

# Dynamic Analysis of Concurrent Go-Programs

Bachelorarbeit - Kolloquium

Erik Kassubek

Institut für Informatik  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

15.02.2023

- Go-Routine
  - leichtgewichtiger Thread
  - ermöglicht Nebenläufigkeit
- Mutexe (Locks)
  - Synchronisationsmechanismus
  - Löst das Problem des gegenseitigen Ausschluss
- Channel
  - Synchronisationsmechanismus
  - Ermöglichen Kommunikation zwischen Routinen

```
func main() {  
    var m sync.Mutex  
  
    go func() {  
        m.Lock()  
        a() // kritischer Abschnitt  
        m.Unlock()  
    }()  
  
    m.Lock()  
    b() // kritischer Abschnitt  
    m.Unlock()  
}
```

# Mutex

```
func main() {  
    var m sync.Mutex  
  
    go func() {  
        m.Lock()  
        a() // kritischer Abschnitt  
        m.Unlock()  
    }()  
  
    m.Lock()  
    b() // kritischer Abschnitt  
    m.Unlock()  
}
```

```
func main() {  
    var m sync.RWMutex  
  
    go func() {  
        m.RLock()  
        read()  
        m.RUnlock()  
    }()  
  
    go func() {  
        m.RLock()  
        read()  
        m.RUnlock()  
    }()  
  
    m.Lock()  
    write()  
    m.Unlock()  
}
```

# Mutex

```
func main() {  
    m sync.Mutex  
    n sync.Mutex  
  
    go func() {  
        m.Lock()  
        n.Lock()  
        n.Unlock()  
        m.Unlock()  
    }()  
  
    n.Lock()  
    m.Lock()  
    m.Unlock()  
    n.Unlock()  
}
```

# Mutex

```
func main() {  
    m sync.Mutex  
    n sync.Mutex  
  
    go func() {  
        m.Lock()  
        n.Lock()  
        n.Unlock()  
        m.Unlock()  
    }()  
  
    n.Lock()  
    m.Lock()  
    m.Unlock()  
    n.Unlock()  
}
```

```
func main() {  
    var m sync.Mutex  
  
    m.Lock()  
    m.Lock()  
}
```

# Channel - Unbuffered

```
func main() {  
    c := make(chan int)  
  
    go func() {  
        c <- 1  
    }()  
  
    <- c  
}
```

# Channel - Unbuffered

```
func main() {  
    c := make(chan int)  
  
    go func() {  
        c <- 1  
    }()  
  
    <- c  
}
```

```
func main() {  
    c := make(chan int)  
  
    go func() {  
        c <- 1  
    }()  
  
    go func() {  
        <- c  
    }()  
  
    <- c  
}
```



# Channel - Buffered

```
func main() {  
    c := make(chan int, 2)  
    d := make(chan int)  
  
    go func() {  
        c <- 1  
        c <- 1  
        d <- 1  
    }()  
  
    <- d  
    <- c  
    <- c  
}
```

## Channel - Buffered

```
func main() {  
    c := make(chan int, 2)  
    d := make(chan int)  
  
    go func() {  
        c <- 1  
        c <- 1  
        d <- 1  
    }()  
  
    <- d  
    <- c  
    <- c  
}
```

```
func main() {  
    c := make(chan int, 2)  
    d := make(chan int)  
  
    go func() {  
        c <- 1  
        d <- 1  
        c <- 1  
    }()  
  
    <- c  
    <- c  
    <- d  
}
```

- Schließt Channel  $\Rightarrow$  keine weiter Kommunikation möglich
- Send auf geschlossenem Channel  $\Rightarrow$  Laufzeitfehler

# Channel - Close

- Schließt Channel  $\Rightarrow$  keine weitere Kommunikation möglich
- Send auf geschlossenem Channel  $\Rightarrow$  Laufzeitfehler

```
func main() {  
    c := make(chan int)  
  
    go func() {  
        c <- 1  
    }()  
    go func() {  
        <- c  
    }()  
    close(c)  
}
```

# Channel - Select

- Wartet gleichzeitig auf mehrere Channel-Operationen
- Erste ausführbare Funktion wird ausgeführt
- Wenn mehrere gleichzeitig  $\Rightarrow$  Zufälliger Case
- Ohne Default  $\Rightarrow$  blockiert

```
go func() {  
    select {  
        case c <- 1:  
            func1()  
        case a := <- d:  
            func2(a)  
        default:  
            func3()  
    }  
}()
```

- Entwicklung und Implementierung eines Detektors zur
  - Erkennung von problematischen Situationen
  - Analyse von problematischen Situationen

- Entwicklung und Implementierung eines Detektors zur
  - Erkennung von problematischen Situationen
  - Analyse von problematischen Situationen
- Dynamische Analyse
  - Instrumentierung
  - Programm (mehrfach) ausführen
  - Verhalten aufzeichnen  $\Rightarrow$  Trace
  - Trace analysieren

- Speichert Ablauf der notwendigen Informationen
- Ein Trace pro Routine
- Ermöglicht Rekonstruktion des Programmablaufs



- Veränderung des Programmcodes
- Ersetze Mutexe/Channel durch eigene Objekte
- Funktionen auf Objekten:
  - Ausführung der eigentlichen Operation
  - Aufzeichnung der Operation
- Aufzeichnung von Fork
- Aufzeichnung / Kontrolle über Select

- `signal(ts, nr)` in Trace
- Erzeuge neuen Trace
- Starte der neuen Routine
- `wait(ts, nr)` in neuen Trace
- Ausführen der Routine

- (Try)(R)Lock:
  - `lock(ts, mu.id, <-|t|r|tr>, <0|1>)`
  - Führe Lock aus
- (Try)(R)Unlock:
  - `unlock(ts, mu.id)` in Trace
  - Führe Lock aus

- Send: ( $c \leftarrow i$ ):
  - $\text{pre}(ts, c.\text{id}, \text{true})$  in Trace
  - $c \leftarrow \{i, r.\text{id}, ts\}$
  - $\text{post}(ts', c.\text{id}, \text{true}, ts)$  in Trace
- Receive ( $a := \leftarrow c$ ):
  - $\text{pre}(ts, c.\text{id}, \text{false})$  in Trace
  - $\{i, \text{id\_send}, ts\_send\} := \leftarrow c$
  - $\text{post}(ts', ch.\text{id}, \text{false}, \text{id\_send}, ts\_send)$  in Trace
  - $a := i$
- Close ( $\text{close}(c)$ )
  - $\text{close}(ts, c.\text{id})$  in Trace
  - $\text{close}(c)$

# Instrumentierung - Select

```
go func() {  
    select {  
        case a := <- c:  
            func1(a)  
        default:  
            func2()  
    }  
}()
```

# Instrumentierung - Select

```
goChan.PreSelect(false, c.GetIdPre(true),
                  d.GetIdPre(true))
switch goChan.FetchOrder[1] {
case 0:
    select {
    case sel_VIBzgbaiCM := <-c.GetChan():
        c.Post(true, sel_VIBzgbaiCM)
        a := sel_VIBzgbaiCM.GetInfo()
        func1(a)
    case <-time.After(time.Second):
        ....
    }
}
```

```
case 1:
    select {
    default:
        goChan.PostDefault()
        func2()
    case <-time.After(time.Second):
        ....
    }
default:
    ....
}
```

- Funktionen in Package implementiert
- Automatisierte Ersetzung im Programmcode
  - Traversierend des AST
  - Veränderung des AST wenn notwendig
- Erzeugung einer neuen Main-Datei zur Ausführung

- Mehrfache Ausführung für verschiedene Select-Pfade
- Zufällige Wahl der Pfade (ohne Doppelung)
- Analyse nach jeder Ausführung
- Konsolidierung der Ergebnisse am Ende
- Automatischer Abbruch wenn Laufzeit zu lange



- Suche nach doppeltem Locking
  - Lock-Operation als letztes Element in Trace
  - Traversiere Trace rückwärts
  - Wenn Lock auf selben Mutex vor Unlock auf selben Mutex  $\Rightarrow$  doppeltes Locking
  - Kein Deadlock wenn beide RLock

- Suche nach zyklischem Locking
  - Aufbau von Lock-Bäumen
  - Suchen nach Zyklen in Lock-Bäumen

# Detektion von Deadlocks: Lock-Bäume

```
func lockTree(){  
    var x,y,z sync.Mutex
```

```
// R1
```

```
go func(){  
    y.Lock()  
    z.Lock()  
    z.Unlock()  
    x.Lock()  
    x.Unlock()  
    y.Unlock()  
}
```

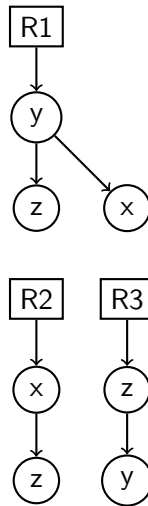
```
// R2
```

```
go func(){  
    x.Lock()  
    z.Lock()  
    z.Unlock()  
    x.Unlock()  
}
```

```
// R3
```

```
go func(){  
    z.Lock()  
    y.Lock()  
    y.Unlock()  
    z.Unlock()  
}
```

```
}
```



# Detektion von Deadlocks: Lock-Bäume

```
func lockTree(){  
    var x,y,z sync.Mutex
```

```
// R1
```

```
go func(){  
    y.Lock()  
    z.Lock()  
    z.Unlock()  
    x.Lock()  
    x.Unlock()  
    y.Unlock()  
}
```

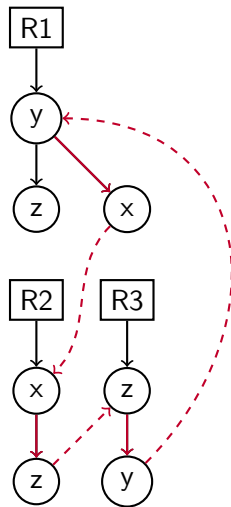
```
// R2
```

```
go func(){  
    x.Lock()  
    z.Lock()  
    z.Unlock()  
    x.Unlock()  
}
```

```
// R3
```

```
go func(){  
    z.Lock()  
    y.Lock()  
    y.Unlock()  
    z.Unlock()  
}
```

```
}
```



- Zyklus nur gültig wenn:
  - keine zwei R-Lock hintereinander
  - Locks in Zyklus dürfen keine gemeinsamen Vorfahren haben, außer beide Vorfahren sind RLock

- Suche nach potenziellem Ablauf mit
  - Send/Receive ohne Kommunikationspartner
  - potenzielles Send auf geschlossenem Channel

- Berechne Pre- und Post-Vectorclocks
- Bestimme vectorclock-annotated Trace
- Bestimme Operationen mit unvergleichbaren Vectorclocks
- Betrachte potenzielle Abläufe
- Suche nach Send/Receive ohne Kommunikationspartner und Send auf Closed

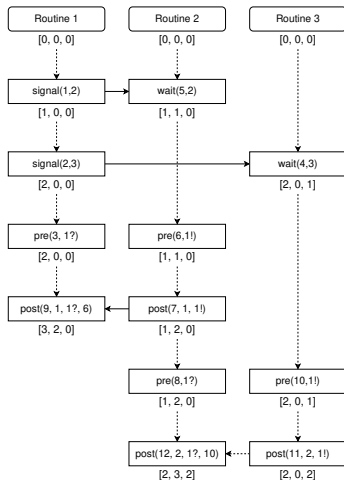
# Analyse - Channel

```
func main() {  
    x := make(chan int)  
  
    go func() {  
        x <- 1  
        <- x  
    }()  
  
    go func() {  
        x <- 1  
    }()  
  
    <-x  
}
```

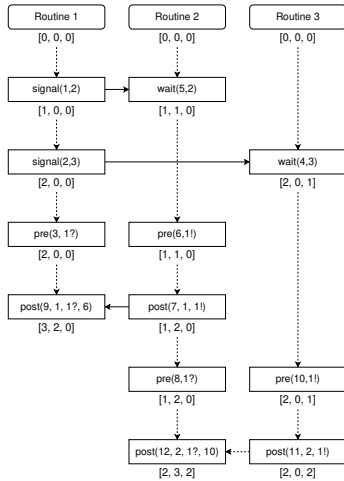


$[[\text{signal}(1, 2), \text{signal}(2, 3), \text{pre}(3, 1?), \text{post}(9, 1, 1?, 6)]$   
 $[\text{wait}(5, 2), \text{pre}(6, 1!), \text{post}(7, 1, 1!), \text{pre}(8, 1?), \text{post}(12, 2, 1?, 10)]$   
 $[\text{wait}(4, 3), \text{pre}(10, 1!), \text{post}(11, 2, 1!)]]$

# Analyse - Channel



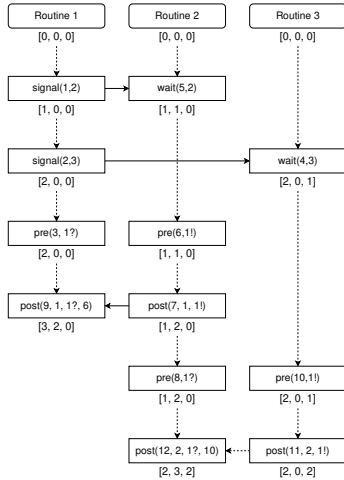
# Analyse - Channel



$$[[[2,0,0]x?[3,2,0]]$$

$$[[1,1,0]x![1,2,0], [1,2,0]x?[2,3,2]]$$

$$[[2,0,1]x![2,0,2]]]$$



$$\begin{aligned}
 & [[2,0,0]x?[3,2,0]] \\
 & [[1,1,0]x![1,2,0], [1,2,0]x?[2,3,2]] \\
 & [[2,0,1]x![2,0,2]]
 \end{aligned}$$

- Für Operation ohne Post:  
Post-VC:  $[\max, \dots, \max]$

- $x$  ist Ursache von  $y$  wenn
  - $x \rightarrow y \Leftrightarrow VC(x) < VC(y) \Leftrightarrow \forall z (VC(x)_z \leq VC(y)_z) \wedge \exists z' (VC(x)_{z'} < VC(y)_{z'})$
- $x$  ist nebenläufig/unvergleichbar mit  $y$  wenn
  - $x || y \Leftrightarrow VC(x) \not\leq VC(y) \Leftrightarrow VC(x) \not\leq VC(y) \wedge VC(y) \not\leq VC(x)$

- Potenzielle Kommunikationspartner auf ungepufferten Channels:
  - Paar von Send-Receive auf selbem Channel
  - Pre- oder Post-Vectorclock unvergleichbar
  - Keine gemeinsamen gehaltenen Mutexe bei Ausführung

- Potenzielle Kommunikationspartner auf ungepufferten Channels:
  - Paar von Send-Receive auf selbem Channel
  - Pre- oder Post-Vectorclock unvergleichbar
  - Keine gemeinsamen gehaltenen Mutexe bei Ausführung
- Potenzielle Kommunikationspartner auf gepufferten Channels:
  - Paar von Send-Receive auf selbem Channel
  - $\#s_{i,<} \leq \#r_{j,<} + \#r_{i,\not<}$
  - $\#s_{i,<} + \#s_{i,\not<} \geq \#r_{j,<}$

# Analyse - Channel

```
func main() {  
    c := make(chan int, 5)  
  
    go func() {  
        c <- 1    // 1  
        c <- 1    // 2  
        c <- 1    // 3  
    }()  
  
    go func() {  
        c <- 1    // 4  
    }()  
  
    <- c          // 5  
    <- c          // 6  
    <- c          // 7  
    <- c          // 8  
}
```



$$\begin{aligned} & [[ [2,0,0] x_1 ? [3,2,0] ] \\ & \quad [ [1,1,0] x_2 ! [1,2,0] , [1,2,0] x_3 ? [2,3,2] ] \\ & \quad [ [2,0,1] x_4 ! [2,0,2] ] ] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [[ [2,0,0] x_1 ?^{[3,2,0]} ] \\ & \quad [ [1,1,0] x_2 !^{[1,2,0]}, [1,2,0] x_3 ?^{[2,3,2]} ] \\ & \quad [ [2,0,1] x_4 !^{[2,0,2]} ] ] \end{aligned}$$
$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$

$$\begin{aligned} & [[2,0,0]x_1?[3,2,0]] \\ & [[1,1,0]x_2![1,2,0], [1,2,0]x_3?[2,3,2]] \\ & [[2,0,1]x_4![2,0,2]] \end{aligned}$$
$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$
$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$

$$\begin{aligned} & [[ [2,0,0] x_1 ?^{[3,2,0]} ] \\ & \quad [ [1,1,0] x_2 !^{[1,2,0]}, [1,2,0] x_3 ?^{[2,3,2]} ] \\ & \quad [ [2,0,1] x_4 !^{[2,0,2]} ] ] \end{aligned}$$
$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$
$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_2! \rightarrow \nexists$$

$$[[[2,0,0]x_1?[3,2,0]]$$
$$[[1,1,0]x_2![1,2,0], [1,2,0]x_3?[2,3,2]]$$
$$[[2,0,1]x_4![2,0,2]]]$$
$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$
$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$
$$x_1? \leftarrow x_2!$$
$$x_3? \leftarrow x_4!$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_2! \rightarrow \text{false}$$

$$[[[2,0,0]x_1?[3,2,0]]$$
$$[[1,1,0]x_2![1,2,0], [1,2,0]x_3?[2,3,2]]$$
$$[[2,0,1]x_4![2,0,2]]]$$
$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$
$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_2! \rightarrow \downarrow$$
$$x_1? \leftarrow x_2!$$
$$x_3? \leftarrow x_4!$$
$$x_1? \leftarrow x_4!$$
$$x_3? \leftarrow \downarrow$$

- Potenzielles Send auf Closed Channel:
  - Pre- oder Post-VC von Send unvergleichbar mit VC von Close
  - Wenn Send ist Ursache von Close  $\Rightarrow$  Send auf Close tritt während Durchlauf auf  $\Rightarrow$  erzeugt Laufzeitfehler

- Dynamischer Detektor zur Erkennung von Concurrency-Bugs
  - Mutex-Bugs mit Lock-Bäumen
  - Channel-Bugs mit Vectorclock
- Implementierung für Instrumenter und Detektor:
  - <https://github.com/ErikKassubek/GoChan>



- [1] M. Sulzmann und K. Stadtmüller, „Two-Phase Dynamic Analysis of Message-Passing Go Programs based on Vector Clocks,” *CoRR*, Jg. abs/1807.03585, 2018. arXiv: 1807.03585. Adresse: <http://arxiv.org/abs/1807.03585>.
- [2] Z. Liu, S. Zhu, B. Qin, H. Chen und L. Song, „Automatically Detecting and Fixing Concurrency Bugs in Go Software Systems,” in *Proceedings of the 26th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Ser. ASPLOS '21, Virtual, USA: Association for Computing Machinery, 2021, S. 616–629, ISBN: 9781450383172. DOI: 10.1145/3445814.3446756. Adresse: <https://doi.org/10.1145/3445814.3446756>.
- [3] Z. Liu, S. Xia, Y. Liang, L. Song und H. Hu, „Who Goes First? Detecting Go Concurrency Bugs via Message Reordering,” in *Proceedings of the 27th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Ser. ASPLOS '22, Lausanne, Switzerland: Association for Computing Machinery, 2022, S. 888–902, ISBN: 9781450392051. DOI: 10.1145/3503222.3507753. Adresse: <https://doi.org/10.1145/3503222.3507753>.
- [4] S. Taheri und G. Gopalakrishnan, „Automated Dynamic Concurrency Analysis for Go,” *arXiv e-prints*, arXiv:2105.11064, arXiv:2105.11064, Mai 2021. arXiv: 2105.11064 [cs.DC].
- [5] S. Taheri und G. Gopalakrishnan, „GoAT: Automated Concurrency Analysis and Debugging Tool for Go,” in *2021 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC)*, 2021, S. 138–150. DOI: 10.1109/IISWC53511.2021.00023.
- [6] The Go Team, *Go Documentation: trace*, <https://pkg.go.dev/cmd/trace>, 2022.
- [7] J. Zhou, S. Silvestro, H. Liu, Y. Cai und T. Liu, „UNDEAD: Detecting and preventing deadlocks in production software,” in *2017 32nd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)*, Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, Nov. 2017, S. 729–740. DOI: 10.1109/ASE.2017.8115684.
- [8] P. Joshi, C.-S. Park, K. Sen und M. Naik, „A Randomized Dynamic Program Analysis Technique for Detecting Real Deadlocks,” *SIGPLAN Not.*, Jg. 44, Nr. 6, S. 110–120, Juni 2009, ISSN: 0362-1340. Adresse: <https://doi.org/10.1145/1543135.1542489>.

- [9] C. J. Fidge, „Timestamps in Message-Passing Systems That Preserve the Partial Ordering,“, 1988.
- [10] The Go Team, Go, <https://go.dev/>, 2022.
- [11] R. Agarwal, L. Wang und S. D. Stoller, „Detecting Potential Deadlocks with Static Analysis and Run-Time Monitoring,“ in *Hardware and Software, Verification and Testing*, S. Ur, E. Bin und Y. Wolfsthal, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 191–207, ISBN: 978-3-540-32605-2.
- [12] T. Yuan, G. Li, J. Lu, C. Liu, L. Li und J. Xue, „GoBench: A Benchmark Suite of Real-World Go Concurrency Bugs,“ in *2021 IEEE/ACM International Symposium on Code Generation and Optimization (CGO)*, <https://github.com/timmyyuan/gobench>, 2021, S. 187–199. DOI: 10.1109/CGO51591.2021.9370317.
- [13] A. Gerrand, *Share Memory By Communicating*, <https://go.dev/blog/codelab-share>, 2010.
- [14] B. Ray, D. Posnett, V. Filkov und P. Devanbu, „A large scale study of programming languages and code quality in github,“ *Proc. FSE 2014*, S. 155–165, Nov. 2014. DOI: 10.1145/2635868.2635922.