Reduced Transfer Language)
- Implementierung mittels Caml
  - starkes, statisches Typsystem
  - funktionales Programmierparadigma

[5] https://www.absint.com/compcert/structure.htm

Gliederung

Zusammenfassung

Sizewell B $\rightsquigarrow$ primäres Reaktorschutzsystem
- Einziger Zweck: sichere Abschaltung des Reaktors

Redundanz $\rightsquigarrow$ Absicherung gegen Systemausfälle
- 4-fach redundante Systeme
- *digitale, analoge, mechanische* Komponenten

Diversität $\rightsquigarrow$ Abfedern von Software-Defekten
- Unterschiedliche Hardware und Software

Isolation $\rightsquigarrow$ Abschottung der einzelnen Replikate
- Technisch $\mapsto$ optische Kommunikationsmedien
- Zeitlich $\mapsto$ nicht-gekoppelte, eigenständige Rechner
- Räumlich $\mapsto$ verschiedene Aufstellorte und Kabelrouten

Verifikation $\rightsquigarrow$ umfangreiche statische Prüfung von Software
- Vielschichtiger Prozess, Betrachtung von Quell- und Binärcode

Literaturverzeichnis (1)

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

[2] Leroy, X. ; Blazy, S. ; Kästner, D. ; Schommer, B. ; Pister, M. ; Ferdinand, C. :
CompCert – A Formally Verified Optimizing Compiler.
In: *Proceedings of the 8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS '16)*, 2016

Literaturverzeichnis (2)

[3] 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

[4] 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

Literaturverzeichnis (3)

[5] 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