

Bachelorprojekt

im Studiengang
Bachelor of Science in Informatik

Dynamic Deadlock Detection in Go

Erik Daniel Kassubek

26.07.2022

Institut für Informatik
Technische Fakultät
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Betreuer

Prof. Dr. Thiemann, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Prof. Dr. Sulzmann, Hochschule Karlsruhe

Abstract

Dieses Projekt betrachtet Detektoren zur Detektion von Ressourcen-Deadlocks in Go. Dazu wird ein bereits implementierter Detektor „Go-Deadlock“ betrachtet und anschließend ein eigener Detektor entwickelt. Dieser Bericht beschreibt die Funktionsweise und Implementierung beider Detektoren und vergleicht sie im Bezug auf ihre Fähigkeit Deadlocks zu erkennen, bzw. False-Positives zu vermeiden. Dies geschieht sowohl durch die Betrachtung von Standard-Situationen als auch durch Anwendung auf tatsächlich verwendete Programme. Außerdem wird der Laufzeit-Overhead der beiden Detektoren betrachtet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
2	Theoretischer Hintergrund	5
2.1	Locks, Mutex	5
2.2	Deadlock	5
2.3	Deadlocks-Detection	6
2.4	UNDEAD	9
3	Review für go-deadlock	11
3.1	Doppeltes Locking	11
3.2	Zyklisches Locking	11
3.3	Timeout	12
3.4	False Negatives / Positives	13
4	Implementierung des Deadlock-Detektors „Deadlock-Go “	15
4.1	Aufbau der Datenstrukturen	16
4.2	(R)-Lock, (R)-TryLock, (R)-Unlock	18
4.3	Periodische Detektion	19
4.4	Abschließende Detektion	20
4.5	Meldung gefundener Deadlocks	20
4.6	Optionen	22
5	Analyse von Deadlock-Go und Vergleich mit go-deadlock (sasha-s)	23
5.1	Funktionale Analyse	23
5.2	Zeitliche Analyse	26
6	Zusammenfassung	28
	Quellen	29
	Referenzen	29

1 Einführung

Deadlocks sind häufig die Ursache, wenn ein Programm nicht mehr reagiert[1]. Deadlocks entstehen, wenn sich mehrere Routinen in einem nebenläufigen Programm zyklisch blockieren. Locks, welche zu den häufigsten elementaren Methoden zur Synchronisierung in nebenläufigen Programmen gehören, können leicht zu solchen Situationen führen [2]. Dabei warten mehrere Routinen zyklisch auf die Freigabe eines oder mehrerer Locks, ohne dass die Möglichkeit besteht, dass eines der Locks freigegeben wird. Eine weitere Situation, bei denen es zu Deadlocks kommen kann besteht darin, dass eine Routine ein Lock beansprucht, während es das selbe Lock bereits hält.

Neben solchen Ressourcen-Deadlock gibt es noch weitere Möglichkeiten Deadlocks zu erzeugen, z.B. Kommunikations-Deadlocks, die im folgenden aber nicht betrachtet werden sollen.

Da Deadlocks häufig nur in sehr bestimmten Fällen auftreten, kann es passieren, dass solche Situationen während der Entwicklung eines Programms nicht bemerkt werden. Dies führt dazu, dass in einer Stichprobe in vier open-source Anwendungen (MySQL, Apache, Mozilla und Open-Office) etwa 30% aller Concurrency-Probleme auf Deadlocks zurückzuführen waren [3].

Go besitzt die s.g. Go Runtime Deadlock Detection um Deadlocks zu erkennen. Dazu zählt Go die nicht blockierten Go-Routinen. Fällt dieser Wert auf 0, nimmt Go an, dass es zu einem Deadlock gekommen ist und bricht das Programm mit einer Fehlermeldung ab [4]. Allerdings kann dies nur tatsächlich auftretende Deadlocks erkennen. Eine Erkennung ob in dem Code ein Deadlock potentiell möglich ist findet hierbei nicht statt. Die Detektion erkennt auch nur Deadlocks, wenn sie alle Routinen betreffen. Wenn es Routinen gibt, die sich zyklisch blockieren, andere Routinen aber nicht blockiert sind wird solch eine Situation nicht erkannt.

Da das Auftreten von Deadlocks sehr stark von dem tatsächlichen Ablauf eines Programms abhängt, kann ein Programm, bzw. eine Implementierung von Locks, welche potentielle Deadlocks erkennen kann sehr hilfreich sein. Die Betrachtung solcher Programme stellt den Hauptteil dieses Projekts da. Dabei werden dynamische Programme betrachtet, also Programme, die während der Laufzeit des eigentlichen Programs nach Deadlocks suchen. Diese speichern Abhängigkeiten zwischen Lock-Operationen in Lock-Graphen oder Lock-Bäumen, und versuchen aus diesen auf Deadlocks zu schließen.

Der Bericht ist folgendermaßen aufgebaut: Zuerst wird auf den theoretischen Hintergrund bezüglich Locks und Deadlocks, sowie die Erkennung von potentiellen Deadlocks mit Lock-Graphen und Lock-Bäumen eingegangen. Anschließend wird die Funktionsweise eines Detektors für Deadlocks “go-deadlock” [5] analysiert, welcher auf Lock-Graphen basiert. Der Hauptteil des Projekts beschäftigte sich mit der Entwicklung und Implementierung eines auf Lock-Bäumen basierten Deadlock-Detektors für Go. Dieser basiert zum Teil auf dem UNDEAD Algorithmus [2]. Er wurde allerdings um weitere Funktionen, wie z.B. RW-Locks erweitert. Dessen Aufbau und Funktionsweise wird in Kapitel 4 beschrieben. Zum Schluss werden die beiden betrachteten Detektoren bezüglich ihrer Fähigkeit potentielle Deadlocks bzw. Situationen, welche nicht zu Deadlocks führen können korrekt zu erkennen. Außerdem wird der Einfluss der Detektoren auf die Laufzeit der Programme analysiert.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Locks, Mutex

Im folgenden werden die Begriffe Lock und Mutex synonym verwendet.

Es gibt Situationen in nebenläufigen Programmen, in denen sich verschiedene Routinen nicht gleichzeitig in bestimmten Bereichen aufhalten dürfen.

Locks gehören zu den am weitesten verbreiteten Mechanismen um solche kritische Bereiche in einem Programm zu schützen [2]. Möchte eine Routine R_1 nun in einen Bereich eintreten, der durch ein Lock, welches bereits von einer anderen Routine R_0 gehalten wird, geschützt ist, muss sie so lange vor dem Lock warten, bis das Lock von R_0 wieder frei gegeben wird.

2.1.1 Operationen

Auf Locks sind in der Regel die drei folgenden Operationen definiert.

- Lock: Eine Routine R versucht das Lock zu beanspruchen. Wird das Lock von keiner Routine gehalten, wird das Lock geschlossen, so dass andere Routinen es nicht schließen können, bis es von R wieder frei gegeben wird. Ist es nicht möglich das Lock zu beanspruchen, da es bereits von einer anderen Routine gehalten wird, muss R so lange von der Operation warten, bis eine Beanspruchung erfolgreich ist.
- TryLock: TryLock unterscheidet sich von Lock dadurch, dass die Routine, wenn es nicht möglich ist, das Lock zu beanspruchen nicht vor der Operation wartet, sondern weiter ausgeführt wird, ohne das Lock geschlossen zu haben. Die Operation gibt außerdem zurück, ob die Beanspruchung erfolgreich war.
- Unlock: Unlock gibt ein Lock wieder frei. Es kann nur von der Routine frei gegeben werden, die es geschlossen hat.

2.1.2 RW-Locks

Neben den allgemeinen Locks gibt es noch Reader-Writer Locks. Diese haben im Vergleich zu den allgemeinen Locks zwei Lock und TryLock Operation, R-Lock und W-Lock (analog für Try-Lock). W-Lock, im folgenden einfach Lock genannt funktioniert identisch zu Lock in den allgemeinen Locks. Bei R-Locks hingegen ist es, anders als bei Lock, möglich dass das Lock gleichzeitig von verschiedenen Routinen gehalten wird (oder mehrfach von der selben Routine), solange alle diese Beanspruchungen durch R-Lock erfolgt sind. Es ist nicht möglich ein Lock gleichzeitig durch R-Lock und Lock zu schließen.

2.2 Deadlock

2.2.1 Zyklischer Deadlock

Ein Deadlock ist ein Zustand in einem nebenläufigen Programm, also einem Programm, in dem mehrere Routinen gleichzeitig ausgeführt werden, wobei alle laufenden Routinen zyklisch auf die Freigabe von Ressourcen warten. Ein solcher Deadlock kann nun entstehen, wenn alle Routinen vor einem Lock warten müssen, wobei die Locks immer von einer anderen Routine gehalten werden.

Man betrachte dazu das folgende Beispiel [6] mit den Locks x und y und den beiden Routinen

R_1 und R_2 , welches den Ablauf eines Programms darstellt. $acq_i(l)$ bezeichnet dabei, dass das Lock l von der Routine R_i beansprucht und $rel_i(l)$, dass l von R_i wieder freigegeben wird.

	R_1	R_2
1.	$acq_1(y)$	
2.	$acq_1(x)$	
3.	$rel_1(x)$	
4.	$rel_1(y)$	
5.		$acq_2(x)$
6.		$acq_2(y)$
7.		$rel_2(y)$
8.		$rel_2(x)$

Da R_1 und R_2 gleichzeitig ablaufen ist es möglich, dass sich die Reihenfolge der einzelnen Operationen zwischen den Routinen ändert (die Reihenfolge innerhalb einer Routine ist immer gleich). Damit ist für das Programm, welches zu dem obigen Ablauf geführt hat, auch folgender Ablauf möglich.

	R_1	R_2
1.	$acq_1(y)$	
5.		$acq_2(x)$
2.	$B_2 - acq_1(x)$	
6.		$B_1 - acq_2(y)$

Dabei impliziert $B_j - acq_i(l)$, dass $acq_i(l)$ nicht ausgeführt werden konnte, bzw. dass die Routine R_i vor dem Lock halten muss, da das Lock bereits von Routine R_j beansprucht wird. In diesem Beispiel wartet nun R_1 darauf, dass das Lock x freigegeben wird und R_2 wartet darauf, dass Lock y freigegeben wird. Da nun alle Routinen warten müssen, bis ein Lock freigegeben wird, allerdings keine der Routinen weiter laufen kann um ein Lock zu öffnen, kommt es zum Stillstand. Dieser Zustand wird als zyklischer Deadlock bezeichnet.

2.2.2 Deadlock durch doppeltes Locking

Eine andere Situation, bei der ein Deadlock entstehen kann tritt auf, wenn eine Routine das selbe Lock mehrfach beansprucht, ohne es zwischendurch wieder frei zu geben. Dies ist sogar möglich, wenn in dem Programm zu diesem Zeitpunkt nur eine Routine aktiv ist. Ein Beispiel dafür gibt der folgende Programmablauf:

	R_1
1.	$acq_1(x)$
2.	$B_1 - acq_1(x)$

Die Routine muss dabei vor der zweiten Beanspruchung warten, ohne dass es die Möglichkeit gibt, dass die Routine irgendwann weiter laufen wird. Solch ein Deadlock wird als doppeltes Locking bezeichnet.

2.3 Deadlocks-Detection

Deadlocks in Programmen sind Fehler, die oft den vollständige Abbruch eines Programmes zur Folge haben, wenn keine zusätzliche Logik zur Erkennung und Auflösung von Deadlocks implementiert ist. Aus diesem Grund möchte man bereits bei der Implementierung eines Programmes

verhindern, dass ein solcher Deadlock auftreten kann. Unglücklicherweise kann es ohne zusätzliche Hilfsmittel schwierig sein, einen solchen Deadlock zu erkennen, da das Auftreten eines Deadlock von dem genauen zeitlichen Ablauf der verschiedenen Routinen abhängt.

Um dennoch Deadlocks erkennen zu können, können Lock-Graphen oder Lock-Bäume verwendet werden, die

2.3.1 Lock-Graphen

Ein Lock-Graph ist ein gerichteter Graph $G = (L, E)$. Dabei ist L die Menge aller Locks. $E \subseteq L \times L$ ist definiert als $(l_1, l_2) \in E$ genau dann wenn es eine Routine R gibt, auf welche $acq(l_2)$ ausgeführt wird, während sie bereits das Lock l_1 hält [7]. Mathematisch ausgedrückt gilt also

$$(l_1, l_2) \in E \Leftrightarrow \exists t_1, t_3 \nexists t_2 \exists i ((t_1 < t_2 < t_3) \wedge aqr_i(l_1)[t_1] \wedge rel_i(l_1)[t_2] \wedge aqr_i(l_2)[t_3])$$

wobei $aqr_i(l_1)[t_i]$ bedeutet, dass $aqr(l_1)$ zum Zeitpunkt t_i auf Routine i ausgeführt wird und equivalent für $rel_i(l_1)[t_i]$.

Ein Deadlock kann nun auftreten wenn es innerhalb dieses Graphen einen Kreis gibt. Um zu verhindern, dass ein False-Positive dadurch ausgelöst wird, dass alle Kanten in einem solchen Kreis aus der selben Routine kommen (wodurch kein Deadlock entstehen kann), können die Kanten noch zusätzlich mit einem Label versehen werden, welches die Routine identifiziert, durch welche die Kante in den Graphen eingefügt wurde. Bei dem Testen nach Zyklen muss nun beachtet werden, dass nicht alle Kanten in dem Kreis das selbe Label haben [7]. Es sei zusätzlich noch gesagt, dass ein Zyklus in einem Lockgraphen nicht immer auf ein potientiell Deadlock hinweist. Ein solcher Fall, bei dem die Detektion von Zyklen zu einer fälschlichen Detektion führt sind sogenannte Gate-Locks. Diese treten z.B. in folgender Situation auf:

	R_1	R_2
1.	$acq_1(z)$	
2.	$acq_1(y)$	
3.	$acq_1(x)$	
4.	$rel_1(x)$	
5.	$rel_1(y)$	
6.	$rel_1(z)$	
7.		$acq_2(z)$
8.		$acq_2(x)$
9.		$acq_2(y)$
10.		$rel_2(y)$
11.		$rel_2(x)$
12.		$rel_2(z)$

In diesem Fall bilden die Locks x und y in dem Lockgraphen einen Zyklus. Allerdings verhindert das Lock z , dass in diesem Fall ein tatsächliches Deadlock auftreten kann, da sich immer nur eine der beiden Routinen in dem Bereich mit den Locks x und y aufhalten kann.

2.3.2 Lock-Bäume

Anders als bei Lock-Graphen, speichert bei Lock-Bäumen jede Routine seine eigenen Abhängigkeiten. Dies bedeutet, dass der Lock-Baum b der Routine R genau dann die Kante $x \rightarrow y$ besitzt, wenn in Routine R das Lock y beansprucht wird, während in das Lock x in R bereits gehalten wird.

Im folgenden, wird ein Lock-Baum als eine Menge von Dependencies betrachtet. Eine solche Dependency besteht aus einem Lock mu und einer Menge von Locks hs („holdingSet“), von

denen mu anhängt, für die es also eine Kante $x \rightarrow mu$ mit $x \in hs$ gibt.

Ein potientiell Deadlock liegt nun vor, wenn es in der Menge aller Dependencies eine gültige, zyklische Kette gibt.

Ein Pfad mit n Elementen ist eine gültige Kette, wenn die folgenden Eigenschaften gelten:

$$\forall i, j \in \{1, \dots, n\} : \neg(i = j) \rightarrow \neg(dep_i = dep_j) \quad (2.3.2.a)$$

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} : mu_i \in hs_{i+1} \quad (2.3.2.b)$$

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} : read(mu_i) \rightarrow (\forall mu \in hs_{i+1} : (mu = mu_i) \rightarrow \neg read(mu)) \quad (2.3.2.c)$$

$$\forall i, j \in \{1, \dots, n\} : \neg(i = j) \rightarrow (\exists l1 \in hs_i \exists l2 \in hs_j ((l1 = l2) \rightarrow (read(l1) \wedge read(l2)))) \quad (2.3.2.d)$$

Dabei bezeichnet mu_i den Mutex und hs_i das holdingSet der i -ten Dependency in der Kette. $read(mu)$ bedeutet, dass das Locking von mu , welches in der Dependency abgebildet ist durch ein R-Lock zustande gekommen ist.

(2.3.2.a) stellt sicher, dass die selbe Dependency nicht mehr als ein mal in der Kette auftauchen kann. (2.3.2.b) besagt, dass die Dependencies tatsächlich eine Kette bilden müssen, dass also der Mutex einer Dependency immer in dem HoldingSet der nächsten Dependency in dem Pfad enthalten sein muss. Auch wenn dies wahr ist, ist dies dennoch keine gültige Kette, wenn sowohl der Mutex mu_i als auch der Mutex mu in hs_{i+1} , für die $mu = mu_i$ gilt, beides Reader-Locks sind. Dass solche Pfade ausgeschlossen werden wird durch (2.3.2.c) sichergestellt. Die letzte Formel (2.3.2.d) beschäftigt sich mit Gate-Locks. Sie besagt, dass wenn es einen Mutex gibt, der in den HoldingSets zweier verschiedener Dependencies in dem Pfad vor kommt, so müssen beide diese Mutexe Reader-Locks sein. Sind sie es nicht, handelt es sich um Gate-Locks, und der entsprechende Pfad kann somit nicht zu einem Deadlock führen. Wenn diese vier Formeln erfüllt sind, handelt es sich um eine gültige Kette.

Ein potientiell Deadlock ergibt sich nun, wenn diese Kette einen Zyklus bildet, wenn als

$$mu_n \in hs_1 \quad (4.3.e)$$

$$read(mu_n) \rightarrow (\forall mu \in hs_1 : (mu = mu_n) \rightarrow \neg read(mu)) \quad (4.3.f)$$

gilt.

Diese Bäume haben mehrere Vorteile gegenüber Lock-Graphen. Da jede Routine seine eigene Datenstruktur hat, wird verhindert, dass es durch gleichzeitigen Zugriff verschiedener Routinen auf die selbe Datenstruktur zu Problemen kommt. Zudem muss die Zugehörigkeit der Abhängigkeiten zu verschiedenen Routinen nicht explizit gespeichert werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass bei der Erkennung von Deadlocks mit Lock-Bäumen Situationen, die auf Grund von Gate-Locks nicht zu Deadlocks führen können, automatisch nicht als Deadlock erkannt werden, während es bei Lock-Graphen in solchen Fällen ohne zusätzliche Tests zu falschen Meldungen kommt.

2.3.3 Doppeltes Locking

Doppeltes Locking, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, lässt sich nicht aus den Lock-Graphen oder Lock-Bäumen erkennen.

Es ist daher notwendig diese gesondert zu betrachten. Dazu speichert jedes Lock, von welchen Routinen es momentan gehalten wird, und für welche dieser Beanspruchungen es als R-Lock beansprucht worden ist.

Während dem (R-)(Try-)Lock Vorgang, noch bevor es zu der eigentlichen Beanspruchung kommt, wird überprüft, ob das Lock in der selben Routine bereits gehalten wird, ohne dass es sich bei beiden Operationen um Reader-Locks handelt. In diesem Fall kommt es zu einem Deadlock.

2.4 UNDEAD

UNDEAD [2] ist ein Algorithmus zur Detektion tatsächlicher und potentieller Deadlocks. Zusätzlich versucht er potentielle Deadlocks in weiteren Durchläufen zu verhindern. Da sich dieses Projekt aber nur mit der Detektion von Deadlocks befasst, soll darauf nicht weiter eingegangen werden.

UNDEAD implementiert drop-in-Replacements für Locks mit Lock, TryLock und Unlock Operationen, mit denen nach potentiellen oder tatsächlichen Deadlocks gesucht werden soll. Die Detektion in UNDEAD läuft in drei Phasen ab. Diese sind die Logging-Phase, die periodische Detektion und die abschließende Detektion.

2.4.1 Logging-Phase

Die Logging-Phase läuft während dem Ablauf des eigentlichen Programms und sammelt Informationen, die zur Erkennung von potentiellen Deadlocks notwendig sind. Zusätzlich sammelt es Call-Stacks für Lock-Operationen. Aufgezeichnete Dependencies in einer Routine werden für jede Routine in einer separaten Hashtabelle gespeichert, um gleichzeitigen Zugriff mehrerer Routinen auf solche Strukturen zu verhindern. Als Schlüssel für die Tabelle wird dabei der XOR Wert der Speicheradressen zweier Locks verwendet. Wenn z.B. das Lock l_1 von den Locks $\{l_2, l_3\}$ abhängt, wird der XOR Wert der Speicheradressen der beiden innersten Locks (hier z.B. l_1 und l_2) als Schlüssel verhindert, um Konflikte zwischen den verschiedenen Schlüsseln zu verhindern.

UNDEAD versucht die Menge der gesammelten Daten so weit wie möglich zu reduzieren. Dies bedeutet, dass keine Call-Stacks für single-Level Locks (Locks, die von keinen anderen Locks abhängen) gespeichert werden. Außerdem werden, wenn in dem Programm momentan nur eine Routine läuft keine Informationen gespeichert. Außerdem versucht UNDEAD, mehrfach auftretende Dependencies nicht mehrfach zu speichern, und in diesem Fall auch die Call-Stack Informationen nicht mehrfach abzufragen.

2.4.2 Periodische Detektion

Die periodische Detektion wird verwendet, um Deadlocks bereits während dem Ablauf des Programms zu erkennen. Dazu wird in regelmäßigen, zeitlichen Abständen eine Routine für die Detektion gestartet. Jede Routine speichert eine aktuelle Dependency, also diejenige Dependency, die zuletzt erkannt wurde.

Wenn die periodische Routine gestartet wird, macht der Detektor einen Snapshot dieser aktuellen Dependencies und sucht in diesen nach Zyklen, wie in 2.3.2 beschrieben. Wird ein solcher Zyklus gefunden, wird überprüft, ob sich die Menge der aktuellen Dependencies seit dem Start der periodischen Detektion geändert hat. Ist dies der Fall, so geht UNDEAD davon aus, dass es sich nur um ein potentielles Deadlock handelt, welches aber nicht aufgetreten ist. In diesem Fall wird das Programm normal weiter ausgeführt. Andernfalls geht UNDEAD davon aus, dass ein tatsächliches Deadlock aufgetreten ist. Tritt dieser Fall auf, wird die abschließende Detektion (Kap. 2.4.3) gestartet und das Programm im Anschluss abgebrochen.

2.4.3 Abschließende Detektion

Die abschließende Detektion wird ausgeführt, nachdem das eigentliche Programm abgeschlossen wurde. Die Detektion basiert dabei auf dem iGoodLock Methode zur Detektion von Deadlocks, basierend auf DeadlockFuzzer [1] und MagicFuzzer [8]. Für die Detektion sucht UNDEAD nach Zyklen wie in 2.3.2 ((2.3.2.a) - (2.3.2.d)) beschrieben. Dazu sucht es nach Dependency-Ketten durch Betrachtung aller möglichen Permutationen von Dependencies in zwei Routine, dann in drei, usw. Es nutzt dabei eine Tiefensuche, um diese Ketten iterativ zu durchsuchen. Wenn eine

solche Kette gefunden wurde wird überprüft, ob sie einen Zyklus bildet (2.3.2 (4.3.e) - (4.3.f)). Ein solcher Zyklus deutet auf einen potentiellen Deadlock hin, was dazu führt, dass UNDEAD eine Information ausgibt.

3 Review für go-deadlock

Im folgenden soll eine Software zur Erkennung von Deadlocks analysiert werden. Dazu wird die Software “sasha-s/go-deadlock“ [5], veröffentlicht auf Github, betrachtet.

Dieses verwendet Drop-In Replacements für die, in Go standardmäßig implementierten, `sync.Mutex` Locks. Diese führen sowohl das eigentliche Locking aus und können, beim Durchlaufen des Programms Situationen erkennen, die zu einem Deadlock führen können. Dabei werden sowohl Locks als auch RW-Locks implementiert. Dies wirkt sich allerdings nur auf die Anwendung des eigentlichen Lockings aus, nicht aber auf die Detection von Deadlocks. Aus diesem Grund wird hierauf im folgenden nicht weiter eingegangen, und die Methoden für die Detection von Deadlocks bezieht sich sowohl auf die allgemeinen als auch die RW-Locks.

Für die Erkennung werden drei verschiedene Fälle betrachtet:

- Doppeltes Locking
- Zyklisches Locking
- Timeout

Diese sollen im folgenden genauer betrachtet werden.

3.1 Doppeltes Locking

Um doppeltes Locking zu erkennen speichert das Programm ein Dictionary *cur* mit allen momentan gehaltenen Locks. Die Werte zu den jeweiligen Keys speichern sowohl, von welcher Go-Routine das Lock momentan gehalten wird, als auch in welcher Datei und Zeile der Befehl, der das Locking dieses Locks zu folge hatte, zu finden ist. Wird ein Lock wieder freigegeben, so wird der entsprechende Eintrag aus *cur* entfernt. Wird nun ein Lock neu beansprucht, überprüft das Programm, ob dieses Lock mit der Routine, die das Lock beanspruchen möchte bereits in *cur* auftaucht. Ist dies der Fall, dann nimmt das Programm an, dass es sich hierbei um ein mögliches Deadlock durch doppeltes Locking handelt und führt entsprechende Schritte aus, um den Nutzer zu warnen. Wird ein Lock wieder frei gegeben, wird der entsprechende Eintrag aus *cur* entfernt.

3.2 Zyklisches Locking

Mit dieser Methode werden mögliche Deadlocks gefunden, die dadurch entstehen, dass alle Threads zyklisch auf die Freigabe eines Locks warten, welches von einem anderen Thread gehalten wird.

Der Detektor arbeitet dabei mit einem Lock-Graphen.

Für die Detektion verwendet das Programm zwei Dictionaries. Das erste ist *cur*, welches bereits in 3.1 betrachtet wurde.

Das andere Dictionary *order* definiert mit seinen Keys die Kanten des Lock-Graphen. Die Keys bestehen dabei aus einer Struktur *beforeAfter*, die Referenzen zu den beiden Locks speicherte, welche von der Kante im Graphen verbunden werden. Wird ein neues Lock *p* beansprucht, so wird für jedes Lock *b*, welches sich momentan in *cur* befindet ein neuer Eintrag *beforeAfter{b, p}* in *order* hinzugefügt. Die Werte, die für jeden Key in *order* gespeichert werden, entsprechen den Information, die auch in *cur* für die beiden Locks gespeichert wird. Allerdings wird auf die Speicherung der ID der erzeugenden Go-Routine verzichtet, da sie nicht benötigt wird. Information aus *order* werden nur entfernt, wenn *order* eine festgelegte maximale Größe überschreitet.

Die Überprüfung, ob ein Lock p zu einem Deadlock führen kann, finden bereits statt, bevor das Lock in *cur* und *order* eingetragen wird. Dazu wird für jedes Lock b in *cur* überprüft, ob *order* einen Key *beforeAfter*{ p, b } besitzt, der Graph also die beiden Locks in umgekehrter Reihenfolge enthält. Existiert solch ein Key, und wurde b von einer anderen Routine als p in *cur* eingefügt, bedeutet dies einen Loop aus zwei Kanten im Lockgraphen und somit einen möglichen Deadlock.

Dies bedeutet aber auch, dass das Programm nicht in der Lage ist, ein Kreis in einem Lock-Graphen zu finden, wenn dieser aus drei oder mehr Kanten besteht. Soche Situationen können aber dennoch zu Deadlocks führen. Ein Beispiel dafür ist die folgende Funktion:

```

1 func threeEdgeLoop() {
2     var x Mutex
3     var y Mutex
4     var z Mutex
5     ch := make(chan bool, 3)
6
7     go func() {
8         // first routine
9         x.Lock()
10        y.Lock()
11        y.Unlock()
12        x.Unlock()
13        ch <- true
14    }()
15
16    go func() {
17        // second routine
18        y.Lock()
19        z.Lock()
20        z.Unlock()
21        y.Unlock()
22        ch <- true
23    }()
24
25    go func() {
26        // third routine
27        z.Lock()
28        x.Lock()
29        x.Unlock()
30        z.Unlock()
31        ch <- true
32    }()
33
34    <-ch
35    <-ch
36    <-ch
37 }

```

Führen die drei Routinen jeweils ihre erste Zeile gleichzeitig aus, muss jede Routine vor ihrer zweiten Zeile warten und es kommt zu einem Deadlock. Da diese Konstellation in einem Lockgraphen aber zu einem Kreis mit einer Länge von drei Kanten führen würde, kann das Programm den möglichen Deadlock nicht erkennen.

3.3 Timeout

Neben diesen beiden Methoden, die vorausschauend nach möglichen Deadlocks Ausschau halten, versucht das Programm auch mit Timeouts um zu überprüfen ob sich das Programm bereits in

einem Deadlock befindet. Möchte eine Routine ein Lock beanspruchen wird vorher eine go routine mit einem Counter gestartet. Sollte die Inanspruchnahme des Locks innerhalb der vorgegebenen Zeit (default: 30s) gelingen, wird die go routine beendet. Sollte es nicht gelingen, nimmt das Programm nach der festgelegten Zeit an, dass es zu einem Deadlock gekommen ist und gibt eine entsprechende Nachricht aus.

Diese Methode kann durchaus nützlich sein, um über Deadlocks informiert zu werden. Allerdings führt sie sehr leicht zu false-positives, wenn die Abarbeitung anderer Routinen und damit die Freigabe des Locks länger Dauer, als die festgelegte Timeout Zeit. Im folgenden Beispiel wird dies deutlich:

```
1 func falsePositive() {
2     var x deadlock.Mutex
3     finished := make(chan bool)
4
5     go func() {
6         // first go routine
7         x.Lock()
8         time.Sleep(40 * time.Second)
9         x.Unlock()
10    }()
11
12    go func() {
13        // second go routine
14        time.Sleep(2 * time.Second)
15        x.Lock()
16        x.Unlock()
17        finished <- true
18    }()
19
20    <-finished
21 }
```

Der Chanel finished wird lediglich verwendet um zu verhindern, dass das Programm beendet wird, bevor die Go-Routinen durchlaufen wurden. Er ist für die Deadlock Analyse also irrelevant. Das Programm startet zwei go-Routinen, die beide das selbe Lock *x* verwenden. Durch den `time.Sleep(2 * time.Second)` command wird sichergestellt, dass die erste go Routine zuerst auf das Lock zugreift. Das Lock in Routine 2 muss also warten, bis es in Routine 1 wieder freigegeben wird. Dies geschieht in etwa 38s nachdem die zweite Routine mit dem warten auf die Freigabe von *x* beginnt. Da dies länger ist als die standardmäßig festgelegte maximale Wartezeit von 30s nimmt das Programm an, es sei in einen Deadlock gekommen, obwohl kein Solcher vorliegt, und auch kein Deadlock möglich ist.

3.4 False Negatives / Positives

Bei False Negatives oder False Positives handelt es sich um Fälle, bei denen es zu einem Deadlock kommen kann, ohne dass dieser Detektiert wird, bzw. Fälle die nicht zu einem Deadlock führen können, aber dennoch als Deadlock angezeigt werden. Neben den oben bereits genannten Fällen, kann dies noch in weiteren Situationen auftreten.

Ein Fall, bei dem ein Deadlock auftreten könnte, welcher von dem Programm aber nicht erkannt wird (False Negative), entsteht bei verschachtelten Routinen. Dabei erzeugt eine go-Routine eine weitere.

```

1 func nestedRoutines() {
2     x := deadlock.NewLock()
3     y := deadlock.NewLock()
4     ch := make(chan bool)
5     ch2 := make(chan bool)
6
7     go func() {
8         x.Lock()
9         go func() {
10             y.Lock()
11             y.Unlock()
12             ch <- true
13         }()
14         <-ch
15         x.Unlock()
16         ch2 <- true
17     }()
18     go func() {
19         y.Lock()
20         x.Lock()
21         x.Unlock()
22         y.Unlock()
23         ch2 <- true
24     }()
25
26     <-ch2
27     <-ch2
28 }

```

Diese Funktion ist bezüglich ihres Ablaufs identisch zu der Funktion `circularLocking` in Kapitel 3.2. Dennoch ist es dem Programm aufgrund der verschachtelten `go`-Routine nicht möglich, den möglichen Deadlock zu erkennen.

Ein Fall, bei dem es zu False Positives kommen kann, wird durch Gate-Locks ausgelöst. Wie bereits beschrieben ist ein auf Lock-Graphen basierender Detektor, und damit solch ein Detektor nicht in der Lage zu erkennen, wenn ein potentieller Deadlock durch Gate-Locks unmöglich gemacht wird.

4 Implementierung des Deadlock-Detektors „Deadlock-Go“

Im folgenden soll die Funktionsweise und Implementierung eines selbst implementierten Detektors „Deadlock-Go“ betrachtet werden. Dieser wurde entwickelt um Ressourcen-Deadlocks in Go-Programmen zu erkennen und den Nutzer vor solchen zu warnen. Der Code kann in [9] gefunden werden.

Der Detektor basiert zum Teil auf dem UNDEAD-Algorithmus [2]. Zusätzlich wurde er um RW-Locks erweitert, welche in UNDEAD nicht betrachtet werden.

Der Detektor implementiert dabei Lock-Bäume, mit welchen zyklisches Locking erkannt werden kann. Neben den Informationen, die für die Erkennung solcher Zyklen benötigt werden, werden außerdem Information darüber gespeichert, wo in dem Programm-Code die Initialisierung sowie die (Try-)(R-)Lock Operationen aufgerufen werden. Diese werden dem Nutzer bereitgestellt, wenn ein potentiell Deadlock erkannt wurde, um das Auffinden und Korrigieren des entsprechenden Deadlocks im Programmcode zu erleichtern.

Das folgende Programm ist ein Beispiel zur Verwendung des Detektors:

```
1 import "github.com/ErikKassubek/Deadlock-Go"
2
3 func main() {
4     x := deadlock.NewLock()
5     y := deadlock.NewLock()
6
7     // make sure, that the program does not terminate
8     // before all routines have terminated
9     ch := make(chan bool, 2)
10
11     go func() {
12         x.Lock()
13         y.Lock()
14         y.Unlock()
15         x.Unlock()
16         ch <- true
17     }()
18
19     go func() {
20         y.Lock()
21         x.Lock()
22         x.Unlock()
23         y.Unlock()
24         ch <- true
25     }()
26     <-ch
27     <-ch
28
29     // start the final deadlock detection
30     deadlock.FindPotentialDeadlocks()
31 }
```

Es erzeugt den folgenden Output:

POTENTIAL DEADLOCK

Initialization of locks involved in potential deadlock:

```
/home/ * * * /undead_test.go 4  
/home/ * * * /undead_test.go 5
```

Calls of locks involved in potential deadlock:

Calls for locks created at /home/ * * * /undead_test.go 4

```
/home/ * * * /undead_test.go 21  
/home/ * * * /undead_test.go 12
```

Calls for locks created at /home/ * * * /undead_test.go 5

```
/home/ * * * /undead_test.go 20  
/home/ * * * /undead_test.go 13
```

In diesem, sowie in allen folgenden Beispielen, wurden die Pfade durch / * * * / gekürzt. In der tatsächlichen Ausgabe wird der vollständige Pfad angegeben.

Der genaue Output hängt von dem tatsächlichen Ablauf ab, der aufgrund der Nebenläufigkeit bei verschiedenen Durchläufen unterschiedlich sein kann.

Das restliche Kapitel ist in die folgenden Abschnitte eingeteilt:

- Aufbau der Datenstrukturen
- (R-)Lock, (R-)TryLock und (R-)Unlock
- Periodische Detection
- Abschließende Detektion
- Meldung gefundener Deadlocks
- Optionen

4.1 Aufbau der Datenstrukturen

Im folgenden sollen die in dem Detektor verwendeten Datenstrukturen betrachtet werden. Wie diese genau verwendet werden, wird in späteren Abschnitten noch genauer betrachtet.

4.1.1 (RW-)Mutex

Die Strukturen für die (RW-)Mutexe sind so implementiert, dass sie als Drop-In-Replacements für die klassischen `sync.(RW)Mutex` verwendet werden. Dabei gibt es eine Struktur für Mutexe und eine für RW-Mutexe, die über ein zusätzliches Interface `MutexInt` zusammengefasst werden können.

Die Mutex-Strukturen beinhalten alle Informationen, die für diese benötigt werden. Dabei handelt es sich um die folgenden Informationen:

- `mu (*sync.(RW)Mutex)` ist das eigentliche Lock, welches für das tatsächliche Locking verwendet wird. Für ein Mutex ist dies ein `*sync.Mutex`, für ein RW-Mutex ein `*sync.RWMutex`.
- `context ([]callerInfo)` ist die Liste der `callerInfo` des Mutex. `CallerInfo` sind die Informationen darüber wo in dem Programm-Code die Initialisierung und die (Try-)(R-)Lock Operationen stattgefunden haben. Dazu werden die Datei und Zeilennummer gespeichert. Je nachdem, wie das Programm über die Optionen konfiguriert ist, kann auch ein vollständiger Call-Stack für die entsprechenden Operationen gespeichert werden.

- in (bool) ist ein Marker welcher speichert, ob der Mutex richtig initialisiert wurde. Es ist nicht möglich ein Mutex einfach durch *var x Mutex* oder *var x RWMutex* zu erzeugen und sofort zu verwenden, sondern die Mutex Variable muss über *x := NewLock()* bzw. *x := NewRWLock()* initialisiert werden. Wird eine Lock-Operation o.ä. auf einem (RW-)Mutex ausgeführt, ohne dass dieses entsprechend initialisiert wurde, wird das Programm mit einem Fehler abgebrochen.
- numberLocked (int) speichert, wie oft das Lock im moment gleichzeitig beansprucht ist. Ist das Lock frei, ist dieser Wert 0. Bei einem Mutex kann der Wert maximal 1 werden, wenn das Lock gerade von einer Routine gehalten wird. Das selbe ist wahr für RW-Mutexe, wenn diese über ein Writer-Lock gehalten werden. Werden diese allerdings von Reader-Locks gehalten, kann das selbe Lock von mehreren Locks gehalten werden.
- isLockedRoutineIndex (*map[int]int) speichert die Indices der Routinen, von welchen das Lock momentan gehalten wird, sowie wie oft es gehalten wird. Dies wird für die Erkennung von doppeltem Locking verwendet.
- memoryPosition (uintptr) speichert die Speicheradresse des Mutex Objekts bei seiner Erzeugung.
- isRLock (map[int]bool) (nur für RW-Mutex) speicher, von welcher Routine der Mutex als RLock gehalten wird.

Zusätzlich enthalten die (RW)-Locks noch Locks, die bei der gleichzeitigen Verwendung des Locks durch R-Lock eine gleichzeitiges schreiben in maps verhindern.

4.1.2 Dependencies

Dependencies werden verwendet, um die Abhängigkeiten der verschiedenen Mutexe untereinander zu speichern. Sie entsprechen dabei einer Menge an Kanten in einem Lock Graphen. Sie enthalten die folgenden Informationen:

- mu (mutexInt) ist das Lock, für welches gespeichert werden soll, von welchen anderen Locks mu abhängt, welche Locks also in der selben Routine bereits gehalten wurden, als mu erfolgreich beansprucht wurde.
- holdingSet ([]mutexInt) ist die Liste der Locks, von denen mu abhängt.
- holdingCount (int) ist die Anzahl der Locks, von denen mu abhängt, also die Anzahl der Elemente in holdingSet.

4.1.3 Routine

Für jede Routine wird automatisch eine Struktur angelegt, die alle für sie relevanten Informationen speichert. Diese Strukturen werden in einem globalen Slice (Liste) routines gespeichert. Bei den Informationen, die von diesen Routinen gehalten werden handelt es sich vor allem um eine Liste der Mutexe, die momentan von der Routine gehalten werden, sowie die Informationen, die für den Aufbau des Lock-Baums benötigt werden. Es handelt sich dabei um die folgenden Informationen:

- index (int) ist der Index der Routine in routines.
- holdingCount (int) speichert die Anzahl der im Moment gehaltenen Locks.
- holdingSet ([]MutexInt) ist eine Liste, welche die momentan von der Routine gehaltenen Locks enthält.
- dependencyMap (map[uintptr]*[]*dependency) ist ein Dictionary, welches verwendet wird, um zu verhindern, dass wenn die selbe Situation im Code mehrfach auftritt (z.B. durch Schleifen) die entsprechenden Dependencies mehrfach in dem Lock-Baum gespeichert werden.
- dependencies ([]*dependencies) speichert die aufgetretenen Dependencies. Dies stellt also die Implementierung des Lock-Baum da.

- curDep (*dependency) ist die letzte in den Lock-Baum (dependencies) eingefügte dependency.
- depCount (int) gibt die Anzahl der in dem Lock-Baum gespeicherten Dependencies an.
- collectSingleLevelLocks speichert Informationen über single-level Locks, also Locks, welche von keinem andere Lock abhängen. Auch dies ist wie dependencyMap dazu da, um zu verhindern verhindern, dass Informationen, die bereits bekannt sind mehrfach gespeichert werden.

4.2 (R)-Lock, (R)-TryLock, (R)-Unlock

Im folgenden sollen die Implementierungen der verschiedenen, auf den Mutexen implementierten Operationen beschrieben werden.

Sind alle Teile des Detektors deaktiviert, werden nur die entsprechenden Operationen auf den sync.(RW)Mutex Locks ausgeführt. Eine weitere Sammlung von Daten findet in diesem Fall nicht statt.

Ist der Detektor nicht vollständig deaktiviert, werden bei den verschiedenen Operationen Daten gesammelt, um die Detektion von Deadlocks zu ermöglichen. Bei dieser Sammlung werden die Datenstrukturen, welche in 4.1 beschrieben wurden, verändert oder neu erzeugt. Diese Vorgänge sollen im folgenden beschrieben werden.

4.2.1 (R)-Lock

Das Locking von RW-Mutexen unterscheidet sich von dem Locking der Mutexe nur dadurch, das isRLock in dem Mutex entsprechend gesetzt wird, und das das Locking des eigentlichen sync.(RW)Locks entsprechend angepasst wird. Die Sammlung der Informationen, welche für die Detektion der Deadlocks benötigt wird ist die selbe.

Zuerst wird überprüft, ob das Lock sowie der Detektor bereits initialisiert wurde. Ist der Mutex nicht über *NewLock()* initialisiert worden, wird das Programm mit einer Fehlermeldung abgebrochen.

Anschließend wird das eigentliche Locking des sync.Mutex über ein defer-Statement vorbereitet. Dabei wird darauf geachtet, ob es sich um ein RWMutex oder ein Mutex handelt, und wenn es sich um ein RWMutex handelt, ob es eine R-Lock-Operation ist.

Anschließend wird überprüft, ob für die entsprechende Routine bereits ein Lock-Baum existiert, die Routine also bereits initialisiert worden ist. Ist dies nicht der Fall wird die Routine initialisiert und damit ein leere Baum für diese Routine erzeugt.

Solange die Detektion von doppeltem Locking nicht deaktiviert ist, wird nun überprüft, ob das Beanspruchen dieses Locks zu einem Deadlock führen würde. Dazu wird zuallererst überprüft, ob der Mutex momentan bereits von einer Routine gehalten wird. Ist dies nicht der Fall kann es nicht zu doppeltem Locking kommen. Wird es bereits gehalten, muss es dennoch nicht zu einem doppelten Locking kommen. Dies ist der Fall, wenn die Routine, die das Mutex hält, und die die es momentan beansprucht nicht die selben sind, oder wenn sie die selben sind wenn beide R-Locks sind. Ist nichts davon der Fall, nimmt das Programm an, es sei ein Deadlock gefunden worden. In diesem Fall wird eine Beschreibung des Deadlocks ausgegeben (vgl. 4.5). Anschließend wird die abschließende Detektion gestartet und das Programm anschließend abgebrochen. Im Anschluss werden nun die entsprechenden Datenstrukturen aktualisiert. Dies geschieht allerdings nur, wenn momentan mindestens eine Routine läuft, da Deadlocks, abgesehen von doppeltem Locking, nur bei der gleichzeitigen Ausführung mehrerer Routinen auftreten. Man betrachte zu erst den Fall des Single-Level-Locks. Dabei handelt es sich um einen Mutex, der zu einem

Zeitpunkt beansprucht wird an dem die selbe Routine keine anderen Locks hält. Da sich somit keine Dependencies bilden, muss der Lock-Baum der Routine nicht verändert werden. In diesem Fall wird lediglich die Information über den Aufruf des Lockings in “context” gespeichert, solange der Aufruf der exakt selben Beanspruchung (selbe Datei und selbe Zeilennummer) noch nicht gespeichert wurde. Hält die Routine allerdings bereits ein oder mehrere Lock, wird die entsprechende Dependency in den Lock-Baum eingefügt, solange sie in dieser noch nicht existiert. Diese Überprüfung wird mit Hilfe von “dependencyMap” ausgeführt. Dazu wird jeder Situation ein Key zugeordnet, die sich durch eine xOr Verknüpfung der Speicheradressen des aktuellen und des zuletzt gelockten Locks in der Routine gebildet wird. Existiert der Schlüssel nicht, kam die Situation noch nicht vor. Andernfalls wird überprüft, ob die momentane Situation tatsächlich einer bereits vorkommenden Situation entspricht, welche in der dependencyMap als mit dem Key verknüpften Value gespeichert werden. Existiert die Situation noch nicht, wird sie in den Lock-Baum und in dependencyMap eingefügt. Für diese Dependency entspricht “mu” gerade dem zu lockenden Mutex und “holdingSet” dem momentanen “holdingSet” der Routine, also der Liste aller Mutexe, die von der Routine im Moment gehalten werden. Sowohl bei Single-Level-Locks als auch bei Locks, welche zu Dependencies führen wird das Lock im Anschluss in das “holdingSet” der Routine eingefügt.

4.2.2 (R)-TryLock

Bei einer Try-Lock Operation wird ein Lock nur beansprucht, wenn es im Moment der Operation beansprucht werden kann, das Lock also nicht bereits von einer Routine gehalten wird. Aus diesem Grund kann die Beanspruchung des Locks nicht direkt zu einem Deadlock führen. Es ist also nicht notwendig nach doppeltem Locking zu suchen, oder den Lock-Baum zu aktualisieren, wenn das Lock beansprucht wird. Ein solches Locking kann nur zu einem Deadlock führen, wenn es bereits durch die (R)-TryLock-Operation gehalten wird und von einer anderen Operation ebenfalls beansprucht werden soll. Es wird also zuerst versucht das Lock zu beanspruchen. Wenn die Beanspruchung erfolgreich war, wird angepasst wie oft das Mutex gelockt ist, das Mutex in das “holdingSet” der Routine eingefügt und anschließend zurück gegeben, ob die (R)-TryLock-Operation erfolgreich war

4.2.3 (R)-Unlock

Zuerst wird überprüft, ob der Mutex überhaupt gelockt ist. Ist dies nicht der Fall wird das Programm mit einer Fehlermeldung abgebrochen. Andernfalls wird die Anzahl der Lockungen des Locks angepasst, dass Mutex aus dem “holdingSet” der Routine entfernt und das eigentliche Lock wieder frei gegeben.

4.3 Periodische Detektion

Ist sie nicht deaktiviert, so wird die periodische Detektion in regelmäßigen Abständen (default: 2s) gestartet um nach lokalen, tatsächlich auftretenden Deadlocks zu suchen. Lokal bedeutet dabei, dass sich nur ein Teil der Routinen in einem Deadlock befindet. Sollte es zu einem totalen Deadlock kommen, bei dem alle Routinen blockiert werden, wird das Programm automatisch von der Go Runtime Deadlock Detection beendet. In diesem Fall ist keine weiter abschließende Detektion von Deadlocks möglich.

Für die periodische Detektion wird von jeder Routine nur “curDep” betrachtet, also diejenige Dependency, welche als letztes in den Lock-Baum eingefügt wurde. Die Detektion wird nur ausgeführt, wenn sich diese Menge seit der letzten periodischen Detektion verändert hat und momentan mindestens zwei Routinen im Moment ein Lock halten. Im diesem Fall wird versucht Zyklen in der Menge der “curDep” zu finden.

Dazu wird eine Depth-First-Search auf diesen Dependencies ausgeführt. Dazu wird zuerst die “curDep” einer der Routinen auf einen Stack gelegt. Der Stack entspricht immer dem momentan betrachteten Pfad. Anschließend wird für die “curDep” jeder Routine, die noch nicht auf dem Stack liegt und noch nicht zuvor bereits betrachtet wurde überprüft, ob das hinzufügen der Dependency zu einer gültigen Kette führt, ob also die Formeln (2.3.2.a) - (2.3.2.d) immer noch gelten. Ist dies der Fall, so wird überprüft, ob die Kette einen Kreis bildet, also ob die Formeln (4.3.e) und (4.3.f) ebenfalls gelten. Ist der Pfad mit der neuen Dependency eine gültige Kette aber kein Kreis, so wird die Dependency auf den Stack gelegt und das ganze rekursiv wiederholt. Ist die Kette ein Kreis, so nimmt das Programm vorerst an, es sei ein lokaler Deadlock erkannt worden. In diesem Fall wird überprüft, ob sich die HoldingSets der Routinen, von denen sich eine Dependency in der Kette befindet seit dem Beginn der momentanen periodischen Detektion verändert hat. Ist dies der Fall, so geht der Detektor davon aus, dass es sich um einen falschen Alarm handelt. Andernfalls wird dem Nutzer mitgeteilt, dass ein Deadlock gefunden wurde, es wird die abschließende Detektion gestartet und das Programm anschließend abgebrochen. Gibt es keine Dependency die, wenn sie auf den Stack gelegt wird zu einer gültigen Kette führt, so wird die oberste Dependency von dem Stack entfernt, so dass andere mögliche Pfade betrachtet werden können.

Wenn es keinen Pfad gibt, der eine gültige, zyklische Kette bildet, so geht der Detektor davon aus, dass sich das Programm nicht in einem lokalen Deadlock befindet.

4.4 Abschließende Detektion

Die abschließende Detektion wird am Ende des Programms durchgeführt um potentielle Deadlocks zu finden, auch wenn diese in dem Durchlauf nicht tatsächlich aufgetreten sind. Sie muss vom Nutzer manuell in seinem Code gestartet werden. Sie wird in diesem Fall nur ausgeführt, wenn sie nicht deaktiviert ist und die Anzahl der Routinen, die in dem Programm vorkamen sowie die Anzahl der einzigartigen Dependencies mindestens zwei ist.

Im Großen und Ganzen verläuft die Detektion identisch zu der periodischen Detektion (vgl. 4.3). Allerdings werden nun nicht nur die zuletzt in die Lock-Bäume aufgenommenen Dependencies sondern alle in den Bäumen vorkommenden Dependencies betrachtet. Dabei wird darauf geachtet, dass von jeder Routine maximal eine Dependency in der Kette vorkommen kann. Außerdem wird die Detektion nicht beim ersten Auftreten eines potentiellen Deadlocks beendet, sondern erst, wenn alle möglichen Pfade betrachtet wurde.

4.5 Meldung gefundener Deadlocks

Wird ein tatsächlicher oder potentieller Deadlock gefunden, wird dem Nutzer dies durch eine Nachricht über den standard error file descriptor (Stderr) mitgeteilt.

4.5.1 Doppeltes Locking

Tritt ein Fall von doppeltem Locking auf, so wird dem Nutzer das dabei involvierte Lock, sowie seine Aufrufe mitgeteilt. Im folgenden ist ein Beispiel für solch eine Ausgabe gegeben:

DEADLOCK (DOUBLE LOCKING)

Initialization of lock involved in deadlock:

/home/ * * * /undead_test.go 238

Calls of lock involved in deadlock:

```
/home/ * * * /undead_test.go 239
/home/ * * * /undead_test.go 240
```

4.5.2 Deadlocks

Bei einem tatsächlichen oder potentiellen Deadlock werden die Locks, welche in dem Zyklus, welcher den Deadlock erzeugt vorkommen, mit den Positionen ihrer Initialisierung und ihren (Try-)(R-)Lock-Operationen angegeben. Dazu werden die callerInfo der Mutexe in den Dependencies betrachtet, die in dem Stack, welcher einen Deadlock beschreibt vorkommen.

Dies führt z.B. zu folgender Ausgabe:

POTENTIAL DEADLOCK

Initialization of locks involved in potential deadlock:

```
/home/ * * * /undead_test.go 40
/home/ * * * /undead_test.go 39
```

Calls of locks involved in potential deadlock:

Calls for lock created at: /home/ * * * /undead_test.go:40

```
/home/ * * * /undead_test.go 48
/home/ * * * /undead_test.go 60
```

Calls for lock created at: /home/ * * * /undead_test.go:39

```
/home/ * * * /undead_test.go 47
/home/ * * * /undead_test.go 61
```

Es ist möglich, sich statt nur der Datei und Zeilennummer auch einen Call-Stack anzeigen zu lassen:

POTENTIAL DEADLOCK

Initialization of locks involved in potential deadlock:

```
/home/ * * * /deadlockGo.go 24
/home/ * * * /deadlockGo.go 25
```

CallStacks of Locks involved in potential deadlock:

CallStacks for lock created at: /home/ * * * /deadlockGo.go:24

goroutine 21 [running]:

DeadlockExamples/selfWritten.DeadlockGoPotentialDeadlock.func2()

 /home/ * * * /deadlockGo.go:43 +0x59

created by DeadlockExamples/selfWritten.DeadlockGoPotentialDeadlock

 /home/ * * * /deadlockGo.go:41 +0x14a

goroutine 20 [running]:

```
DeadlockExamples/selfWritten.DeadlockGoPotentialDeadlock.func1()  
  /home/ * * * /deadlockGo.go:33 +0x7b  
created by DeadlockExamples/selfWritten.DeadlockGoPotentialDeadlock  
  /home/ * * * /deadlockGo.go:29 +0xdb
```

CallStacks for lock created at: /home/ * * * /deadlockGo.go:25

```
goroutine 21 [running]:  
DeadlockExamples/selfWritten.DeadlockGoPotentialDeadlock.func2()  
  /home/ * * * /deadlockGo.go:42 +0x45  
created by DeadlockExamples/selfWritten.DeadlockGoPotentialDeadlock  
  /home/ * * * /deadlockGo.go:41 +0x14a
```

```
goroutine 20 [running]:  
DeadlockExamples/selfWritten.DeadlockGoPotentialDeadlock.func1()  
  /home/ * * * /deadlockGo.go:34 +0x8f  
created by DeadlockExamples/selfWritten.DeadlockGoPotentialDeadlock  
  /home/ * * * /deadlockGo.go:29 +0xdb
```

4.6 Optionen

Die Funktionsweise des Detektors kann über verschiedenen Optionen gesteuert werden, die vor der ersten Lock-Operation gesetzt werden müssen. Dies beinhaltet die folgenden Möglichkeiten:

- Aktivierung oder Deaktivierung des gesamten Detektors (Default: aktiviert)
- Aktivierung oder Deaktivierung der periodischen Detektion (Default: aktiviert)
- Aktivierung oder Deaktivierung der abschließenden Detektion (Default: aktiviert)
- Festlegung der Zeit zwischen periodischen Detektionen (Default: 2s)
- Aktivierung oder Deaktivierung der Sammlung von Call-Stacks (Default: deaktiviert)
- Aktivierung oder Deaktivierung der Sammlung von Informationen über Single-Level-Locks (Default: aktiviert)
- Aktivierung oder Deaktivierung der Detektion von doppeltem Locking (Default: aktiviert)
- Festlegung der maximalen Anzahl von Dependencies pro Routine (Default: 4096)
- Festlegung der maximalen Anzahl von Mutexen von denen ein Mutex abhängen kann (Default: 128)
- Festlegung der maximalen Anzahl von Routinen (Default: 1024)
- Festlegung der maximalen Länge eines Call-Stacks in Bytes (Default 2048)

5 Analyse von Deadlock-Go und Vergleich mit go-deadlock (sasha-s)

Im Folgenden soll der in 4 beschriebene und in [9] implementierte Detektor „Deadlock-Go“ analysiert und mit dem in 3 betrachteten Detektor „go-deadlock“ verglichen werden. Um Verwechslungen zwischen den beiden relativ ähnlichen Namen zu vermeiden, wird dieser im folgenden nach dem Besitzer des Git-Hub Repositories als sasha-s bezeichnet.

Für den Vergleich werden verschiedene Beispiel-Programme betrachtet, die in [10] implementiert sind. Diese bestehen zum einen aus verschiedenen Standardsituationen, zum anderen auf Programmen, die aus tatsächlichen Programmen übernommen wurden. Diese werden aus Gobench [11], einer Benchmark Suite für Parallelitätsfehler in Go ausgewählt.

5.1 Funktionale Analyse

Man betrachte die Programme zuerst funktional, d.h. man überprüft, ob sie zu den gewünschten Ergebnissen führen.

Man betrachte zuerst die Standardsituationen. In der folgenden Tabelle 5.1 sind die betrachteten Situation beschrieben. Dazu wird für jede Situation eine kurze Beschreibung angegeben und dann überprüft, ob die beiden Detektoren in der Lage sind diese korrekt zu klassifizieren, d.h. eine Warnung über einen Deadlock auszugeben wenn ein solcher vorliegt, und keine Warnung zu geben, wenn kein Deadlock auftreten kann.

Ein potenzielles Deadlock, welches durch das zyklische Locking von zwei Deadlocks auftritt kann durch beide Tools erkannt werden (1.1). Ebenso erkenne beide, dass kein Deadlock vorliegt, wenn das Locking von mehreren Locks nicht zyklisch verläuft (1.2). Sobald diese Zyklen allerdings eine Länge von 3 oder mehr erreichen, werden diese durch sasha-s nicht mehr erkannt, da dieser Detektor nur nach Loops der Länge zwei sucht (2). Deadlock-Go hingegen ist in der Lage auch diese potentiellen Deadlocks zu erkennen.

Auch bei Deadlocks, in denen zwar zyklisches Locking auftritt, welche aber auf Grund von Gate-Locks nicht zu einem tatsächlich Deadlock führen können, schneidet Deadlock-Go besser ab (3). Da dieser mit Lock-Bäumen und nicht mit einem Lock-Graphen implementiert ist, wird in diesem Fall kein potentielles Deadlock ausgegeben. sasha-s hingegen erkennt nicht, dass solch ein Deadlock nicht auftreten kann und gibt somit eine false-positive Mitteilung über ein potentielles Deadlock aus.

sasha-s ist standardmäßig dazu in der Lage doppeltes Locking zu erkennen. Bei Deadlock-Go hängt die Erkennung solcher Deadlocks von den Optionen ab. Ist die Erkennung von doppeltem Locking nicht deaktiviert, ist Deadlock-Go also auch in der Lage solche Deadlocks durch doppeltes Locking zu erkennen (5).

Bei verschachtelten Routinen wie in 3.2 beschrieben ist keines der Tools in der Lage das potentielle Deadlock zu erkennen (4).

Für tatsächlich auftretende Deadlocks, welche durch zyklisches Locking auftreten sind beide Detektoren in der Lage, solche Situationen zu erkennen (6).

Für sasha-s sind keine Try-Lock-Operationen implementiert. Aus diesem Grund können potentielle Deadlocks, die solche Try-Lock Operationen besitzen nicht wirklich erkannt werden. Deadlock-Go besitzt eine Implementierung von Try-Lock- Operationen. Doppeltes Locking kann

für Try-Lock erkannt werden, sowohl wenn es auch bei ein Try-Lock zu doppeltem Locking kommt (7.1), als auch wenn es durch die Try-Lock-Operation doppeltes Locking verhindert wird (7.2). Deadlock-Go ist nicht in der Lage Deadlocks zu erkennen, wenn dieses durch zyklisches Locking auftritt, wobei der Zyklus ein Try-Lock enthält. Es wird kein potentieller Deadlock erkannt, unabhängig davon, ob der Zyklus mit dem Try-Lock zu einem Deadlock führen kann oder nicht (8).

ID	Typ	Deadlock-Go	sasha-s
1.1	Potentielles Deadlock durch zyklisches Locking von zwei Locks	Ja	Ja
1.2	Kein Potentielles Deadlock, da die Locks nicht zyklisch sind	Ja	Ja
2	Potentielles Deadlock durch zyklisches Locking von drei Locks	Ja	Nein
3	Zyklisches Locking welches aber durch Gate-Locks nicht zu einem Deadlock führen kann	Ja	Nein
4	Potentielles Deadlock, welches durch Verschachtlung mehrerer Routinen (fork/join) verschleiert wird	Nein	Nein
5	Deadlock durch doppeltes Locken	Ja	Ja
6.1	Tatsächliches Deadlock durch zyklisches Locking von Locks in zwei Routinen	Ja	Ja
6.2	Tatsächliches Deadlock durch zyklisches Locking von Locks in drei Routinen	Ja	Ja
7.1	Doppeltes Locking mit TryLock (TryLock \rightarrow Lock)	Ja	Nein*
7.2	Kein Doppeltes Locking mit TryLock (Lock \rightarrow TryLock)	Ja	Nein*
8.1	Deadlock durch zyklisches Locking mit TryLock	Nein	Nein*
8.2	Zyklisches Locking, welches durch TryLock nicht zu einem Deadlock führt	Ja	Nein*
9.1	Potentielles Deadlock mit RW-Lock in zwei Routinen (R1: x.RLock \rightarrow y.Lock, R2: y.Lock \rightarrow x.Lock)	Ja	Ja
9.2	Potentielles Deadlock mit RW-Lock in zwei Routinen (R1: x.RLock \rightarrow y.Lock, R2: y.RLock \rightarrow x.Lock)	Ja	Ja
9.3	Kein potentielles Deadlock mit RW-Lock in zwei Routinen (R1: x.RLock \rightarrow y.RLock, R2: y.RLock \rightarrow x.RLock)	Ja	Nein
9.4	Kein potentielles Deadlock mit RW-Lock in zwei Routinen (R1: x.Lock \rightarrow y.RLock, R2: y.RLock \rightarrow x.Lock)	Ja	Nein
9.5	Kein potentielles Deadlock mit RW-Lock in zwei Routinen (R1: x.RLock \rightarrow y.Lock, R2: y.RLock \rightarrow x.RLock)	Ja	Nein
9.6	Kein potentielles Deadlock mit RW-Lock in zwei Routinen (R1: x.Lock \rightarrow y.RLock, R2: y.RLock \rightarrow x.RLock)	Nein	Nein
10.1	Kein Potentielles Deadlock, wegen Lock von RW-Locks als Gate-Locks.	Ja	Nein
10.2	Potentielles Deadlock, da R-Lock von Deadlock nicht als Gate-Lock funktioniert.	Ja	Ja
11.1	Doppeltes Locking von RW-Locks, welches zu Deadlock führt (Lock \rightarrow Lock, RLock \rightarrow Lock, Lock \rightarrow RLock)	Ja	Ja
11.2	Doppeltes Locking von RW-Locks, welches nicht zu einem Deadlock führt (RLock \rightarrow RLock)	Ja	Nein

Tabelle 5.1: Funktionale Analyse der Standartsituationen

*: sasha-s implementiert keine Try-Locks

Für RW-Locks gibt es in beiden Detektoren eine Implementierung. Allerdings unterscheidet sich die Detektion von Deadlocks in sasha-s für RW-Locks nicht von der für normale Locks. Aus

diesem Grund kommt es bei diesem Detektor zu false-positives, wenn ein Zyklus in den Lock-Operationen aufgrund von RLock-Operationen nicht zu einem Deadlock führen kann. Deadlock-Go kann in vielen dieser Situationen eine false-positive Meldung verhindern (9.1-9.5), allerdings gibt es auch hier Situationen, in denen eine false-positive Meldung nicht verhindert werden kann (9.6).

Wie schon bei normalen Locks ist sasha-s auch bei RW-Locks nicht in der Lage zu erkennen, wenn zyklisches Locking, durch Gate-Locks nicht zu einem Deadlock führen kann, während dies für Deadlock-Go möglich ist (10.1). Es ist auch in der Lage zu erkennen, dass R-Locks nicht als Gat-Locks funktionieren. Da sasha-s allgemein nicht in der Lage ist Gate-Locks zu erkennen, wird dies automatisch erkannt. (10.2).

Ähnliches gilt auch für doppeltes Locking. Sasha-s ist nicht in der Lage zu erkennen, wenn doppeltes Locking wegen R-Lock nicht auftreten können (11.2), erkennt aber doppeltes Locking allgemein, und damit auch, wenn es mit R-Locks zu doppeltem Locking kommt (11.1). Deadlock-Go kann beide Situationen korrekt erkennen.

Im folgenden sollen nun Beispielprogramme aus GoBench [11] betrachtet werden. Dabei handelt es sich um Programme mit etwa 100 Zeilen und 1 bis 3 Routinen. Für Deadlock-Go wurden dabei alle Optionen aktiviert, um ein optimales Detektionsergebnis zu erhalten. Die folgende Tabelle 5.2 gibt für jedes Programm an, ob es von den Detektoren erkannt wurde.

ID	Deadlock-Go	sasha-s
Cockroach584	Ja	Ja
Cockroach9935	Ja	Ja
Cockroach6181	Ja	Ja
Cockroach7504	Ja	Ja
Cockroach10214	Ja	Ja
Etd5509	Nein	Nein
Etd6708	Ja	Ja
Etd10492	Ja	Ja
Kubernetes13135	Ja	Ja
Kubernetes30872	Ja	Ja
Moby4951	Ja	Ja
Moby7559	Ja	Ja
Moby17176	Nein	Nein
Moby36114	Ja	Ja
Syncthing4829	Ja	Ja

Tabelle 5.2: Funktionale Analyse der Beispielprogramme

Beide Detektoren waren in der Lage die potentiellen Deadlocks in 13 der 15 Beispielprogramme zu erkennen. Bei zwei der Programm war keiner der beiden Detektoren in der Lage, einen potentiellen Deadlock zu finden. Bei diesen beiden Programmen handelt es sich um Programme, bei denen es bei besonderen Abläufen dazu kommt, das vergessen wird Locks frei zu geben, was zu einem Deadlock führen kann. Da diese Pfade aber nur in sehr speziellen Situationen abgelaufen werden ist es verständlich, dass die Detektoren nicht in der Lage sind, diese zu erkennen.

Es ist erstaunlich, dass sasha-s gleich viele Probleme richtig erkannt hat, obwohl Deadlock-Go in den Standartproblemen in Tab. 5.1 bessere Ergebnisse gezeigt hat. Dies lässt darauf schließen, dass solche Situationen, in denen Deadlock-Go besser abschneidet nicht sehr häufig in tatsächlichen Situationen auftreten. Es muss allerdings auch beachtet werden, dass es sich bei den betrachteten Beispielen um Situationen handelt, in denen Deadlocks tatsächlich auftreten,

wären Deadlock-Go vor allem bei der Verhinderung von false-positives besser abschneidet als sasha-s. Diese Situation kommen in dem Beispielen allerdings nicht vor.

5.2 Zeitliche Analyse

Im folgenden soll der Einfluss der Detektoren auf die Laufzeit eines Programmes betrachtet werden. Dazu werden Programme basierend auf Programm 1.1 aus Tabelle 5.1 verwendet. Da die Laufzeit stark von der Anzahl der Lock und der Anzahl der Routinen abhängt, werden vier verschiedene Fälle analysiert. Als erstes wird Programm 1.1 mit zwei Routinen und zwei Locks (2×2) verwendet. Zudem wird das Programm für die restlichen drei Fälle verändert. Für den zweiten Fall werden ebenfalls zwei Routinen verwendet, allerdings mit 100 Locks (2×100). Als drittes werden 100 Routinen mit zwei Locks (100×2) und zum Schluss 100 Routinen mit 100 Locks (100×100) betrachtet. Dabei erhält man folgende Werte:

	2×2 [ms]	2×100 [ms]	100×2 [ms]	100×100 [ms]
ohne Detektor	0.006	0.010	0.110	0.244
Deadlock-Go ohne periodische	0.070+0.002 0.072	0.740 + 41.325 42.065	2.175 + 0.260 2.535	41.532 + 113 687.142 113 728.674
Deadlock-Go mit periodische	0.072+0.002 0.079	0.804+41.585 42.368	2.178 + 0.263 2.441	60.509 + 106 799.742 106 860.251
Sasha-s	0.062	12.622	11.541	507.628

Tabelle 5.3: Laufzeiten der einzelnen Programm für bzw. ohne die Detektoren

Für die Detektion mit Deadlock-Go werden sowohl die Laufzeit des eigentlichen Programms sowie die Laufzeit der abschließenden Detektion und die Gesamtzeit angegeben. Graphisch gibt sich folgendes Bild:

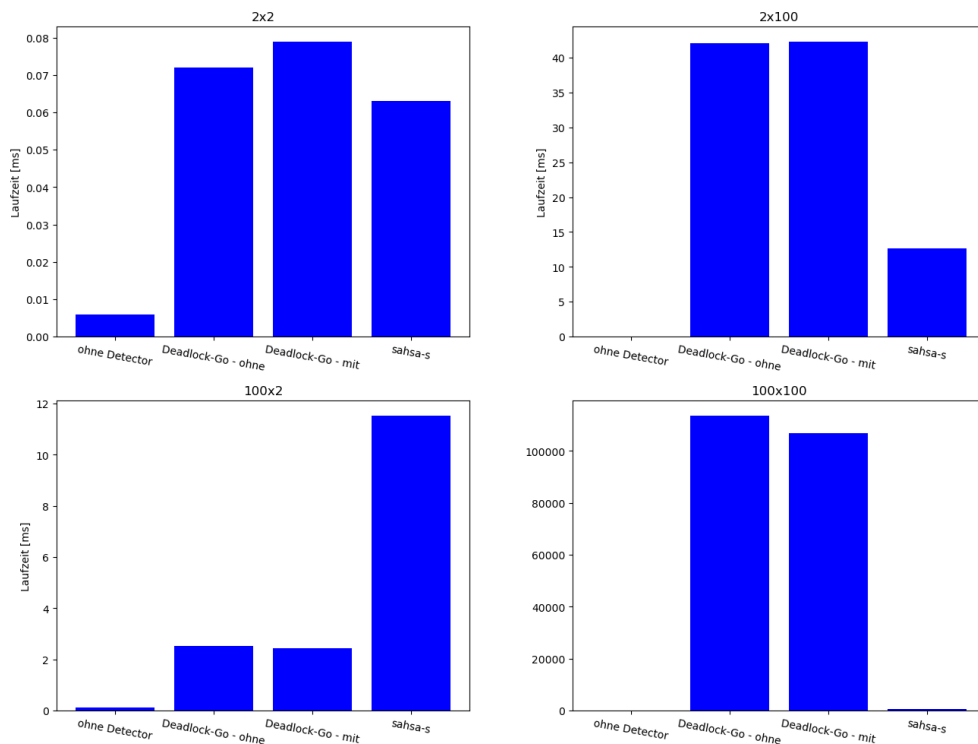


Abbildung 5.1: Laufzeiten der betrachteten Situationen ohne Detektor, mit Deadlock-Go mit und Ohne periodische Detektion und sasha-s

Es ist klar sichtbar, dass die Detektoren einen deutlichen Einfluss auf die Laufzeit haben. Bei dem Vergleich der beiden Detektoren bezüglich ihrer Laufzeit kommt es auf das betrachtete Programm an, sind sowohl die Anzahl der Routinen als auch die Anzahl der Dependencies klein, ist der Unterschied zwischen den beiden Detektoren relativ gering. Sasha-S hat einen klaren Vorteil, wenn es sich um ein Programm mit vielen Locks und damit vielen Dependencies handelt. Da sasha-s immer nur Pfade der Länge zwei in seinem Lock-Graphen betrachtet, während Deadlock-Go alle möglichen Pfade in seinen Lock-Bäumen analysiert, muss Deadlock-Go deutlich mehr Pfade analysieren, und hat daher eine signifikant längere Laufzeit. Deadlock-Go hat dafür einen Vorteil, wenn die Anzahl der Routinen groß, die Anzahl der Locks aber klein ist. Da die Lock-Bäume in Deadlock-go in diesem Fall alle sehr klein sind, verliert sasha-s seinen Vorteil, dass es nur Pfade der Länge 2 betrachtet. Allerdings überwiegt dieser wieder deutlich, wenn sowohl die Anzahl der Routinen als auch die Anzahl der Lock groß ist.

Beide Detektoren sind in der Lage, die Detektion zu deaktivieren, so dass die dann nur noch einen sehr geringen Verlangsamung der Laufzeiten haben. Nachdem ein Programm zu Ende entwickelt wurde, und alle potentiellen Deadlock beseitigt wurden, kann die Detektion somit deaktiviert werden um die schnelleren Laufzeiten zu erreichen, ohne dass der Detector aus dem Code entfernt werden muss.

6 Zusammenfassung

Das Projekt betrachtete Möglichkeiten zur Detektion von Ressourcen-Deadlocks in Go und entwickelte, sowie implementierte einen eigenen Detektor. Neben dem selbst implementierten Detektor Deadlock-Go wurde ein weiterer Detektor go-deadlock betrachtet. Beide Detektoren benutzen dynamische Detektion um Deadlocks, welche durch Locks und RW-Locks erzeugt werden zu erkennen. Dabei nutzt go-deadlock Lock-Graphen, während Deadlock-Go auf Lock-Bäumen arbeitet. Beide Programme sind in der Lage viele solche Deadlocks zu erkennen, wobei Deadlock-Go in den Betrachteten Standard-situationen besser abschneidet, gerade auch was die Vermeidung von Falsch-Positives bei RW-Locks angeht. Beide Detektoren haben einen negativen Einfluss auf die Laufzeit der Programme, wobei der genaue Einfluss von der Anzahl der Locks und Routinen abhängt. Nachdem die Detektoren in der Softwareentwicklung verwendet wurden um potentielle Deadlocks zu verhindern, können sie beide deaktiviert werden. Dadurch ist es möglich, dass die Programme nahezu ohne Verschlechterung der Laufzeit laufen können, ohne dass das Programm umgeschrieben werden muss.

Quellen

- [1] 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>.
- [2] 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.
- [3] S. Lu, S. Park, E. Seo und Y. Zhou, „Learning from Mistakes: A Comprehensive Study on Real World Concurrency Bug Characteristics“, Jg. 43, Nr. 3, S. 329–339, März 2008, ISSN: 0362-1340. DOI: 10.1145/1353536.1346323. Adresse: <https://doi.org/10.1145/1353536.1346323>.
- [4] The Go Authors, *Go Runtime Library src/runtime/proc.go*, <https://go.dev/src/runtime/proc.go#L4935>. (besucht am 10.05.2022).
- [5] sasha-s, *go-deadlock*, <https://github.com/sasha-s/go-deadlock>, 2018. (besucht am 03.05.2022).
- [6] M. Sulzmann, *Dynamic deadlock prediction*, <https://sulzmann.github.io/AutonomieSysteme/lec-deadlock.html>. (besucht am 03.05.2022).
- [7] S. Bensalem und K. Havelund, „Dynamic Deadlock Analysis of Multi-threaded Programs“, in *Hardware and Software, Verification and Testing*, S. Ur, E. Bin und Y. Wolfsthal, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 208–223, ISBN: 978-3-540-32605-2. DOI: 10.1007/11678779_15.
- [8] Y. Cai und W. K. Chan, „MagicFuzzer: Scalable deadlock detection for large-scale applications“, in *2012 34th International Conference on Software Engineering (ICSE)*, 2012, S. 606–616. DOI: 10.1109/ICSE.2012.6227156.
- [11] 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)*, 2021, S. 187–199. DOI: 10.1109/CGO51591.2021.9370317.

Referenzen

- [9] E. Kassubek, *Deadlock-Go*, <https://github.com/ErikKassubek/Deadlock-Go>, 2021. (besucht am 18.07.2022).
- [10] E. Kassubek, *DeadlockExamples*, <https://github.com/ErikKassubek/BachelorProjektGoDeadlockDetection/tree/main/DeadlockExamples>, 2021. (besucht am 18.07.2022).