



Fakultät Informatik, Institut für Systemarchitektur, Professur für Rechnernetze

BESTIMMUNG DER DIENSTGÜTEZUVERLÄSSIGKEIT IN ZUSAMMENGESetzten DIENSTLEISTUNGEN IM INTERNET DER DIENSTE

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt an der
Technischen Universität Dresden
Fakultät Informatik

eingereicht von
Dipl.-Inf. Anja Strunk
geboren am 07. Februar 1983 in Pirna

Betreuender Hochschullehrer:
Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. Alexander Schill

Gutachter:
Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. A. Schill (TU Dresden)
Prof. Dr. rer. pol. York Sure (Universität Koblenz-Landau)

- Dresden, Dezember 2010 -

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, Anja Strunk, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema „Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit in zusammengesetzten Dienstleistungen im Internet der Dienste“ selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht wurden.

Dresden, den

ZUSAMMENFASSUNG

Das Anbieten, die Vermittlung und der Konsum von Softwarekomponenten nach dem Paradigma „Software-as-a-Service“ über das Internet wird zunehmend populärer. Diese so genannten elektronischen Dienstleistungen unterschiedlicher Komplexität werden auf Netzwerkservern zur Verfügung gestellt und können von anderen Anwendungen eingebunden werden. Damit können Ressourcen für die Entwicklung und das Betreiben eigener Dienste eingespart werden. Traditionelle Beispiele solcher Dienste sind Währungsumrechnungen¹ oder Wettervorhersagen², aber auch komplexere Geschäftsprozesse, wie z.B. Rechnungsprüfdienste³, werden vermehrt als elektronische Dienste bereitgestellt.

Voraussetzung für die Akzeptanz der elektronischen Dienstleistungen ist die Absicherung deren Dienstgüte (engl. Quality of Service). Die Dienstgüte gibt Auskunft darüber, wie gut ein Dienst seine Funktion erbringt. Klassische Parameter sind Antwortzeit oder Verfügbarkeit. Die Betrachtung der Dienstgüte hat für den Dienstanbieter als auch für den Dienstanbieter Vorteile: Durch die Angabe der Dienstgüte kann sich der Dienstanbieter von seiner Konkurrenz abgrenzen, während der zukünftige Dienstanutzer in der Lage ist, die Performanz seiner Systeme, welche den Dienst integrieren, abzuschätzen. Beide Parteien streben eine möglichst hohe Dienstgüte an.

Die Bestimmung der Dienstgüte in zusammengesetzten Dienstleistungen wurde in den letzten Jahren viel diskutiert. In diesem Zusammenhang ist besonders die Dienstgütezuerlässigkeit eines Dienstes wichtig. Die Dienstgütezuerlässigkeit gibt an, wie sicher es einem Dienst gelingt, seine Qualitätsversprechen einzuhalten. Je nach Kontext spricht man von relativer oder absoluter Dienstgütezuerlässigkeit. Die relative Dienstgütezuerlässigkeit bezieht sich auf die Fähigkeit eines Dienstes seine Dienstgütegarantien während der nächsten Interaktion einzuhalten, während sich die absolute Dienstgütezuerlässigkeit auf den Zeitraum der nächsten n Interaktionen bezieht. Verletzt ein Dienst eine Dienstgütegarantie, weil er beispielsweise nicht in der vorgegebenen Zeit antwortet, so gefährdet der Dienstanutzer die Performanz seiner Systeme, während der Dienstanbieter mit Strafzahlungen zu rechnen hat.

Die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung hat verschiedene Vorteile. Sie gestattet dem Dienstanbieter z.B. drohende Qualitätsverschlechterungen vorherzusagen und auf diese geeignet zu reagieren. Auch der Dienstanutzer profitiert von der Existenz der Dienstgütezuerlässigkeit. Er kann z.B. das Risiko für seine Systeme besser kalkulieren.

Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit in zusammengesetzten Dienstleistungen. Zu diesem Zweck wird die Dienstgütezuerlässigkeit von Teildiensten auf Basis ihrer Monitoring-Historie vorhergesagt. Die Monitoring-Historie protokolliert für jeden Dienst und jede Dienstgütegarantie, ob in vergangenen Interaktionen Dienstgüteverletzungen stattgefunden haben. Die Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes wird als Verletzungswahrscheinlichkeit gemessen, die angibt, wie wahrscheinlich eine Dienstgüteverletzung durch den Teildienst ist.

Für die Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit kommt eine Markov-Kette erster Ordnung zum Einsatz. Die Bestimmung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit beruht auf den Prinzipien der allgemeinen Stochastik. Die Berechnungszeit beträgt in beiden Fällen wenige Millisekunden. Beide Verfahren liefern äußerst zuverlässige Vorhersagewerte.

Auf Basis der Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienste wird die Dienstgütezuerlässigkeit der zusammengesetzten Dienstleistung bestimmt. Sie kann detailliert in Form der Verletzungsmatrix oder als einfacher numerischer Wert in Form der Verletzungszahl angegeben werden. Die Verletzungsmatrix einer Dienstgütegarantie enthält die Eintrittswahrscheinlichkeit für jede mögliche Anzahl von Dienstgüteverletzungen. Ihre Aufstellung erfordert exponentiellen Aufwand. Demgegenüber besitzt die Verletzungszahl eine lineare Berechnungszeit. Sie gibt die Belastung einer Dienstleistung mit Dienstgüteverletzungen an. Die Dienstgütezuerlässigkeit ist dabei umso geringer je kleiner die Werte der Verletzungsmatrix und Verletzungszahl sind.

¹ <http://www.websvcicx.com/currencyconvertor.aspx?WSDL>

² <http://www.premis.cz/PremisWS/MeteorologyWS.aspx?WSDL>

³ <https://b2b.hqclaims.com/SCClientWS/SCClientAuditRequestWebService.aspx?wsdl>

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| I. Grundlagen | 7 |
| 1. Einführung | 7 |
| 1.1 Motivation | 7 |
| 1.2 Ziele der Arbeit | 8 |
| 1.3 Gliederung | 8 |
| 2. Begriffsklärung und Basiskonzepte..... | 11 |
| 2.1 Internet der Dienste | 11 |
| 2.1.1 Rollenmodell..... | 11 |
| 2.1.2 Beschreibung der Dienste | 12 |
| 2.1.3 Infrastruktur | 13 |
| 2.2 Dienstgüte zusammengesetzter Dienstleistungen..... | 14 |
| 2.2.1 Höhe der Dienstgüte | 15 |
| 2.2.2 Zuverlässigkeit der Dienstgüte | 15 |
| 2.3 Binden in zusammengesetzten Dienstleistungen..... | 16 |
| 2.3.1 Wahl des Ausführungsplans - Optimierungsproblem | 17 |
| 2.3.2 Zeitpunkt des Bindens – Entscheidungsproblem | 17 |
| 2.4 Zusammenfassung | 18 |
| 3. Verwandte Arbeiten | 19 |
| 3.1 Klassifikation existierender Ansätze zum qualitätssensitiven Binden..... | 19 |
| 3.1.1 Optimierungsalgorithmen | 19 |
| 3.1.2 Infrastruktur | 23 |
| 3.1.3 Zusammenfassung existierender Ansätze zum qualitätssensitiven Binden..... | 25 |
| 3.2 Klassifikation existierender Arbeiten zur Dienstgüteüberwachung..... | 30 |
| 3.2.1 Zuständigkeit | 30 |
| 3.2.2 Intrusivität..... | 30 |
| 3.2.3 Kontinuität..... | 31 |
| 3.2.4 Monitoring-Architektur..... | 31 |
| 3.2.5 Zusammenfassung existierender Arbeiten zur Dienstgüteüberwachung | 31 |
| 3.3 Zusammenfassung | 32 |
| II. Konzeption..... | 35 |
| 4. Analyse der Problemstellung | 35 |
| 4.1 Motivierendes Szenario | 35 |
| 4.2 Methodik | 36 |
| 4.3 Metriken und Wertebereiche | 37 |
| 4.3.1 Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes..... | 37 |
| 4.3.2 Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans | 38 |
| 4.4 Anforderungen..... | 39 |
| 4.4.1 Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes..... | 39 |
| 4.4.2 Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans | 40 |
| 4.5 Zusammenfassung | 40 |
| 5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften | 43 |
| 5.1 Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes..... | 43 |
| 5.1.1 Relative Verletzungswahrscheinlichkeit..... | 43 |
| 5.1.2 Absolute Verletzungswahrscheinlichkeit..... | 48 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 5.2 | Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans | 50 |
| 5.2.1 | Verletzungsmatrix | 51 |
| 5.2.2 | Verletzungszahl..... | 59 |
| 5.3 | Zusammenfassung | 62 |
| 6. | Diskussion | 63 |
| 6.1 | Umsetzung der Anforderungen..... | 63 |
| 6.1.1 | Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes..... | 63 |
| 6.1.2 | Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans | 64 |
| 6.2 | Zeitkomplexität..... | 64 |
| 6.2.1 | Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes..... | 64 |
| 6.2.2 | Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans | 65 |
| 6.3 | Zusammenfassung | 66 |
| III. | Evaluation..... | 67 |
| 7. | Evaluation zur Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes | 67 |
| 7.1 | Performanz..... | 67 |
| 7.1.1 | Relative Verletzungswahrscheinlichkeit | 67 |
| 7.1.2 | Absolute Verletzungswahrscheinlichkeit | 70 |
| 7.2 | Korrektheit..... | 71 |
| 7.2.1 | Relative Verletzungswahrscheinlichkeit | 76 |
| 7.2.2 | Absolute Verletzungswahrscheinlichkeit | 81 |
| 7.3 | Zusammenfassung | 84 |
| 8. | Evaluation zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans | 87 |
| 8.1 | Performanz..... | 87 |
| 8.1.1 | Verletzungsmatrix | 87 |
| 8.1.2 | Verletzungszahl..... | 91 |
| 8.2 | Korrektheit..... | 93 |
| 8.2.1 | Verletzungsmatrix | 93 |
| 8.2.2 | Verletzungszahl..... | 97 |
| 8.3 | Zusammenfassung | 100 |
| 9. | Zusammenfassung und Ausblick | 103 |
| 9.1 | Zusammenfassung | 103 |
| 9.2 | Ausblick..... | 106 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Interaktion zwischen Dienstanwender und Dienstleistung | 12 |
| Abbildung 2: Elemente der Dienstbeschreibung | 12 |
| Abbildung 3: Infrastruktur des Internets der Dienste | 13 |
| Abbildung 4: Zusammengesetzte Dienstleistung A-B-C | 14 |
| Abbildung 5: Binden zwischen Task und Teildienst..... | 16 |
| Abbildung 6: Basisstruktur für die Durchführung qualitätssensitiver Bindungsprozesse | 24 |
| Abbildung 7: Minimalarchitektur einer Komponente zur Dienstgüteüberwachung..... | 31 |
| Abbildung 8: Öko-Rechner als zusammengesetzter IT-Dienst | 35 |
| Abbildung 9: Methodik bei der Bestimmung der Dienstgütezuverlässigkeit des Ausführungsplans A..... | 37 |
| Abbildung 10: Modelklassen der Zeitreihenanalyse | 44 |
| Abbildung 11: Ausführungsplan A des Öko-Rechners | 54 |
| Abbildung 12: Methodik der Performanz-Tests für die Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit..... | 68 |
| Abbildung 13: Berechnungszeit zur Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit..... | 68 |
| Abbildung 14: Vorgehen bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit..... | 69 |
| Abbildung 15: Methodik der Performanz-Tests für die Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit..... | 70 |
| Abbildung 16: Berechnungszeit zur Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit | 71 |
| Abbildung 17: Auszug Testreihe 1 | 71 |
| Abbildung 18: Auszug Testreihe 2..... | 71 |
| Abbildung 19: Auszug Testreihe 3..... | 72 |
| Abbildung 20: Auszug Testreihe 4..... | 72 |
| Abbildung 21: Auszug Testreihe 5..... | 72 |
| Abbildung 22: Auszug Testreihe 6..... | 72 |
| Abbildung 23: Auszug Testreihe 7..... | 73 |
| Abbildung 24: Auszug Testreihe 8..... | 73 |
| Abbildung 25: Auszug Testreihe 9..... | 73 |
| Abbildung 26: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des J2EE HTTP Proxies | 74 |
| Abbildung 27: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des J2EE Container001..... | 74 |
| Abbildung 28: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des J2EE Container002..... | 75 |
| Abbildung 29: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des J2EE Container003..... | 75 |
| Abbildung 30: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des J2EE Container004..... | 76 |
| Abbildung 31: Methodik der Korrektheitstests für die Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit..... | 76 |
| Abbildung 32: Mittlerer quadratischer Fehler simulierter Monitoring-Historien bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung 1, 2, und 3 | 77 |
| Abbildung 33: Mittlerer quadratischer Fehler simulierter Monitoring-Historien bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung 1, 2 und 3 ($n > 100$) | 78 |
| Abbildung 34: Mittlerer quadratischer Fehler simulierten Monitoring-Historien bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung $k > 3$ | 79 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 35: Mittlerer quadratischer Fehler realer Monitoring-Historien bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung $k > 3$.. | 80 |
| Abbildung 36: Mittlerer quadratischer Fehler realer Monitoring-Historien bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung $k < 4$, $n > 150$ | 80 |
| Abbildung 37: Mittlerer quadratischer Fehler reale Monitoring-Historien bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung $k > 3$, $n > 150$ | 81 |
| Abbildung 38: Methodik der Korrektheitstests für die Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit | 82 |
| Abbildung 39: Mittlerer quadratischer Fehler generierter Monitoring-Historien bei der Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit | 83 |
| Abbildung 40: mittlerer quadratischer Fehler realer Monitoring-Historien bei der Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit | 84 |
| Abbildung 41: Methodik der Performanz-Tests zur Bestimmung aller Verletzungsmatrizen eines Ausführungsplans | 88 |
| Abbildung 42: Berechnungszeit für die Aufstellung aller Verletzungsmatrizen eines Ausführungsplans für $z \leq 20$ | 89 |
| Abbildung 43: Berechnungszeit für die Aufstellung aller Verletzungsmatrizen eines Ausführungsplans für $z > 20$ | 89 |
| Abbildung 44: Performanz-Unterschied bei der Aufstellung aller Verletzungsmatrizen eines Ausführungsplans | 90 |
| Abbildung 45: Mittlerer Performanz-Gewinn beim Einsatz des optimierten Verfahren zur Aufstellung aller Verletzungsmatrizen eines Ausführungsplans | 91 |
| Abbildung 46: Methodik der Performanz-Tests zur Bestimmung der Verletzungszahl eines Ausführungsplans | 91 |
| Abbildung 47: Berechnungszeit für die Ermittlung der allgemeinen Verletzungszahl | 92 |
| Abbildung 48: Mittlerer quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer bestimmten Anzahl von Dienstgüteverletzungen | 97 |
| Abbildung 49: Mittlerer quadratischer Fehler bei der Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl | 99 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1: Berechnung der Dienstgüte in zusammengesetzten Dienstleistungen ([4], [17]) | 15 |
| Tabelle 2: Vergleich existierender Forschungsarbeiten im Bereich qualitätssensitiven Bindens: Optimierungsalgorithmen – exakte Verfahren | 27 |
| Tabelle 3: Vergleich existierender Forschungsarbeiten im Bereich qualitätssensitiven Bindens: Optimierungsalgorithmen – Heuristiken | 28 |
| Tabelle 4: Vergleich existierender Forschungsarbeiten im Bereich qualitätssensitiven Bindens: Infrastruktur | 29 |
| Tabelle 5: Vergleich existierender Forschungsarbeiten im Bereich Dienstgüteüberwachung | 32 |
| Tabelle 6: potentielle Teildienste für die Tasks des Öko-Rechners | 36 |
| Tabelle 7: Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur Prognose von Verletzungswahrscheinlichkeiten, nach [30] | 44 |
| Tabelle 8: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des Teildienstes „IMDS-Europe“ | 47 |
| Tabelle 9: Anzahl der Teildienstaufrufe der einzelnen Kontrollaktivitäten | 51 |
| Tabelle 10: Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienste des Öko-Rechners | 55 |
| Tabelle 11: Anzahl der Teildienstaufrufe im Ausführungsplan <i>A</i> des Öko-Rechners | 55 |
| Tabelle 12: Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Fehlerszenarien für die Fehlerhäufigkeit | 56 |
| Tabelle 13: Verletzungsmatrix für die Fehlerhäufigkeit im Ausführungsplan <i>A</i> des Öko-Rechners | 57 |
| Tabelle 14: Verletzungsmatrix für die Fehlerhäufigkeit in Ausführungsplan des Öko-Rechners –1 | 57 |
| Tabelle 15: Verletzungsmatrix für die Fehlerhäufigkeit in Ausführungsplan des Öko-Rechners –2 | 58 |
| Tabelle 16: Verletzungsmatrix für die Antwortzeit im Ausführungsplan <i>A</i> des Öko-Rechners | 59 |
| Tabelle 17: Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienste | 93 |
| Tabelle 18: Häufigkeit von Dienstgüteverletzungen von Prozess 1 bei 100 Aufrufen | 94 |
| Tabelle 19: Quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für <i>i</i> Verletzungen der Dienstgüteeigenschaften SLO3 bei 100 Aufrufen von Prozess1 | 96 |
| Tabelle 20: Quadratischer Fehler bei der Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl der Dienstgüteeigenschaften SLO1 für die Versuchsreihe mit 100 Aufrufen | 98 |
| Tabelle 21: Verletzungszahlen für die drei Dienstgütegarantien der acht Testprozesse | 100 |

I. Grundlagen

Abschnitt I beschäftigt sich mit den Grundlagen, die für das Verständnis der Arbeit notwendig sind. Der Abschnitt beginnt mit der Motivation und der Zielstellung der Arbeit in Kapitel 1. Daran schließt sich eine detaillierte Beschreibung aller verständnisrelevanten Definitionen und Basiskonzepte an (Kapitel 2). So werden u.a. das Internet der Dienste und die Besonderheiten bei der Qualitätsbetrachtung von zusammengesetzten Dienstleistungen erklärt. Abschließend stellt Kapitel 3 existierende und verwandte Arbeiten aus dem Bereich qualitätssensitiver Dienstleistungen im Internet der Dienste vor.

1. Einführung

Das einführende Kapitel verdeutlicht die Problemstellung der Arbeit. Es werden die Motivation und Ziele sowie die Gliederung der Arbeit vorgestellt.

1.1 Motivation

Das *Internet der Dienste*, ein Begriff der zunehmend populärer wird, beschreibt eine Tendenz bei dem technische wie nichttechnische Dienstleistungen über das Internet angeboten, vermittelt und konsumiert werden. Von besonderem Interesse sind hierbei technische Dienstleistungen, die nach dem Paradigma „*Software-as-a-Service*“ Softwarekomponenten unterschiedlicher Komplexität auf Netzwerkservern zur Nutzung bereitstellen. Externe Anwendungen können diese Module einbinden, um einen Teil ihrer Systemfunktionalität zu realisieren. Auf Ressourcen für Entwicklung und Betreiben eigener Module kann verzichtet werden.

Grundlage für jede erfolgreiche Geschäftsbeziehung im Internet der Dienste ist, neben der eigentlichen Funktion einer Dienstleistung, deren Dienstgüte (engl. Quality of Service (QoS)). Die Dienstgüte ist ein Maß für die Qualität, mit der ein Dienst seine Funktionalität erbringt. Typische Beispiele sind Antwortzeit oder Verfügbarkeit. Beachtet man die Dienstgüte eines Dienstes so hat dies Vorteile für beide Parteien, den Dienstanbieter und den Dienstanutzer: Der Dienstanbieter kann sich durch Publizieren der Dienstgüte seiner Dienste von der Konkurrenz abgrenzen. Dem zukünftigen Dienstanutzer ist es möglich, die Performanz seiner Systeme abzuschätzen, die einen oder mehrere Dienste integrierten. Hierbei wird von beiden Parteien eine möglichst hohe Dienstgüte angestrebt, die in der Regel schriftlich im Rahmen eines Nutzungsvertrages fixiert wird.

Die Betrachtung von Dienstgüte im Internet der Dienste wurde in den letzten Jahren viel diskutiert ([1] - [17]). Zwei zentrale Herausforderungen im Kontext zusammengesetzter Dienstleistungen bilden hierbei (1) die Bereitstellung einer möglichst hohen Dienstgüte und (2) die Bereitstellung einer möglichst zuverlässigen Dienstgüte.

Die Entwicklung von Methoden zur Bereitstellung zusammengesetzter Dienstleistungen hoher Dienstgüte ist Gegenstand des Forschungsbereiches *qualitätssensitiven Bindens* (engl. QoS-aware Composition) ([3], [8], [9], [10]). Ziel dabei ist es, durch Selektion geeigneter Teildienste, die Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung gezielt zu maximieren. Die Basis hierfür bilden zum Einen die Konzepte der Optimierungstheorie und zum Anderen die von Jaeger et al. [4] und Cardoso et al. [17] entwickelten Berechnungsvorschriften zur Bestimmung der Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung auf Basis der Dienstgüte der genutzten Teildienste. Die Antwortzeit einer zusammengesetzten Dienstleistung beispielsweise ermittelt sich aus der Summe der Antwortzeiten aller sequentiell aufgerufenen Teildienste.

Als zweite Herausforderung im Rahmen zusammengesetzter Dienstleistungen gilt es neben einer hohen auch eine möglichst zuverlässige Dienstgüte bereitzustellen. Je zuverlässiger ein Dienst ist, desto seltener kommt es zu Verletzungen vertraglich festgelegter Qualitätsversprechen. Dienstgütevletzungen sind für beide Parteien, den Dienstanutzer und den Dienstanbieter, von

1. Einführung

Nachteil: Der Dienstnutzer muss mit Qualitätseinbußen der Systeme rechnen, die den unzuverlässigen Dienst integrieren, während der Dienstanbieter u.a. Strafzahlungen aufgrund des durch die Dienstgütereletzung entstandenen Vertragsbruches zu befürchten hat. Im Gegensatz zur Höhe der Dienstgüte, findet deren Zuverlässigkeit in aktuellen Forschungsansätzen keine Beachtung, obwohl sie einen wichtigen Bestandteil darstellt. Nicht zuletzt werden die Kaufentscheidung eines potentiellen Dienstnutzers sowie der Profit eines Dienstbetreibers davon abhängig sein, wie zuverlässig ein Dienst bezüglich seiner Dienstgütegarantien ist.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen geeignete Methoden entwickelt werden, welche die Zuverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung bezüglich ihrer Dienstgütegarantien bestimmen, um im Rahmen des qualitätssensitiven Bindens nicht nur hochqualitative, sondern auch hochzuverlässige Dienste zu erzeugen.

1.2 Ziele der Arbeit

Für die Bereitstellung hochzuverlässiger zusammengesetzter Dienstleistungen ist es notwendig die Dienstgütezuhverlässigkeit zu quantifizieren. Die Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung ist von der Dienstgüte der genutzten Teildienste abhängig ([4], [17]). Folglich ist auch ihre Dienstgütezuhverlässigkeit im starken Maße davon abhängig, ob die Teildienste ihre Qualitätsversprechen einhalten können. Hieraus lässt sich die erste These der Arbeit definieren:

These 1: Die Zuverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung bezüglich ihrer Qualitätsversprechen kann auf Basis der Dienstgütezuhverlässigkeit der genutzten Teildienste berechnet werden.

Für die genaue Berechnung der Dienstgütezuhverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung ist eine genaue Kenntnis der zukünftigen Dienstgütezuhverlässigkeit der Teildienste notwendig. Hieraus resultiert die zweite These dieser Arbeit:

These 2: Die Zuverlässigkeit eines Teildienstes bezüglich seiner Qualitätsversprechen kann auf Basis seiner Monitoring-Historie vorhergesagt werden.

Die Monitoring-Historie speichert die im Rahmen vergangener Interaktionen gemessene Dienstgüte sowie stattgefundenen Dienstgütereletzungen eines Teildienstes als Maß für seine Dienstgütezuhverlässigkeit.

1.3 Gliederung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei große Abschnitte. Abschnitt I widmet sich den Grundlagen. Kapitel 1 beschreibt die Motivation und die Zielstellung der Arbeit, gefolgt von der Erklärung wichtiger Basiskonzepte in Kapitel 2. Die Betrachtung verwandter Arbeiten auf dem Gebiet der Dienstgütebetrachtung in zusammengesetzten Dienstleistungen erfolgt in Kapitel 3.

Der zweite Abschnitt der Arbeit befasst sich mit der Lösungsfindung. Das Ziel ist es die Dienstgütezuhverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung zu bestimmen. Eine ausführliche Analyse dieser Problemstellung findet sich in Kapitel 4. Das Entwurfskapitel (Kapitel 5) präsentiert Konzepte zur Realisierung der in dieser Arbeit aufgestellten Thesen. Es werden konkrete Vorschriften zur Berechnung der Dienstgütezuhverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung und zur Vorhersage der Dienstgütezuhverlässigkeit für Teildienste definiert. Im letzten Kapitel (Kapitel 6) von Abschnitt II werden die entwickelten Konzepte abschließend kritisch diskutiert.

Abschnitt III enthält die Validierung der Arbeit. Diese bezieht sich auf die Evaluation der bereitgestellten Vorschriften zur Bestimmung bzw. Vorhersage der Dienstgütezuhverlässigkeit. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht neben der Korrektheit der Formeln auch der Rechenauf-

wand bei ihrer Anwendung. Mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem kurzen Ausblick auf weiterführende Forschungsaspekte schließt die Arbeit ab.

2. Begriffsklärung und Basiskonzepte

Kapitel 2 erläutert wichtige Begriffe und Konzepte, die die Basis für das Verständnis der Arbeit bilden. Es handelt sich hierbei um (1) das Internet der Dienste, (2) eine detaillierte Betrachtung von Dienstgüte in zusammengesetzten Dienstleistungen und (3) die Erklärung, was man im Kontext zusammengesetzter Dienstleistungen unter „Binden“ versteht.

2.1 Internet der Dienste

Das *Internet der Dienste* beschreibt eine Vision in der technische wie nichttechnische Dienstleistungen über das Internet angeboten, vermittelt und konsumiert werden. Von besonderem Interesse sind technische Dienstleistungen. Sie bieten nach dem Paradigma „*Software-as-a-Service*“ Softwarekomponenten unterschiedlicher Komplexität auf Netzwerkservern zur Nutzung an und können von anderen Anwendungen eingebunden werden, um einen Teil ihrer Systemfunktionalität zu realisieren. Auf Ressourcen für Entwicklung und Betreiben eigener Dienste kann verzichtet werden.

Die Vision des Internets der Dienste ist die globale Etablierung Service-orientierter Architekturen (SOA), ein Begriff der erstmals von Gartner¹ 1996 eingeführt wurde. Er beschreibt ein Software-Paradigma, bei dem die Gesamtfunktionalität in Form von Diensten (engl. Services) verteilt realisiert und von verschiedenen Besitzern verwaltet wird. Auf diese Weise ist es möglich auch komplexe Software-Systeme zu betreiben ohne alle erforderlichen Komponenten selbst bereitstellen zu müssen.

Im Folgenden wird auf die drei wesentlichen Konzepte des Internets der Dienste genauer eingegangen: (1) das Rollenmodell, (2) die Beschreibung der Dienste und (3) die Infrastruktur.

2.1.1 Rollenmodell

Ein Rollenmodell beschreibt die Verantwortlichkeiten innerhalb eines Softwaresystems, die dessen Funktionsweise sicherstellen. Das Internet der Dienste definiert fünf Rollen: (1) die Dienstleistung und (2) deren Betreiber, (3) den Dienstonutzer und (4) den Konsumenten sowie (5) den Dienstentwickler.

2.1.1.1 Dienstleistung & (Dienst-)Betreiber

Eine *Dienstleistung* (kurz. Dienst) auch als Service bezeichnet, stellt eine für die Nutzung durch Dritte auf Netzwerkservern zur Verfügung stehende Softwarekomponente dar. Die Dienstleistung ist gegenüber deren *Betreiber* (engl. Provider) abzugrenzen. Als Betreiber wird die juristische oder natürliche Person bezeichnet, die den Dienst bereitstellt.

2.1.1.2 Dienstonutzer & (Dienst-) Konsument

Der *Dienstonutzer* (kurz. Nutzer) nimmt eine Dienstleistung in Anspruch. Es handelt sich hierbei immer um die juristische oder natürliche Person, die die Auswahl eines Dienstes vornimmt und mit deren Betreiber eine wirtschaftliche Beziehung eingeht. Demgegenüber steht der *Konsument* der Dienstleistung. Hiermit wird das eigentliche Softwaresystem bezeichnet, in das die Dienstleistung integriert wird und mit dem der Nachrichtenaustausch erfolgt (siehe Abbildung 1)

¹ <http://www.gartner.com/>

2. Begriffsklärung und Basiskonzepte

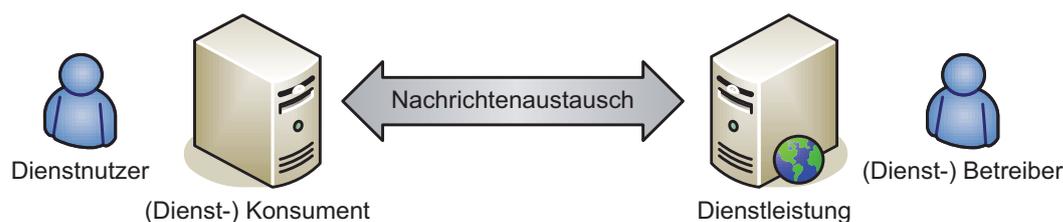


Abbildung 1: Interaktion zwischen Dienstnutzer und Dienstleistung

2.1.1.3 Dienstentwickler

Der in der klassischen SOA vernachlässigte *Dienstentwickler* (kurz. Entwickler) ist für die Erstellung der Dienstleistung verantwortlich. In der Regel handelt es sich hierbei um eine juristische oder natürliche Person, die die notwendige Expertise zur Softwareentwicklung aufweist.

2.1.2 Beschreibung der Dienste

Für die Nutzung und Ausführung der Dienste im Internet der Dienste ist eine ausreichend Beschreibung dieser notwendig. Diese beinhaltet die Definition von vier Aspekten (siehe Abbildung 2): (1) Eigenschaften, (2) Schnittstelle, (3) Verhalten und (4) Daten des Dienstes.

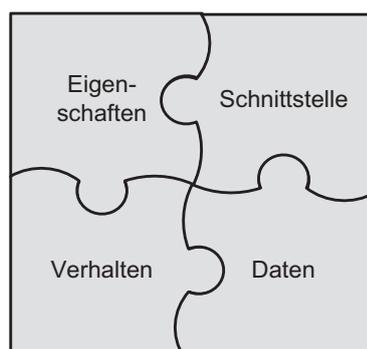


Abbildung 2: Elemente der Dienstbeschreibung

2.1.2.1 Beschreibung der Diensteseigenschaften

Die Eigenschaften einer Dienstleistung lassen sich in funktionale und nicht-funktionale Aspekte unterteilen. *Funktionale Eigenschaften* beschreiben was der Dienst tut, z.B. „Währungsumrechnung vornehmen“. *Nicht-funktionale Eigenschaften* enthalten Zusatzinformation über den Dienst, die sich nach *Dienstgüte* und *Meta-Daten* unterteilen lassen.

Die *Dienstgüte* macht Aussagen über die Qualität mit der ein Dienst seine Funktionalität erbringt. Klassische Beispiele sind Antwortzeit und Verfügbarkeit eines Dienstes.

Alle Informationen, die sich nicht auf die Qualität der Dienstleistung beziehen, werden als *Meta-Daten* bezeichnet. So findet man Informationen über den Betreiber, Autor oder das Erstellungsdatum des Dienstes.

2.1.2.2 Schnittstellenbeschreibung

Die *Schnittstellenbeschreibung* enthält alle Informationen, die für die technische Integration der Dienstleistung in Service-orientierte Systeme notwendig sind. Dazu zählen die bereitgestellten Operationen, das Format der ausgetauschten Nachrichten sowie Adress- und Protokollinformationen.

2.1.2.3 Datenbeschreibung

Die *Datenbeschreibung* beinhaltet die formale Definition der vom Dienst konsumierten und produzierten Daten. Je nach Standard kann eine Integration der Datenbeschreibung in die Schnittstellen- und Verhaltensbeschreibung einer Dienstleistung erfolgen.

2.1.2.4 Verhaltensbeschreibung

Die *Verhaltensbeschreibung* eines Dienstes definiert, wie dessen Funktionalität erbracht wird. Man unterscheidet hier zwischen atomaren Diensten und zusammengesetzten Diensten. Zusammengesetzte Dienste erbringen ihre Funktionalität indem sie wiederum andere, so genannte Teildienste nutzen, während atomare Dienste dies in alleiniger Verantwortung tun.

2.1.3 Infrastruktur

Die wesentlichen Funktionen des Internets der Dienste sind das Veröffentlichen, Auffinden und Ausführen von Diensten. Die hierfür notwendige Infrastruktur teilt sich in (1) die Entwicklungsumgebung, (2) den Marktplatz und (3) die Laufzeitumgebung. Alle drei Komponenten interagieren sowohl untereinander als auch mit den Rollen (siehe Abbildung 3) und werden im Folgenden näher beschrieben.

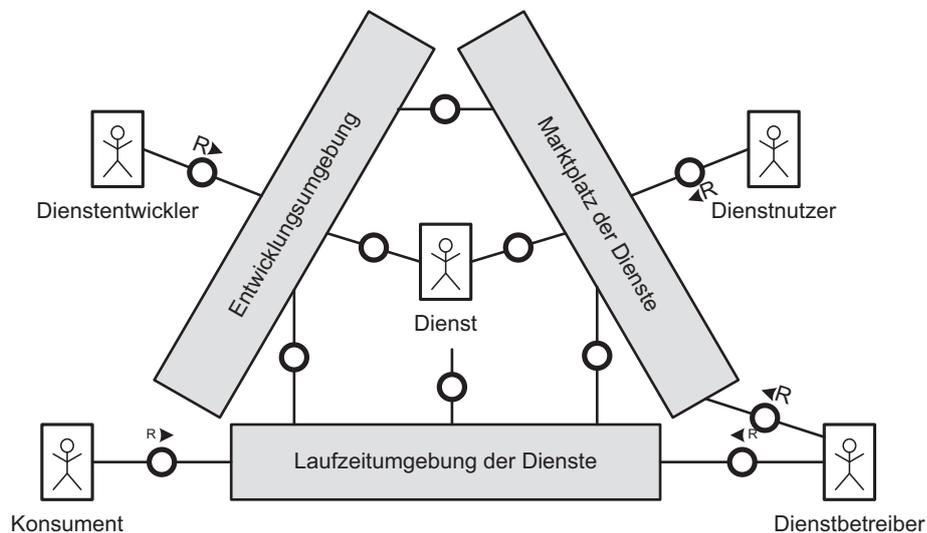


Abbildung 3: Infrastruktur des Internets der Dienste

2.1.3.1 Entwicklungsumgebung

Aufgabe der Entwicklungsumgebung ist die Unterstützung des Dienstenwicklers bei der Erstellung neuer Dienstleistungen. Hierfür bietet sie eine Menge von Werkzeugen an, um die verschiedenen Aspekte eines Dienstes schnell und kostengünstig zu beschreiben. Idealerweise ist die Entwicklungsumgebung über eine Schnittstelle mit dem Marktplatz und der Laufzeitumgebung verbunden. Dies ermöglicht die einfache Veröffentlichung neuer Dienstleistungen sowie die Nutzung der Funktionalitäten von Marktplatz und Laufzeitumgebung innerhalb der Entwicklungsumgebung.

Ein vielversprechender Ansatz einer Open-Source Entwicklungsumgebung für das Internet der Dienste bildet die Eclipse¹-basierte *ISE (Integrated Service Engineering) Workbench* [20].

¹ www.eclipse.org

2. Begriffsklärung und Basiskonzepte

2.1.3.2 *Marktplatz der Dienste*

Der Marktplatz der Dienste erfüllt vier wesentliche Funktionen: (1) Veröffentlichung und (2) Auffinden existierender Dienste, (3) Vertragsaushandlung und (4) Bereitstellung von Feedback über die Dienste.

Um einen Dienst zu veröffentlichen, wird dieser unter Angabe seiner Schnittstellen-, Daten- und Eigenschaftsbeschreibung im *Dienstverzeichnis* (engl. Repository) eingetragen. Zum Auffinden einer bestimmten Dienstleistung wendet sich ein potentieller Dienstanutzer an die *Servicesuche* (engl. Discovery). Diese gleicht die Anforderungen des Nutzers mit den im Repository gespeicherten Dienstbeschreibungen ab und liefert eine geordnete Liste zutreffender Dienste zurück.

Entscheidet sich ein Interessent für die Nutzung einer Dienstleistung beginnt die *Vertragsaushandlung* (engl. Contracting). Ergebnis dieser Phase ist ein rechtsgültiger Vertrag, der Rechte und Pflichten der einzelnen Parteien festlegt. Wichtige Bestandteile sind die Funktion, die Dienstgüter sowie mögliche Sanktionen bei Nichteinhaltung von Vertragsgegenständen.

Nach der Interaktion hat der Dienstanutzer die Möglichkeit den Dienst zu bewerten. Die einzelnen Nutzerbewertungen werden zur Reputation des Dienstes aggregiert und stehen zukünftigen Nutzern als weiteres Kriterium bei der Kaufentscheidung zur Verfügung.

2.1.3.3 *Laufzeitumgebung der Dienste*

Die Laufzeitumgebung des Internets der Dienste übernimmt zwei zentrale Aufgaben: (1) die Dienstausführung und (2) die Vertragsüberwachung.

Die *Dienstausführung* (engl. Execution) erfolgt durch verschiedene Container, Applikationsserver und Frameworks, die auf die unterschiedlichen Modelle zur Verhaltensbeschreibung atomarer wie zusammengesetzter Dienstleistungen spezialisiert sind. Typische Beispiele sind Apache Axis¹ und JAX-WS² zur Ausführung Java-basierter atomarer Dienste oder Apache ODE³ zur Ausführung BPEL⁴-basierter zusammengesetzter Dienstleistungen.

Die *Vertragsüberwachung* (engl. Monitoring) kontrolliert die Einhaltung der ausgehandelten Verträge. Von besonderem Interesse ist die Kontrolle der Dienstgüteparameter, indem diese gemessen und mit den vertraglich festgelegten Garantien verglichen wird. Die im Rahmen der Vertragsüberwachung anfallenden Informationen über Abweichungen zwischen der gemessenen und der garantierten Dienstgüte werden auf dem Marktplatz veröffentlicht. Sie stehen zukünftigen Nutzern als weiteres Kriterium bei der Kaufentscheidung zur Verfügung.

2.2 Dienstgüte zusammengesetzter Dienstleistungen

Zusammengesetzte Dienstleistungen basieren im Gegensatz zu atomaren Diensten auf der Funktionalität ihrer Teildienste. So z.B. die in Abbildung 4 dargestellte zusammengesetzte Dienstleistung A-B-C bestehend aus dem sequentiellen Aufruf von Teildienst a, Teildienst b und Teildienst c.

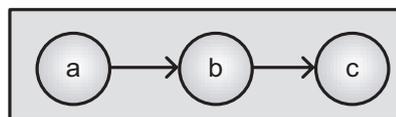


Abbildung 4: Zusammengesetzte Dienstleistung A-B-C

¹ <http://ws.apache.org/axis/>

² <https://jax-ws.dev.java.net/>

³ <http://ode.apache.org/>

⁴ Business Process Execution Language, De-Facto Standard zur formalen Beschreibung von zusammengesetzten Dienstleistungen

Die Abhängigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung von ihren Teildiensten wirkt sich auf ihre Eigenschaften aus. Eine der wichtigsten Eigenschaften ist die Dienstgüte, welche durch zwei Aspekte charakterisiert ist: (1) die Höhe der Dienstgüte und (2) die Zuverlässigkeit bezüglich Dienstgütegarantien. Diese Abhängigkeiten werden im Folgenden genauer erläutert.

2.2.1 Höhe der Dienstgüte

Die Abhängigkeit der Höhe der Dienstgüte (kurz. Dienstgüte) einer zusammengesetzten Dienstleistung von der Dienstgüte der Teildienste wurde erstmals von Cardoso et al. [17] und Jaeger [4] et al. gezeigt. Die Autoren definieren mathematische Formeln, die es gestatten, den Wert eines Dienstgüteparameters einer zusammengesetzten Dienstleistung zu berechnen. Basis hierfür bildet die Dienstgüte der genutzten Teildienste sowie deren Ausführungsreihenfolge (Kontrollstruktur). Die Antwortzeit des zusammengesetzten A-B-C Dienstes aus Abbildung 4 beispielsweise ermittelt sich aus der Summe der Antwortzeit von Teildienst a, von Teildienst b und von Teildienst c. Die vollständigen Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der bekanntesten Dienstgüteeigenschaften auf Basis der vier Basiskontrollstrukturen Sequenz, Parallelität, Alternative und Schleife sind in Tabelle 1 zu finden. Für die Berechnung der Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung sind die in Tabelle 1 angegebenen Aggregationssegmente rekursiv auf die Kontrollstruktur anzuwenden.

| | Sequenz | Parallel | Alternative | Schleife |
|-----------------------|--|--|--|------------------|
| Antwortzeit (T) | $\sum_{i=1}^n T(s_i)$ | $\max(T(s_i)_{i \in \{1,2,\dots,n\}})$ | $\max(T(s_i)_{i \in \{1,2,\dots,n\}})$ | $k * T(s_i)$ |
| Preis (C) | $\sum_{i=1}^n C(s_i)$ | $\sum_{i=1}^n C(s_i)$ | $\max(C(s_i)_{i \in \{1,2,\dots,n\}})$ | $k * C(s_i)$ |
| Verfügbarkeit (A) | $\prod_{i=1}^n A(s_i)$ | $\prod_{i=1}^n A(s_i)$ | $\min(A(s_i)_{i \in \{1,2,\dots,n\}})$ | $A(s_i)^k$ |
| Zuverlässigkeit (R) | $\prod_{i=1}^n R(s_i)$ | $\prod_{i=1}^n R(s_i)$ | $\min(R(s_i)_{i \in \{1,2,\dots,n\}})$ | $R(s_i)^k$ |
| Benutzerdefiniert (F) | $f_s(F(s_i))$ $i \in \{1,2,\dots,n\}$ | $f_p(F(s_i))$ $i \in \{1,2,\dots,n\}$ | $f_A(F(s_i))$ $i \in \{1,2,\dots,n\}$ | $f_L(k, F(s_i))$ |

Tabelle 1: Berechnung der Dienstgüte in zusammengesetzten Dienstleistungen ([4], [17])

2.2.2 Zuverlässigkeit der Dienstgüte

Aus der Abhängigkeit der Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung von den Teildiensten ergibt sich, dass auch die Zuverlässigkeit bezüglich Dienstgütegarantien (kurz Dienstgütezuerlässigkeit) einer zusammengesetzten Dienstleistung von den Teildiensten stark beeinflusst wird. Tatsächlich wirken sich von Teildiensten verursachte Vertragsverletzungen transitiv auf die zusammengesetzte Dienstleistung aus, wie ein einfaches Beispiel zeigt: Angenommen die garantierte Antwortzeit der A-B-C Dienstleistung aus Abbildung 4 beträgt 35 Sekunden und ist auf Basis der Dienstgütegarantien der Teildienste a, b und c von jeweils 10 Sekunden, 20 Sekunden und 5 Sekunden berechnet worden. Kann der Teildienst B seine Antwortzeit zur Laufzeit nicht einhalten, weil er statt in 20 Sekunden erst nach 30 Sekunden antwortet, so verursacht auch die zusammengesetzten Dienstleistung eine Verletzung ihrer Garantie für die Antwortzeit. Handelt es sich bei Teildienst B um einen äußerst unzuverlässigen Dienst, so wird eine solche Verletzung sehr häufig vorkommen, wodurch auch die zusammengesetzte Dienstleistung als unzuverlässig eingestuft werden wird.

2. Begriffsklärung und Basiskonzepte

2.3 Binden in zusammengesetzten Dienstleistungen

Eine zusammengesetzte Dienstleistung (kurz Komposition oder (Web-) Prozess¹) ist ein Dienst, der seine Funktionalität unter Nutzung weiterer Dienste erbringt. Sie ist definiert durch eine Menge von Arbeitsschritten (kurz Tasks) sowie die Reihenfolge deren Abarbeitung.

Definition 1 - zusammengesetzte Dienstleistung (Komposition): Eine *zusammengesetzte Dienstleistung (Komposition)* $K = (T, V)$ ist gegeben durch

- eine Menge von **Tasks** $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, wobei m die Anzahl aller Tasks der Komposition ist.
- eine Menge von **Task-Übergängen** $V \subseteq T \times T$, die die Abarbeitungsreihenfolge der Tasks definieren.

Eine Task beschreibt Schnittstelle und Funktion eines Arbeitsschrittes innerhalb einer Komposition. Ein Teildienst stellt die Implementierung einer solchen Schnittstelle und Funktion dar. Als Binden (siehe Abbildung 5) bezeichnet man die Verknüpfung einer Task mit dem Teildienst, der zur Realisierung der Task gewählt wurde. Das Ergebnis des Bindens ist ein konkreter *Ausführungsplan* der Komposition.

Definition 2 - Ausführungsplan: Ein *Ausführungsplan* $A = (S, W)$ ist gegeben durch

- die Menge von **Teildiensten** $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, wobei m die Anzahl aller Dienste des Ausführungsplans ist.
- die Menge von **Teildienstübergängen** $W \subseteq S \times S$, die die Abarbeitungsreihenfolge definieren.

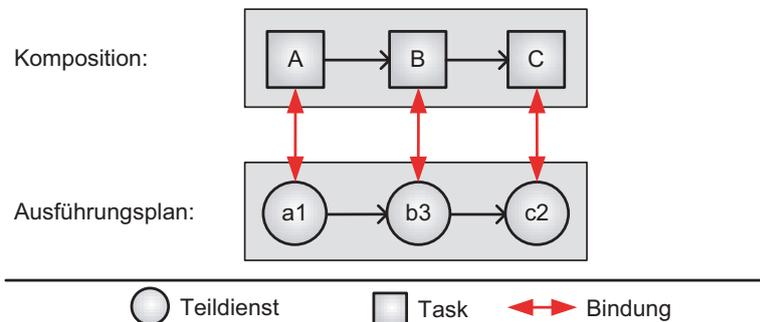


Abbildung 5: Binden zwischen Task und Teildienst

Der Ausführungsplan definiert die von einer Komposition genutzten Teildienste und bestimmt damit die Dienstgüte sowie Dienstgütezuerlässigkeit der Komposition. Im Folgenden wird daher immer von Dienstgüte und Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans gesprochen. Die Angaben haben für die zusammengesetzte Dienstleistung immer dann Gültigkeit, wenn diese den jeweiligen Ausführungsplan nutzt.

Besitzt eine Komposition mehrere Ausführungspläne, so stehen verschiedene Level der Dienstgüte und Dienstgütezuerlässigkeit zur Verfügung. Durch geschickte Wahl des zu nutzenden Ausführungsplans kann die Dienstgüte und Dienstgütezuerlässigkeit einer Komposition gezielt beeinflusst werden. Ein Umstand, der im Rahmen des qualitätssensitiven Bindens ausgenutzt wird. Eine Berücksichtigung der Dienstgütezuerlässigkeit erfolgt in bisherigen Arbeiten jedoch

¹ Die Begriffe zusammengesetzte Dienstleistung, Komposition und (Web-) Prozess werden im Folgenden synonym verwendet.

nicht. Dies liegt darin begründet, dass die zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans notwendigen Aggregationsvorschriften derzeit noch nicht definiert worden sind. Die vorliegende Arbeit widmet sich dieser Aufgabe.

2.3.1 Wahl des Ausführungsplans - Optimierungsproblem

Existieren mehrere Teildienste¹ als Implementierung einer Task, so stehen für die zusammengesetzte Dienstleistung mehrere Ausführungspläne zur Verfügung. Aus dieser Menge ist ein geeigneter Plan zu identifizieren. Dies wird in der Regel nicht zufällig erfolgen, sondern unter dem Aspekt eine oder mehrere Eigenschaften zu maximieren bzw. zu minimieren. So hat der Betreiber z.B. das Ziel, die Kosten oder die Auslastung vorhandener Ressourcen zu minimieren. Gleichzeitig können Nebenbedingungen existieren, die sich in Ober- bzw. Untergrenzen für bestimmte Eigenschaften äußern, so z.B. eine obere Preisgrenze der Komposition von maximal 5 Euro.

Ziel des qualitätssensitiven Bindens ist es, ein bestimmtes Qualitätslevel zu erfüllen, welches in Form von qualitativen (z.B. minimaler Preis) und quantitativen Angaben (z.B. Preis max. 5 Euro) vorliegen kann. Hieraus resultiert ein Optimierungsproblem, welches ohne Beschränkung der Allgemeinheit als folgendes Maximierungsproblem definiert werden kann:

Definition 3 - Teildienstselektionsproblem: Das Teildienstselektionsproblem (R, T, N) ist gegeben durch

- den **Suchraum** $R = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ mit der Menge aller Ausführungspläne,
- die Menge $Z = \{f_i: R \rightarrow \mathbb{R}\}$ aller zu maximierenden **Zielfunktionen**, sowie
- die Menge $N = \{f_k \succ r_k \in \mathbb{R} \mid f_k \in Z, \succ \in \{>, \geq\}\}$ aller einzuhaltenden **Nebenbedingungen**.

Dabei ist $n \in \mathbb{N}$ die Anzahl aller Ausführungspläne einer Komposition. Die Menge Z der Zielfunktionen beschreibt die zu maximierenden Dienstgüteeigenschaften. Sie werden nach den in Tabelle 1 aufgelisteten Aggregationsmustern gebildet. Die Menge N definiert die einzuhaltenden qualitativen Nebenbedingungen, die durch die Schranken bezüglich der Dienstgüte, z.B. eine maximale Antwortzeit von 50 Sekunden, gegeben sind.

Im Rahmen des qualitätssensitiven Bindens wird versucht das Optimierungsproblem zu lösen. Ziel ist es den optimalen Ausführungsplan $A \in R$ zu finden, der alle Zielfunktionen, d.h. Dienstgüteeigenschaften, maximiert und dabei gleichzeitig alle qualitativen Nebenbedingungen erfüllt. Auf diese Weise ist es möglich die Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung gezielt zu maximieren.

2.3.2 Zeitpunkt des Bindens – Entscheidungsproblem

Das Binden, d.h. die Ersetzung der Tasks durch Teildienste, kann zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Lebenszyklus der zusammengesetzten Dienstleistung erfolgen. Am bekanntesten sind:

- **Binden zur Entwicklungszeit:** Die Bindung zwischen Task und Teildienst findet bereits im Rahmen der Modellierung zur Entwicklungszeit statt. Es stellt den traditionellen Weg dar und wird auch als statisches Binden bezeichnet.
- **Spätes Binden:** Das Binden wird auf einen beliebigen Zeitpunkt zwischen Entwicklungszeit und Ausführungszeit verschoben.
- **Erneutes Binden:** Erneutes Binden dient der Fehlerkompensierung in Kompositionen, indem bereits gebundene jedoch fehlerhafte Teildienste durch äquivalente Dienste ersetzt werden. Dieser Adaptionsmechanismus wird standardmäßig eingesetzt, um nicht verfügbare Teildienste in Kompositionen zu eliminieren.

¹ Es wird davon ausgegangen, dass alle Teildienste einer Task funktional äquivalent sind sowie die gleiche Schnittstelle besitzen.

2. Begriffsklärung und Basiskonzepte

Aus den verschiedenen Bindungszeitpunkten ergeben sich unterschiedliche Vor- und Nachteile. So kann beim späten Binden die Dienstgüte der zusammengesetzten Dienstleistung gezielt an die Nutzeranforderungen angepasst werden. Demgegenüber sind jedoch vor der Dienstaussführung entsprechende Ressourcen für den Bindungsprozess bereitzustellen. Die Entscheidung darüber, welche Bindungszeitpunkte unterstützt werden, kann daher nur der Architekt der zusammengesetzten Dienstleistung treffen.

2.4 Zusammenfassung

Kapitel 2 definierte wichtige Basiskonzepte und Begriffe, die im weiteren Verlauf der Arbeit Anwendung finden. So wurde als erstes das Internet der Dienste vorgestellt. Im Anschluss erfolgte eine detaillierte Untersuchung der Dienstgüte in zusammengesetzten Dienstleistungen und deren Abhängigkeit von der Dienstgüte der Teildienste. Den Abschluss bildete die Erläuterung des Bindens als Verständnisgrundlage für die Dienstgütezverlässigkeit in zusammengesetzten Dienstleistungen.

Nachdem die in dieser Arbeit verwendeten Basiskonzepte und Begriffe erläutert wurden, soll im nachfolgenden Kapitel 3 auf die mit der Problemstellung der Arbeit verwandten Themen genauer eingegangen werden.

3. Verwandte Arbeiten

Kapitel 3 widmet sich dem aktuellen Stand der Forschung. Ziel der Arbeit ist die Bestimmung der Dienstgütezuvverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung. Hierfür ist es notwendig sich das Forschungsgebiet qualitätssensitiver Kompositionen genauer anzuschauen.

Das Forschungsgebiet der qualitätssensitiven Kompositionen gliedert sich aktuell in zwei Hauptrichtungen: (1) den Forschungszweig des qualitätssensitiven Bindens und (2) den Forschungsbereich der Dienstgüteüberwachung.

Mit Hilfe der Techniken des qualitätssensitiven Bindens (siehe Kapitel 2.3.1) ist es möglich, den Wert der Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung gezielt zu beeinflussen. Durch die Selektion eines geeigneten Ausführungsplans für die Komposition können nicht nur Schranken eingehalten, sondern auch die Werte der einzelnen Dienstgüteparameter maximiert werden. Aktuelle Forschungsansätze aus dem Bereich des qualitätssensitiven Bindens werden in Abschnitt 3.1 vorgestellt.

Das Gebiet der Dienstgüteüberwachung (engl. Monitoring) versucht die Dienstgüte einer Dienstleistung während der Ausführung zu messen, um Dienstgütereletzungen zu erkennen. Auf Basis dieser Informationen werden Vertragsbrüche registriert und Schadensersatzansprüche fixiert. Darüber hinaus ermöglicht eine frühzeitige Fehlererkennung Dienstbetreibern die Aktivierung entsprechender Kompensierungsstrategien, um zukünftige Dienstgütereletzungen zu vermeiden. Eine Klassifikation der aktuellen Ansätze zur Dienstgüteüberwachung erfolgt in Abschnitt 3.2.

3.1 Klassifikation existierender Ansätze zum qualitätssensitiven Binden

Das qualitätssensitive Binden verfolgt das Ziel die Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung zu maximieren, indem für jede Task der optimale Teildienst selektiert wird. Das dem qualitätssensitiven Binden zur Grunde liegende Optimierungsproblem, das so genannte Teildienstselektionsproblem, wurde bereits in Kapitel 2.3.1 formal definiert und hat nicht nur rein akademischen Charakter. Es stellt eine allgemein anerkannte Herausforderung der Industrie dar, wenn es darum geht die Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung gezielt anzupassen. Die Anpassung wird an unterschiedlichen Stellen im Lebenszyklus der Dienstleistung benötigt: (1) während des statischen Bindens und (2) des späten Bindens vor der Ausführung der Dienstleistung [21] sowie (3) während des erneuten Bindens zur Laufzeit ([1], [2], [26]).

Die Grundlage für den Forschungszweig des qualitätssensitiven Bindens wurde von Jaeger et al. [4] und Cardoso et al. [17] gelegt, die erstmals erkannten, dass die Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung im Wesentlichen von der Dienstgüte der genutzten Teildienste abhängt und die dazugehörigen Aggregationsvorschriften definierten.

Aufbauend auf den Ergebnissen von Jaeger et al. und Cardoso et al. publizierten zahlreiche Autoren ihre Forschungsansätze im Bereich des qualitätssensitiven Bindens. Die Ansätze lassen sich nach zwei Kriterien klassifizieren: (1) Die Entwicklung effizienter Algorithmen zur Lösung des Optimierungsproblems (siehe Kapitel 2.3.1) und (2) die Bereitstellung einer adäquaten Infrastruktur zur Durchführung von qualitätssensitiven Bindungsvorgängen zur Entwicklungs- und Laufzeit. Die bedeutendsten Vertreter auf beiden Gebieten werden im Folgenden genauer vorgestellt.

3.1.1 Optimierungsalgorithmen

Kapitel 2.3.1 definierte das Teildienstselektionsproblem, welches im Rahmen des qualitätssensitiven Bindens zu lösen ist. Es lässt sich als multidimensionales, multi-choice Rucksackproblem [65] modellieren und gehört damit zu den NP-harten Problemen [56]. Eine exakte Lösung ist nur mit exponentiellem Aufwand möglich [55]. Aus diesem Grund gehen zahlreiche Ansätze des qualitätssensitiven Bindens von einer oder mehreren der folgenden Vereinfachungen aus: (1) Verzicht

3. Verwandte Arbeiten

auf Nichtlinearität, (2) Verzicht auf globale Qualitätsmaximierung, (3) Verzicht auf Nebenbedingung, (4) Verzicht auf Mehrzieloptimierung und (5) Verzicht auf das Finden der exakten Lösung. Auf die mit diesen Vereinfachungen verbundenen Einschränkungen bezüglich der Einsetzbar- und Praxistauglichkeit der Ansätze soll im Folgenden genauer eingegangen werden. Zuvor erfolgt eine kurze Erklärung zu exakten Verfahren.

3.1.1.1 Exakte Verfahren

Exakte Verfahren nutzen die Tatsache aus, dass der Lösungsraum endlich ist. Auf diese Weise können die Zielfunktionen für jeden Ausführungsplan ausgewertet werden, um den optimalen Plan exakt zu bestimmen. Ein solches Vorgehen, oft auch als vollständige Enumeration bezeichnet, ist aufgrund der exponentiellen Zeitkomplexität nur für kleine Lösungsräume geeignet.

Intelligenter enumerative Verfahren versuchen frühzeitig suboptimale Teilausführungspläne zu erkennen, um sie von der weiteren Lösungsfindung auszuschließen (begrenzte Enumeration). Das Branch-and-Bound Verfahren nutzt hierfür die Nebenbedingungen des Optimierungsproblems. Verletzt ein Teilausführungsplan eine oder mehrere Nebenbedingungen, so können alle diesen Teilausführungsplan enthaltenden Ausführungspläne von der Lösungsfindung ausgeschlossen werden. Auf diese Weise wird die Größe des Suchraumes reduziert und die Rechendauer verkürzt. In der Regel können inakzeptable Rechenzeiten bei großen Suchräumen jedoch nicht vermieden werden.

3.1.1.2 Verzicht auf Nichtlinearität der Zielfunktionen

Die Zielfunktionen des Teildienstselektionsproblems werden durch die Struktur der Komposition und durch die Semantik der zu betrachtenden Dienstgütekriterien gebildet. Hierfür sind die von Jaeger et al. und Cardoso et al. definierten dienstgütespezifischen Aggregationsmuster (siehe Tabelle 1) auf die Kompositionsstruktur rekursiv anzuwenden. So ergibt sich die Antwortzeit einer zusammengesetzten Dienstleistung mit drei parallel aufgerufenen Teildiensten aus dem Maximum der Antwortzeiten aller drei Teildienste.

Die Struktur der Zielfunktionen eines Optimierungsproblems bestimmt dessen Linearität. Im Allgemeinen sind lineare Probleme effizienter zu lösen als nicht-lineare. Aus diesem Grund beschränken einige Ansätze zur Lösung des Teildienstselektionsproblems Kompositionsstruktur und unterstützte Dienstgüteeigenschaften, um lineare Zielfunktionen zu erhalten. So auch der viel zitierte Ansatz des Linear Integer Programming von Zeng et al. [28], der trotz dieser Vereinfachung exakte Lösungen nur mit exponentiellem Aufwand ermitteln kann [46].

Auch zahlreiche andere Autoren ([24], [44], [61], [63], [67], [68], [69]) stützen sich auf die Linearität der Zielfunktionen, die jedoch zur Unbrauchbarkeit der Ansätze in der Praxis führt, da bei der Betrachtung allgemeiner Kompositionsstrukturen, insbesondere bei Verwendung von Parallelität im Kontrollfluss, hiervon nicht ausgegangen werden kann [17].

3.1.1.3 Verzicht auf globale Qualitätsmaximierung

Um die Komplexität des Teildienstselektionsproblems zu reduzieren, verzichten einige Ansätze darauf, die Gesamtqualität der zusammengesetzten Dienstleistung durch Auswertung der Zielfunktionen zu maximieren (= Ende-zu-Ende Maximierung). Stattdessen gehen sie von der Annahme aus, dass sich die Maximalqualität dadurch ergibt, dass man für jede Task jeweils den Teildienst mit der maximalen Qualität selektiert, unabhängig von der Wahl der Teildienste für die restlichen Tasks der Komposition. Ein Vorgehen, das oft als lokale Qualitätsmaximierung bezeichnet wird.

Der Verzicht auf die Ende-zu-Ende Qualitätsmaximierung gestattet es mächtige Teile-und-Herrsche (Divide-and-Conquer) Strategien bei der Suche nach der exakten Lösung anzuwenden. So gibt es Ansätze, die nach den Prinzipien der Dynamischen Programmierung ([44], [57], [61], [62]) arbeiten, die allerdings für größere Lösungsräume exponentielle Zeitkomplexität besitzen [65]. Andere Autoren ([44], [69]) interpretieren das Teildienstselektionsproblem als endlichen, azyklischen Graph, dessen Struktur durch den Kontrollfluss der Komposition bestimmt wird und dessen Knoten die verfügbaren Teildienste bilden. Die Kanten des Graphen sind mit der Qualität der Teildienste beschriftet. Die Suche nach dem optimalen Ausführungsplan reduziert sich

dadurch auf das Problem zur Suche nach dem kürzesten Pfad in dem Graphen (MCOP¹) [46], das mit Hilfe bewährte Algorithmen, wie der Algorithmus von Dijkstra, effizient gelöst werden kann.

Der Verzicht auf die globale Qualitätsmaximierung indem optimale Teildienste unabhängig vom verbleibenden Rest der zusammengesetzten Dienstleistung selektiert werden, besitzt keinen Mehrwert für die Lösung des Teildienstselektionsproblems, weil hierbei eine Ende-zu-Ende Maximierung der Qualität der zusammengesetzten Dienstleistung nicht immer erreicht werden kann [28].

3.1.1.4 Verzicht auf Nebenbedingungen

Zur Effizienzsteigerung von Optimierungsalgorithmen verzichten einige Ansätze ([57], [59], [61], [69]) auf die Berücksichtigung von Nebenbedingungen. Nebenbedingungen sind im Rahmen des Teildienstselektionsproblems durch obere und untere Schranken der Qualität der zusammengesetzten Dienstleistung gegeben. Typische Beispiele sind Beschränkungen im Bereich der Gesamtkosten oder Verfügbarkeit des Dienstes. Ohne Berücksichtigung von Nebenbedingungen kann zur Lösung des Teildienstselektionsproblems z.B. der effiziente Greedy Algorithmus angewendet werden [65].

Der Verzicht auf Nebenbedingen verbietet eine für die Praxis äußerst wichtige Anforderung an das Teildienstselektionsproblem: Die Definition von Schranken, was meist darin resultiert, dass zwar ein optimaler Ausführungsplan mit hervorragender Qualität gefunden wird, dieser jedoch die angesetzten Kosten für die zusammengesetzte Dienstleistung bei weitem überschreitet.

3.1.1.5 Verzicht auf Mehrzieloptimierung

Mehrzielprobleme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie mehrere Zielfunktionen besitzen, die zueinander in Konflikt stehen. Im Rahmen des Teildienstselektionsproblems findet man einen solchen Konflikt zwischen Qualität und Preis der zusammengesetzten Dienstleistung. Je höher die Qualität eines Dienstes ist, desto höher wird auch ihr Preis sein. Für die Lösung von Mehrzielproblem gibt es daher in der Regel nicht einen optimalen Ausführungsplan, sondern eine Menge von Plänen mit äquivalenter Qualität, die so genannten Pareto-optimalen Lösungen [71].

Die Ermittlung aller Pareto-optimalen Ausführungspläne wird von nahezu allen Autoren umgangen, indem die unterschiedlichen Zielfunktionen über die Methode der additiven Wichtung (SAW²) zu einer globalen Zielfunktion aggregiert werden. Auf diese Weise können die Prinzipien der Einzieloptimierung angewendet werden. Hierfür sind zwei Schritte erforderlich: (1) die Normierung der Wertebereiche der Zielfunktionen und (2) die Wichtung der einzelnen Zielfunktionen.

Die Normierung der Wertebereiche erfolgt standardmäßig nach Gleichung (3.1) für den Fall einer zu minimierenden Dienstgüteeigenschaft und nach Gleichung (3.2) für den Fall einer zu maximierenden Eigenschaft [70]. Dabei bezeichnet q den aktuellen, q^{max} den maximalen und q^{min} den minimalen Wert der Dienstgüteeigenschaft. Voraussetzung für eine Normierung ist das Vorhandensein eines begrenzten Wertebereiches, wovon nicht bei allen Dienstgüteeigenschaften, wie z.B. bei der Antwortzeit oder dem Preis, ausgegangen werden kann.

$$q_{norm}^- = \begin{cases} \frac{q^{max} - q}{q^{max} - q^{min}} & \text{wenn : } q^{max} - q^{min} \neq 0 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$q_{norm}^+ = \begin{cases} \frac{q^{min} - q}{q^{max} - q^{min}} & \text{wenn : } q^{max} - q^{min} \neq 0 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.2)$$

¹ Multi-Constraint Path Problem

² Simple Additive Weighting

3. Verwandte Arbeiten

Die aggregierte Zielfunktion ergibt sich standardmäßig aus der Division der gewichteten Summe der n^+ zu maximierenden Eigenschaften durch die gewichtete Summe der n^- zu minimierenden Eigenschaften (siehe Gleichung (3.3)) [67].

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{n^+} w_i^+ * q_{norm,i}^+}{\sum_{i=1}^{n^-} w_i^- * q_{norm,i}^-} \quad (3.3)$$

Der Wert w_i bestimmt die Wichtung der i -ten Dienstgüteeigenschaft. Die Summe aller Wichtungen muss eins ergeben (siehe Gleichung (3.4)).

$$\sum_{i=1}^{n^+} w_i^+ + \sum_{i=1}^{n^-} w_i^- = 1 \quad (3.4)$$

Die Verwendung einer aggregierten Zielfunktion ist insofern problematisch, weil der als optimal identifizierte Ausführungsplan stark von der genutzten Gewichtung abhängt. Darüber hinaus ist durch eine solche Vorgehensweise der Kompromiss zwischen den einzelnen Pareto-optimalen Ausführungsplänen nicht ersichtlich [64].

3.1.1.6 Verzicht auf das Finden der exakten Lösung

Wie bereits beschrieben, ist die Identifikation der exakten Lösung des Teildienstselektionsproblems trotz Vereinfachungen meist nicht in effizienter Zeit möglich. Eine Alternative bieten (meta-) heuristische Lösungsverfahren. (Meta-) Heuristiken sind allgemeine Suchverfahren, die die Rechendauer verringern, indem sie einen großen Teil des Suchraumes bei der Suche nach der optimalen Lösung ausschließen. Der Ausschluss von Teilen des Suchraumes basiert dabei in der Regel auf Vermutungen und Schätzungen, so dass die meisten Verfahren keine optimale Lösung, wohl aber eine Näherungslösung bieten.

Neben einigen proprietären Heuristiken ([3], [24], [44], [70]) scheint der Genetische Algorithmus der derzeit vielversprechendste Ansatz im Rahmen der Heuristiken zu sein. Der Genetische Algorithmus orientiert sich an der biologischen Evolution, bei der eine Menge von Chromosomen zufällig erzeugt wird. Aus dieser werden mit Hilfe einer fitnessabhängigen Auswahl (Auslese) gute Chromosomen selektiert und durch die genetischen Operationen Mutation und Rekombination zu Chromosomen der nächsten Generation überführt. Analog zur biologischen Evolution soll die Fitness der Population beim Genetischen Algorithmus von Generation zu Generation steigen, um so das optimale Chromosom zu identifizieren.

Überträgt man das Konzept des Genetischen Algorithmus auf das Teildienstselektionsproblem, so sind die möglichen Ausführungspläne als Chromosomen zu kodieren. Die Fitnessfunktion wird durch die Zielfunktion, d.h. die Dienstgüte der zusammengesetzten Dienstleistung gebildet. Der Ansatz des Genetischen Algorithmus wurde erstmals von Canfora et al. [8] vorgeschlagen und anschließend in zahlreichen Arbeiten optimiert.

Besondere Herausforderung bei der Implementierung des Genetischen Algorithmus besteht in der Wahl der Genetischen Operatoren, die wesentlichen Einfluss auf Effizienz und Korrektheit des Algorithmus haben. Entsprechende Untersuchungen nahmen Ma et al. in [72] und [73] vor. Eine systematische Analyse aller bekannten Selektions-, Mutations- und Rekombinationsoperatoren auf Performanz und Verhalten des Algorithmus ist jedoch noch nicht durchgeführt worden.

Darüber hinaus ist auch die Kodierung eines Ausführungsplans als Chromosom von entscheidender Bedeutung für die Effektivität des Genetischen Algorithmus. So konnten Gao et al. [13] mittels einer baumbasierten Kodierung einen Performanz-Gewinn von ca. 40 Prozent gegenüber der ein-feldbasierten Kodierungen ihrer Vorgänger [8] erreichen. Eine zusätzliche Steigerung der

Effektivität soll durch das Parallelisieren des Genetischen Algorithmus erreicht werden [58], indem die Anfangspopulation in mehrere kleine Teilpopulationen unterteilt wird, die sich dann parallel und unabhängig voneinander entwickeln. Die Endlösung wird durch den direkten Vergleich der Optimallösungen aus allen n Teilpopulationen identifiziert. Eine Weiterentwicklung des Genetischen Algorithmus zur Identifikation aller Pareto-optimalen Lösungen ist von Wada et al. entwickelt worden [64].

Neue Ansätze erweitern des Teildienstselektionsproblem zusätzlich um Inter-Service-Abhängigkeiten und –Konflikte ([60] - [62]), um Inkompatibilität von Schnittstellen der Teildienste einer Task zu berücksichtigen. Ai und Tang [15] modifizierten hierfür den Genetischen Algorithmus von Canfora et al. [8] entsprechend.

Neben dem Einsatz des Genetischen Algorithmus stehen weitere klassische Heuristiken, wie die Simulierte Abkühlung [75], die Tabu Suche [74] oder der Ameisenkolonialgorithmus [77] zur Verfügung. Leider sind diese Heuristiken bis jetzt bei der Lösung des Teildienstselektionsproblems nicht berücksichtigt worden, obwohl sich eine detaillierte Betrachtung dieser sicherlich lohnen würde.

3.1.2 Infrastruktur

Im Gegensatz zur Bereitstellung effizienter Algorithmen zur Lösung des Teildienstselektionsproblems, sind Forschungsarbeiten zur Entwicklung einer adäquaten Infrastruktur zur Durchführung von qualitätssensitiven Bindungsvorgängen relativ selten. Eine solche Infrastruktur besteht rudimentär, gemäß Abbildung 6, aus den folgenden fünf Komponenten: (1) dem Teildienst-Repository, (2) dem Selektor, (3) dem QoS-Aggregator, (4) dem Prozess-Repository und (5) dem Connector. Wird zur Laufzeit erneutes Binden unterstützt um fehlerhafte Teildienste zu kompensieren, kommt noch die Komponente des Rebinding-Triggers hinzu.

Das *Teildienst-Repository* ist für die Bereitstellung der Menge von äquivalenten Teildiensten für jede Task der zusammengesetzten Dienstleistung verantwortlich. Die aktuelle Forschungsfrage in diesem Bereich besteht in der Art und Weise wie diese Informationen zur Verfügung gestellt werden. Kapitel 3.1.2.1 wird hierauf genauer eingehen. Der *Selektor* dient zur Identifikation des optimalen Ausführungsplans. Hierfür nutzt die Komponente einen der in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Optimierungsalgorithmen, wobei nicht alle Ansätze eine Ende-zu-Ende Qualitätsbetrachtung aufweisen. Aufgabe des *QoS-Aggregator* ist es den Selektor zu unterstützen, indem dieser die Berechnung der Dienstgüte für einen Ausführungsplan vornimmt. Hierfür werden die Formeln von Jaeger et al. und Cardoso et al. angewendet. Das *Prozess-Repository* speichert die Beschreibung der zusammengesetzten Dienstleistung sowie die Anforderungen an die Dienstgüte. Für die Prozessbeschreibung hat sich der BPEL Standard [80], für die Dienstgüte der WSAG Standard [81] bewährt. Die wichtige Komponente des *Connectors* übernimmt die Einbindung der Binding-Infrastruktur in die Prozessausführung der zusammengesetzten Dienstleistung. Die hierfür vorgeschlagenen Ansätze mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen werden in Kapitel 3.1.2.2 genauer diskutiert. Der *Rebinding-Trigger* ist für das Erkennen und Anstoßen von Rebinding-Prozessen verantwortlich. Dies geschieht im Allgemeinen, wenn die Differenz der berechneten Dienstgüte und der tatsächlich zur Laufzeit gemessenen Dienstgüte der zusammengesetzten Dienstleistung einen bestimmten Schwellwert erreicht oder ein Teildienst als nicht mehr verfügbar gekennzeichnet wird.

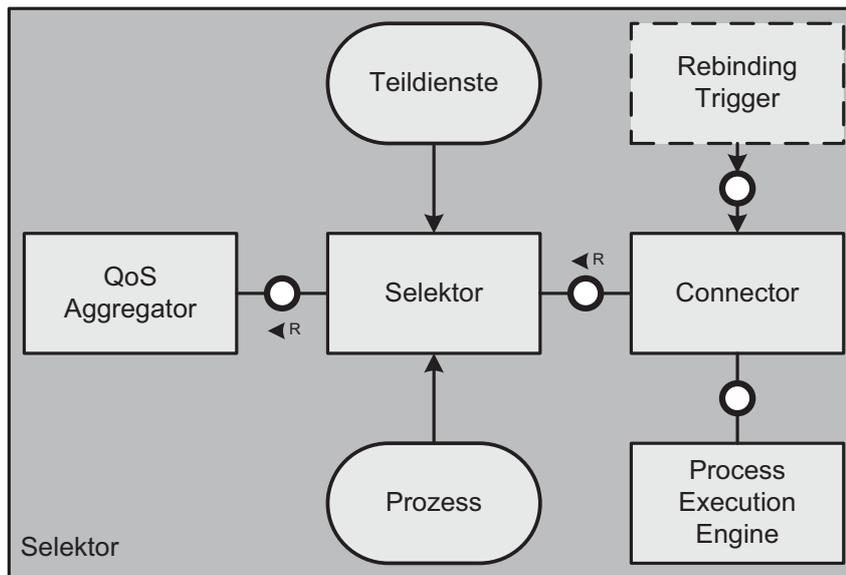


Abbildung 6: Basisstruktur für die Durchführung qualitätssensitiver Bindungsprozesse

3.1.2.1 Teildienst-Repository

Für die Durchführung qualitätssensitiven Bindens ist das Vorhandensein von mind. zwei Teildiensten pro Task Voraussetzung. Zur Beschreibung dieser Menge von Teildiensten haben sich zwei Ansätze herausgebildet: (1) die *statische Beschreibung* und (2) die *dynamische Beschreibung*.

Die *statische Beschreibung* legt die Menge der verfügbaren Teildienste pro Task vor der Durchführung des Bindungsvorganges fest. Ein Vertreter dieser Variante ist der im Rahmen des Forschungsprojektes Theseus/Texto entwickelte Rebinder ([1], [2]), bei dem zur Entwicklungszeit für jede Task die Menge der äquivalenten Teildienste zu definieren und dem Rebinder in Form einer Datei zu übermitteln ist. Die Verwendung einer statischen Menge birgt jedoch die Gefahr, dass die Informationen über die Teildienste bei Ausführung der zusammengesetzten Dienstleistung bereits veraltet sind.

Die *dynamische Beschreibung* der verfügbaren Teildienste basiert auf einer Suchanfrage. Für jede Task wird hierbei eine in der Regel semantisch annotierte Suchanfrage hinterlegt, die die passenden Teildienste genau beschreibt. So nutzen METEOR-S [41] und RuGQoS [59] eine OWL-S Anfrage zur Definition der gesuchten Teildienste. Ein solcher Ansatz ist wesentlich flexibler, da hierbei die dynamische Struktur Service-orientierter Systeme berücksichtigt wird, in der das Dienstangebot ständigen Veränderungen unterliegt. Dieser Vorteil wird jedoch durch einen zusätzlichen Overhead bei der Ausführung der Suchanfrage während des Bindens erkauft. Abhilfe kann hier ein hybrider Ansatz schaffen, der periodisch eine statische Liste von Teildiensten pro Task aktualisiert.

Orthogonal zu der Frage nach der Art der Beschreibung, d.h. ob die Menge der Teildienste für eine Task statisch oder dynamisch definiert wird, steht die Frage nach der technischen Realisierung dieser Beschreibung. Auch hierbei gibt es grundsätzlich zwei Varianten: (1) die Definition der alternativen Teildienste in einer *separaten Datei* oder (2) die *Erweiterung der Prozessbeschreibungssprache*.

Die Definition der Teildienste in einer *separaten Datei* soll die Kompatibilität und Unabhängigkeit der Prozessbeschreibung von der Ausführungsumgebung bewahren. In [1] definieren die Autoren die Endpoint Definition Language (EDL) zur Modellierung alternativer Teildienste. Die Sprache verknüpft jedes PartnerLink Element (Task in BPEL) eines BPEL Prozesses mit einer statischen Menge von WSDL Port Elementen um die Verbindung zwischen Task und verfügbaren Teildiensten zu modellieren. Das EDL Modell der zusammengesetzten Dienstleistung wird in einer separaten Datei gespeichert und zusammen mit dem dazugehörigen BPEL Prozess in der

Ausführungsumgebung bereitgestellt. Die Verknüpfung zwischen Teildienstmengenbeschreibung und Prozess erfolgt über den identischen Namen der BPEL und EDL Datei.

Ein Vertreter der Erweiterung der Kompositionssprache zur Modellierung der Teildienste bildet das Forschungsprojekt *ReFFlow* ([38], [39]). Es erweitert den BPEL-Standard um das Element `<find_bind>`. Das Element verknüpft ein PartnerLink Element mit einer UDDI Anfrage, um zur Laufzeit die zur Verfügung stehenden Teildienste zu ermitteln. Hierfür wurde die frei verfügbare BPEL Engine ActiveBPEL¹ von den Autoren entsprechend modifiziert. Der Nachteil dieser Lösung besteht in der Inkompatibilität der Spracherweiterung zum BPEL-Standard.

3.1.2.2 Connector

Der Connector hat die Aufgabe die Bindungskomponente in die Ausführungsumgebung der zusammengesetzten Dienstleistung zu integrieren, um transparente Bindungsprozesse vor und während der Laufzeit zu unterstützen. Hierfür kristallisieren sich drei Grundkonzepte heraus: (1) der *Proxy-Ansatz*, (2) die *Erweiterung der Prozessausführungsumgebung* und (3) der *Eingriff in die Prozessausführung*.

Der *Proxy-Ansatz* ist die am häufigsten genutzte Variante, um eine Bindungskomponente in die Prozessausführung zu integrieren. Für die Unterstützung von Bindungsvorgängen agiert die Bindungskomponente als Proxy zwischen dem Prozessnutzer und dem Prozess. Auf diese Weise kann sie die Nutzerpräferenzen entgegennehmen und die passenden Bindungen für den Prozess vornehmen. Zur Unterstützung von erneutem Binden im Fehlerfall positioniert sich die Bindungskomponente als Vermittler zwischen Prozessausführungsumgebung und genutzten Teildiensten. Auf diese Weise kann die Bindungskomponente flexibel entscheiden, welcher Teildienst für die Durchführung einer Task verwendet wird. Ein solches Architekturmuster vertreten die Autoren des Forschungsprojektes *SeCSE* ([9], [10], [11], [12]), die ein komplettes Framework zur Unterstützung QoS-sensitiver BPEL Prozesse entwickelten. Ein großer Nachteil dieser Methode ist jedoch der durch den Proxy gebildete Single-Point-of-Failure, so dass dessen Ausfall die gesamte Dienstausführung blockiert.

Bei einer *Erweiterung der Prozessausführungsumgebung* wird direkt in deren Quellcode eingegriffen, um spätes oder erneutes Binden zu gestatten. In [78] wurde hierfür die Open Source BPEL-Engine ActiveBPEL verwendet und als Apative ActiveBPEL (A-ActiveBPEL) Engine publiziert. Ein großer Nachteil dieser Lösung stellt die enge Bindung an die genutzte Ausführungsumgebung dar. Dem Nutzer eines solchen Systems steht es nicht mehr frei auf eine präferierte Prozessausführungsumgebung auszuweichen.

Ein Ansatz, der einen Kompromiss zwischen Proxy und Erweiterung der Prozessausführungsumgebung darstellt, ist eine separate in die *Prozessausführung eingreifende Komponente*. In [1] und [2] wird ein solches Konzept vorgestellt. Hierbei überwacht eine separate Bindungskomponente die Prozessausführung und modifiziert bei Bedarf die Bindungsinformationen zur Laufzeit, um spätes und erneutes Bindens zu realisieren. Der große Vorteil dieser Lösung besteht in der Tatsache, dass die Prozessausführung bei Ausfall der Bindungskomponente nicht gefährdet wird.

3.1.3 Zusammenfassung existierender Ansätze zum qualitätssensitiven Binden

Das vorangegangene Kapitel beschäftigte sich mit dem aktuellen Stand der Forschung im Bereich qualitätssensitiven Bindens, der sich auf zwei Kerngebiete fokussiert: (1) Die Bereitstellung effizienter Algorithmen zur Lösung des Teildienstselektionsproblems und (2) der Entwicklung geeigneter Infrastrukturen zum Durchführen von Bindungsprozessen vor und während der Laufzeit.

Aktuelle Lösungsalgorithmen für das Teildienstselektionsproblem sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgelistet. Da das Finden einer exakten Lösung des NP-harten Optimierungsproblems nur mit exponentiellem Aufwand möglich ist, gehen viele Autoren von einer oder mehrerer der folgenden Vereinfachungen aus: (1) Verzicht auf Nichtlinearität, (2) Verzicht auf globale Qualitätsmaximie-

¹ <http://www.activevos.com/community-open-source.php>

3. Verwandte Arbeiten

rung, (3) Verzicht auf Nebenbedingungen, (4) Verzicht auf Mehrzieloptimierung und (5) Verzicht auf das Finden der exakten Lösung. Darüber hinaus ist in keinem der Ansätze die Berücksichtigung der Dienstgütezuverlässigkeit erkennbar. Nicht einmal deren Notwendigkeit wird identifiziert, obwohl die Dienstgütezuverlässigkeit eine zentrale Anforderung für Dienstnutzer und Betreiber darstellt.

Derzeitige Ansätze im Bereich der Infrastruktur für qualitätssensitive Bindungsvorgänge sind in Tabelle 4 zu finden. Im Gegensatz zur Entwicklung von Optimierungsalgorithmen findet die Infrastruktur verhältnismäßig wenig Beachtung und ist meist an Systeme zur dynamischen Komposition gekoppelt. Auch in diesem Forschungszweig wird auf die Dienstgütezuverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung nicht eingegangen. Dieses Defizit besteht aufgrund des Fehlens einer geeigneten Aggregationsvorschrift zur Bestimmung der Dienstgütezuverlässigkeit in zusammengesetzten Dienstleistungen, ein Aspekt dem sich die vorliegende Arbeit widmet.

3.1. Klassifikation existierender Ansätze zum qualitätssensitiven Binden

| Ansatz | Unterstützte Zielfunktionen | Qualitäts-optimierung | Nebenbedingungen | Mehrzziel-optimierung | Algorithmus | Kriterien | |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|---|---|-------------|
| Zeng et al. | linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Linear Integer Programming | Antwortzeit, Verfügbarkeit, Preis, Reputation | [28] |
| QCWS | linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Branch-and-Bound (MMKP) Integer Programming | beliebig | [42] - [46] |
| QCWS | linear | lokal | ja | aggregierte Zielfunktion | MCOP-Algorithmen | beliebig | [42] - [46] |
| NSFC | nicht linear | lokal | nein | aggregierte Zielfunktion | Mod. Dynamic Programming | Antwortzeit, Durchsatz | [57] |
| RuGQoS | nicht linear | global | nein | keine | Backward breadth first Suchalgorithmus | Antwortzeit, Durchsatz | [59] |
| Wan et al. | nicht linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Divide-and-Conquer basierte Selektion | Antwortzeit, Preis, Verfügbarkeit | [60] |
| Gao et al. | linear | lokal | nein | aggregierte Zielfunktion | Dynamische Programmierung | beliebig | [61], [62] |
| Cardellini et al. | linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Linear Programming | Antwortzeit, Preis, Verfügbarkeit | [63] |
| QWESC | linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Integer Programming | beliebig | [67] |
| MAIS | linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Mixed Integer Programming | Antwortzeit, Verfügbarkeit, Preis, Reputation | [68] |
| HOSSON | linear | lokal | nein | aggregierte Zielfunktion | MCOP-Algorithmen | Preis, Reputation | [69] |

Tabelle 2: Vergleich existierender Forschungsarbeiten im Bereich qualitätssensitiven Bindens: Optimierungsalgorithmen – exakte Verfahren

| Ansatz | Unterstützte Zielfunktionen | Qualitäts-optimierung | Nebenbedingungen | Mehrziel-optimierung | Algorithmus | Kriterien | |
|----------------|-----------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|---|---|-------------|
| SeCSe | nicht linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Genetischer Algorithmus | Antwortzeit, Preis, Verfügbarkeit | [9] - [12] |
| Gao et al. | nicht linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Genetischer Algorithmus | beliebig | [13] |
| Ai & Tang | nicht linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Genetischer Algorithmus | Antwortzeit, Preis, Reputation, Verfügbarkeit | [15] |
| WSQoSX | Linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Mod. Integer Programming + eigene Heuristik | beliebig | [24] - [27] |
| QCWS | Linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Eigene Heuristik | beliebig | [42] - [46] |
| E ³ | nicht linear | global | ja | Pareto optimal | Multiobjektiver Genetischer Algorithmus | Durchsatz, Latenz, Preis | [64] |
| Yang et al. | nicht linear | global | ja | aggregierte Zielfunktion | Greedy Algorithmus, Graham & Quickhull basierend auf konvexer Hülle | beliebig | [65], [66] |

Tabelle 3: Vergleich existierender Forschungsarbeiten im Bereich qualitätssensitiven Bindens: Optimierungsalgorithmen – Heuristiken

3.1. Klassifikation existierender Ansätze zum qualitätssensitiven Binden

| Ansatz | Teildienst-Repository | | Connector | | Beschreibung | |
|----------|--------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| | Menge der Teildienste | Technische Realisierung | Binding | Rebinding | Prozess | Dienstgüte |
| TEXO | statisch | separate Datei (EDL) | nicht unterstützt | Separate Komponente | BPEL | WSAG [1], [2] |
| SeCSe | dynamisch | separate Datei | Proxy | Proxy | BPEL | unbekannt [8] - [10] |
| WSQoSX | dynamisch | separate Datei | Proxy | Proxy | BPEL | WSAG [24] - [27] |
| ReFFlow | dynamische UDDI Anfrage | BPEL Erweiterung | nicht unterstützt | Erweiterung Prozessausführung | BPEL | unbekannt [38], [39] |
| Meteor-S | dynamisch OWL-S Anfrage | separate Datei | Proxy | Proxy | BPEL | OWL-S [41] |
| NSFC | dynamisch | separate Datei | Proxy | nicht unterstützt | BPEL | WSAG [57] |
| RuGQoS | dynamische OWL-S Anfrage | separate Datei | Proxy | nicht unterstützt | BPEL, OWL | WSAG [59] |
| VRESCO | dynamisch | in VCL integriert | Proxy | Proxy | Vienna Composition Language (VCL) | VCL [79] |

Tabelle 4: Vergleich existierender Forschungsarbeiten im Bereich qualitätssensitiven Bindens: Infrastruktur

3. Verwandte Arbeiten

3.2 Klassifikation existierender Arbeiten zur Dienstgüteüberwachung

Das Ziel der Dienstgüteüberwachung (engl. Monitoring) ist es, die Dienstgüte einer Dienstleistung während der Interaktion genau zu bestimmen und diese mit den zugesicherten Werten zu vergleichen. Die so gewonnenen Informationen können auf vielfältige Weise weiterverarbeitet werden. Eines der wichtigsten Anwendungsfelder ist die Erkennung und Veröffentlichung stattgefundener Dienstgüeverletzungen.

Die Dienstgüteüberwachung im Internet der Dienste wurde in den letzten Jahren viel diskutiert ([84]-[115]). Die verschiedenen Ansätze sind bezüglich ihrer Vorstellungen einer geeigneten Dienstgüteüberwachung sehr heterogen, beschäftigen sich im Wesentlichen jedoch mit den folgenden drei Forschungsfragen: (1) Der Frage nach der Zuständigkeit für die Dienstgüteüberwachung, (2) der Frage nach der Intrusivität der Dienstgüteüberwachung und (3) der Frage nach der Kontinuität.

Die Beantwortung der oben genannten Forschungsfragen durch existierende Ansätze wird im Folgenden analysiert. Abschließend wird auf die Minimalarchitektur für die Dienstgüteüberwachung eingegangen.

3.2.1 Zuständigkeit

Die Zuständigkeit für die Dienstgüteüberwachung beschäftigt sich mit der Frage wer für das Messen der Dienstgüte verantwortlich ist und läuft letztendlich auf die Entscheidung hinaus, wo die Überwachungskomponente installiert wird: (1) beim Dienstanutzer (Client-Side Monitoring) oder (2) beim Dienstanbieter (Service-Side Monitoring). Beide Varianten haben Vor- und Nachteile, die in [100] genauer beschrieben sind.

Mit der Entscheidung für eine Dienstgüteüberwachung beim Dienstanutzer oder Dienstanbieter wird gleichzeitig festgelegt, wer die Kontrolle über die notwendigen Softwarekomponenten besitzt und wer Zugriff auf die Daten hat. Unter dem Aspekt der Datenintegrität ist sowohl die Installation der Dienstgüteüberwachung beim Dienstanbieter als auch beim Dienstanutzer fraglich, da Datenfälschung durch die kontrollierende Instanz nicht ausgeschlossen werden kann. So ist es möglich, dass ein Dienstanbieter die Veröffentlichung von Dienstgüeverletzungen unterdrückt oder der Dienstanutzer nicht stattgefundene Dienstgüeverletzungen publiziert. Um diesem Problem entgegen zu wirken, wählen einige Ansätze ([101], [104], [111]) eine vertrauenswürdige dritte Partei (Trusted Third Party (TTP)) zur Überwachung der Dienstgüte.

3.2.2 Intrusivität

Die Intrusivität der Dienstgüteüberwachung bezieht sich auf die Frage, ob die Dienstauführung durch die Dienstgüteüberwachung beeinflusst wird oder nicht. Im ersten Fall spricht man von intrusiver, im zweiten von nicht-intrusiver Dienstgüteüberwachung [92]. Andere Autoren sprechen von online und offline Monitoring ([105], [113]).

Ansätze, die nach dem Prinzip der intrusiven Dienstüberwachung arbeiten ([83], [85], [86], [89], [99], [100], [103], [104], [105], [108], [111], [113], [115]), greifen in die Implementierung des Dienstes oder des Konsumenten ein, um die notwendigen Instruktionen zur Messung der Qualitätsparameter zu hinterlegen. Diese Methode hat den Nachteil, dass die zu überwachenden Dienstgüteeigenschaften bereits zur Entwicklungszeit bekannt sein müssen. Darüber hinaus müssen zur Laufzeit beim Dienst selbst oder bei seinem Konsumenten Ressourcen für die Überwachung zur Verfügung gestellt werden. Demgegenüber findet eine synchrone Ausführung von Dienst und Dienstgüteüberwachung statt, so dass evtl. Verzögerungszeiten beim Erkennen von Dienstgüeverletzungen vermieden werden.

Nicht-intrusive Dienstgüteüberwachung ([85] - [88], [90] - [94], [101], [102], [106], [110], [114]) führt die notwendigen Dienstgütemessungen durch, indem Laufzeitinformationen, wie die Antwort des Dienstes, ausgewertet werden. Ein Eingriff in die Implementierung von Dienst oder Konsument ist nicht erforderlich. Diese Trennung von Geschäftslogik und Dienstgüteüberwachung stellt einen wesentlich saubereren Ansatz dar.

3.2.3 Kontinuität

Die Kontinuität der Dienstgüteüberwachung beschäftigt sich mit der Frage, zu welchen Zeiten die Dienstgüteüberwachung erfolgt. Man unterscheidet kontinuierliche und diskrete Dienstgüteüberwachung.

Kontinuierliche Dienstgüteüberwachung erlaubt das schnelle Erkennen von Dienstgütereletzungen, was insbesondere im Hinblick auf Adaption und Fehlerkompensierung einen großen Vorteil darstellt. Dies liegt darin begründet, dass die notwendigen Daten sofort vorliegen, während dies bei diskreter Dienstgüteüberwachung im schlimmsten Fall erst beim nächsten Messintervall der Fall ist. Die Kontinuität der Dienstüberwachung bestimmt somit die Schnelligkeit mit der auf Dienstgütereletzungen reagiert werden kann [107]. Der große Vorteil der diskreten Dienstgüteüberwachung besteht demgegenüber in der Einsparung von Ressourcen ([87], [88]). Tatsächlich ist die Analyse aller Informationen rund um die Dienstauführung für die Bestimmung der Dienstgüte und das Erkennen von Dienstgütereletzungen nicht nötig [88].

3.2.4 Monitoring-Architektur

Die aktuellen Forschungsansätze sind in ihren vorgeschlagenen Lösungen sehr heterogen und lassen sich bezüglich ihrer Architektur nur schwer vergleichen. Allen gemein ist jedoch die Tatsache, dass eine minimale Architektur zur Dienstgüteüberwachung (siehe Abbildung 7) aus zwei Basiskomponenten besteht: (1) den *Sensoren* zur Messung der Dienstgüte und (2) den *Auswertern*, die die gemessenen Werte interpretieren und stattgefunden Dienstgütereletzungen erkennen. Werden die gemessenen Daten persistent vorgehalten, ist zusätzlich eine Datenbank in die Architektur einzubinden.

Uneinigkeit der Autoren besteht dagegen bei der Kommunikation zwischen Sensoren und Auswertern. Einige Ansätze präferieren eine Pull-Architektur, bei der die Auswerter die notwendigen Daten erfragen. Demgegenüber steht die Push-Architektur, die die gemessenen Informationen direkt an die Komponente zur Auswertung weiterleitet.

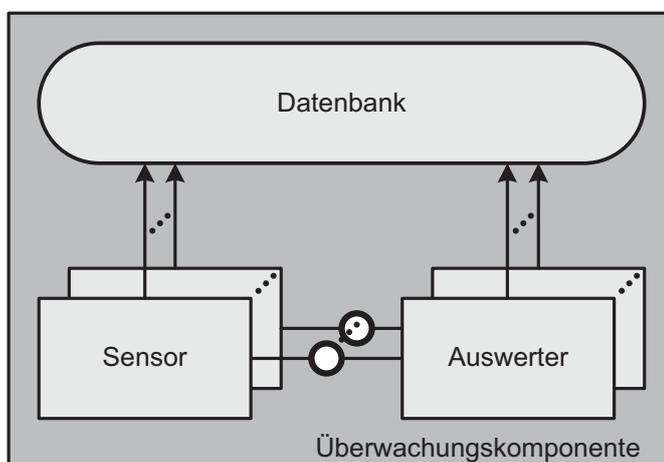


Abbildung 7: Minimalarchitektur einer Komponente zur Dienstgüteüberwachung

3.2.5 Zusammenfassung existierender Arbeiten zur Dienstgüteüberwachung

Der vorliegende Abschnitt beschäftigt sich mit dem aktuellen Stand der Forschung im Bereich der Dienstgüteüberwachung. Hierzu wurden existierende Ansätze untersucht. Ziel war es herauszufinden, ob bzw. in wie weit der Aspekt der Dienstgütezuerlässigkeit unterstützt wird. Erstaunlicherweise beschäftigen sich die Ansätze zwar mit der Gewinnung von Messwerten und der Erkennung von Dienstgütereletzungen, Konzepte zur Verwertung dieser Informationen zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit sind jedoch kaum anzutreffen. Lediglich Bertolino et al. er-

3. Verwandte Arbeiten

wähnt die (Vor-) Berechnung von Dienstgüeverletzungen als Maß für die Dienstgütezuverlässigkeit in [87]. Tiefgreifende Konzepte zur Bestimmung der Dienstgütezuverlässigkeit sind jedoch nicht definiert.

Eine Übersicht der untersuchten Ansätze zur Dienstgütemessung und –überwachung findet sich in Tabelle 5. Die Konzepte beschäftigen sich schwerpunktmäßig mit den Fragen nach Zuständigkeit, Intrusivität und Kontinuität der Dienstgüteüberwachung und werden in Tabelle 5 entsprechend ihren Lösungsansätzen klassifiziert. Folgt man dem Konzept einer minimalen Architektur für eine Überwachungskomponente, so kann die fehlende Bestimmung der Dienstgütezuverlässigkeit als zusätzlicher Auswerter nachgepflegt werden.

| Ansatz | Zuständigkeit | Intrusivität | Kontinuität | |
|------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|
| SLAMon | Dienstanbieter | intrusiv | diskret | [83] |
| Dynamic Proxy | Dienstanbieter | intrusiv / nicht-intrusiv | diskret / kontinuierlich | [85], [86] |
| Bertolino et al. | Dienstanbieter | nicht-intrusiv | diskret | [87] |
| Chau et al. | Dienstanbieter | nicht-intrusiv | kontinuierlich | [88] |
| Chen et al. | Dienstanbieter | Intrusiv | kontinuierlich | [89] |
| SLA@SOI | Dienstanbieter | nicht-intrusiv | kontinuierlich | [90]-[92] |
| Fakhfakh et al. | Dienstanbieter | nicht-intrusiv | diskret | [93] |
| Grunske et al. | Dienstanbieter | nicht-intrusiv | diskret | [94] |
| VRESCo | Dienstnutzer/ Dienstanbieter | intrusiv | kontinuierlich | [99], [100] |
| TAPAS | Dritte Partei | nicht-intrusiv | diskret | [101] |
| ASG | Dienstanbieter | nicht-intrusiv | kontinuierlich | [102] |
| VieDAM | Dienstanbieter | intrusiv | kontinuierlich | [103] |
| TPM | dritte Partei | intrusiv | kontinuierlich | [104] |
| PLASTIC | Dienstnutzer/ Dienstanbieter | intrusiv | kontinuierlich | [105] |
| SORMA | Dienstanbieter | nicht-intrusiv | kontinuierlich | [106] |
| Rosenberg et al. | Dienstnutzer | intrusiv | kontinuierlich | [108] |
| SeCSE | Dienstanbieter | nicht-intrusiv | diskret | [110] |
| GrandSlam | Dritte Partei | intrusiv | kontinuierlich | [111] |
| Wu et al. | Dienstanbieter | intrusiv | kontinuierlich | [113] |
| Zeng et al. | Dienstanbieter | nicht-intrusiv | kontinuierlich | [114] |
| PM framework | Dienstanbieter | intrusiv | kontinuierlich | [115] |

Tabelle 5: Vergleich existierender Forschungsarbeiten im Bereich Dienstgüteüberwachung

3.3 Zusammenfassung

Kapitel 3 widmete sich dem aktuellen Stand der Forschung im Bereich qualitätssensitiver Kompositionen. Hierfür waren existierende Forschungsansätze aus dem Bereich des qualitätssensitiven Bindens und der Dienstgüteüberwachung zu untersuchen. Neben der Klassifikation der Ansätze lag der Schwerpunkt der Untersuchungen darauf herauszufinden, in wie weit das Konzept der Dienstgütezuverlässigkeit unterstützt wird.

Die Ansätze im Bereich des qualitätssensitiven Bindens liefern Konzepte zur gezielten Maximierung der Dienstgüte einer zusammengesetzten Dienstleistung. Hierfür ist für jede Task der Komposition ein optimaler Teildienst zu selektieren. Forschungsarbeiten im diesem Kontext fokussieren sich auf zwei zentrale Aspekte: (1) die Bereitstellung adäquater Algorithmen zur Selektion der optimalen Teildienste und (2) die Konzeption einer geeigneten Infrastruktur zur Durchführung qualitätssensitiver Bindungsvorgänge vor und während der Laufzeit zusammengesetzter

Dienstleistungen. Eine Berücksichtigung der Dienstgütezuerlässigkeit erfolgt in keinem der beiden Aspekte. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass eine entsprechende Methodik zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit in zusammengesetzten Diensten auf Basis der Eigenschaften der Teildienste nicht existiert.

Im Bereich der Dienstgüteüberwachung beschäftigen sich die existierenden Ansätze schwerpunktmäßig mit der Datengewinnung und Auswertung, um Dienstgüteverletzungen zuverlässig erkennen zu können. Die zentralen Fragen hierbei sind Zuständigkeit, Intrusivität und Kontinuität der Datengewinnung und Datenauswertung. Auf die Evaluierung der Dienstgütezuerlässigkeit wird ebenfalls nicht eingegangen, obwohl die notwendigen Daten durch die Dienstgüteüberwachung ebenso vorliegen wie eine geeignete Architektur.

3. Verwandte Arbeiten

II. Konzeption

Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung der Dienstgütezverlässigkeit in zusammengesetzten Dienstleistungen. Im ersten Abschnitt wurde auf die notwendigen Grundlagen für ein solches Vorhaben eingegangen. Der nun folgende zweite Abschnitt widmet sich der Konzeption. Nach einer detaillierten Analyse der Problemstellung in Kapitel 4, stellt Kapitel 5 die Methodik zur Ermittlung der Dienstgütezverlässigkeit vor. Die Konzeption schließt mit einer kritischen Diskussion der entwickelten Konzepte in Kapitel 6 ab.

4. Analyse der Problemstellung

Kapitel 4 widmet sich der Analyse der Problemstellung. Aufbauend auf einem Szenario wird die Methodik zur Bestimmung der Dienstgütezverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung vorgestellt. Daran anschließend erfolgen die Definition geeigneter Metriken und Wertebereiche zum Messen der Dienstgütezverlässigkeit sowie die Identifikation der Anforderungen an die Aggregationsvorschriften.

4.1 Motivierendes Szenario

Als Einstieg in die Problematik zur Bestimmung der Dienstgütezverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung soll folgendes Szenario eines Öko-Rechners aus der Automobilindustrie dienen. Dieser zusammengesetzte IT-Dienst ermittelt auf Basis einer hypothetischen, deutschen Industrierichtlinie den Öko-Wert eines Kraftfahrzeuges. Der Öko-Wert ergibt sich aus dem Ressourcenverbrauch bei Produktion, Betrieb und Wartung des Fahrzeuges. Liegt der Öko-Wert unter einer bestimmten Grenze gilt das Fahrzeug als besonders umweltfreundlich, was von der deutschen Bundesregierung mit einem ermäßigten Kfz-Steuersatz gewürdigt wird.

Abbildung 8 zeigt den Aufbau des Öko-Rechners als zusammengesetzte Dienstleistung. Die Eingabe bildet das Datenblatt eines Fahrzeuges, welches neben der Materialliste auch eine Aufschlüsselung der Ressourcen für Produktion, Wartung und Betrieb enthält. Die notwendigen Daten wurden auf Basis von Statistiken und Simulationen vom Automobilhersteller identifiziert. Im ersten Schritt ermittelt der Dienst für jedes im Datenblatt verzeichnete Material die chemische Zusammensetzung. Hierfür wird ein IMDS Teildienst [37] benutzt, eine zentrale Datenbank der Automobilhersteller in der Informationen zu den verwendeten Materialien gespeichert sind. Auf Basis der chemischen Zusammensetzung, sowie dem Ressourcenverbrauch bei Produktion, Betrieb und Wartung kann anschließend mit Hilfe eines Eco-Value Teildienstes der Öko-Wert des Fahrzeuges berechnet werden. Wird eine Zertifizierung des Öko-Wertes gewünscht, so ist hierfür der Certify Teildienst in Anspruch zu nehmen. Öko-Wert und evtl. angefordertes Zertifikat werden nach Beendigung aller Rechnungen als Ergebnis des Öko-Rechners ausgegeben.

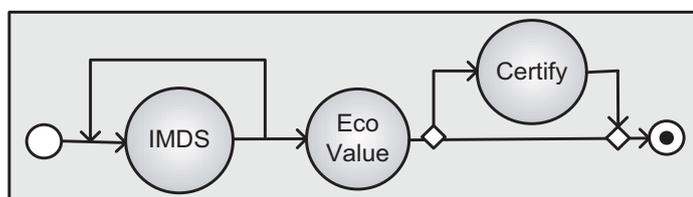


Abbildung 8: Öko-Rechner als zusammengesetzter IT-Dienst

Der Öko-Rechner wird von der fiktiven Firma GreenIT betrieben. Als potentielle Kandidaten für die Tasks IMDS, Eco Value und Certify wurden die in Tabelle 6 aufgelisteten Teildienste iden-

4. Analyse der Problemstellung

tifiziert. Nun sucht die Firma GreenIT einen geeigneten Ausführungsplan für den Öko-Rechner. Mit der Wahl des Ausführungsplans wird die Dienstgüte und Dienstgütezuverlässigkeit der zusammengesetzten Dienstleistung bestimmt. Als geeignet gilt der Ausführungsplan, der eine adäquate Dienstgüte sowie Dienstgütezuverlässigkeit besitzt und einen Preis von 2,50 Euro pro Aufruf nicht überschreitet. Als wichtige Dienstgüteeigenschaften sieht die Firma GreenIT die Antwortzeit und die Fehlerhäufigkeit. Für beide Parameter soll der Öko-Rechner eine Dienstgütegarantie anbieten. Die Antwortzeit definiert die Zeit, die maximal vom Absenden der Anfrage bis zum Eintreffen der Antwort beim Konsumenten vergehen darf. Die Fehlerhäufigkeit bestimmt die maximale Anzahl auftretender SOAP-Fehler während der Interaktion mit dem Dienst.

| IMDS Task | Eco Value Task | Certify Task |
|-----------------------------|-------------------------------|---|
| IMDS-Europe IMDS-Germany | Eco-Value Eco-Value-Backup | Certify-Standard Certify-Premium Certify-Gold |

Tabelle 6: potentielle Teildienste für die Tasks des Öko-Rechners

4.2 Methodik

Für die Identifikation eines geeigneten Ausführungsplans für den Öko-Rechner ist es notwendig die Dienstgüte und Dienstgütezuverlässigkeit aller 12 Ausführungspläne zu vergleichen. Zu diesem Zweck müssen beiden Größen numerische Werte zugewiesen werden. Die Dienstgüte setzt sich aus mehreren Parametern zusammen; im Fall des Öko-Rechners aus der Antwortzeit und der Fehlerhäufigkeit. Entsprechende Aggregationsvorschriften für die Berechnung klassischer Dienstgüteparameter auf Basis der im Ausführungsplan genutzten Teildienste wurden von Jaeger et al. [4] und Cardoso et al. [17] definiert. Kapitel 2.2.1 ging genauer auf die damit verbundenen Konzepte ein. So ermittelt sich die Antwortzeit des Öko-Rechners aus der Summe der Antwortzeiten aller IMDS Teildienstaufrufe, des Eco-Value Aufrufes und des Certify-Aufrufes.

Die Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans kann aktuell nicht numerisch bewertet werden, wie die Analyse verwandter Arbeiten (siehe Kapitel 3) zeigte. Der wichtige Aspekt der Dienstgütezuverlässigkeit bleibt derzeit unberücksichtigt, wenn es um die Wahl eines geeigneten Ausführungsplans geht. Einzige Entscheidungsgrundlage bilden die Werte der einzelnen Dienstgüteparameter.

Auf die Dienstgütezuverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung ging Kapitel 2.2.2 genauer ein. Hierbei wurde deutlich, dass die Dienstgütezuverlässigkeit hauptsächlich von den Teildiensten abhängt, genauer gesagt davon wie gut diese ihre Qualitätsversprechen einhalten. Für den Öko-Rechner bedeutet dies, dass seine Dienstgütezuverlässigkeit bezüglich Antwortzeit und Fehlerhäufigkeit direkt von der Dienstgütezuverlässigkeit der genutzten Teildienste für die IMDS, Eco-Value und Certify Task abhängt.

Um die Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans zu bestimmen, ist vorab die Dienstgütezuverlässigkeit der genutzten Teildienste zu bewerten. Eine solche Bewertung kann auf Basis der Monitoring-Historie¹ der Teildienste erfolgen. Die Monitoring-Historie gibt an wie oft es einem Dienst in der Vergangenheit gelungen war, seine Dienstgüteversprechen einzuhalten. Ziel ist es auf Basis dieser Informationen die Dienstgütezuverlässigkeit des Teildienstes in den nachfolgenden Interaktionen vorherzusagen. Eine entsprechende Rechenvorschrift hierfür konnte im Rahmen der Analyse existierender Arbeiten nicht identifiziert werden.

Fasst man die oben diskutierten Aspekte zusammen, so sind für die Bestimmung der Dienstgütezuverlässigkeit des Ausführungsplans A zwei Schritte notwendig: (1) Die Vorhersage der

¹ Es wird davon ausgegangen, dass jede Monitoring-Historie genau eine Dienstgütegarantie protokolliert. Bietet ein Dienst beispielsweise zwei verschiedene Garantien für die Antwortzeit an, so existiert zu jeder Garantie eine separate Monitoring-Historie. Auf diese Weise lassen sich die Dienstgütegarantien der Teildienste bewerten. Werden beide Antwortzeiten durch dieselbe Monitoring-Historie dokumentiert, kann die Zuverlässigkeit eines Teildienstes bezüglich einer Dienstgütegarantie nicht mehr bewertet werden.

Dienstgütezuerlässigkeit der Teildienste auf Basis ihrer Monitoring-Historie MH ($f_D(MH)$) und (2) die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit des Ausführungsplan auf Basis der Dienstgütezuerlässigkeit der genutzten Teildienste ($f_D(A)$). Abbildung 9 fasst diese Vorgehensweise zusammen.



Abbildung 9: Methodik bei der Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit des Ausführungsplans A

4.3 Metriken und Wertebereiche

Als Voraussetzung für die Berechnung der Dienstgütezuerlässigkeit ist eine geeignete Metrik zu identifizieren. Eine Metrik definiert den Wertebereich einer Eigenschaft sowie dessen Ordnung. Auf diese Weise ist es möglich die Qualität einer Größe, in diesem Fall die der Dienstgütezuerlässigkeit auf Basis eines numerischen Wertes zu beschreiben. Hierbei ist zunächst der Zeitraum zu definieren für den die berechnete Dienstgütezuerlässigkeit Gültigkeit hat. Prinzipiell ist zu unterscheiden, ob die Dienstgütezuerlässigkeit zum nächsten Interaktionszeitpunkt gesucht ist oder die im Mittel in den nachfolgenden Ausführungen vorzufindende Dienstgütezuerlässigkeit relevant ist. Im ersten Fall spricht man von der *relativen Dienstgütezuerlässigkeit*, im letzten von der *absoluten Dienstgütezuerlässigkeit* einer Dienstleistung.

Definition 4 - relative Dienstgütezuerlässigkeit: Die relative Dienstgütezuerlässigkeit gibt an, wie gut es einem Dienst gelingen wird seine Dienstgütegarantien während der nächsten Interaktion einzuhalten.

Definition 5 - absolute Dienstgütezuerlässigkeit: Die absolute Dienstgütezuerlässigkeit gibt an, wie gut es einem Dienst gelingen wird seine Dienstgütegarantien im Mittel während der nächsten n Interaktionen einzuhalten.

Die Berechnung der relativen Dienstgütezuerlässigkeit ist immer dann sinnvoll, wenn der Ausführungsplan nur kurzfristig genutzt wird. Dies ist z.B. der Fall, wenn der Ausführungsplan nur zur Kompensierung eines temporären Fehlers im Standard-Ausführungsplan der zusammengesetzten Dienstleistung dient. Soll der Ausführungsplan jedoch längere Zeit im Einsatz bleiben, so empfiehlt es sich die absolute Dienstgütezuerlässigkeit zu berechnen und als Vergleichskriterium für die Identifikation des optimalen Ausführungsplans zu nutzen.

4.3.1 Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes

Die zusammengesetzte Dienstleistung tritt gegenüber den Teildiensten ihres Ausführungsplans als Konsument auf. Aus Sicht des Konsumenten ist es wichtig die Wahrscheinlichkeit zu kennen, mit der ein Dienst eine Dienstgütegarantie nicht einhalten wird. Eine solche Wahrscheinlichkeit wird im Folgenden als *Dienstgüte-Verletzungswahrscheinlichkeit* (kurz *Verletzungswahrscheinlichkeit*) bezeichnet und dient als Maß für die Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes.

Definition 6 - Dienstgüte-Verletzungswahrscheinlichkeit (Verletzungswahrscheinlichkeit): Die Dienstgüte-Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e} \in [0,1]$ des Teildienstes s definiert die Wahrscheinlichkeit mit welcher der Dienst seine Dienst-

4. Analyse der Problemstellung

gütegarantie e verletzt wird. Die Dienstgütezuverlässigkeit eines Teildienstes ist umso höher, je geringer der Wert für seine Verletzungswahrscheinlichkeit ist.

Je nach Kontext der zu bestimmenden Dienstgütezuverlässigkeit bezieht sich die Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes auf die nächste Interaktion (relative Dienstgütezuverlässigkeit) bzw. die nächsten n Interaktionen (absolute Dienstgütezuverlässigkeit). Im Folgenden kennzeichnet die relative Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e}$ die Metrik der relativen und die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit $\overline{p}_{s,e}$ die Metrik der absoluten Dienstgütezuverlässigkeit.

Die Dienstgütezuverlässigkeit des Teildienstes s bezüglich der Dienstgütegarantie e ergibt sich aus der Monitoring-Historie $MH_{s,e}$. Die Monitoring-Historie besteht aus einer Menge von 4-Tupeln. Jedes Tupel [82] protokolliert eine Interaktion und speichert, ob es dem Dienst gelungen war die Dienstgütegarantie einzuhalten.

Definition 7 - Monitoring-Historie-Element: Das Monitoring-Historie-Element $h_{s,e} = (t, v, s, e)$ beschreibt durch den Wert $v \in \{0, 1\}$, ob der Dienst s während der Interaktion zum Zeitpunkt t die Garantie e verletzt hatte. Dabei kodiert der Wert $v = 1$ die Verletzung und der Wert $v = 0$ die Einhaltung der Dienstgütegarantie.

4.3.2 Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans

Die Beurteilung der Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans erfolgt, entgegen der eines Teildienstes, aus Sicht des Betreibers der zusammengesetzten Dienstleistung. Für ihn ist es wichtig zu wissen, wie oft welche Dienstgütegarantie während der Nutzung eines Ausführungsplans verletzt wird. Auf Basis dieser Informationen kann er geeignete Kompensierungsstrategien wählen, die Dienstgütegarantien der zusammengesetzten Dienstleistung festlegen sowie die Vor- und Nachteile der verschiedenen Ausführungspläne gegeneinander vergleichen.

Die Anzahl mit der eine Dienstgütegarantie innerhalb eines Ausführungsplans verletzt wird, kann stark variieren. Bei z Teildienstaufrufen sind 0 bis z Verletzungen möglich. 0 Verletzungen findet man immer dann vor, wenn jeder Teildienst die Dienstgütegarantie bei jedem Aufruf einhält. Mit z Verletzungen sind zu rechnen, wenn jeder Teildienst die Dienstgütegarantie bei jedem Aufruf verletzt. Wie gut ein Teildienst seine Dienstgütegarantie einhält, wird durch die Verletzungswahrscheinlichkeit bestimmt. Dies bedeutet, dass eine bestimmte Anzahl k von Dienstgüteverletzungen immer nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, der so genannten *Eintrittswahrscheinlichkeit*, eintritt. Die Anzahl k von Dienstgüteverletzungen für die Dienstgütegarantie e und deren Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{A,e}^k$ im Ausführungsplan A wird im Folgenden im *Zweitupel* $eVE_{A,e} = (k, p_{A,e}^k)$ zusammengefasst. Alle Zweitupel $eVE_{A,e}$ für eine Dienstgütegarantie werden in der Dienstgüteverletzungsmatrix zusammengefasst.

Definition 8 – Zweitupel $eVE_{A,e}$: Das Zweitupel $eVE_{A,e} = (k, p_{A,e}^k)$ für die Dienstgütegarantie e bestimmt mit $k \in \mathbb{N}$ die Anzahl von Verletzungen für e , die mit der Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{A,e}^k \in [0, 1]$ im Ausführungsplan A eintritt.

Je nach Kontext der zu bestimmenden Dienstgütezuverlässigkeit enthält das Zweitupel $eVE_{A,e}$ die Anzahl von Verletzungen und deren Eintrittswahrscheinlichkeit, die zur nächsten Interaktion erwartet werden (relative Dienstgütezuverlässigkeit) oder die Anzahl von Verletzungen und deren Eintrittswahrscheinlichkeit, die im Mittel während der nächsten n Interaktionen vorzufinden ist (absolute Dienstgütezuverlässigkeit). Im Folgenden bezeichnet das Zweitupel $eVE_{A,e} = (k, p_{A,e}^k)$ die Metrik für die relative Dienstgütezuverlässigkeit und das Zweitupel $\overline{eVE_{A,e}} = (k, \overline{p_{A,e}^k})$ die Metrik für die absolute Dienstgütezuverlässigkeit.

Die Dienstgüteverletzungsmatrix enthält alle notwendigen Informationen, um einen Ausführungsplan bezüglich seiner Dienstgütezuverlässigkeit beurteilen zu können. In vielen Fällen sind diese Informationen zu komplex. Für einen einfachen Vergleich verschiedener Ausführungspläne z.B. im Rahmen des Teildienstselektionsproblems (vergleiche Kapitel 2.3.1), ist ein numerischer

Wert vorteilhaft. Die Werte der Dienstgüteverletzungsmatrix sind daher geeignet zu aggregieren. Ein solcher Wert soll im Folgenden als *Verletzungszahl* $a_{A,e}$ des Ausführungsplans A bezüglich der Dienstgütegarantie e bezeichnet werden und gilt als Maß für die garantiespezifische Dienstgütezuverlässigkeit. Die *allgemeine Verletzungszahl* a_A fasst die Verletzungszahlen aller Garantien zusammen und misst die allgemeine Dienstgütezuverlässigkeit des Ausführungsplans A .

Definition 9 – Verletzungszahl $a_{A,e}$: Die Verletzungszahl $a_{A,e} \in \mathbb{R}$ bestimmt die Belastung des Ausführungsplans A mit Verletzungen der Dienstgütegarantie e . Die Dienstgütezuverlässigkeit ist umso höher, je geringer der Wert $a_{A,e}$ ist.

Definition 10 – allgemeine Verletzungszahl a_A : Die allgemeine Verletzungszahl $a_A \in \mathbb{R}$ bestimmt die allgemeine Belastung des Ausführungsplans A mit Dienstgüteverletzungen. Die Dienstgütezuverlässigkeit ist umso höher, je geringer der Wert a_A ist.

Je nach Kontext der zu bestimmenden Dienstgütezuverlässigkeit enthält der Wert $a_{A,e}$ bzw. a_A die Verletzungszahl der nächsten Interaktion (relative Dienstgütezuverlässigkeit) oder die mittlere Verletzungszahl der nächsten n Interaktionen (absolute Dienstgütezuverlässigkeit). Im Folgenden definieren die Größen $a_{A,e}$ bzw. a_A die Metrik der relativen Dienstgütezuverlässigkeit und die Größen $\bar{a}_{A,e}$ bzw. \bar{a}_A die Metrik der absoluten Dienstgütezuverlässigkeit des Ausführungsplans A .

4.4 Anforderungen

Um die Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans zu bestimmen, sind gemäß Kapitel 4.2 zwei Vorschriften zu definieren: (1) eine Vorschrift zur Vorhersage der Dienstgütezuverlässigkeit eines Teildienstes auf Basis seiner Monitoring-Historie und (2) eine Vorschrift zur Bestimmung der Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans. Auf die Anforderungen an diese beiden Vorschriften soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

4.4.1 Dienstgütezuverlässigkeit eines Teildienstes

/A1/ Beachtung von Zeitstempeln

Die Dienstgütezuverlässigkeit eines Teildienstes wird auf Basis seiner Monitoring-Historie vorhergesagt. Für eine möglichst genaue Vorhersage ist die Berücksichtigung von Zeitstempeln unabdingbare Voraussetzung. Der Zeitstempel definiert, wann ein Monitoring-Historie-Eintrag erstellt wurde und damit das Alter einer solchen Information. Um die Zeitveränderlichkeit im Verhalten eines Teildienstes widerzuspiegeln, sind jüngere Historie-Einträge stärker in die Vorhersage der Dienstgütezuverlässigkeit einzubeziehen als ältere.

/A2/ Verzicht auf Kontextinformationen

Für die Vorhersage des zukünftigen Verhaltens eines Teildienstes existieren zwei konträre Ansätze: (1) kontextsensitive Verfahren und (2) kontextfreie Verfahren.

Die kontextsensitiven Verfahren gehen der Frage nach, warum ein Dienst ein bestimmtes Verhalten gezeigt hat. So ist weniger der Dienstausschlag, sondern vielmehr der Grund hierfür von Interesse. Zu diesem Zweck wird der Ausführungskontext der Dienstleistung untersucht. Ziel ist der Aufbau eines Ursache-Wirkungsmodells. Auf diese Weise können bei Auftreten eines bekannten Kontextes nicht nur potentielle Fehler vorhergesagt werden, vielmehr ermöglichen kontextsensitive Verfahren die Identifikation geeigneter Kompensierungsstrategien. Dieser Vorteil wird durch die aufwendige Definition des Anwendungskontextes sowie durch die Entwicklung geeigneter Analyse- und Lernstrategien zur Aufstellung des Ursache-Wirkungsmodells erkauft.

Einen weniger ursachenbezogenen aber effizienteren Weg bei der Vorhersage zukünftigen Verhaltens gehen die kontextfreien Verfahren. Solche Verfahren arbeiten ausschließlich auf der

4. Analyse der Problemstellung

durch das Monitoring bereitgestellten Historie von Dienstgüeverletzungen und –einhalten. D.h. sie sagen zukünftige Werte auf Basis vergangener Werte vorher, ohne deren Ursache zu kennen. So ist es nicht nötig zu wissen, warum ein Dienst in der letzten Interaktion seine Dienstgütegarantie verletzt hat, um die Wahrscheinlichkeit für eine zukünftige Verletzung abzuleiten. Es ist ausreichend zu wissen, dass eine Dienstgüeverletzung stattgefunden hat.

Informationen über die Ursache vergangener Verletzungen sind äußerst heterogen und schwer zu formalisieren. Darüber hinaus sind Dienstbetreiber in vielen Fällen bemüht die Gründe für das Fehlverhalten ihrer Dienste nicht offen zu legen, vor allem dann, wenn sich diese auf innerbetriebliche Prozesse beziehen. Aus diesem Grund soll zur Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes auf die kontextfreien Verfahren zurückgegriffen werden.

4.4.2 Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans

/A3/ Beachtung von Vertragsinhalten

Die Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans bezieht sich ausschließlich auf die Dienstgütegarantien der Komposition. Bei der Berechnung der Dienstgütezuerlässigkeit sind daher nur jede Eigenschaften zu berücksichtigen, für die später eine Garantie festgelegt werden soll. Welche das sind, kann dem Dienstgütevertrag entnommen werden. Die Berechnung der Dienstgütezuerlässigkeit ist daher auf den Inhalt eines solchen Vertrages auszurichten. Für den Öko-Rechner bedeutet dies, dass die Berechnung der Dienstgütezuerlässigkeit basierend auf den Eigenschaften Antwortzeit und Fehlerhäufigkeit zu erfolgen hat.

/A4/ Beachtung der Häufigkeit von Teildienstaufrufen

Sieht man sich die Kompositionsstruktur des Öko-Rechners genauer an, so fällt auf, dass nicht jeder Teildienst gleich oft aufgerufen wird. Die Task IMDS beispielsweise befindet sich innerhalb einer Schleife. Es ist davon auszugehen, dass ihr implementierender Teildienst mehr als einmal aufgerufen wird. Im Gegensatz dazu steht die Task Certify. Ihr implementierender Teildienst wird aufgrund einer Fallunterscheidung nur dann ausgeführt, wenn tatsächlich eine Zertifizierung vom Nutzer verlangt wird.

Durch die unterschiedliche Häufigkeit mit der ein Teildienst innerhalb eines Ausführungsplans genutzt wird, ist auch der Einfluss seiner Dienstgüte auf Wert und Zuerlässigkeit der Dienstgüte des Ausführungsplans nicht einheitlich. Bindet man beispielsweise innerhalb einer Schleife einen instabilen Teildienst, so wird sich dies viel dramatischer auf die Gesamtverfügbarkeit der Komposition auswirken, als die Instabilität eines einmalig genutzten Teildienstes. Im Rahmen der Berechnung der Dienstgütezuerlässigkeit ist die Häufigkeit mit der ein Teildienst innerhalb der zusammengesetzten Dienstleistung genutzt wird, entsprechend zu berücksichtigen. Wichtige Informationen hierfür können der Struktur der Komposition entnommen werden.

4.5 Zusammenfassung

Kapitel 4 widmete sich der Analyse der Problemstellung. Über ein einführendes Szenario wurde die Methodik zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans abgeleitet. Diese besteht aus zwei zentralen Schritten: (1) die Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes auf Basis seiner Monitoring-Historie und (2) die Ermittlung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans auf Basis der Dienstgütezuerlässigkeit der genutzten Teildienste. Im nachfolgenden Kapitel 5 wird genauer auf die Konzeption der beiden Schritte eingegangen.

An die Definition der Methodik anschließend, erfolgten erste Analyseentscheidungen zur Festlegung der Metriken und Wertebereiche sowie der Anforderungen. Als Metrik für die Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes dient die Verletzungswahrscheinlichkeit. Eine genaue Bewertung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans ist durch die Dienstgüteverletzungsmatrix möglich. Sie enthält für jede mögliche Anzahl von Verletzungen der Garantie e , die Wahrscheinlichkeit mit der diese während der Ausführung des Ausführungsplans eintreten. Die Einträge

der Dienstgüeverletzungsmatrix können zur garantiespezifischen Verletzungszahl $a_{A,e}$ bzw. zur allgemeinen Verletzungszahl a_A aggregiert werden, als einfache numerische Metrik für die Dienstgüezuverlässigkeit eines Ausführungsplans. Dabei beschreibt $a_{A,e}$ die Dienstgüezuverlässigkeit bezüglich der Dienstgüegarantie e und a_A die allgemeine Dienstgüezuverlässigkeit des Ausführungsplans A .

4. Analyse der Problemstellung

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

Das vorangegangene Kapitel 4 analysierte die Problemstellung der Arbeit mit dem Ergebnis, dass für die Bestimmung der Dienstgütezuvverlässigkeit eines Ausführungsplans zwei wesentliche Konzepte bereitzustellen sind:

- Die Vorhersage der Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes auf Basis seiner Monitoring-Historie. Die Verletzungswahrscheinlichkeit definiert die Dienstgütezuvverlässigkeit eines Teildienstes bezüglich einer Dienstgütegarantie und kann als relativer oder absoluter Wert angegeben werden.
- Die Ermittlung der Dienstgüteverletzungsmatrix zur detaillierten Bewertung der Dienstgütezuvverlässigkeit eines Ausführungsplans bezüglich einer Dienstgütegarantie und die Aggregation der Matrix zum numerischen Wert $a_{A,e}$ bzw. a_A . Die Verletzungszahl $a_{A,e}$ bzw. die allgemeine Verletzungszahl a_A gilt als einfache Metrik für die Bestimmung der garantiespezifischen bzw. allgemeinen Dienstgütezuvverlässigkeit eines Ausführungsplans.

Das vorliegende Kapitel 5 widmet sich der Bereitstellung oben genannten Konzepte.

5.1 Dienstgütezuvverlässigkeit eines Teildienstes

5.1.1 Relative Verletzungswahrscheinlichkeit

5.1.1.1 Methodik

Die relative Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e}$ bestimmt die eigenschaftsspezifische Dienstgütezuvverlässigkeit eines Teildienstes s (siehe Kapitel 4.3) und misst die Wahrscheinlichkeit, mit welcher der Teildienst die Garantie e zum nächsten Interaktionszeitpunkt nicht einhält. Es handelt sich um eine Prognose für das Auftreten einer Dienstgüteverletzung unter Kenntnis des bisherigen Zustandes des Teildienstes. Eine solche Prognose soll gemäß der Analyse in Kapitel 4 kontextfrei erfolgen. Kontextfreie Prognosen arbeiten nach den Prinzipien der Zeitreihenanalyse, die versuchen auf Basis der vergangenen Werte zukünftige Werte und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten zu berechnen.

Überträgt man die obigen Überlegungen auf die Bestimmung der relativen Dienstgütezuvverlässigkeit, so sind die in der Monitoring-Historie eines Teildienstes gespeicherten Werte für Dienstgüteverletzungen bzw. –einhaltungen als Zeitreihe zu interpretieren. Auf Basis dieser Zeitreihe wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine zukünftige Dienstgüteverletzung bestimmt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit entspricht der Verletzungswahrscheinlichkeit des Teildienstes

Die Vertreter der Zeitreihenanalyse unterteilen sich nach Chatfield [29] in subjektive, univariate und multivariate Verfahren. Subjektive Verfahren werden von Menschen aufgrund ihrer Erfahrungsbasis getätigt. Sie sind weder deterministisch noch automatisch berechenbar. Ihre Verwendung zur Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit scheidet aus. Im Gegensatz dazu basieren uni- und multivariate Methoden auf deterministischen Modellen. Univariate Modelle treffen die Prognosen für zukünftige Werte einer Variablen ausschließlich auf Basis der vergangenen Werte dieser, während multivariate Methoden mehrere Parameter auswerten. Für die Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit sind univariate Modelle ausreichend, da auf Basis bisheriger Dienstgüteverletzungen das Auftreten zukünftiger Verletzungen prognostiziert wird.

Die Verfahren der univariaten Zeitreihenanalyse arbeiten nach den Prinzipien der Gleitmittelprozesse (engl. Moving-Average-Processes), Autoregression sowie Mischformen beider (siehe Abbildung 10). Es muss daher geprüft werden, welche Methode für die Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit am geeignetsten erscheint.

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

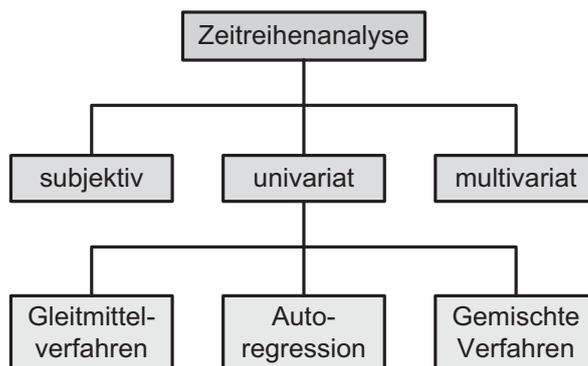


Abbildung 10: Modelklassen der Zeitreihenanalyse

Ein Vergleich der einzelnen Vertreter der univariaten Prognosemodelle zur Bestimmung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit wurde durch Urbanik in [30] vorgenommen. Der Autor hat hierfür jeweils bedeutende Vertreter aus den drei Subklassen univariater Modelle gewählt und untersucht, wie stark die Prognosen von den tatsächlichen Werten abweichen. Für seine vergleichenden Untersuchungen wählte Urbanik drei Versuchsreihen unterschiedlicher Struktur zu je 50 Werten. Die Versuchsreihen wurden in zwei Abschnitte aufgeteilt. Die Werte 1 bis 30 dienten der Modell- und Parameterfindung. Man bezeichnet diesen Abschnitt auch als Lernstichprobe. Die Werte 31 bis 50 bilden die Kontrollstichprobe, deren Werte mit den Prognosen verglichen wurden. Als Vergleichskriterium zog Urbanik die drei klassischen Parameter zur Bestimmung der Güte eines Prognosemodells heran: (1) der *mittlere quadratische Fehler* (engl. Mean Square Error (MSE)), (2) das *Akaike Informationskriterium* (AIC) ([31]) und (3) das *Bayessche Kriterium von Schwarz* (SBC) ([31]). Je geringer die Werte von MSE, AIC und SBC sind, desto zuverlässiger waren die Prognosen. Das Ergebnis der Untersuchungen kann Tabelle 7 entnommen werden. Für detaillierte Informationen zur Versuchsdurchführung sowie zur genauen Arbeitsweise der einzelnen stochastischen Modelle sei auf [30] verwiesen.

| Model | Durchschnitt MSE | Durchschnitt AIC | Durchschnitt BSC |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Gleitmittelprozesse | | | |
| Exp. Glätten ($\alpha = 0,3$) | 0,2765 | -26,9 | -26,9 |
| Exp. Glätten ($\alpha = 0,8$) | 0,4354 | -16,9433 | -16,9433 |
| Moving Average 2. Ordnung | 0,2378 | -22,8267 | -19,8367 |
| Autoregression | | | |
| Markov-Kette | 0,2047 | -30,1633 | -29,1733 |
| Autoregression 2. Ordnung | 0,2129 | -25,11 | -22,12 |
| Mischformen | | | |
| ARMA (1,1) ohne Konstante | 0,2797 | -19,7867 | -16,7967 |
| ARMA (1,1) mit Konstante | 0,2453 | -24,1167 | -22,1267 |
| ARMA (2,2) ohne Konstante | 0,2925 | -15,4367 | -10,4567 |

Tabelle 7: Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur Prognose von Verletzungswahrscheinlichkeiten, nach [30]

Tabelle 7 zeigt, dass die Markov-Kette in allen drei Vergleichskriterien stets die besten, d.h. geringsten Werte aufweist. Diese Tatsache ist nicht verwunderlich, denn bereits zahlreiche andere Forschungsbereiche ([32] - [35]) zeigen, dass die Markov-Kette trotz ihrer Einfachheit sehr aussagekräftige Prognose- und Vorhersagewerte liefert.

Definition 11 – Markov-Kette: Eine *Markov-Kette* $K = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ *erster Ordnung* [36] der Länge n ist ein stochastischer, zeitdiskreter Prozess mit der Zustandsmenge Z , welcher in einem von den Zuständen $z_i \in Z$ startet und dann schrittweise von einem Zustand in den nächsten wechselt. Die Wahrscheinlichkeit von Zustand z_i zum Zustand z_j zu wechseln, wird Übergangswahrscheinlichkeit p_{ij} genannt und berechnet sich nach Gleichung 5.1.

$$p_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{N_i} \quad (5.1)$$

Dabei ist $N_{i,j}$ die Anzahl aller Übergänge vom Zustand z_i zum Zustand z_j und N_i die Gesamtzahl aller Übergänge vom Zustands z_i in einen beliebigen Folgezustand in der vorhandenen Markov-Kette.

Die Übergangswahrscheinlichkeiten der Markov-Kette entsprechen den Wahrscheinlichkeiten mit denen zukünftige Werte eintreten. Hierbei definiert die Wahrscheinlichkeit p_{ij} die Eintrittswahrscheinlichkeit für den Zustand z_j als Folge des Zustandes z_i .

Überträgt man oben genannte Arbeitsweise der Markov-Kette auf die Bestimmung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit, so ergeben sich die folgenden zwei Schritte. Als Basis dient eine Markov Kette erster Ordnung mit der binären Zustandsmenge $Z \in \{0,1\}$:

- Aufstellen der Markov-Kette
- Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine zukünftige Dienstgüteverletzung

1. Aufstellen der Markov-Kette

Um die relative Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e}$ eines Teildienstes s für die Dienstgütegarantie e zu bestimmen, muss zunächst die erforderliche Markov-Kette erstellt werden. Als Markov-Kette dienen die Werte der letzten n der insgesamt m Monitoring-Historie-Einträge. Der Wert v_i des Monitoring-Historie-Eintrages $h_i = (t_i, v_i, s, e)$ bildet den Zustand z_i der Markov-Kette. Hieraus ergibt sich die folgende Markov-Kette: $K = (z_1, z_2, \dots, z_n) = (v_{m-n+1}, v_{m-n+2}, \dots, v_m)$.

2. Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine zukünftige Dienstgüteverletzung

Im zweiten Schritt ist die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine zukünftige Dienstgüteverletzung zu bestimmen. Eine Dienstgüteverletzung wird durch den Folgezustand $z_{n+1} = 1$ der Markov-Kette kodiert. Bei einer Zustandsmenge $Z \in \{0, 1\}$ resultieren unter Verwendung einer Markov-Kette erster Ordnung zwei Eintrittswahrscheinlichkeiten für den Folgezustand $z_{n+1} = 1$. Die bedingte Wahrscheinlichkeit $p_{0,1}$ für den Zustand $z_{n+1} = 1$ als Folge des Zustandes $z_n = 0$ und die bedingte Wahrscheinlichkeit $p_{1,1}$ für den Zustand $z_{n+1} = 1$ als Folge des Zustandes $z_n = 1$. Welche dieser Größen der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit entspricht, ist abhängig vom aktuellen Zustand z_n der Markov-Kette. Ist der aktuelle Zustand $z_n = 0$ so ist $p_{0,1}$ die Verletzungswahrscheinlichkeit andernfalls $p_{1,1}$.

Aggregierte Berechnung der Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e}$

Beachtet man die Tatsache, dass sich die Markov-Kette direkt aus der Monitoring-Historie $MH_{s,e}$ des Teildienstes s und der Dienstgütegarantie e ableiten lässt, können die eben erläuterten Schritte 1 und 2 zu einer aggregierten Berechnung zusammengefasst werden. Dies ergibt die in der Gleichung (5.2) dargestellte Formel zur Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e}$ für den Teildienst s und die Dienstgütegarantie e .

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

$$P_{s,e} = P_{v_m,1} = \frac{N_{v_m,1}}{N_{v_m}} \quad (5.2)$$

Mit

$$N_{v_m,1} = \sum_{i=m-n+1}^{m-1} b_i \quad \text{und} \quad b_i = \begin{cases} 1 & \text{wenn } (v_i = v_m) \wedge (v_{i+1} = 1) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.3)$$

und

$$N_{v_m} = \sum_{i=m-n+1}^{m-1} c_i \quad \text{und} \quad c_i = \begin{cases} 1 & \text{wenn } v_i = v_m \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.4)$$

Gleichung (5.3) berechnet in Abhängigkeit von $v_m \in \{0, 1\}$ (dem Wert des letzten Historie-Eintrages) wie oft eine Dienstgütereletzung ($v_m = 1$) bzw. -einhaltung ($v_m = 0$) im zu betrachtenden Ausschnitt der Monitoring-Historie $MH_{s,e}$ von einer Dienstgütereletzung gefolgt war. Gleichung (5.4) definiert in Abhängigkeit von $v_m \in \{0, 1\}$ wie viele Zustandsübergänge insgesamt von einer Dienstgütereletzung ($v_m = 1$) bzw. einer -einhaltung ($v_m = 0$) im zu betrachtenden Ausschnitt der Monitoring-Historie $MH_{s,e}$ existieren.

Berücksichtigung von mehr Vergangenheitsinformationen

In den vergangenen Erläuterungen wurde die relative Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis einer Markov-Kette erster Ordnung ermittelt. Dies bedeutet, dass die berechnete Wahrscheinlichkeit immer nur vom aktuellen Zustand der Markov-Kette abhängt. Will man die Vergangenheit eines Teildienstes stärker berücksichtigen, so muss man eine Markov-Kette höherer Ordnung verwenden. Die Übergangswahrscheinlichkeit einer Markov-Kette k -ter Ordnung berechnet sich nach Gleichung (5.5).

$$P_{i_1 i_2 \dots i_k, j} = \frac{N_{i_1 i_2 \dots i_k, j}}{N_{i_1 i_2 \dots i_k}} \quad (5.5)$$

Markov-Ketten höherer Ordnung erlauben eine genauere Vorhersage zukünftiger Folgezustände. Dieser Vorteil wird mit einem höheren Rechenaufwand erkaufte. Die Länge n der Markov-Kette sowie deren Ordnung k muss daher geeignet gewählt werden, um einen vertretbaren Kompromiss zwischen Genauigkeit der Prognose und Dauer der Berechnung zu erhalten. Allgemein lässt sich die relative Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e}$ für den Teildienst s und die Dienstgütegarantie e auf Basis einer Monitoring-Historie der Länge m und einer Markov-Kette der Ordnung k und der Länge n ($m \geq n$) nach Gleichung (5.6) ermitteln. In Kapitel 7 wird zeigen, dass für die Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit eine Markov-Kette erster Ordnung ausreichend genaue Vorhersagewerte liefert.

$$P_{s,e} = P_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m, 1} = \frac{N_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m, 1}}{N_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m}} \quad (5.6)$$

Mit

$$N_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m, 1} = \sum_{i=m-n+1}^{m-k} b_i$$

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{wenn } (v_i = v_{m-k+1}) \wedge \dots \wedge (v_{i+k-1} = v_m) \wedge (v_{i+k} = 1) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.7)$$

und

$$N_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m} = \sum_{i=m-n+1}^{m-1} c_i$$

$$c_i = \begin{cases} 1 & \text{wenn } (v_i = v_{m-k+1}) \wedge (v_{i+1} = v_{m-k+2}) \wedge \dots \wedge (v_{i+k-1} = v_m) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.8)$$

5.1.1.2 Beispiel

Die Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e}$ als Metrik für die relative Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes soll zum besseren Verständnis anhand eines Beispiels illustriert werden. Tabelle 8 zeigt die Monitoring-Historie für die Antwortzeit des Teildienstes „IMDS-Europe“, der im Öko-Rechner Anwendung finden soll. Nachfolgend wird gezeigt, wie die relative Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{imds-europe,rt}$ für die Antwortzeit (rt) dieses Teildienstes berechnet wird. Hierfür wird eine Markov-Kette zweiter Ordnung ($k = 2$) der Länge 12 ($n = 12$) verwendet.

| t_i | v_i | s | e |
|-------|-------|-------------|-----|
| 1 | 1 | IMDS-Europe | rt |
| 2 | 1 | IMDS-Europe | rt |
| 3 | 0 | IMDS-Europe | rt |
| 4 | 0 | IMDS-Europe | rt |
| 5 | 0 | IMDS-Europe | rt |
| 6 | 1 | IMDS-Europe | rt |
| 7 | 0 | IMDS-Europe | rt |
| 8 | 1 | IMDS-Europe | rt |
| 9 | 0 | IMDS-Europe | rt |
| 10 | 0 | IMDS-Europe | rt |
| 11 | 0 | IMDS-Europe | rt |
| 12 | 0 | IMDS-Europe | rt |

Tabelle 8: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des Teildienstes „IMDS-Europe“

1. Aufstellen der Markov-Kette

Schritt eins zur Bestimmung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{imds-europe,rt}$ für die Antwortzeit des Teildienstes „IMDS-Europe“ bildet die Aufstellung der Markov-Kette. Im Beispiel findet eine Markov-Kette der Länge $n = 12$ Anwendung. Dies bedeutet, dass die letzten 12 Werte der Monitoring-Historie für die Antwortzeit des Teildienstes „IMDS-Europe“ aus Tabelle 8 chronologisch aufzulisten sind. Dies führt zu folgender Markov-Kette: $K = (1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$.

2. Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine zukünftige Dienstgüteverletzung

Im zweiten Schritt ist die Eintrittswahrscheinlichkeit für den Folgezustand $z_{n+1} = 1$ zu berechnen. Für das Beispiel soll eine Markov-Kette zweiter Ordnung verwendet werden, dies bedeutet, dass die Prognose auf Basis der letzten zwei Zustände der Markov-Kette erfolgt. Die beiden letzten Zustände lauten $z_{n-1} = 0$ und $z_n = 0$. D.h. die Eintrittswahrscheinlichkeit für den Folgezustand $z_{n+1} = 1$ entspricht der Übergangswahrscheinlichkeit $p_{00,1}$. Hierfür ist Gleichung (5.5) anzuwenden. Die relative Dienstgütezuerlässigkeit für die Antwortzeit des Teildienstes „IMDS-Europe“, gemessen als relative Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{imds-europe,rt}$, beträgt 0,25 (siehe Gleichung (5.9).

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

$$P_{imds-europart} = P_{00,1} = \frac{\text{Anzahl Übergänge von Zustand } 00 \text{ nach Zustand } 1}{\text{Anzahl Übergänge von Zustand } 00} = \frac{1}{4} \quad (5.9)$$

Wie bereits erwähnt, ist die Aufstellung der Markov-Kette für die Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit nicht nötig. Wendet man Gleichung (5.6) auf die Monitoring-Historie aus Tabelle 8 an, so erhält man ebenfalls den Wert 0,25. (siehe Gleichung (5.10))

$$\begin{aligned} P_{imds-europart} &= \frac{N_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m, 1}}{N_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m}} = \frac{\sum_{i=m-n+1}^{m-k} b_i}{\sum_{i=m-n+1}^{m-k} c_i} \\ &= \frac{N_{00,1}}{N_{00}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} b_i}{\sum_{i=1}^{10} c_i} \quad (5.10) \\ &= \frac{0+0+0+1+0+0+0+0+0+0}{0+0+1+1+0+0+0+0+0+1+1} \\ &= \frac{1}{4} \end{aligned}$$

5.1.2 Absolute Verletzungswahrscheinlichkeit

5.1.2.1 Methodik

Die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit $\overline{p_{s,e}}$ misst die absolute Dienstgütezverlässigkeit eines Teildienstes s bezüglich der Dienstgütegarantie e (siehe Kapitel 4.3). Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit mit welcher der Teildienst seine Dienstgütegarantie im Mittel nicht einhalten kann. Es handelt sich um eine absolute oder auch mittlere Wahrscheinlichkeit. Wahrscheinlichkeitsberechnung basiert immer auf einer hinreichend großen Menge E von Ereignissen. Will man die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis E_1 bestimmen, so ist dessen Vorkommen durch die Anzahl aller Ereignisse zu dividieren. Dieser Sachverhalt ist in Gleichung (5.11) dargestellt.

$$p(E_1) = \frac{|E_1|}{|E|} \quad (5.11)$$

Gemäß den Anforderungen aus Abschnitt 4.4 sind für die Vorsage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit kontextfreie Verfahren anzuwenden. Kontextfreie Verfahren arbeiten ausschließlich auf Informationen, die für den Dienstnutzer sichtbar sind. Informationen über interne Vorgänge sind nicht bekannt. Dies bedeutet, dass für die Bestimmung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit lediglich die Daten der Monitoring-Historie $MH_{s,e}$ des Teildienstes s und der Garantie e zur Verfügung stehen. Die Monitoring-Historie besteht aus zwei Ereignistypen: (1) Dienstgüteverletzung ($v_i = 1$) und (2) Dienstgüteeinhaltung ($v_i = 0$). Die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit bezieht sich auf den ersten Ereignistyp. Sie berechnet sich aus der Division der Anzahl von Dienstgüteverletzungen ($v_i = 1$) in der Monitoring-Historie und der Länge m der Historie (siehe Gleichung (5.12)). Die Anzahl der Dienstgüteverletzungen ergibt sich aus der Addition der Werte v_i aller m Einträge.

$$\overline{p_{s,e}} = p(v=1) = \frac{\sum_{i=1}^m v_i}{m} \quad (5.12)$$

Statt der gesamten Monitoring-Historie kann auch nur ein Ausschnitt dieser als Grundlage für die Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit dienen. Im Allgemeinen werden in diesem Fall die letzten n der m Einträge verwendet, um einen möglichst aktuellen Wert zu erhalten. Gleichung (5.12) ist dann entsprechend anzupassen. Eine Begrenzung der Monitoring-Historie ist immer dann sinnvoll, wenn Dienste verglichen werden sollen. Um vergleichbare Werte zu erhalten, muss die Berechnung der Verletzungswahrscheinlichkeit unbedingt auf Basis gleich langer Monitoring-Historien erfolgen. Haben die Monitoring-Historien der Dienste unterschiedliche Längen, so müssen diese vereinheitlicht werden. Darüber hinaus berücksichtigt die Beschränkung der Monitoring-Historie die Zeitveränderlichkeit der Dienstgütezuvverlässigkeit, eine Anforderung die gemäß Kapitel 4.4 zu erfüllen ist. Dieser Effekt kann verstärkt werden, indem der Einfluss veralteter Dienstgüteverletzungen auf die Verletzungswahrscheinlichkeit durch einen Wichtungsfaktor $w \leq 1$ reduziert wird. Die obigen Überlegungen führen zur der in Gleichung (5.13) angegebenen allgemeinen Berechnungsformel für die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit für den Teildienst s und die Dienstgütegarantie e .

$$\overline{p_{s,e}} = p(v=1) = \frac{\sum_{i=m-n+1}^m w^{m-i} * v_i}{\sum_{i=m-n+1}^m w^{m-i}} \quad (5.13)$$

5.1.2.2 Beispiel

Die Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit $\overline{p_{s,e}}$ als Metrik für die absolute Dienstgütezuvverlässigkeit eines Teildienstes soll zum besseren Verständnis anhand eines Beispiels illustriert werden. Tabelle 8 zeigt die Monitoring-Historie für die Antwortzeit (rt) des Teildienstes „IMDS-Europe“. Nachfolgend wird gezeigt, wie die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit $\overline{p_{\text{imds-europe,rt}}}$ berechnet wird.

Gemäß Gleichung (5.13) ist zur Bestimmung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit die Anzahl der Dienstgüteverletzungen innerhalb des zu betrachtenden Ausschnitts der Monitoring-Historie durch die Länge zu dividieren. Im Beispiel sollen 12 Werte der Historie berücksichtigt und auf eine Wichtung der einzelnen Einträge verzichtet werden ($m = 12$, $n = 12$, $w = 1$). Gleichung (5.14) zeigt die Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit für die Antwortzeit des Teildienstes „IMDS-Europe“. Die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit beträgt rund 0,334.

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

$$\begin{aligned}
 \overline{P_{\text{imds-europeert}}} &= \frac{\sum_{i=m-n+1}^m w^{m-i} * v_i}{\sum_{i=m-n+1}^m w^{m-i}} \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^{12} 1^{12-i} * v_i}{\sum_{i=1}^{12} 1^{12-i}} \quad (5.14) \\
 &= \frac{1+1+0+0+0+0+1+0+1+0+0+0+0}{12} \\
 &= \frac{1}{3}
 \end{aligned}$$

Zur Verdeutlichung wie sich eine Wichtung der Werte der einzelnen Monitoring-Historie-Einträge auf die Berechnung auswirkt, soll nun ein Wichtungsfaktor von $w = 0,9$ verwendet werden. Die Monitoring-Historie in Tabelle 8 zeigt, dass der Teildienst „IMDS-Europe“ in jüngster Vergangenheit deutlich weniger Verletzungen der Antwortzeit aufweist. Als Maß für die absolute Dienstgütezuerlässigkeit ist aus diesem Grund mit einer geringeren absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit zu rechnen. Die Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis aller 12 Monitoring-Historie-Einträge ist in Gleichung (5.15) dargestellt. Tatsächlich ist die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit unter Verwendung eines Wichtungsfaktors von 0,9 mit einem Wert von 0,26 geringer als im vorangegangenen Beispiel.

$$\begin{aligned}
 \overline{P_{\text{imds-europeert}}} &= \frac{\sum_{i=m-n+1}^m w^{m-i} * v_i}{\sum_{i=m-n+1}^m w^{m-i}} \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^{12} 0,9^{12-i} * v_i}{\sum_{i=1}^{12} 0,9^{12-i}} \quad (5.15) \\
 &= \frac{0,9^{11} + 0,9^{10} + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,9^6 + 0 + 0,9^4 + 0 + 0 + 0 + 0}{\sum_{i=1}^{12} 0,9^{12-i}} \\
 &\cong \underline{\underline{0,26}}
 \end{aligned}$$

5.2 Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans

Die Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans wird gemäß Kapitel 4.3 mit Hilfe der Verletzungsmatrix für jede Dienstgütegarantie der zusammengesetzten Dienstleistung oder durch die Verletzungszahl bewertet. Die Verletzungsmatrix enthält eine Menge von Zweitupeln, die jeder möglichen Anzahl von Dienstgüteverletzungen eine Eintrittswahrscheinlichkeit zuordnet. Die Verletzungszahl definiert die Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans in Form eines

numerischen Wertes. Beide Größen, Verletzungsmatrix und Verletzungszahl, berechnen sich auf Basis der Verletzungswahrscheinlichkeiten der genutzten Teildienste, die je nach Kontext relativen oder absoluten Charakter haben. Dementsprechend haben auch die Zweitupel relativen oder absoluten Charakter, je nachdem welche Verletzungswahrscheinlichkeit der Teildienste verarbeitet wird. Dies bedeutet insbesondere, dass sich die Bestimmungsvorschriften der absoluten und relativen Dienstgütezverlässigkeit eines Ausführungsplans nicht unterscheiden. Sie arbeiten lediglich auf verschiedenen Eingaben. Im Folgenden wird daher allgemein von Dienstgütezverlässigkeit, Verletzungswahrscheinlichkeit, Zweitupel, Anzahl von Dienstgüteverletzungen und Verletzungszahl gesprochen. Die dargestellte Vorgehensweise gilt dann gleichermaßen für die Ermittlung der absoluten wie auch der relativen Werte. Die Definition von Formeln und Gleichungen erfolgt ohne Beschränkung der Allgemeinheit auf Basis der relativen Größen. Für die Ermittlung der absoluten Werte sind diese Angaben durch die entsprechenden absoluten Werte zu ersetzen.

5.2.1 Verletzungsmatrix

5.2.1.1 Methodik

Um die Dienstgütezverlässigkeit eines Ausführungsplans genau zu bewerten ist für jede Dienstgütegarantie die Verletzungsmatrix aufzustellen. Die Verletzungsmatrix enthält für jede mögliche Anzahl k von Dienstgüteverletzungen die dazugehörige Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{A,e}^k$. Auf Basis dieser Informationen kann der Betreiber der zusammengesetzten Dienstleistung die Dienstgütezverlässigkeit detailliert bewerten. Der Öko-Rechner besitzt zwei Dienstgütegarantien: (1) eine Garantie für die Antwortzeit und (2) eine Garantie für die Fehlerhäufigkeit. Für eine detaillierte Beurteilung der Dienstgütezverlässigkeit von Ausführungsplänen des Öko-Rechners ist daher die Verletzungsmatrix für die Antwortzeit und die Verletzungsmatrix für die Fehlertoleranz aufzustellen.

Die Anzahl von Dienstgüteverletzungen für eine Dienstgütegarantie innerhalb eines Ausführungsplans entspricht der Zahl von Teildienstaufrufen, die ihre Garantie für diese Eigenschaft nicht einhalten können. Hierzu ist zunächst zu bestimmen, wie oft jeder im Ausführungsplan der Komposition enthaltene Teildienst insgesamt aufgerufen wird.

Die obigen Überlegungen führen zu den folgenden zwei Schritten für die Bestimmung der Dienstgütezverlässigkeit eines Ausführungsplans in Form der Verletzungsmatrizen:

1. Ermittlung der Gesamtzahl von Teildienstaufrufen im Ausführungsplan A der zusammengesetzten Dienstleistung. Dieser Schritt gilt als Vorbereitung für die eigentliche Berechnung in Schritt 2.
2. Ermittlung der Verletzungsmatrix für jede Dienstgütegarantie der zusammengesetzten Dienstleistung.

1. Ermittlung der Gesamtzahl von Teildienstaufrufen im Ausführungsplan A

In Schritt eins zur Bestimmung einer Verletzungsmatrix gilt es, zu ermitteln, wie oft jeder Teildienst s im Ausführungsplans A insgesamt aufgerufen wird. Die Reihenfolge der einzelnen Teildienstaufrufe wird durch den Kontrollfluss der zusammengesetzten Dienstleistung definiert. Dieser setzt sich rekursiv aus den Basiskontrollaktivitäten Sequenz, Parallelität, Wiederholung sowie Fallunterscheidung zusammen. Jede Kontrollaktivität kodiert eine bestimmte Anzahl von Teildienstaufrufen (siehe Tabelle 9).

| Kontrollaktivität | Anzahl Teildienstaufrufe |
|--------------------|--------------------------|
| Sequenz | 1 |
| Parallelität | 1 |
| Wiederholung | k |
| Fallunterscheidung | 1 |

Tabelle 9: Anzahl der Teildienstaufrufe der einzelnen Kontrollaktivitäten

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

Die Gesamtanzahl mit der jeder Teildienst im Ausführungsplan aufrufen wird, erhält man durch Addition der durch die Kontrollaktivitäten kodierten Anzahl von Dienstaufrufen aus Tabelle 9. Hierbei sind nur jene Kontrollaktivitäten zu berücksichtigen, die den Teildienst enthalten.

2. Ermittlung der Verletzungsmatrix für jede Dienstgütegarantie

Der zweite Schritt besteht darin, für jede Dienstgütegarantie der zusammengesetzten Dienstleistung die Verletzungsmatrix aufzustellen, um dem Betreiber alle Informationen für eine detaillierte Bewertung der Dienstgütezverlässigkeit der zusammengesetzten Dienstleistung zur Verfügung zu stellen. Die Verletzungsmatrix einer Dienstgütegarantie besteht aus der Menge aller Zweitupel $eVE_{A,e} = (k, p_{A,e}^k)$. Dabei bestimmt k die Anzahl von Dienstgüteverletzungen und $p_{A,e}^k$ deren Eintrittswahrscheinlichkeit.

Eine Dienstgüteverletzung der Garantie e entsteht immer dann, wenn ein Teildienst seine Qualitätsversprechen nicht einhalten kann. Dies bedeutet die Anzahl von Dienstgüteverletzungen für e entspricht der Anzahl von fehlerhaften Teildienstaufrufen. Bei z Teildienstauffrufen sind 0 bis z Verletzungen möglich. 0 Verletzungen findet man immer dann vor, wenn jeder Teildienst die Dienstgütegarantie bei jedem Aufruf einhält. Mit z Verletzungen sind zu rechnen, wenn jeder Teildienst die Dienstgütegarantie bei jedem Aufruf verletzt.

Eine bestimmte Anzahl von Dienstgüteverletzungen kann durch mehrere Fehlerszenarien verursacht werden. Im Öko-Rechner beispielsweise ist eine Dienstgüteverletzung für die Antwortzeit durch drei¹ verschiedene Fehlerszenarien möglich: (1) nur der IMDS Teildienst kann seine Dienstgütegarantie für die Antwortzeit nicht einhalten, (2) nur der Eco-Value Teildienst kann seine Dienstgütegarantie für die Antwortzeit nicht einhalten oder (3) nur der Certify Teildienst kann seine Dienstgütegarantie für die Antwortzeit nicht einhalten. Insgesamt existieren bei z Teildienstauffrufen 2^z mögliche Fehlerszenarien.

Definition 12 Fehlerszenario: Ein *Fehlerszenario* $FS_{A,e} = (f_1, f_2, \dots, f_z)$ mit $f_i \in \{0, 1\}$ für den Ausführungsplan A und die Dienstgütegarantie e ist eine mögliche Kombination, bei der m der insgesamt z Teildienstauffrufe eine Dienstgüteverletzung verursachen. Hierbei kodiert $f_i = 0$ die Einhaltung und $f_i = 1$ die Nichteinhaltung der Dienstgütegarantie durch den i -ten Teildienstauffruf.

Die Wahrscheinlichkeit mit der ein Teildienst s die Dienstgütegarantie e verletzt, ist durch die Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e}$ definiert. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teildienst die Dienstgütegarantie einhält, bildet das Inverse der Verletzungswahrscheinlichkeit $(1 - p_{s,e})$. Hieraus lässt sich nach Gleichung (5.16) die Wahrscheinlichkeit $p_{FS_{A,e}}$ für das Auftreten eines bestimmten Fehlerszenarios $FS_{A,e}$ für die Dienstgütegarantie e im Ausführungsplan A berechnen. Die Wahrscheinlichkeit ist das Produkt der Wahrscheinlichkeiten mit denen die Teildienste ihre Dienstgütegarantien verletzen bzw. einhalten werden.

$$p_{FS_{A,e}} = \prod_{i=1}^z q_{i,e} \quad (5.16)$$

Mit

$$q_{i,e} = \begin{cases} 1 - p_{s,e} & \text{wenn } f_i \in FS_{A,e} = 0 \\ p_{s,e} & \text{wenn } f_i \in FS_{A,e} = 1 \end{cases} \quad (5.17)$$

Die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Fehlerszenarien können nach der Anzahl ihrer kodierten Dienstgüteverletzungen gruppiert werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{A,e}^k$ für das Auftre-

¹ Unter der Annahme, dass jeder der drei Teildienste des Öko-Rechners nur einmal ausgeführt wird.

5.2. Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans

ten von k Verletzungen der Dienstgütegarantie e im Ausführungsplan A ergibt sich aus der Addition der Wahrscheinlichkeit aller Fehlerszenarien aus der Gruppe mit k Verletzungen. Der Sachverhalt wird in Gleichung (5.18) formal definiert. Hierbei bezeichnet $p_{FS_{A,e}^i}$ die Eintrittswahrscheinlichkeit für das i -te Fehlerszenarios $FS_{A,e}^i$ $i \in \{1, 2, \dots, 2^z\}$ für die Dienstgütegarantie e im Ausführungsplan A . Der Faktor $b_{k,i} \in \{0, 1\}$ in Gleichung (5.19) entscheidet, welche Fehlerszenarien zusammengefasst werden.

$$p_{A,e}^k = \sum_{i=1}^{2^z} b_{k,i} * p_{FS_{A,e}^i} \quad (5.18)$$

Mit

$$b_{k,i} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } k \neq \sum_{f_i \in FS_{A,e}^i} f_i \\ 1 & \text{wenn } k = \sum_{f_i \in FS_{A,e}^i} f_i \end{cases} \quad (5.19)$$

Setzt man Gleichung (5.16) zur Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Fehlerszenarios in Gleichung (5.18) und (5.19) ein, so erhält man Gleichung (5.20) bis (5.23)¹. Beispiele hierzu sind in Anhang A zu finden.

$$p_{A,e}^k = \begin{cases} 1 + g_{A,e}^k & \text{wenn } k = 0 \\ g_{A,e}^k & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.20)$$

Mit

$$g_{A,e}^k = \begin{aligned} & x_{k,1}(p_{1,e} + p_{2,e} + \dots + p_{z,e}) \\ & + x_{k,2}(p_{1,e}p_{2,e} + p_{2,e}p_{3,e} + \dots + p_{z-1,e}p_{z,e}) \\ & + x_{k,3}(p_{1,e}p_{2,e}p_{3,e} + p_{1,e}p_{2,e}p_{4,e} + \dots + p_{z-2,e}p_{z-1,e}p_{z,e}) \\ & \quad \vdots \\ & + x_{k,z}(p_{1,e}p_{2,e} \dots p_{z,e}) \end{aligned} \quad (5.21)$$

$$x_{k,i} = a_{k,i} \binom{i}{k} \text{ und } \binom{i}{k} = 0 \text{ wenn } k > i \quad (5.22)$$

$$a_{k,i} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } |k - i| \bmod 2 = 0 \\ -1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.23)$$

Die Nutzung von Gleichung (5.20) bis Gleichung (5.23) erspart einen Großteil der Multiplikations- und Additionsoperationen, die für die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Fehlerszenarien mit Gleichung (5.16) und Gleichung (5.17) erforderlich wären. Dieses Vorgehen bringt einen Performanz-Gewinn von ca. 70 Prozent, wie Kapitel 8.2 zeigen wird.

¹ Die Gültigkeit von Gleichung (5.20) bis (5.23) lässt sich mit dem binomischen Lehrsatz begründen. Auf eine formale Herleitung wurde jedoch verzichtet, weil dies weit über den Fokus der Arbeit hinausgehen würde.

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

Die beschriebene Vorgehensweise zur Aufstellung der Verletzungsmatrix, speziell der Zweitupel $eVE_{A,e}$, funktioniert nur dann, wenn jeder Teildienst für jede von der zusammengesetzten Dienstleistung garantierte Dienstgüteeigenschaft ebenfalls eine Dienstgütegarantie bereitstellt. Obwohl dies bei den klassischen Eigenschaften, wie Antwortzeit oder Verfügbarkeit in der Regel der Fall ist, kann hiervon nicht ausgegangen werden. Aus diesem Grund ist ein geeignetes Konzept notwendig, um fehlende Eigenschaften zu verarbeiten. Grundsätzlich existieren hierfür zwei Lösungsmöglichkeiten.

Lösungsmöglichkeit eins besteht darin, dass die Formel zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit (siehe Gleichung (5.20)) als unlösbar gibt, sobald ein Teildienst s existiert, der keine Garantie für e anbietet. In diesem Fall kann die Verletzungsmatrix nicht ermittelt werden. Dieser pessimistische Ansatz ist insofern problematisch, als dass es Eigenschaften gibt, die nur für Teildienste einer bestimmten Domäne sinnvoll sind. Hierzu zählt z.B. die Farbtiefe von Druckerdiensten. Übertragen auf zusammengesetzte Dienstleistungen bedeutet dies, dass im Nutzungsvertrag Dienstgütegarantien definiert sein können, die nur für eine Teilmenge der Teildienste gelten. Diese Art von Dienstleistungen können unter Wahl eines pessimistischen Ansatzes bei der Bestimmung der Verletzungsmatrix nicht unterstützt werden. Aus diesem Grund soll ein optimistischer Ansatz gewählt werden.

Der optimistische Ansatz besteht darin, dass jene Teildienste, die die entsprechende Eigenschaft nicht unterstützen, bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Fehlerszenarien ignoriert werden. Konkret heißt dies, dass das Fehlerszenario $FS_{A,e} = (f_1, f_2, \dots, f_2)$ um jene m Teildienste zu kürzen ist, die für die zu betrachtende Eigenschaft keine Dienstgütegarantie anbieten. Besteht z.B. für die Teildienste s_2, s_5 und s_6 keine Dienstgütegarantie für die Eigenschaft e , so wird das Fehlerszenario $FS_{A,e} = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6)$ ¹ auf das Szenario $FS_{A,e} = (f_1, f_3, f_4)$ reduziert sowie die Formeln (5.16) – (5.23) entsprechend angepasst. Der optimistische Ansatz hat zudem den Vorteil die Länge eines Fehlerszenarios und damit die Anzahl der Rechnungen zu reduzieren.

Mit Abschluss von Schritt zwei ist es möglich die Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans detailliert zu bewerten. Für einen einfachen und effizienten Vergleich verschiedener Ausführungspläne ist in zwei weiteren Schritten die allgemeine Verletzungszahl zu bestimmen als numerisches Maß für die Dienstgütezuverlässigkeit. Das Vorgehen wird im nächsten Kapitel (5.2.2) vorgestellt.

5.2.1.2 Beispiel

Die Bestimmung der Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans in Form der Verletzungsmatrizen soll nachfolgend anhand des Öko-Rechners verdeutlicht werden.

In Abbildung 11 ist ein Ausführungsplan des Öko-Rechners dargestellt. Der Öko-Rechner besitzt zwei Dienstgütegarantien: (1) eine Garantie für die Antwortzeit sowie (2) eine Garantie für die Fehlerhäufigkeit. Es sind daher zwei Eigenschaften zu berücksichtigen, die im Beispiel von allen drei Teildiensten des Ausführungsplans unterstützt werden. Die Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienste für die Dienstgütegarantie der Fehlerhäufigkeit (v) und die Garantie der Antwortzeit (rt) sind Tabelle 10 zu entnehmen.

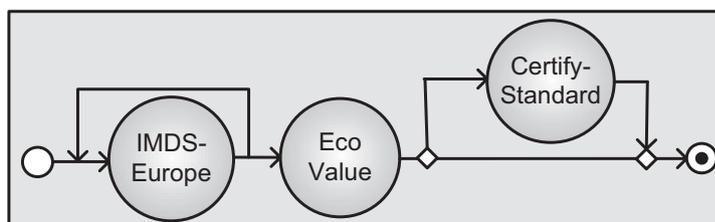


Abbildung 11: Ausführungsplan A des Öko-Rechners

¹ Unter der Annahme, dass jeder der sechs Dienste nur einmal ausgeführt wird.

| Teildienst s | $P_{s,v}$ | $P_{s,rt}$ |
|------------------|-----------|------------|
| IMDS-Europe | 0,25 | 0,1 |
| Eco-Value | 0,3 | 0,1 |
| Certify-Standard | 0,8 | 0,4 |

Tabelle 10: Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienste des Öko-Rechners

1. Ermittlung der Gesamtzahl von Teildienstaufrufen im Ausführungsplan A

Schritt eins auf dem Weg zur Bestimmung der Verletzungsmatrizen bildet die Ermittlung der Gesamtanzahl von Teildienstaufrufen. Wendet man Tabelle 9 auf den Kontrollfluss des Öko-Rechners an, so erhält man k Aufrufe des Teildienstes „IMDS-Europe“, einen Aufruf des Teildienstes „Eco-Value“ und einen Aufruf des Teildienstes „Certify-Standard“. Für die weitere Berechnung ist die genaue Anzahl der Schleifendurchläufe erforderlich. Diese ist in der Regel abhängig von der Eingabe und muss vom Dienstentwickler abgeschätzt oder durch Messungen ermittelt werden. Ist dies nicht möglich, so kann auch eine feste Anzahl $k > 1$ gewählt werden, um die Teildienste innerhalb eines Schleifendurchlaufes stärker zu gewichten. In diesem Fall muss k allerdings für jeden Ausführungsplan gleich gewählt werden, um nachfolgende Vergleiche nicht zu verzerren. Für das Beispiel des Öko-Rechners soll $k = 2$ gewählt werden, was zu der in Tabelle 11 enthaltenen Anzahl von Teildienstaufrufen führt.

| Teildienst | Anzahl Teildienstaufrufe |
|------------------|--------------------------|
| IMDS-Europe | 2 |
| EcoValue | 1 |
| Certify-Standard | 1 |
| Gesamt | 4 |

Tabelle 11: Anzahl der Teildienstaufrufe im Ausführungsplan A des Öko-Rechners

2. Ermittlung der Verletzungsmatrix für jede Dienstgütegarantie

Im zweiten Schritt ist die Verletzungsmatrix für jede Dienstgütegarantie der zusammengesetzten Dienstleistung zu bestimmen. Die Verletzungsmatrix einer Dienstgütegarantie e im Ausführungsplan A besteht aus den Zweitupeln $eVE_{A,e}$, die jeder Anzahl von Dienstgüteverletzungen ihre Eintrittswahrscheinlichkeit zuordnet. Hierfür ist eine vollständige Liste aller Fehlerszenarien und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten aufzustellen. Der Öko-Rechner besitzt insgesamt vier Teildienstaufrufe, so dass $2^4 = 16$ Fehlerszenarien vorliegen. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Fehlerszenarien werden nach Formel (5.16) ermittelt. Sie definiert, in Abhängigkeit der Werte $f_i \in FS_{A,e}$ des Fehlerszenarios, die Verletzungswahrscheinlichkeiten $p_{s,e}$ der aufgerufenen Teildienste ($f_i = 1$) bzw. den invertierten Wert ($f_i = 0$) zu multiplizieren. Hierbei kodiert $f_i = 0$ eine Dienstgüteeinhaltung und $f_i = 1$ eine Dienstgüteverletzung während des i -ten Teildienstaufrufes. Gleichung (5.24) zeigt dies exemplarisch für das sechste Fehlerszenario $FS_{A,v}^6 = (0,1,1,0)$ für die Fehlerhäufigkeit. Das Szenario definiert einen fehlerfreien ersten Aufruf des Teildienstes „IMDS-Europe“ sowie des Teildienstes „Certify-Standard“. Dagegen ist der Teildienst „IMDS-Europe“ beim zweiten Aufruf sowie der Aufruf des Teildienstes „Eco-Value“ fehlerhaft, d.h. die Dienste liefern statt einer korrekten Antwort eine SOAP Fehlermeldung zurück.

$$\begin{aligned}
 FS_{A,v}^6 &= (0, 1, 1, 0) \\
 p_{FS_{A,v}^6} &= (1 - p_{imds-europe,v}) * (p_{imds-europe,v}) * (p_{ecovalue,v}) * (1 - p_{certify-standard,v}) \\
 &= 0,75 * 0,25 * 0,3 * 0,2 \\
 &= \underline{\underline{0,01125}}
 \end{aligned}
 \tag{5.24}$$

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

Die vollständige Auflistung der Eintrittswahrscheinlichkeiten aller 16 Fehlerszenarien für die Fehlerhäufigkeit finden sich in Tabelle 12.

| Fehlerszenario i | Fehlerszenario $FS_{A,v}^i = (f_1, f_2, f_3, f_4)$ | Wahrscheinlichkeit $P_{FS_{A,v}^i}$ |
|-----------------------|---|--|
| 0 | (0, 0, 0, 0) | $0,75*0,75*0,7*0,2=0,07875$ |
| 1 | (0, 0, 0, 1) | $0,75*0,75*0,7*0,8=0,315$ |
| 2 | (0, 0, 1, 0) | $0,75*0,75*0,3*0,2=0,03375$ |
| 3 | (0, 0, 1, 1) | $0,75*0,75*0,3*0,8=0,135$ |
| 4 | (0, 1, 0, 0) | $0,75*0,25*0,7*0,2=0,02625$ |
| 5 | (0, 1, 0, 1) | $0,75*0,25*0,7*0,8=0,105$ |
| 6 | (0, 1, 1, 0) | $0,75*0,25*0,3*0,2=0,01125$ |
| 7 | (0, 1, 1, 1) | $0,75*0,25*0,3*0,8=0,045$ |
| 8 | (1, 0, 0, 0) | $0,25*0,75*0,7*0,2=0,02625$ |
| 9 | (1, 0, 0, 1) | $0,25*0,75*0,7*0,8=0,105$ |
| 10 | (1, 0, 1, 0) | $0,25*0,75*0,3*0,2=0,01125$ |
| 11 | (1, 0, 1, 1) | $0,25*0,75*0,3*0,8=0,045$ |
| 12 | (1, 1, 0, 0) | $0,25*0,25*0,7*0,2=0,00875$ |
| 13 | (1, 1, 0, 1) | $0,25*0,25*0,7*0,8=0,035$ |
| 14 | (1, 1, 1, 0) | $0,25*0,25*0,3*0,2=0,00375$ |
| 15 | (1, 1, 1, 1) | $0,25*0,25*0,3*0,8=0,015$ |

Tabelle 12: Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Fehlerszenarien für die Fehlerhäufigkeit

Für die Aufstellung der Verletzungsmatrix sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Fehlerszenarien aus Tabelle 12 in einem anschließenden Schritt entsprechend ihrer Fehleranzahl zusammenzufassen. Hierbei findet Gleichung (5.18) und (5.19) Anwendung. Die Gleichung definiert, dass zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgüeverletzungen die Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Fehlerszenarien, die k Verletzungen enthalten, zu addieren sind. Gleichung (5.25) zeigt dies beispielhaft für die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit für zwei Dienstgüeverletzungen für die Fehlerhäufigkeit. Die Verletzungsmatrix für die Fehlerhäufigkeit des Ausführungsplans A des Öko-Rechners aus Abbildung 11 findet sich in Tabelle 13.

$$\begin{aligned}
 P_{A,v}^6 &= P_{FS_{A,v}^3} + P_{FS_{A,v}^4} + P_{FS_{A,v}^6} + P_{FS_{A,v}^9} + P_{FS_{A,v}^{10}} + P_{FS_{A,v}^{12}} \\
 &= 0,03375 + 0,105 + 0,01125 + 0,105 + 0,01125 + 0,00875 \\
 &= \underline{\underline{0,1805}}
 \end{aligned}
 \tag{5.25}$$

5.2. Dienstgütezuvverlässigkeit eines Ausführungsplans

| Anzahl von Dienstgüteverletzungen K | Wahrscheinlichkeit $P_{A,v}^k$ |
|--|--|
| 0 | $= p_{FS_{A,v}^0}$ $= \underline{\underline{0,07875}}$ |
| 1 | $= p_{FS_{A,v}^1} + p_{FS_{A,v}^2} + p_{FS_{A,v}^4} + p_{FS_{A,v}^8}$ $= \underline{\underline{0,40125}}$ |
| 2 | $= p_{FS_{A,v}^3} + p_{FS_{A,v}^5} + p_{FS_{A,v}^6} + p_{FS_{A,v}^9} + p_{FS_{A,v}^{10}} + p_{FS_{A,v}^{12}}$ $= \underline{\underline{0,37625}}$ |
| 3 | $= p_{FS_{A,v}^7} + p_{FS_{A,v}^{11}} + p_{FS_{A,v}^{13}} + p_{FS_{A,v}^{14}}$ $= \underline{\underline{0,12875}}$ |
| 4 | $= p_{FS_{A,v}^{15}}$ $= \underline{\underline{0,015}}$ |

Tabelle 13: Verletzungsmatrix für die Fehlerhäufigkeit im Ausführungsplan A des Öko-Rechners

Zur Reduktion der Berechnungszeit sollte die Berechnung Eintrittswahrscheinlichkeit für eine bestimmte Anzahl von Dienstgüteverletzungen nach der reduzierten Formel in Gleichung (5.20) bis (5.23) erfolgen. Die Ergebnisse bei Anwendung der reduzierten Formel für die Fehlerhäufigkeit finden sich in Tabelle 14 und Tabelle 15. Aus Platzgründen wurden die Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienste abgekürzt. Hierbei entspricht p_1 und p_2 der Verletzungswahrscheinlichkeit des Teildienstes „IMDS-Europe“, p_3 der Verletzungswahrscheinlichkeit des Teildienstes „Eco-Value“ und p_4 der Verletzungswahrscheinlichkeit des Teildienstes „Certify-Standard“.

| Fehleranzahl K | Wahrscheinlichkeit $P_{A,v}^k$ |
|---------------------|---|
| 0 | $= 1 - \binom{1}{0} (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)$ $+ \binom{2}{0} (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 + p_2 p_3 + p_2 p_4 + p_3 p_4)$ $- \binom{3}{0} (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 + p_1 p_3 p_4 + p_2 p_3 p_4)$ $+ \binom{4}{0} (p_1 p_2 p_3 p_4)$ $= \underline{\underline{0,07875}}$ |

Tabelle 14: Verletzungsmatrix für die Fehlerhäufigkeit in Ausführungsplan des Öko-Rechners –1

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

| Fehleranzahl i | Wahrscheinlichkeit $P_{A,v}^k$ |
|---------------------|---|
| 1 | $= + \binom{1}{1} (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)$ $- \binom{2}{1} (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 + p_2 p_3 + p_2 p_4 + p_3 p_4)$ $+ \binom{3}{1} (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 + p_1 p_3 p_4 + p_2 p_3 p_4)$ $- \binom{4}{1} (p_1 p_2 p_3 p_4)$ $= \underline{\underline{0,40125}}$ |
| 2 | $= - \binom{1}{2} (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)$ $+ \binom{2}{2} (p_1 p_2 + p_2 p_3 + p_1 p_4 + p_2 p_4 + p_3 p_4)$ $- \binom{3}{2} (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 + p_1 p_3 p_4 + p_2 p_3 p_4)$ $+ \binom{4}{2} (p_1 p_2 p_3 p_4)$ $= \underline{\underline{0,37625}}$ |
| 3 | $= + \binom{1}{3} (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)$ $- \binom{2}{3} (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 + p_2 p_3 + p_2 p_4 + p_3 p_4)$ $+ \binom{3}{3} (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 + p_1 p_3 p_4 + p_2 p_3 p_4)$ $- \binom{4}{3} (p_1 p_2 p_3 p_4)$ $= \underline{\underline{0,12875}}$ |
| 4 | $= - \binom{1}{4} (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)$ $+ \binom{2}{4} (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 + p_2 p_3 + p_2 p_4 + p_3 p_4)$ $- \binom{3}{4} (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 + p_1 p_3 p_4 + p_2 p_3 p_4)$ $+ \binom{4}{4} (p_1 p_2 p_3 p_4)$ $= \underline{\underline{0,015}}$ |

Tabelle 15: Verletzungsmatrix für die Fehlerhäufigkeit in Ausführungsplan des Öko-Rechners –2

Für eine vollständige Bewertung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans sind die Verletzungsmatrizen aller Dienstgütegarantien der zusammengesetzten Dienstleistung aufzustellen. Der Öko-Rechner besitzt zwei Dienstgütegarantien: (1) eine Garantie für die Fehlerhäufigkeit sowie (2) eine Garantie für die Antwortzeit. Die Schritte zum Aufstellen der Verletzungsmatrix sind daher für die Garantie der Antwortzeit zu wiederholen. Dies führt zu der in Tabelle 16 dargestellten Verletzungsmatrix.

| Fehleranzahl k | Eintrittswahrscheinlichkeit $P_{A,rt}^k$ |
|---------------------|---|
| 0 | 0,4374 |
| 1 | 0,4374 |
| 2 | 0,1134 |
| 3 | 0,0114 |
| 4 | 0,0004 |

Tabelle 16: Verletzungsmatrix für die Antwortzeit im Ausführungsplan A des Öko-Rechners

5.2.2 Verletzungszahl

5.2.2.1 Methodik

Die Verletzungsmatrizen sind für einen leichten und effizienten Vergleich verschiedener Ausführungspläne, z.B. im Rahmen des Teildienstselektionsproblems, zu komplex. Stattdessen sollten diese zu einem numerischen Wert zusammengefasst werden. In Kapitel 4.3 wurde hierfür die Verletzungszahl $a_{A,e}$ bzw. die allgemeine Verletzungszahl a_A definiert. Die Verletzungszahl $a_{A,e}$ für die Dienstgütegarantie e im Ausführungsplan A ergibt sich durch Aggregation aller Zweitupel der Verletzungsmatrix für e und A . Die Verletzungszahlen aller Dienstgütegarantien bilden zusammen die allgemeine Verletzungszahl a_A als Maß für die allgemeine Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans.

Die obigen Überlegungen führen zu den folgenden zwei Schritten für die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans in Form der allgemeinen Verletzungszahl:

1. Ermittlung der garantiespezifischen Verletzungszahl für jede Dienstgütegarantie durch Aggregation der Zweitupel der Verletzungsmatrix.
2. Ermittlung der allgemeinen Verletzungszahl durch Aggregation aller garantiespezifischen Verletzungszahlen.

1. Ermittlung der garantiespezifischen Verletzungszahl für jede Dienstgütegarantie

Auf Basis der Verletzungsmatrix einer Dienstgütegarantie ist es dem Betreiber einer zusammengesetzten Dienstleistung möglich die Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans bezüglich einer Dienstgütegarantie genau zu beurteilen. Stehen mehrere Ausführungspläne zur Verfügung, so wird der Dienstbetreiber in der Regel denjenigen Ausführungsplan wählen, der die wenigsten Belastungen durch Dienstgüteverletzungen aufweist. Die Belastung eines Ausführungsplans mit Dienstgüteverletzungen wird durch die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Verletzungsmatrix bestimmt. Es liegt daher nahe jede Anzahl von Dienstgüteverletzungen mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit zu gewichten und die Produkte anschließend zu addieren. Der so ermittelte numerische Wert entspricht der dienstgütespezifischen Verletzungszahl $a_{A,e}$ für die Garantie e im Ausführungsplan A und ist in Gleichung (5.26) für eine zusammengesetzte Dienstleistung mit z Teildienstaufrufen formal dargestellt.

$$a_{A,e} = \sum_{i=0}^z i * p_{A,e}^i \tag{5.26}$$

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

Setzt man Gleichung (5.20) bis Gleichung (5.23) zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgüteverletzungen in Gleichung (5.26) ein, so ergibt sich Gleichung (5.27).

$$\begin{aligned}
 a_{A,e} = & \quad + \left[+1 \binom{1}{1} - 2 \binom{1}{2} + \dots (-1)^{(z-1)} z \binom{1}{z} \right] (p_{1,e} + p_{2,e} + \dots + p_{z,e}) \\
 & + \left[-1 \binom{2}{1} + 2 \binom{2}{2} - \dots (-1)^{(z-2)} z \binom{2}{z} \right] (p_{1,e} p_{2,e} + p_{1,e} p_{3,e} \dots + p_{z-1,e} p_{z,e}) \\
 & + \left[+1 \binom{3}{1} - 2 \binom{3}{2} + \dots (-1)^{(z-1)} z \binom{3}{z} \right] (p_{1,e} p_{2,e} p_{3,e} + p_{1,e} p_{2,e} p_{4,e} + \dots + p_{z-2,e} p_{z-1,e} p_{z,e}) \\
 & \quad \vdots \\
 & + \left[(-1)^{(z-1)} 1 \binom{z}{1} + (-1)^{(z-2)} 2 \binom{z}{2} + \dots + (-1)^{(z-z)} z \binom{z}{z} \right] (p_{1,e} p_{2,e} \dots p_{z,e})
 \end{aligned} \tag{5.27}$$

Die alternierende Summe der Binomialkoeffizienten $(\sum_{j=1}^i (-1)^{(i-j)} j \binom{i}{j})$ mit $j < i$ beträgt Eins für $i = 1$ und Null für alle $i < 1$ ($i, j \in \mathbb{N}$).

Beweis:

1) Die Anwendung der Rechenregel $j \binom{i}{j} = i \binom{i-1}{j-1}$ ergibt Gleichung (5.28):

$$\sum_{j=1}^i (-1)^{(i-j)} j \binom{i}{j} = \sum_{j=1}^i (-1)^{(i-j)} i \binom{i-1}{j-1} \tag{5.28}$$

2) Die Anwendung einer Indexverschiebung auf Gleichung (5.28) ergibt Gleichung (5.29):

$$\sum_{j=1}^i (-1)^{(i-j)} i \binom{i-1}{j-1} = \sum_{j=0}^{i-1} (-1)^{(i-(j+1))} i \binom{i-1}{j-1+1} = i \sum_{j=0}^{i-1} (-1)^{(i-(j+1))} \binom{i-1}{j} \tag{5.29}$$

3) Die Anwendung des binomischen Lehrsatzes $((a+b)^i = \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} a^{i-j} * b^j)$ ergibt Gleichung (5.30):

$$i \sum_{j=0}^{i-1} (-1)^{(i-(j+1))} \binom{i-1}{j} = i \sum_{j=0}^{i-1} (-1)^{(i-(j+1))} * 1^j \binom{i-1}{j} = i * (-1+1)^{i-1} \tag{5.30}$$

Die Gleichung (5.30) beträgt Eins für $i = 1$ ($(1 * (-1+1)^{1-1}) = 1$) sowie Null für alle $i > 1$ ($(i * (-1+1)^{i-1}) = 0$), so dass sich die Bestimmung der garantiespezifischen Verletzungszahl nach Gleichung (5.27) auf die Summe der Verletzungswahrscheinlichkeiten aller z Teildienstaufrufe der zusammengesetzten Dienstleistung reduziert. Dieser Sachverhalt ist in Gleichung (5.31) formal definiert. Man sieht leicht, dass die Belastung eines Ausführungsplans mit Dienstgüteverletzungen umso geringer ist, je kleiner die Verletzungswahrscheinlichkeiten der genutzten Teildienste sind.

$$a_{A,e} = \sum_{i=0}^z p_{z,e} \quad (5.31)$$

Gleichung (5.31) zur Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl eines Ausführungsplans verzichtet auf die Aufstellung der Verletzungsmatrix. Das exponentielle Laufzeitverhalten reduziert sich somit zu einem linearen Laufzeitverhalten und gestattet den effizienten Vergleich einer Vielzahl von Ausführungsplänen bezüglich ihrer Dienstgütezulverlässigkeit. Dieser Vorteil wird jedoch mit einem Informationsverlust bei der Bewertung der Dienstgütezulverlässigkeit erkauft. Für kritische Entscheidungen z.B. darüber welche Kompensierungsstrategien für Dienstgüteverletzungen eingesetzt werden sollen, muss daher immer die Verletzungsmatrix Anwendung finden.

Für die Anwendung von Gleichung (5.31) ist in einem vorbereitenden Schritt die Gesamtanzahl z von Teildienstaufrufen zu bestimmen, wie dies in Kapitel 5.2.1.1 im Rahmen der Methodik zur Verletzungsmatrix beschrieben wurde. Für die Behandlung von Teildiensten, welche die Garantie e nicht unterstützen, gilt die gleiche Vorgehensweise bei der Aufstellung der Verletzungsmatrix: Die Teildienste werden bei der Berechnung der Verletzungszahl ignoriert und Gleichung (5.31) entsprechend angepasst.

2. Ermittlung der allgemeinen Verletzungszahl

Als letzten Schritt gilt es die allgemeine Verletzungszahl des Ausführungsplans zu berechnen. Sie ergibt sich aus der gewichteten Summe aller dienstgütespezifischen Verletzungszahlen, wie dies Gleichung (5.32) formal definiert. Dabei bezeichnet E die Menge aller Dienstgütegarantien der zusammengesetzten Dienstleistung. Die Berechnung der allgemeinen Verletzungszahl lehnt sich damit an die Bestimmung der allgemeinen Dienstgüte eines Ausführungsplans an, wie dies im Rahmen der Mehrzieloptimierung in Kapitel 3.1.1.5 beschrieben wurde.

$$a_A = \sum_{e \in E} w_e * a_{A,e} \quad (5.32)$$

Mit

$$\sum_{e \in E} w_e = 1 \quad (5.33)$$

5.2.2.2 Beispiel

Die Bestimmung der Dienstgütezulverlässigkeit eines Ausführungsplans in Form der Verletzungszahl soll nachfolgend anhand des Öko-Rechners verdeutlicht werden. Der zu untersuchende Ausführungsplan ist in Abbildung 11 dargestellt. Nachfolgend wird gezeigt, wie die allgemeine Verletzungszahl des Ausführungsplans für den Öko-Rechner ermittelt wird.

1. Ermittlung der garantiespezifischen Verletzungszahl für jede Dienstgütegarantie

Die Berechnung der allgemeinen Verletzungszahl sieht im ersten Schritt die Bestimmung aller dienstgütespezifischen Verletzungszahlen vor. Der Öko-Rechner besitzt zwei Dienstgütegarantien: (1) eine Garantie für die Antwortzeit sowie (2) eine Garantie für die Fehlerhäufigkeit. Folglich gilt es zwei Verletzungszahlen zu berechnen. Hierfür findet Gleichung (5.31) Anwendung. Sie definiert die dienstgütespezifische Verletzungszahl eines Ausführungsplans als Summe der Verletzungswahrscheinlichkeiten aller Teildienstaufrufe. Wendet man die Vorschrift zur Berechnung der Verletzungszahl für die Fehlerhäufigkeit an, so erhält man den Wert 1,6, wie Gleichung (5.34) zeigt. Hierbei ist zu beachten, dass die Verletzungswahrscheinlichkeit des Teildienst „IMDS-Europe“ zweimal in die Berechnung aufgenommen wird, da der Dienst aufgrund eines Schleifendurchlaufes zweimal aufgerufen wird (vergleiche hierzu Kapitel 5.2.1.2).

5. Entwurf der Bestimmungsvorschriften

$$\begin{aligned} a_{A,v} &= p_{imds-europe,v} + p_{imds-europe,v} + p_{eco-value,v} + p_{certify-standard,v} \\ &= 0,25 + 0,25 + 0,3 + 0,8 \\ &= \underline{\underline{1,6}} \end{aligned} \quad (5.34)$$

Als Voraussetzung zur Berechnung der allgemeinen Verletzungszahl eines Ausführungsplans ist für jede Dienstgütegarantie der zusammengesetzten Dienstleistung die dienstgütespezifische Verletzungszahl zu bestimmen. Für Ausführungspläne des Öko-Rechners bedeutet dies, dass die oben genannten Schritte zur Bestimmung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl für die Antwortzeit zu wiederholen sind. Unter Verwendung von Gleichung (5.31) erhält man den Wert 0,7.

2. Ermittlung der allgemeinen Verletzungszahl

Die Ermittlung der allgemeinen Verletzungszahl als numerisches Maß für die Dienstgütezverlässigkeit eines Ausführungsplans erfolgt mit Hilfe von Gleichung (5.32) und Gleichung (5.33). Die Gleichung definiert die allgemeine Verletzungszahl als gewichtete Summe aus den Verletzungszahlen aller ihrer Dienstgütegarantien. Der Öko-Rechner besitzt zwei Dienstgütegarantien: (1) eine für die Fehlerhäufigkeit und (2) eine Garantie für die Antwortzeit. Die Verletzungszahlen für diese beiden Eigenschaften sind demnach zu summieren. Als Wichtung soll sowohl für die Fehlerhäufigkeit als auch für die Antwortzeit der Faktor 0,5 verwendet werden. Dies ergibt eine allgemeine Verletzungszahl für den Ausführungsplan des Öko-Rechners von 1,15. Gleichung (5.35) zeigt die Berechnung.

$$\begin{aligned} a_A &= \sum_{e \in E} w_e * a_{A,e} \\ &= 0,5 * 1,6 + 0,5 * 0,7 \\ &= \underline{\underline{1,15}} \end{aligned} \quad (5.35)$$

5.3 Zusammenfassung

Kapitel 5 widmete sich dem Entwurf der Bestimmungsvorschriften zur Vorhersage der relativen und absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes sowie zu Bestimmung der Verletzungsmatrix und der dienstgütespezifischen als auch der allgemeinen Verletzungszahl eines Ausführungsplans.

Die Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes basiert auf einer Markov-Kette, welche die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine zukünftige Dienstgüteverletzung auf Basis des bisherigen Verhaltens des Teildienstes berechnet. Die Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit orientiert sich an der allgemeinen Stochastik. Sie berechnet sich aus der Division der Anzahl aller Dienstgüteverletzungen in vergangenen Interaktionen des Teildienstes und der Gesamtanzahl von Interaktionen.

Der zweite Abschnitt von Kapitel 5 beschäftigte sich mit der Dienstgütezverlässigkeit eines Ausführungsplans. Es wurde gezeigt, wie die Verletzungsmatrix durch Aufstellen aller Fehlerszenarien bestimmt wird. Für die Ermittlung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl sind die Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienstaufrufe zu addieren. Die allgemeine Verletzungszahl berechnet sich aus der gewichteten Summe aller dienstgütespezifischen Verletzungszahlen. Als Vorbereitung für alle Berechnungen (Verletzungsmatrix, Verletzungszahl) ist die Gesamtanzahl von Teildienstaufrufen zu ermitteln.

6. Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans, um im Rahmen von qualitätssensitiven Bindungsvorgängen hochqualitative als auch hochzuverlässige zusammengesetzte Dienste bereitstellen zu können. Die hierfür nötigen Konzepte wurden im vergangenen Kapitel vorgestellt. In Kapitel 6 sollen die Ergebnisse tiefgreifend diskutiert werden. Der Fokus liegt auf der Umsetzung der Anforderungen und der Zeitkomplexität der Algorithmen. Eine detaillierte Validierung der Ergebnisse bezüglich Korrektheit und Performanz erfolgt in den anschließenden Kapiteln 7 und 8 dieser Arbeit.

6.1 Umsetzung der Anforderungen

Kapitel 4 widmete sich der Analyse der Problemstellung zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans. Basierend auf dem Szenario eines Öko-Rechners wurden die Anforderungen an die Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit von Teildiensten und an die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit von zusammengesetzten Dienstleistungen identifiziert. Die Umsetzung dieser Anforderungen durch die in Kapitel 5 definierten Konzepte soll im Folgenden erörtert werden.

6.1.1 Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes

Die Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes ist durch zwei Anforderungen gestützt: (1) /A1/ Beachtung von Zeitstempeln und (2) /A2/ Verzicht auf Kontextinformationen.

/A1/ Beachtung von Zeitstempeln

Die Berücksichtigung von Zeitstempeln hat zum Ziel den Einträgen der Monitoring-Historie ein Alter zuzuordnen, um so die Veränderlichkeit im Verhalten eines Dienstes widerspiegeln zu können. Somit können jüngere Einträge der Monitoring-Historie stärker bei der Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes berücksichtigt werden als ältere.

Im Rahmen der Bestimmung der relativen Dienstgütezuerlässigkeit in Form der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit wurde der Beachtung von Zeitstempeln durch die Aufstellung einer Markov-Kette Rechnung getragen. Die Kette enthält alle relevanten Monitoring-Historie-Einträge chronologisch nach ihrem Alter, d.h. Zeitstempel, geordnet. Hierbei bildet der Wert des jüngsten Eintrages den aktuellsten Zustand der Markov-Kette. Je nach Ordnung k der Markov-Kette, bestimmten die Werte der k jüngsten Monitoring-Historie-Einträge die relative Verletzungswahrscheinlichkeit.

Wird die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit als Maß für die absolute Dienstgütezuerlässigkeit berechnet, so ist die Anzahl von Dienstgüteverletzungen im berücksichtigten Ausschnitt der Monitoring-Historie durch die Anzahl der Einträge zu dividieren. Um auch hier das Alter eines Eintrages zu berücksichtigen, kann jeder Monitoring-Eintrag gewichtet werden. Die Gewichtung erfolgt hierbei indirekt proportional zum Alter des Eintrages, d.h. je älter der Eintrag desto geringer ist sein Einfluss auf die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit.

/A2/ Verzicht auf Kontextinformationen

Der Verzicht auf Kontextinformationen ermöglicht die einfache und universelle Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit. Dies gestattet einerseits die Verwendung der Berechnungskonzepte in einer Vielzahl von Domänen und Anwendungsfällen und zum anderen eine äußerst effiziente Berechnung.

Sowohl die Berechnung der relativen als auch die der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit verzichtet auf Kontextinformationen. Erstere nutzt die Markov-Kette, deren Stärke in der kontext-

6. Diskussion

freien, effizienten Vorhersage von Prognosen und Folgewerten liegt, letztere Berechnung beruht auf einer einfachen Division.

6.1.2 Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans

Die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans basiert auf zwei Anforderungen: (1) /A3/ Beachtung von Vertragsinhalten und (2) /A4/ Beachtung der Häufigkeit von Teildienstauffufen.

/A3/ Beachtung von Vertragsinhalten

Die Beachtung von Vertragsinhalten fordert, dass sich die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans am Dienstgütevertrag der zusammengesetzten Dienstleistung orientieren muss. D.h. die Dienstgütezuerlässigkeit ist nur für solche Eigenschaften zu ermitteln, für die die zusammengesetzte Dienstleistung eine Garantie zusichert. Die Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans kann mittels der Verletzungsmatrix oder der Verletzungszahl bestimmt werden. Beide Größen sind spezifisch und für jede Dienstgütegarantie zu ermitteln, so dass die Anforderung nach Beachtung von Vertragsinhalten erfüllt wurde.

/A3/ Beachtung der Häufigkeit von Teildienstauffufen

Die Forderung nach Beachtung der Häufigkeit mit der ein Teildienst innerhalb der Komposition aufgerufen wird, ergibt sich aus der Tatsache, dass die Eigenschaften mehrmalig aufgerufener Teildienste stärkeren Einfluss auf Wert und Zuerlässigkeit der Gesamtqualität eines Ausführungsplans besitzen. Bindet man beispielsweise innerhalb einer Schleife einen instabilen Teildienst, so wird sich dessen Ausfall viel dramatischer auf die Gesamtverfügbarkeit der zusammengesetzten Dienstleistung auswirken, als der eines einmalig genutzten Teildienstes. Diese Anforderung wurde mit Schritt eins, dem Vorbereitungsschritt, der Methodik zur Ermittlung der Dienstgütezuerlässigkeit unterstützt. Schritt eins sieht die Bestimmung der Gesamtanzahl von Teildienstauffufen vor. Als Basis dient hierfür die Kontrollstruktur der zusammengesetzten Dienstleistung, bestehend aus den Aktivitäten Sequenz, Schleife, Parallelität und Verzweigung. Jede der vier Grundelemente schreibt eine feste Anzahl von Dienstauffufen vor.

6.2 Zeitkomplexität

In Kapitel 5 wurde die Methodik zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit vorgestellt. Neben der Korrektheit ist die Zeitkomplexität einer solchen Methodik interessant. Sie soll im Folgenden sowohl für die Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes als auch für die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans ermittelt werden. Detaillierte Betrachtungen zur Korrektheit der beiden Verfahren finden sich in Kapitel 7 und 8 dieser Arbeit.

6.2.1 Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes

6.2.1.1 Relative Verletzungswahrscheinlichkeit

Die Vorhersage der relativen Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes resultiert in der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit, d.h. einer Prognose für eine zukünftige Dienstgüteverletzung. Hierfür findet eine Markov-Kette der Länge n und der Ordnung k Anwendung. Die mathematische Berechnungsvorschrift ist in Gleichung (5.6) in Kapitel 5.1.1.1 definiert. Um deren Zeitkomplexität zu bestimmen, wurde die Formel als Java-Programm implementiert. Das dazugehörige Struktogramm ist in Anhang B abgebildet.

Den ersten Schritt zur Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit bildet die Aufstellung des zu suchenden Musters. Das Muster besteht in Abhängigkeit der Ordnung k aus den letzten k Zuständen der Markov-Kette. Hierfür ist eine Schleife mit k Durchläufen auszuführen.

Im zweiten Schritt ist das Muster in der Markov-Kette zu suchen sowie zu ermitteln wie oft dieses von einer Dienstgüeverletzung gefolgt ist. Dieser Abschnitt wird durch zwei ineinander geschachtelte Schleifen implementiert. Die erste Schleife wird $(n - k)$ mal ausgeführt. Sie zählt, wie oft das Muster in der Markov-Kette vorzufinden ist. Hierbei muss für jeden Eintrag geprüft werden, ob er den Anfang des Musters darstellt. Diese Aufgabe übernimmt eine zweite Schleife mit maximal k Durchläufen.

Aus den obigen Überlegungen ergibt sich eine maximale Anzahl von $k + (n - k) * k$ Schleifendurchläufen. Die Ordnung k einer Markov-Kette ist in der Regel wesentlich kleiner als ihre Länge n . Die Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit besitzt somit eine lineare Zeitkomplexität von $O(n * k)$. Folglich weist die Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes ein sehr gutes Laufzeitverhalten auf. Konkrete Werte zu den Ausführungszeiten der Berechnungsvorschrift in Abhängigkeit der Länge n und der Ordnung k der verwendeten Markov-Kette befinden sich im Kapitel 7 dieser Arbeit.

6.2.1.2 Absolute Verletzungswahrscheinlichkeit

Die Vorhersage der absoluten Dienstgütezuverlässigkeit bedingt die Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit. Hierfür ist die Anzahl der Dienstgüeverletzungen im zu betrachtenden Ausschnitt der Monitoring-Historie durch die Länge n des Ausschnittes zu dividieren. Das Vorgehen ist formal in Gleichung (5.12) in Kapitel 5.1.2.1 definiert. Um die Zeitkomplexität zu bestimmen wurde die Gleichung als Java-Programm implementiert. Das dazugehörige Struktogramm ist in Anhang B dargestellt.

Für die Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit ist eine Schleife notwendig. Sie zählt die Dienstgüeverletzungen, die innerhalb des zu betrachtenden Ausschnittes der Monitoring-Historie vorzufinden sind. Die Schleife wird n mal durchlaufen und führt zu einer linearen Zeitkomplexität $O(n)$ für die Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit. Folglich besitzt die Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit ein sehr gutes Laufzeitverhalten.

6.2.2 Bestimmung der Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans

6.2.2.1 Verletzungsmatrix

Die Verletzungsmatrix enthält die Eintrittswahrscheinlichkeit für jede mögliche Anzahl von Dienstgüeverletzungen für eine bestimmte Dienstgütegarantie eines Ausführungsplans. Sie liefert damit detaillierte Informationen über die Dienstgütezuverlässigkeit. Für die Verletzungsmatrix einer Dienstgütegarantie sind, nach Ermittlung der Gesamtzahl z von Teildienstaufrufen als Vorbereitung, die Eintrittswahrscheinlichkeiten aller $z+1$ möglichen Anzahl von Dienstgüteverletzungen zu berechnen. Die entsprechende Vorschrift ist in Gleichung (5.20) bis Gleichung (5.23) in Kapitel 5.2.1.1 definiert. Zur Bestimmung der Zeitkomplexität für die Aufstellung der Verletzungsmatrix sind die Gleichungen als Java-Programm implementiert worden. Das dazugehörige Struktogramm ist in Anhang B zu finden.

Die Bestimmung der Verletzungsmatrix einer Dienstgütegarantie beginnt mit der Vorbereitung der Produkte und Summen aller Verletzungswahrscheinlichkeiten. Für diesen Schritt sind mehrere Schleifen sowie eine Rekursion erforderlich. Bei einer zusammengesetzten Dienstleistung mit z Teildienstaufrufen führt dies zu einer exponentiellen Zeitkomplexität von $O(2^z)$. Im nächsten Schritt wird für jede mögliche Anzahl von Dienstgüteverletzungen die Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt und als Verletzungsmatrix zusammengefasst. Hierfür sind drei Schleifen auszuführen, die bei z Teildienstaufrufen in z^3+z Rechenschritten münden. Es resultiert eine kubische Zeitkomplexität von $O(z^3)$ für die Aufstellung der Verletzungsmatrix für eine Dienstgütegarantie. Die Zeitkomplexität erhöht sich um den Faktor d , der Anzahl von Dienstgütegarantien der zusammengesetzten Dienstleistung. Dies liegt darin begründet, dass für jede Dienstgütegarantie eine Verletzungsmatrix zu erstellen ist, um dem Betreiber der zusammengesetzten Dienstleistung mit den notwendigen Informationen über im Ausführungsplan auftretende Dienstgüteverletzungen zu versorgen. Folglich besitzt die vollständige Aufstellung aller d Verletzungsmatrizen eine Zeitkomplexität von $O(d * (2^z + z^3 + z))$. Durch die Dominanz des exponentiellen Anteils 2^z , handelt es sich

6. Diskussion

bei der Aufstellung der d Verletzungsmatrizen um ein Verfahren mit einer exponentiellen Zeitkomplexität $O(2^z)$ in Abhängigkeit der Anzahl z von Teildienstaufrufen der zusammengesetzten Dienstleistung. Eine exponentielle Zeitkomplexität bedingt ein schlechtes Laufzeitverhalten für große Eingabemengen. Ab welcher Anzahl von Teildienstaufrufen dies der Fall sein wird, ist Gegenstand der Untersuchungen in Kapitel 8.

6.2.2.2 Allgemeine Verletzungszahl

Die Verletzungszahl gibt einen einfachen numerischen Wert für den effizienten Vergleich mehrerer Ausführungspläne an. Sie berechnet sich aus der gewichteten Summe aller dienstgütegäranziespezifischen Verletzungszahlen. Gleichung (5.32) und (5.33) definierten diesen Sachverhalt. Für die Berechnung der dienstgütegäranziespezifischen Verletzungszahl sind die Verletzungswahrscheinlichkeiten aller Teildienstaufrufe zu addieren, wie es in Gleichung (5.31) in Kapitel 5.2.2.1 formal spezifiziert ist. Um die Zeitkomplexität bei der Berechnung der Verletzungszahl zu bestimmen wurden die Gleichungen (5.31) bis (5.33) als Java-Programm implementiert. Die dazugehörigen Struktogramme sind in Anhang B zu finden.

Für die Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl ist die Summe der Verletzungswahrscheinlichkeiten aller Teildienstaufrufe zu bilden. Bei z Teildienstaufrufen führt dies zu einer linearen Zeitkomplexität von $O(z)$. Dieser Schritt ist für jede Dienstgütegäranzie zu wiederholen. Es ergeben sich bei d Dienstgütegäranzies ($d * z$) Rechenschritte. Die Berechnung der allgemeinen Verletzungszahl eines Ausführungsplans ist daher linear in z und d . Hieraus resultiert ein sehr gutes Laufzeitverhalten, was die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit in Form der Verletzungszahl zu einer äußerst effizienten Methode macht.

6.3 Zusammenfassung

Kapitel 6 beinhaltet eine kritische Diskussion der Ergebnisse dieser Arbeit. Im Fokus standen die Umsetzung der Anforderungen und die Zeitkomplexität der definierten Vorschriften. Es konnte gezeigt werden, dass alle der im Rahmen der Problemanalyse identifizierten Anforderungen erfolgreich durch die Konzepte in Kapitel 5 umgesetzt werden konnten.

Die Betrachtung der Zeitkomplexität ergab sowohl bei der Vorhersage der absoluten als auch bei der Prognose der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit ein lineares Verhalten. Im Gegensatz dazu ist bei der Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans in Form der Verletzungsmatrix mit einem schlechten Laufzeitverhalten zu rechnen, denn es liegt eine exponentielle Zeitkomplexität vor. Demgegenüber ist die Berechnung der allgemeinen Verletzungszahl eines Ausführungsplans mit einer linearen Zeitkomplexität wieder äußerst effizient. Dies bestätigt die Hypothese in Kapitel 5, die Verletzungszahl zur schnellen Bewertung mehrere Ausführungspläne zu nutzen, um hochzuverlässige Kandidaten zu identifizieren. Stattdessen dient die Verletzungsmatrix eines Ausführungsplans dem Dienstbetreiber als Informationsquelle um z.B. Entscheidungen über Kompensierungsstrategien zu treffen. Da eine solche Entscheidung in der Regel nur für wenige Ausführungspläne und vor der Dienstauführung durchgeführt wird, ist eine exponentielle Zeitkomplexität vertretbar.

Wie sich die Zeitkomplexität der einzelnen Rechenschritte auf die Berechnungszeiten auswirken, wird in Kapitel 7 und 8 im Rahmen einer detaillierten Evaluation analysiert.

III. Evaluation

Das Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit in zusammengesetzten Dienstleistungen. Die hierfür notwendigen Aggregationsvorschriften wurden im zweiten Abschnitt der Arbeit konzipiert sowie kritisch diskutiert. Im nun folgenden dritten und letzten Abschnitt sollen die Ergebnisse detailliert evaluiert werden. Im Fokus stehen Korrektheitstests, die nachweisen, dass die ermittelten Werte mit den tatsächlichen Werten übereinstimmen. Darüber hinaus erfolgen Performanz-Untersuchungen, die ein Maß für die Ausführungszeit der Berechnungen liefern.

Der Evaluation folgen eine Zusammenfassung der Ergebnisse und deren Gegenüberstellung mit den Thesen. Mit einem kurzen Ausblick auf weiterführende Forschungsaspekte schließt die Arbeit ab.

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes

Die Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes wird als Verletzungswahrscheinlichkeit gemessen. Sie bestimmt die Wahrscheinlichkeit mit der ein Teildienst während der nächsten Interaktion bzw. im Mittel während der nächsten n Interaktionen seine Garantie für eine bestimmte Dienstgüteeigenschaft nicht einhält. Im ersten Fall spricht man von der relativen im zweiten Fall von der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit. Für die Evaluierung der Vorhersage der Verletzungswahrscheinlichkeit sind zwei Aspekte zu untersuchen: (1) die Abhängigkeit des Laufzeitverhaltens von den Eingaben und (2) die hinreichende Übereinstimmung der vorhergesagten Verletzungswahrscheinlichkeiten mit den tatsächlichen Werten. Beide Punkte werden im Folgenden analysiert, wobei eine Unterscheidung zwischen der absoluten und relativen Verletzungswahrscheinlichkeit erfolgt.

Für die Evaluation sind die Berechnungsvorschriften für die Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit (Gleichung (5.6) aus Kapitel 5.1.1.1) sowie der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit (Gleichung (5.12) aus Kapitel 5.1.2.1) als Java-Programm implementiert worden. Die entsprechenden Struktogramme sind Anhang B zu entnehmen. Als Eingabe dienen Java-Objekte, die speziell für die einzelnen Testfälle erzeugt worden. Die Testdurchführung selbst fand auf einem Lenovo T61 (Duo-Core, 3 GB RAM) mit Windows XP Service Pack 3 als Betriebssystem statt.

7.1 Performanz

7.1.1 Relative Verletzungswahrscheinlichkeit

7.1.1.1 Aufbau der Testumgebung

Aufgabe der Performanz-Tests ist es, die Abhängigkeit der Berechnungszeit $t_{n,k}$ für die relative Verletzungswahrscheinlichkeit von der Länge n sowie der Ordnung k der verwendeten Markov-Kette zu untersuchen. Als Testdaten dienen hierfür ohne Beschränkung der Allgemeinheit Monitoring-Historien, die eine zufällige Verteilung von Dienstgüteverletzungen zu insgesamt 30 Prozent enthielten. Dies war möglich, da die Berechnung der Verletzungswahrscheinlichkeit unabhängig von der Struktur der Monitoring-Historie ist.

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgütezuvverlässigkeit eines Teildienstes

Um den Einfluss der Ordnung der Markov-Kette auf die Ausführungszeit zu untersuchen, existieren 10 Testfälle, die sich jeweils in der Ordnung der verwendeten Markov-Kette unterscheiden. Insgesamt werden die Ordnungen 1 bis 10 gewählt.

Pro Testfall erfolgt die Analyse der Ausführungszeit in Abhängigkeit der Länge der Markov-Kette. Hierfür dienen 200 Durchläufe, in denen sich die Länge in 100-er Schritten von 100 auf 20.000 erhöht. Um den Einfluss von unregelmäßig auftretenden Prozessen, wie dem Java Garbage Collector, zu reduzieren, gibt es pro Durchlauf 50 Messungen. Abbildung 12 fasst die Vorgehensweise bei der Durchführung der Performanz-Tests für die relative Verletzungswahrscheinlichkeit zusammen.

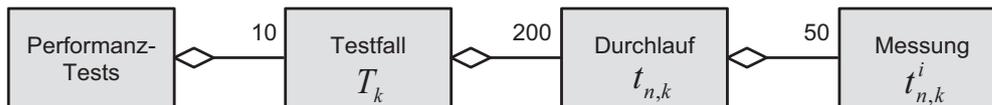


Abbildung 12: Methodik der Performanz-Tests für die Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit

Als Berechnungszeit $t_{n,k}$ für die Ermittlung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes auf Basis einer Markov-Kette der Länge n und der Ordnung k gilt das arithmetische Mittel der Berechnungszeiten aller 50 Messungen eines Durchlaufes (siehe Gleichung 7.1).

$$t_{n,k} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} t_{n,k}^i \quad (7.1)$$

7.1.1.2 Testergebnisse

Abbildung 13 zeigt die Testergebnisse für die Performanz-Untersuchungen, deren genauen Messwerte Anhang C entnommen werden können. Deutlich zu erkennen ist die Steigerung der Berechnungszeit mit zunehmender Länge der Markov-Kette. Dies ergibt sich aus der Arbeitsweise des Algorithmus (siehe Struktogramm in Anhang B), der mit jedem zusätzlichen Zustand der Markov-Kette eine weitere Operation ausführen muss. Hieraus ergibt sich eine lineare Zeitkomplexität für die Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes. Die Zeitkomplexität ist im Diagramm in Abbildung 13 deutlich zu erkennen und wurde bereits im Kapitel 6.2.1.1 ermittelt.

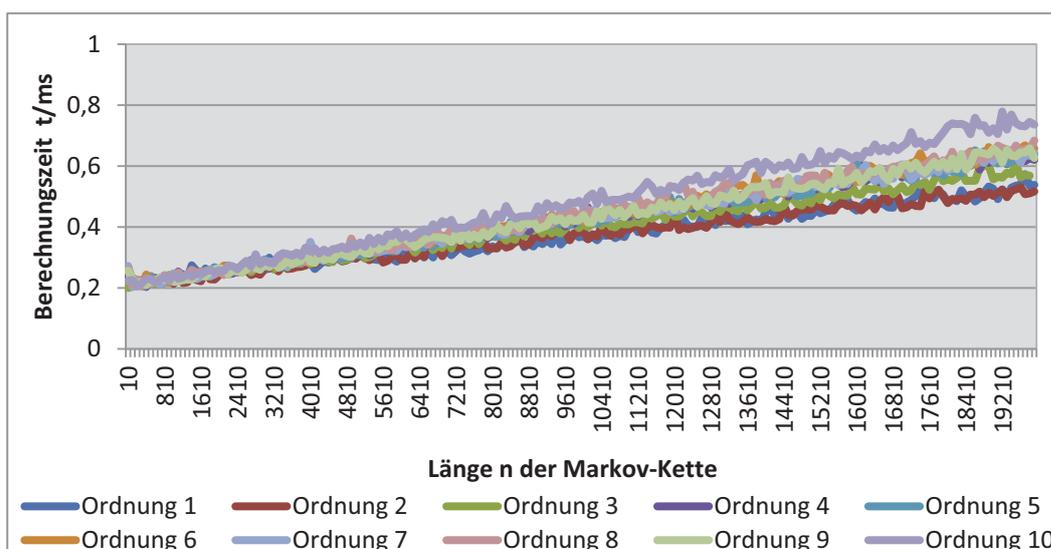


Abbildung 13: Berechnungszeit zur Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit

Zu erwarten war auch der Performanz-Unterschied zwischen Markov-Ketten unterschiedlicher Ordnung. Der Unterschied verstärkt sich mit zunehmender Länge der Kette und liegt im Bereich von wenigen Nanosekunden.

Generell handelt es sich bei der Ermittlung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit um eine äußerst effiziente Berechnung. Selbst bei einer Ordnung von 10 und einer Länge von 20.000 Zuständen liegt die Berechnungszeit unter einer Millisekunde. Der Einsatz dieser Methode in Echtzeitsystemen ist folglich problemlos möglich.

Die Performanz-Differenz zwischen Markov-Ketten unterschiedlicher Ordnung lässt sich leicht mit der Implementierung des Algorithmus erklären (siehe Struktogramm in Anhang B). In Abhängigkeit der Ordnung k werden die letzten k Zustände der Markov-Kette als Muster $p = (v_{n-k+1}, \dots, v_{n-1}, v_n)$ interpretiert. Die relative Verletzungswahrscheinlichkeit (vergleiche Kapitel 5.1.1) berechnet sich aus dem Verhältnis der Anzahl mit der das Muster p vom Zustand 1 gefolgt wird und der Anzahl mit der p insgesamt in der Markov-Kette auftritt (Gleichung 7.2).

$$P_{s,e} = \frac{N_{v_{n-k+1} \dots v_{n-1} v_n}}{N_{v_{n-k+1} \dots v_{n-1} v_n}} \quad (7.2)$$

Für die Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit ist daher nach dem Muster p in der Markov-Kette zu suchen. Hierfür ist für jede Zustandsfolge der Länge k zu prüfen, ob sie dem Muster p entspricht. Abbildung 14 verdeutlicht die Arbeitsweise des Algorithmus. Eine Markov-Kette der Länge n und der Ordnung k besitzt insgesamt $(n - k)$ Zustandsfolgen der Länge k . Dies führt im schlechtesten Fall zu $(n - k) * k$ Vergleichen, da die Übereinstimmung jedes Zustandes jeder Folge mit jedem Zustand des Musters überprüft werden muss. Die Anzahl der Vergleiche erhöht sich daher pro Ordnung um $(n - k) * k$. Dies erklärt warum sich die Berechnungszeit mit zunehmender Ordnung k erhöht sowie ebenfalls warum sich dieser Performanz-Unterschied mit wachsendem n zusätzlich vergrößert.

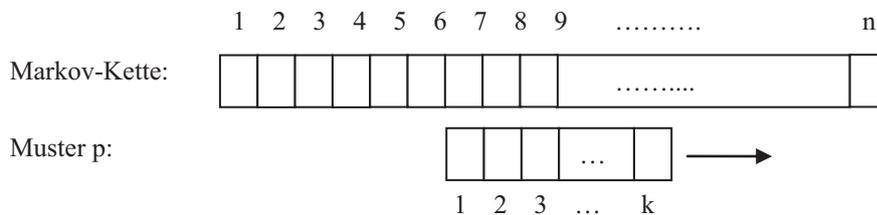


Abbildung 14: Vorgehen bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit

Die Performanz-Differenz von $(n - k) * k$ ist nur dann vorzufinden, wenn das zu suchende Muster p an jeder Stelle der Markov-Kette auftritt. Eine solche Konstellation ist äußerst selten. Stattdessen wird es Zustandsfolgen der Länge k geben, die nicht dem Muster p entsprechen. Im günstigsten Fall wird dies bereits beim Vergleich des ersten Zustandes des Musters p mit dem ersten Zustand der Zustandsfolge erkannt. Statt k Vergleichen ist in diesem Fall nur ein Vergleich notwendig. Folglich liegen die notwendigen Vergleichsoperationen für die Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit je nach Struktur der Markov-Kette im Bereich von $(n - k)$ für den Fall, dass das Musters p nicht vorzufinden ist und $(n - k) * k$ für den Fall, dass das Muster p mit jeder Zustandsfolge der Markov-Kette übereinstimmt. Hierbei ist der Unterschied zwischen den tatsächlich notwendigen Vergleichsoperationen und den maximal möglichen umso größer, je höher Ordnung der Markov-Kette ist. Dies erklärt, warum der Performanz-Differenz zwischen den Markov-Ketten unterschiedlicher Ordnung keinem konstanten Wert entspricht, sondern vielmehr von der Struktur der Markov-Kette abhängt.

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgütezuvverlässigkeit eines Teildienstes

7.1.2 Absolute Verletzungswahrscheinlichkeit

7.1.2.1 Aufbau der Testumgebung

Mit Hilfe der Performanz-Tests zur absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit soll geprüft werden, wie die Berechnungszeit t_n von der Länge n der Monitoring-Historie des Teildienstes abhängt. Zu diesem Zweck werden 200 Testfälle durchgeführt. Pro Testfall erhöht sich die Anzahl der Monitoring-Einträge um 100 bis auf maximal 20.000 Werte. Zur Reduktion des Einfluss unregelmäßig auftretender Prozesse auf die Berechnungszeit, wird diese pro Testfall 50-mal gemessen. Abbildung 15 fasst die Vorgehensweise bei der Durchführung der Performanz-Tests für die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit zusammen.

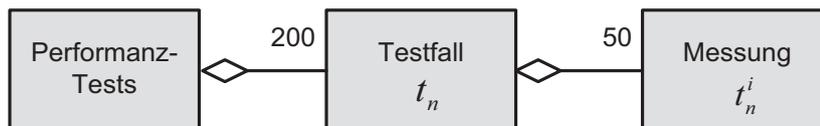


Abbildung 15: Methodik der Performanz-Tests für die Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit

Als Berechnungszeit für die Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes auf Basis seiner Monitoring-Historie der Länge n gilt das arithmetische Mittel aus den 50 Messungen eines Testfalls (siehe Gleichung 7.3).

$$t_n = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} t_n^i \quad (7.3)$$

Als Eingabedaten für die Performanz-Untersuchungen dienten ohne Beschränkung der Allgemeinheit Testreihen, die eine zufällige Verteilung von Dienstgüteverletzungen zu insgesamt 30 Prozent enthielten. Dies war möglich, da die Berechnung der Verletzungswahrscheinlichkeit unabhängig von der Struktur der Monitoring-Historie erfolgt.

7.1.2.2 Testergebnisse

Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse der Performanz-Untersuchungen zur Ermittlung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit. Die genauen Messwerte sind in Anhang C zu finden. Deutlich zu erkennen ist der Anstieg der Berechnungszeit mit zunehmender Länge der zugrunde liegenden Monitoring-Historie. Dies ergibt sich aus der Arbeitsweise des Algorithmus (siehe Struktogramm in Anhang B), der mit jedem zusätzlichen Monitoring-Eintrag eine weitere Operation ausführen muss. Dies führt zu einer linearen Zeitkomplexität für die Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes. Die Zeitkomplexität ist im Diagramm in Abbildung 16 deutlich zu erkennen und wurde bereits im Kapitel 6.2.1.2 identifiziert. Dies macht die Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit zu einer äußerst effizienten Berechnung, die selbst bei einer Menge von 20.000 Monitoring-Einträgen weniger als 3 Millisekunden benötigt und problemlos im Rahmen von Echtzeitprozessen einsetzbar ist.

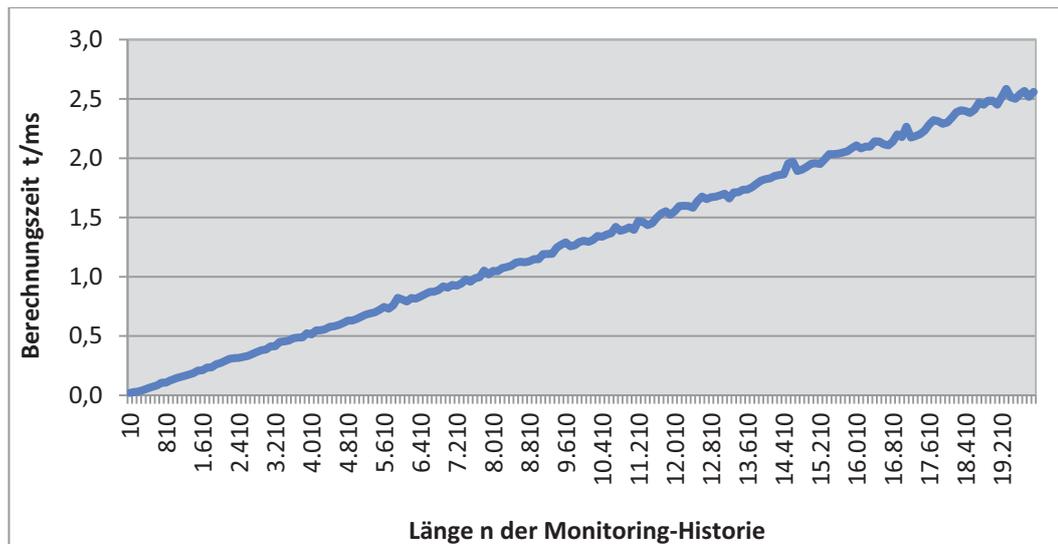


Abbildung 16: Berechnungszeit zur Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit

7.2 Korrektheit

Für die Evaluierung der Korrektheit der Vorhersage von relativer sowie absoluter Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes dienen 14 Testreihen zu je 1.000 Werten. Jede Testreihe repräsentiert die Monitoring-Historie eines Teildienstes. Neun davon wurden simuliert, während fünf Testreihen auf Monitoring-Historien realer Dienste basieren, die im Internet abgerufen werden können. Hierfür wurden die Dienste über einen begrenzten Zeitraum beobachtet und die gemessenen Werte als Zeitreihe interpretiert. Die einzelnen Testreihen werden im Folgenden kurz charakterisiert.

Testreihe 1 simuliert einen Teildienst mit zufällig verteilten, vereinzelt auftretenden Dienstgütereletzungen. Der Teildienst hält seine Dienstgütegarantie in insgesamt 10 Prozent der Fälle nicht ein. Abbildung 17 zeigt einen Auszug einer solchen Monitoring-Historie.

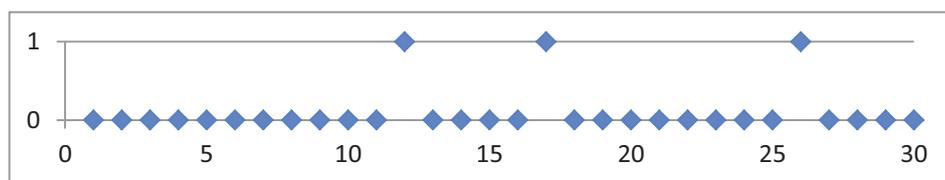


Abbildung 17: Auszug Testreihe 1

Testreihe 2 simuliert einen Teildienst mit zufällig verteilten, blockweise auftretenden Dienstgütereletzungen. Der Teildienst hält seine Dienstgütegarantie in insgesamt 10 Prozent der Fälle nicht ein. Abbildung 18 zeigt einen Auszug einer solchen Monitoring-Historie.

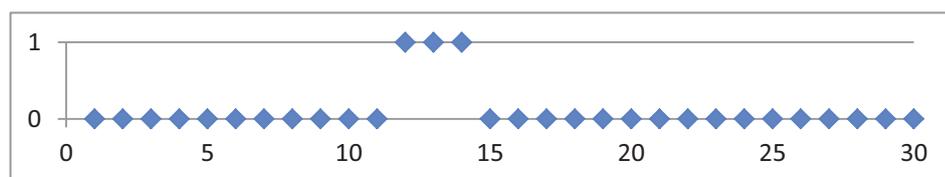


Abbildung 18: Auszug Testreihe 2

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgütezverlässigkeit eines Teildienstes

Testreihe 3 simuliert einen Teildienst mit zufällig verteilten vereinzelt sowie blockweise auftretenden Dienstgüeverletzungen. Der Teildienst hält seine Dienstgüegarantie in insgesamt 10 Prozent der Fälle nicht ein. Abbildung 19 zeigt einen Auszug einer solchen Monitoring-Historie.

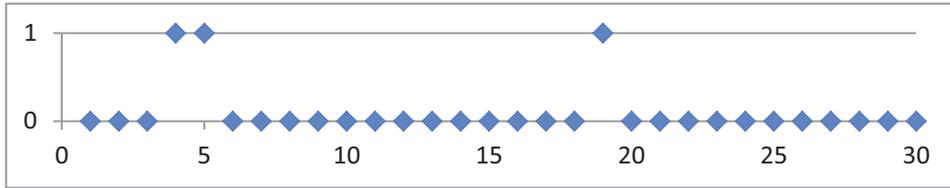


Abbildung 19: Auszug Testreihe 3

Testreihe 4 simuliert einen Teildienst mit zufällig verteilten, vereinzelt auftretenden Dienstgüeverletzungen. Der Teildienst hält seine Dienstgüegarantie in insgesamt 30 Prozent der Fälle nicht ein. Abbildung 20 zeigt einen Auszug einer solchen Monitoring-Historie.

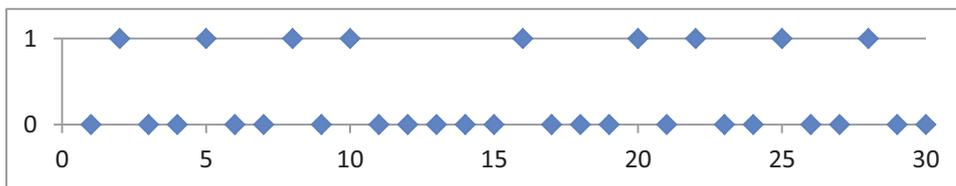


Abbildung 20: Auszug Testreihe 4

Testreihe 5 simuliert einen Teildienst mit zufällig verteilten, blockweise auftretenden Dienstgüeverletzungen. Der Teildienst hält seine Dienstgüegarantie in insgesamt 30 Prozent der Fälle nicht ein. Abbildung 21 zeigt einen Auszug einer solchen Monitoring-Historie.

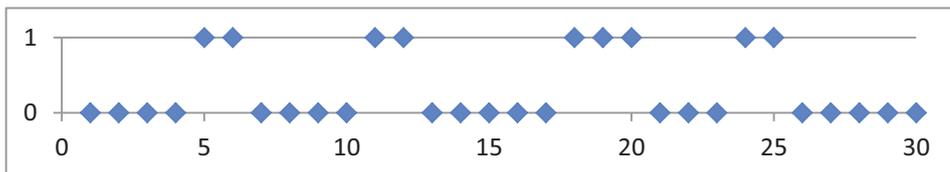


Abbildung 21: Auszug Testreihe 5

Testreihe 6 simuliert einen Teildienst mit zufällig verteilten vereinzelt sowie blockweise auftretenden Dienstgüeverletzungen. Der Teildienst hält seine Dienstgüegarantie in insgesamt 30 Prozent der Fälle nicht ein. Abbildung 22 zeigt einen Auszug einer solchen Monitoring-Historie.

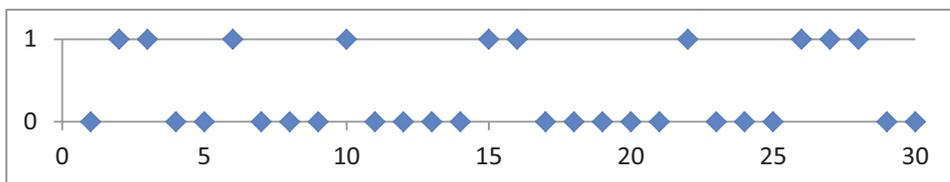


Abbildung 22: Auszug Testreihe 6

Testreihe 7 simuliert einen Teildienst mit zufällig verteilten, vereinzelt auftretenden Dienstgüeverletzungen. Der Teildienst hält seine Dienstgüegarantie in insgesamt 50 Prozent der Fälle nicht ein. Abbildung 23 zeigt einen Auszug einer solchen Monitoring-Historie.

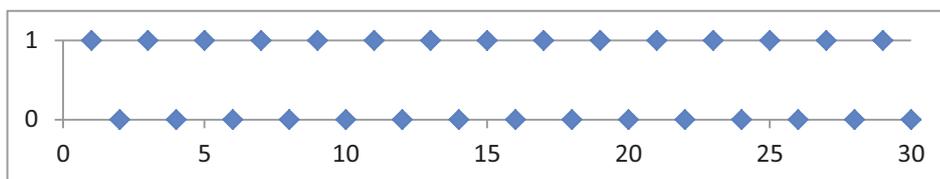


Abbildung 23: Auszug Testreihe 7

Testreihe 8 simuliert einen Teildienst mit zufällig verteilten, blockweise auftretenden Dienstgütereletzungen. Der Teildienst hält seine Dienstgütegarantie in insgesamt 50 Prozent der Fälle nicht ein. Abbildung 24 zeigt einen Auszug einer solchen Monitoring-Historie.

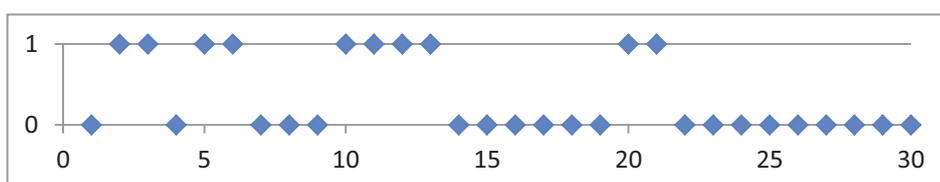


Abbildung 24: Auszug Testreihe 8

Testreihe 9 simuliert einen Teildienst mit zufällig verteilten, vereinzelt sowie blockweise auftretenden Dienstgütereletzungen. Der Teildienst hält seine Dienstgütegarantie in insgesamt 50 Prozent der Fälle nicht ein. Abbildung 25 zeigt einen Auszug einer solchen Monitoring-Historie.

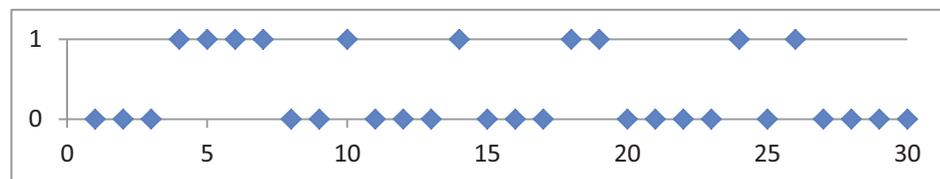


Abbildung 25: Auszug Testreihe 9

Testreihe 10 entspricht der Monitoring-Historie des J2EE HTTP Proxy¹ vom 18.05.2010 bis einschließlich 25.05.2010. Die Historie enthält die Antwortzeit des Dienstes, die in regelmäßigen Abständen gemessen wird. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 26 zu finden, wobei die rote Linie die Grenze der Antwortzeit anzeigt. Es handelt sich bei dem J2EE HTTP Proxy also um einen Dienst, der in ca. 50 Prozent der Fälle seine Garantie für die Antwortzeit nicht einhält.

¹ <http://jpsmanager.cern.ch/jps/central/showMonitoringHistory.do?componentName=HTTP%20proxy>

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes

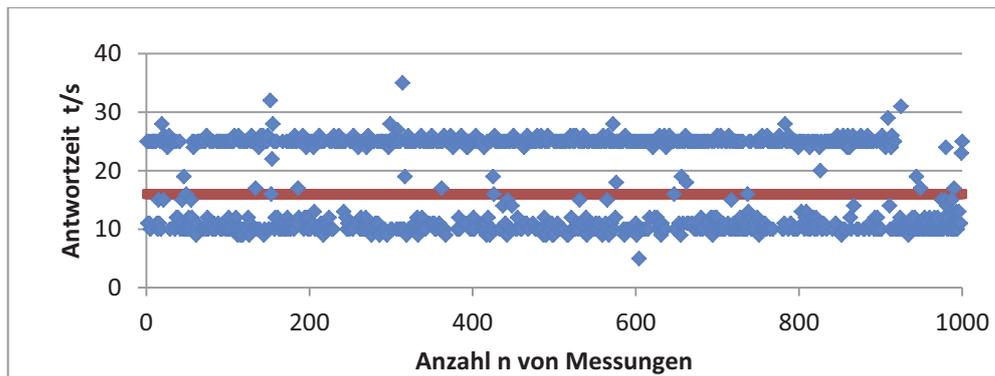


Abbildung 26: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des J2EE HTTP Proxies

Testreihe 11 entspricht der Monitoring-Historie des J2EE Container001¹ vom 18.05.2010 bis einschließlich 25.05.2010. Die Historie enthält die Antwortzeit des Dienstes, die in regelmäßigen Abständen gemessen wird. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 27 zu finden, wobei die rote Linie den garantierten Wert für die Antwortzeit anzeigt. Es handelt sich bei dem J2EE Container001 also um einen Dienst, der in ca. 30 Prozent der Fälle seine Garantie für die Antwortzeit nicht einhält.

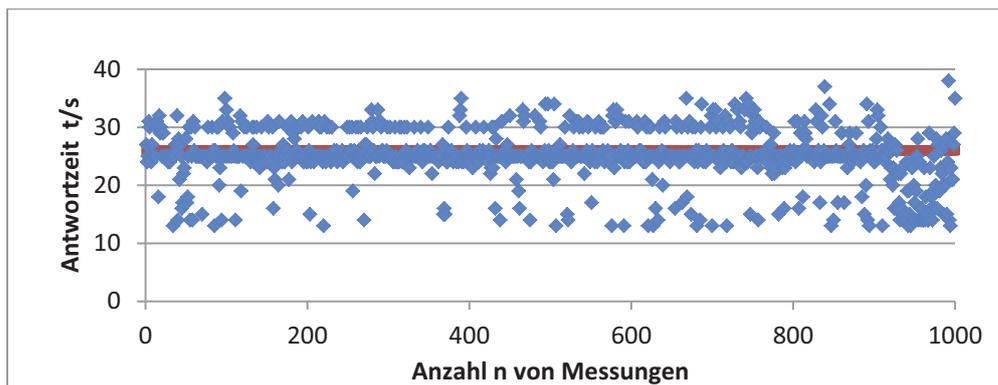


Abbildung 27: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des J2EE Container001

Testreihe 12 entspricht der Monitoring-Historie des J2EE Container002² vom 18.05.2010 bis einschließlich 25.05.2010. Die Historie enthält die Antwortzeit des Dienstes, die in regelmäßigen Abständen gemessen wird. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 28 zu finden, wobei die rote Linie den garantierten Wert für die Antwortzeit anzeigt. Es handelt sich bei dem J2EE Container002 also um einen Dienst, der in ca. 30 Prozent der Fälle seine Garantie für die Antwortzeit nicht einhält.

¹ <http://jpsmanager.cern.ch/jps/central/showMonitoringHistory.do?componentName=container%200001>

² <http://jpsmanager.cern.ch/jps/central/showMonitoringHistory.do?componentName=container%200002>

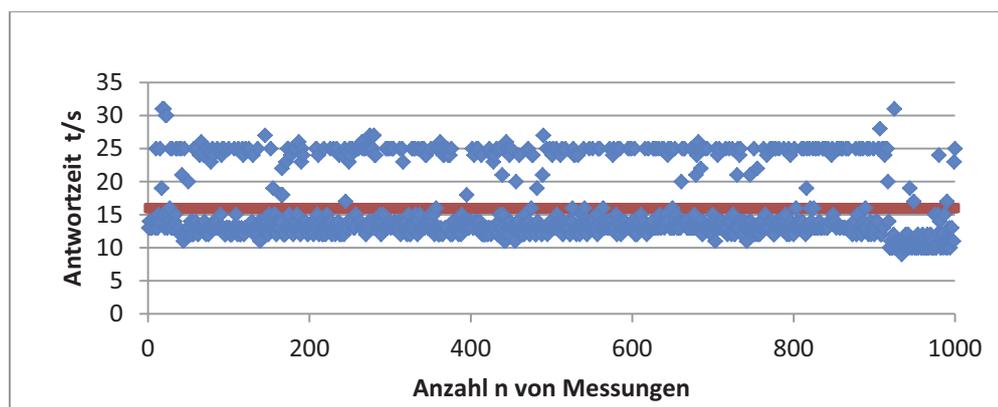


Abbildung 28: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des J2EE Container002

Testreihe 13 entspricht der Monitoring-Historie des J2EE Container003¹ vom 18.05.2010 bis einschließlich 25.05.2010. Die Historie enthält die Antwortzeit des Dienstes, die in regelmäßigen Abständen gemessen wird. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 29 zu finden, wobei die rote Linie den garantierten Wert für die Antwortzeit anzeigt. Es handelt sich bei dem J2EE Container003 also um einen Dienst, der in ca. 35 Prozent der Fälle seine Garantie für die Antwortzeit nicht einhält.

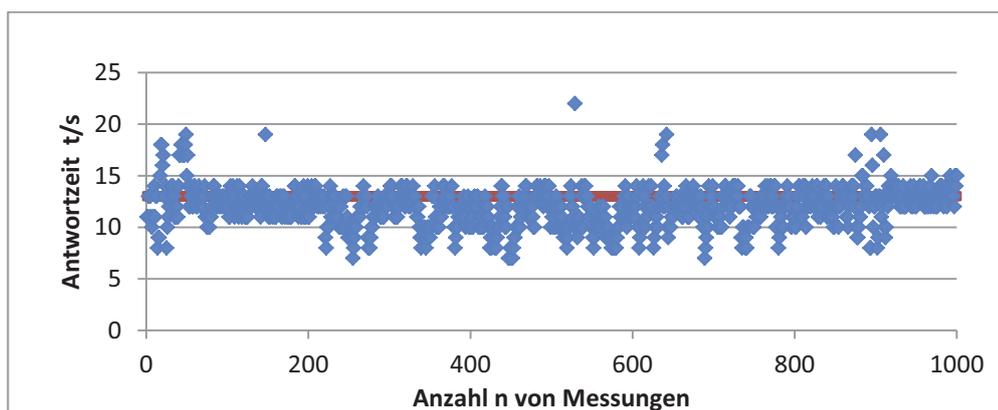


Abbildung 29: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des J2EE Container003

Testreihe 14 entspricht der Monitoring-Historie des J2EE Container004² vom 18.05.2010 bis einschließlich 25.05.2010. Die Historie enthält die Antwortzeit des Dienstes, die in regelmäßigen Abständen gemessen wird. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 30 zu finden, wobei die rote Linie den garantierten Wert für die Antwortzeit anzeigt. Es handelt sich bei dem J2EE Container004 also um einen Dienst, der in ca. 20 Prozent der Fälle seine Garantie für die Antwortzeit nicht einhält.

¹ <http://jpsmanager.cern.ch/jps/central/showMonitoringHistory.do?componentName=container%200003>

² <http://jpsmanager.cern.ch/jps/central/showMonitoringHistory.do?componentName=container%200004>

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgütezuvverlässigkeit eines Teildienstes

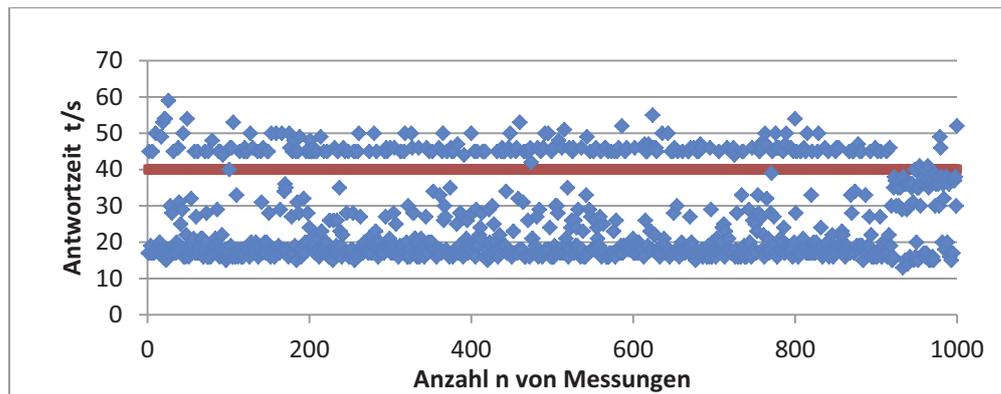


Abbildung 30: Monitoring-Historie für die Antwortzeit des J2EE Container004

7.2.1 Relative Verletzungswahrscheinlichkeit

7.2.1.1 Aufbau der Testumgebung

Ziel der Korrektheitstests ist es nachzuweisen, dass die Markov-Kette ein geeignetes Modell ist, um die relative Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes bezüglich einer bestimmten Dienstgütegarantie vorherzusagen. Dies ist der Fall, wenn der Vorhersagefehler möglichst klein ist. Zusätzlich ist der Einfluss der Länge n und der Ordnung k der Markov-Kette auf den Vorhersagefehler zu untersuchen.

Als Basis für die Korrektheitsuntersuchungen dienen die Monitoring-Historien der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten 14 Teildienste. Jede Monitoring-Historie wird in zwei Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt repräsentiert die Lernstichprobe auf deren Basis die relative Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e}^{F_{n,k}}$ vorhergesagt wird. Hierfür werden 50 Testfälle durchgeführt, wobei sich pro Testfall die Länge der Lernstichprobe in 10er-Schritten von 10 auf 500 erhöht. Jeder Testfall beinhaltet 10 Vorhersagen der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit. Jede Vorhersage basiert auf einer Markov-Kette anderer Ordnung. Insgesamt werden die Ordnungen 1 bis 10 untersucht.

An die Lernstichprobe variabler Länge schließt sich die Kontrollstichprobe an. Sie besitzt jeweils 500 Einträge und dient zur Bestimmung des tatsächlichen Wertes $p_{s,e}^{A_{n,k}}$ für die relative Verletzungswahrscheinlichkeit. Hierfür wird die Berechnungsvorschrift für die relative Verletzungswahrscheinlichkeit äquivalent auf die Kontrollstichprobe angewandt, d.h. der Prozentsatz ermittelt, mit der das Muster p bestehend aus den k -letzten Zuständen der Lernstichprobe von einer Dienstgüteverletzung, d.h. dem Zustand 1 gefolgt wird. Abbildung 31 fasst die Vorgehensweise bei den Korrektheitsuntersuchungen für die relative Verletzungswahrscheinlichkeit zusammen.

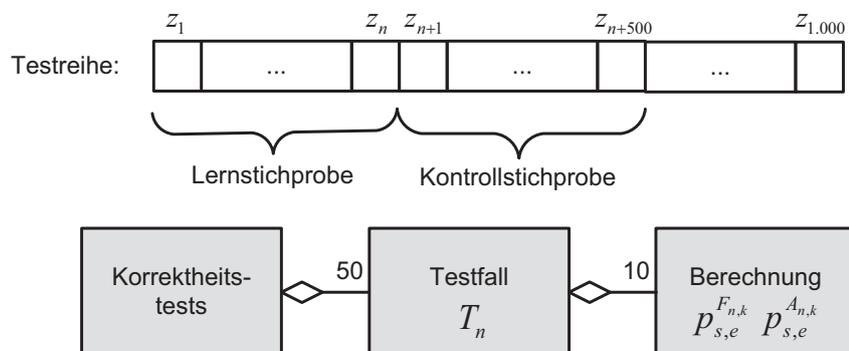


Abbildung 31: Methodik der Korrektheitstests für die Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit

7.2.1.2 Testergebnisse

Als Vorhersagefehler einer Markov-Kette der Länge n und der Ordnung k dient traditionell der mittlere quadratische Fehler $\varepsilon_{n,k}$. Der mittlere quadratische Fehler (siehe Gleichung 7.4) ist der Mittelwert der quadratischen Fehler zwischen vorhergesagter Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{i,e}^{F_{n,k}}$ und tatsächlicher Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{i,e}^{A_{n,k}}$ aller m Testreihen. Die quadratischen Fehler aller Messungen sind in Anhang D zu finden.

$$\varepsilon_{n,k} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (p_{i,e}^{F_{n,k}} - p_{i,e}^{A_{n,k}})^2 \quad (7.4)$$

Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse der Korrektheitsuntersuchungen der neun simulierten Testreihen für die Ordnung 1 bis 3. Deutlich ist zu erkennen, wie sich der mittlere quadratische Fehler mit zunehmender Länge n der Markov-Kette reduziert. Dies liegt darin begründet, dass mit zunehmender Länge der Markov-Kette ein größerer Beobachtungszeitraum vorliegt und damit mehr Informationen über das Verhalten des Teildienstes. Das Erkennen von Mustern im Verhalten eines Teildienstes wird so vereinfacht. Als hinreichend großer Beobachtungszeitraum haben sich ca. 100 Einträge erwiesen, denn der mittlere quadratische Fehler schwingt sich ab diesem Zeitpunkt auf einen niedrigen Wert ein.

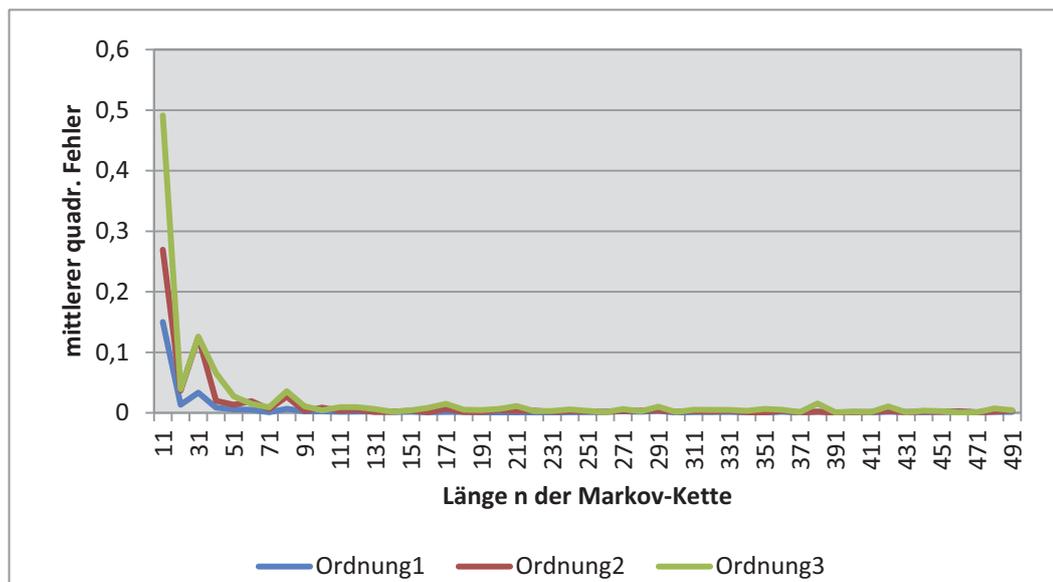


Abbildung 32: Mittlerer quadratischer Fehler simulierter Monitoring-Historien bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung 1, 2, und 3

Eine genaue Bewertung des mittleren quadratischen Fehlers für die simulierten Testreihen der Ordnung 1 bis 3 gestattet Abbildung 32. Sie zeigt die Fehler für Markov-Ketten mit einer Länge von mehr als 100 Einträgen mit einem Maximalwert von 0,015. Die genauesten Vorhersagewerte liefert im Mittel eine Markov-Kette erster Ordnung mit einem mittleren quadratischen Fehler im Bereich von 0,0003 und 0,003. Hierbei konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Testreihen mit vereinzelt, blockweise oder vereinzelt und blockweise auftretenden Dienstgütereletzungen beobachtet werden.

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgüteezuverlässigkeit eines Teildienstes

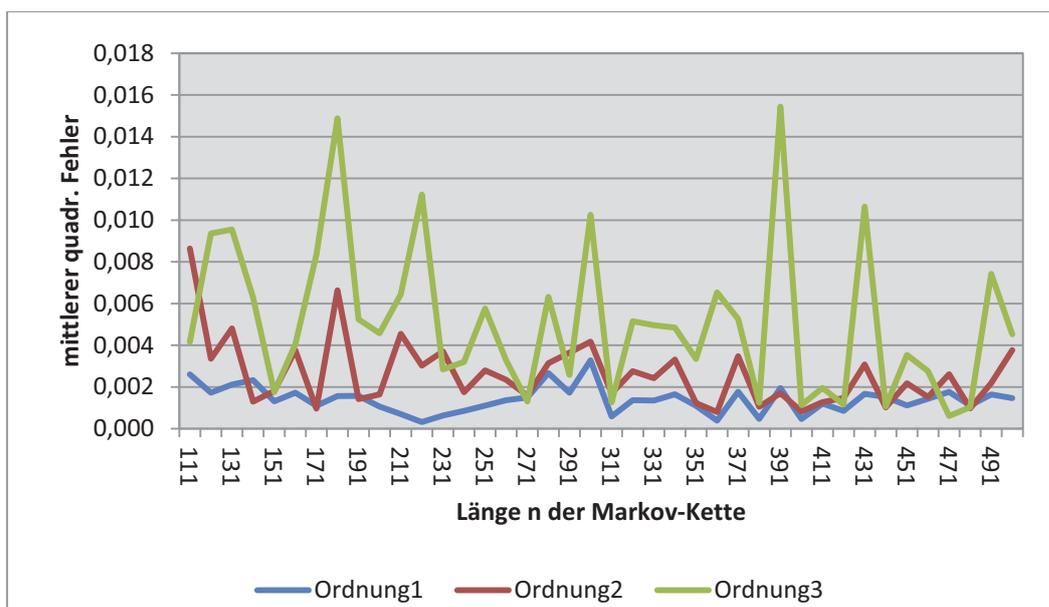


Abbildung 33: Mittlerer quadratischer Fehler simulierter Monitoring-Historien bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung 1, 2 und 3 ($n > 100$)

Das schlechte Abschneiden Markov-Ketten höherer Ordnung (siehe Abbildung 33) bezüglich des mittleren quadratischen Fehlers bei der Vorhersage ist nicht überraschend. Markov-Ketten höherer Ordnung ermitteln die relative Verletzungswahrscheinlichkeit nicht auf Basis eines Zustandes, sondern auf Basis einer Zustandsfolge, die von den letzten k Zuständen gebildet wird. Dieses so genannte Muster p wird umso länger, je größer die Ordnung der Markov-Kette ist. Um zuverlässige Aussagen über das Folgeverhalten eines Teildienstes machen zu können, muss das Muster p mit einer signifikanten Häufigkeit in der Monitoring-Historie des Teildienstes auftreten. Zwar kann dies bei einigen Teildiensten der Fall sein, betrachtet man aber die Gesamtheit aller Teildienste, ist das Vorkommen eines Musters fester Länge nicht gegeben. Aus diesem Grund besitzen Markov-Ketten höherer Ordnung große mittlere quadratische Fehler.

Markov-Ketten höherer Ordnung liefern nur in Einzelfällen genauere Werte als Markov-Ketten erster Ordnung, nämlich genau dann, wenn der Teildienst in seinem Verhalten ein wiederkehrendes Muster fester Länge zeigt. In diesem Fall kann eine teildienstspezifische Berechnungsvorschrift auf Basis einer Markov-Kette höherer Ordnung definiert werden. Man beachte aber, dass diese Gleichung an den jeweiligen Teildienst angepasst ist und keine allgemeingültige Formel darstellt. Sie kann nicht auf beliebige Teildienste übertragen werden. Die allgemeingültige Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit basiert auf einer Markov-Kette erster Ordnung.

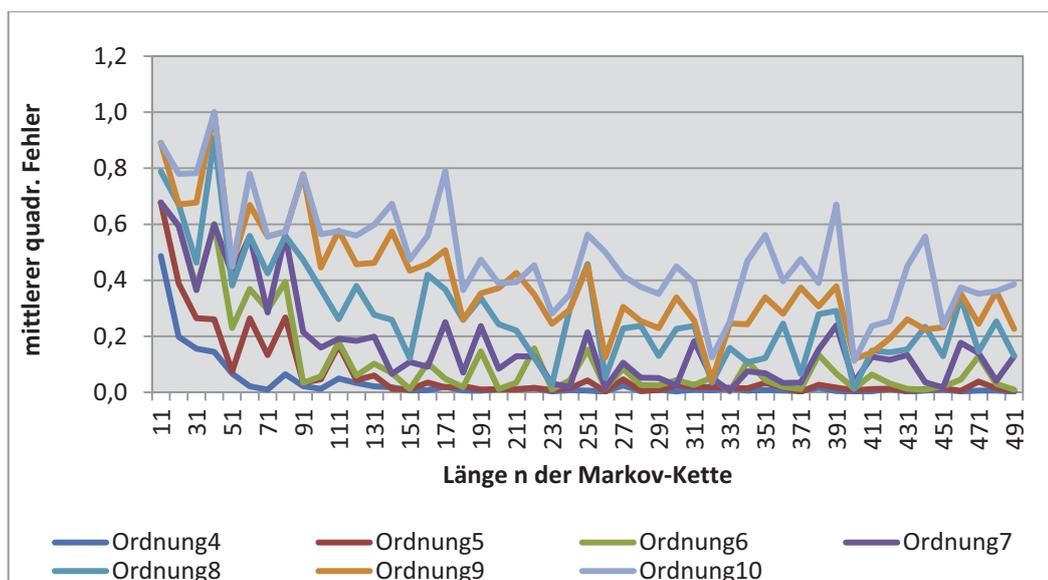


Abbildung 34: Mittlerer quadratischer Fehler simulierten Monitoring-Historien bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung $k > 3$

Die oben beschriebenen Ergebnisse der Korrektheitsuntersuchungen basierten auf Monitoring-Historien, die künstlich erzeugt worden. Diese haben den Vorteil eine gewisse Charakteristik aufzuweisen, die sich im konkreten Fall darin äußert, dass sich ein Teildienst in der Zukunft analog seiner Vergangenheit verhält. Obwohl dies die Voraussetzung jeglicher Vorhersagen ist, findet man dies bei realen Diensten in der Regel nur in abgeschwächter Form. Aus diesem Grund wurden die Monitoring-Historien von fünf realen Diensten in die Korrektheitsuntersuchungen mit einbezogen. Die mittleren quadratischen Fehler für die Markov-Ketten der Ordnung 1, 2 und 3 finden sich in Abbildung 35 und in vergrößerter Darstellung in Abbildung 35. Die mittleren quadratischen Fehler für Markov-Ketten der Ordnung größer 3 sind in Abbildung 36 zu finden. Die Grafiken zeigen die gleiche Charakteristik wie dies bereits bei der Analyse der mittleren quadratischen Fehler der simulierten Monitoring-Historien identifiziert wurde: (1) Abnahme des mittleren quadratischen Fehlers mit zunehmender Länge n der Markov-Kette und (2) Zunahme des mittleren quadratischen Fehlers mit zunehmender Ordnung k der Markov-Kette.

Eine genaue Bewertung der mittleren quadratischen Fehler für die Markov-Ketten der Ordnung 1, 2 und 3 gestattet Abbildung 36. Hierbei sieht man deutlich den Unterschied zu den simulierten Testreihen: Bei der Verarbeitung realer Monitoring-Historien sind schlechtere Werte für den mittleren quadratischen Fehler zu erwarten. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass sich das Verhalten eines Dienstes über die Zeit ändert und nicht genau dem Verhalten in der Vergangenheit gleicht, wie dies bei den simulierten Diensten der Fall ist. So ist bei realen Diensten ein Beobachtungsraum von ca. 150 Interaktionen erforderlich um einen hinreichend genauen Vorhersagewert zu erhalten. Der Vorhersagefehler liegt hierbei zwischen 0,0003 und 0,0382 für Markov-Ketten erster Ordnung.

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgüteezuverlässigkeit eines Teildienstes

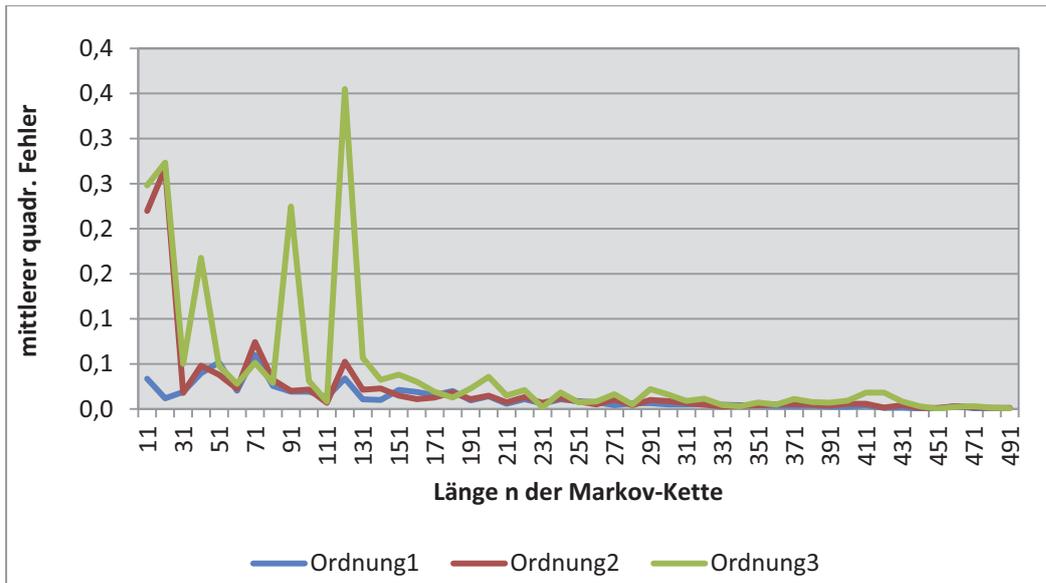


Abbildung 35: Mittlerer quadratischer Fehler realer Monitoring-Historien bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung $k > 3$

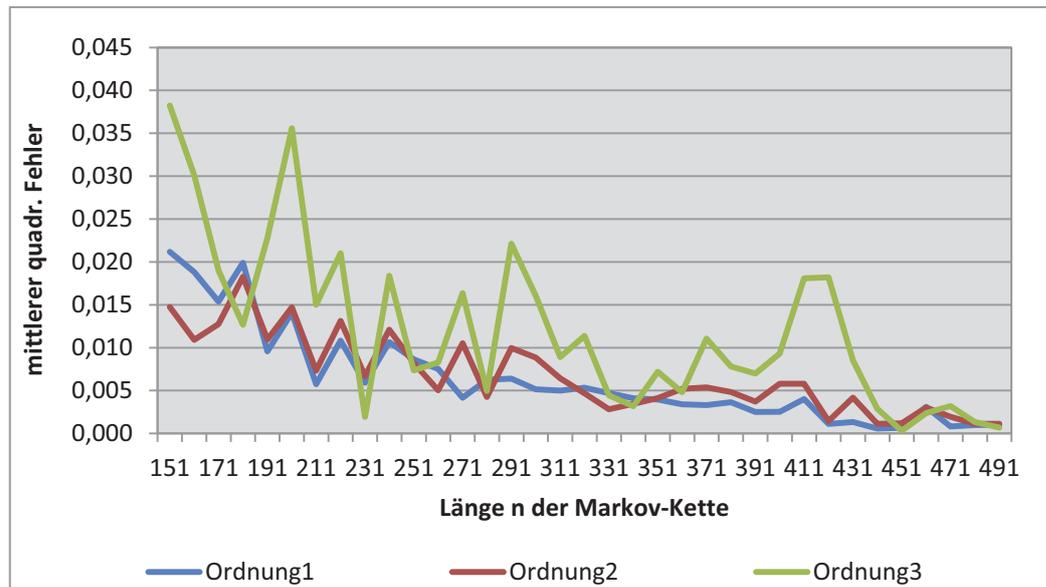


Abbildung 36: Mittlerer quadratischer Fehler realer Monitoring-Historien bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung $k < 4, n > 150$

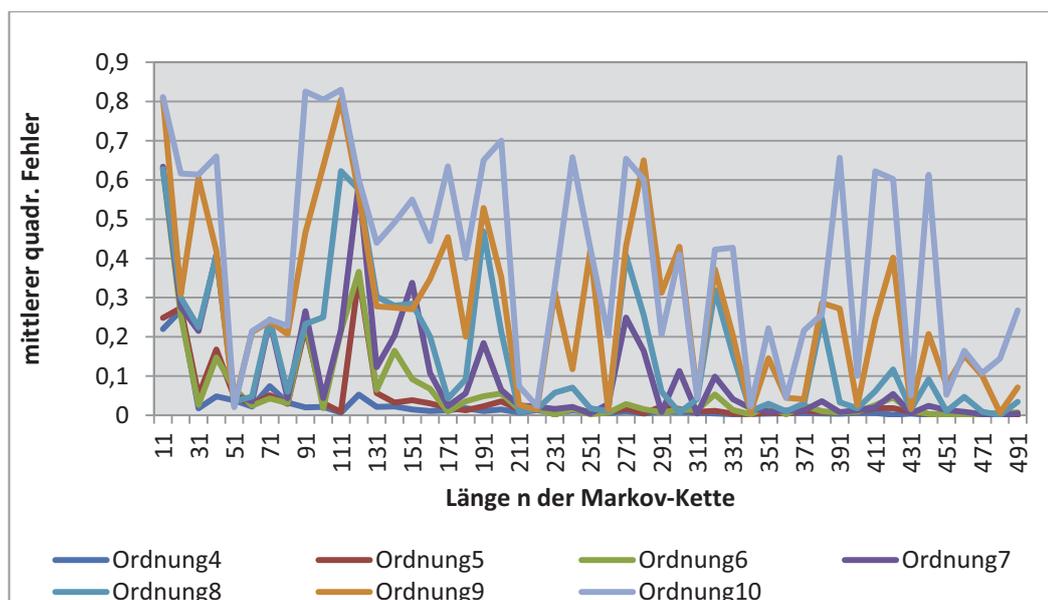


Abbildung 37: Mittlerer quadratischer Fehler reale Monitoring-Historien bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis von Markov-Ketten der Ordnung $k > 3$, $n > 150$

Fasst man die Testergebnisse sowohl der simulierten als auch der realen Teildienste zusammen, so lässt sich folgendes über die Korrektheit bei der Vorhersage der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit sagen:

1. Bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit sollte eine Markov-Kette erster Ordnung Anwendung finden, da diese im Gegensatz zu Markov-Kette höherer Ordnung im Mittel genauere Werte liefert.
2. Je länger die verwendete Markov-Kette, d.h. die zu Grunde liegende Monitoring-Historie ist, desto genauer werden die Vorhersagewerte. Als hinreichend genau wird eine Länge von 150 Einträgen angesehen. In diesem Fall beträgt der mittlere quadratische Fehler mit einer 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit maximal $0,0238^1$.
3. Je homogener der betrachtete Teildienst in seinem Verhalten ist, desto zuverlässiger sind die vorhergesagten Werte. Beständiges Verhalten stellt die Grundlage jeglicher Vorhersagestrategien dar und ist daher keine Schwäche der in dieser Arbeit skizzierten Methode.

7.2.2 Absolute Verletzungswahrscheinlichkeit

7.2.2.1 Aufbau der Testumgebung

Ziel der Korrektheitstests ist es nachzuweisen, dass das arithmetische Mittel (Gleichung (5.12) in Kapitel 5.1.2.1) ein geeignetes Modell ist, um die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes bezüglich einer bestimmten Dienstgütegarantie vorherzusagen. Dies ist der Fall, wenn der Vorhersagefehler möglichst klein ist. Zusätzlich war der Einfluss der Länge n der Monitoring-Historie auf den Vorhersagefehler zu untersuchen.

Als Basis für die Korrektheitsuntersuchungen dienen die Monitoring-Historien der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten 14 Teildienste. Jede Monitoring-Historie wird in zwei Ab-

¹ Obere Grenze des 95-prozentigen Konfidenzintervalls unter Annahme einer Normalverteilung der quadratischen Fehler aller Monitoring-Historien. (Mittelwert der quadratischen Fehler aller 14 Messungen der Länge 150: $\mu = 0,00596$; Standardabweichung der quadratischen Fehler aller 14 Messungen der Länge 150: $\sigma = 0,0009413$; geschätzter Standardfehler: $S.E = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,0009413}{\sqrt{14}} = 0,0083$).

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgütezuvverlässigkeit eines Teildienstes

schnitte unterteilt. Der erste Abschnitt repräsentiert die Lernstichprobe auf deren Basis die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit $\overline{p_{s,e}^{F_n}}$ vorhergesagt wird. Hierfür werden 50 Testfälle durchgeführt, wobei sich pro Testfall die Länge der Lernstichprobe in 10er Schritten von 10 auf 500 erhöht.

An die Lernstichprobe variabler Länge, schließt sich die Kontrollstichprobe an. Sie besitzt jeweils 500 Einträge und dient zur Bestimmung des tatsächlichen Wertes $\overline{p_{s,e}^{A_n}}$ für die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit. Hierfür wird die Berechnungsvorschrift für die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit äquivalent auf die Kontrollstichprobe angewandt, d.h. der Prozentsatz ermittelt, mit der es in der Kontrollstichprobe zu Dienstgüteverletzungen kam. Abbildung 38 fasst die Vorgehensweise bei den Korrektheitsuntersuchungen für die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit zusammen.

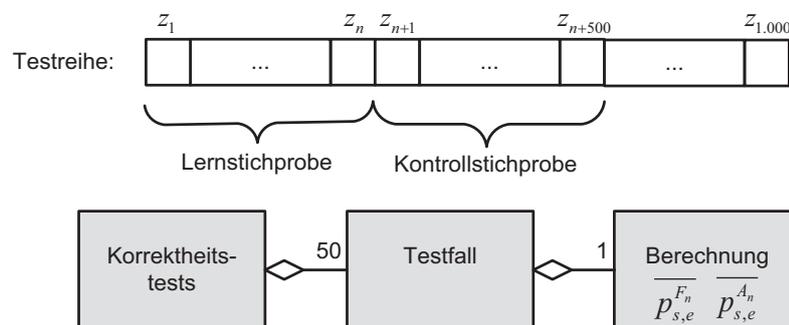


Abbildung 38: Methodik der Korrektheitstests für die Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit

7.2.2.2 Testergebnisse

Als Vorhersagefehler zur Beurteilung der Genauigkeit der vorhergesagten absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit dient der mittlere quadratische Fehler ε_n . Er berechnet sich gemäß Gleichung (7.5) aus dem Mittelwert der quadratischen Fehler zwischen vorhergesagter Verletzungswahrscheinlichkeit $\overline{p_{s,e}^{F_n}}$ und der tatsächlichen Verletzungswahrscheinlichkeit $\overline{p_{s,e}^{A_n}}$ aller m Testreihen. Die quadratischen Fehler aller Messungen der 14 Monitoring-Historien sind in Anhang D zu finden.

$$\varepsilon_{n,k} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\overline{p_{i,e}^{F_{n,k}}} - \overline{p_{i,e}^{A_{n,k}}})^2 \quad (7.5)$$

Den mittleren quadratischen Fehler aller neun simulierten Monitoring-Historien zeigt Abbildung 39. Deutlich ist zu erkennen, wie sich der mittlere quadratische Fehler mit zunehmender Länge n der Monitoring-Historie reduziert und bei ca. 100 Werten einschwingt. Dies liegt darin begründet, dass mit zunehmender Länge der Monitoring-Historie ein größerer Beobachtungszeitraum existiert und damit mehr Informationen über das Verhalten des Teildienstes. Je mehr Informationen über einen Dienst vorliegen, desto zuverlässiger können Vorhersagen bezüglich seines zukünftigen Verhaltens getätigt werden.

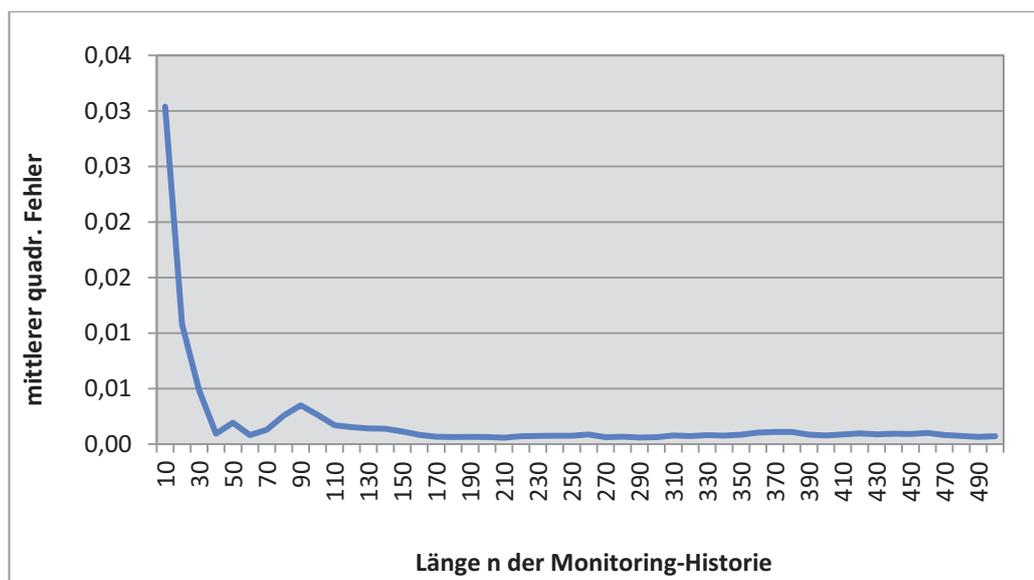


Abbildung 39: Mittlerer quadratischer Fehler generierter Monitoring-Historien bei der Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit

Das verhältnismäßig schnelle Einschwingen des mittleren quadratischen Fehlers bei 100 Einträgen auf maximal 0,01 ist mit der Charakteristik der simulierten Monitoring-Historien zu begründen. Diese sind so erstellt worden, dass sie zu einem festen Prozentsatz ihre Dienstgütegarantien verletzen. Genau dieser Prozentsatz entspricht der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit und wird ab einer Anzahl von ca. 100 Einträgen zuverlässig bestimmt. Darüber hinaus sind die Monitoring-Historien simulierter Dienste äußerst homogen, d.h. das Verhalten eines Dienstes ändert sich nicht. Bei realen Diensten wird dies nicht der Fall sein. Reale Dienste weisen Verhaltensänderungen auf, die zwar nicht sprunghaft auftreten, aber dennoch die Genauigkeit der Vorhersagen der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit beeinflussen. Um dies zu untersuchen wurden die Monitoring-Historien von fünf realen Diensten in die Korrektheitsuntersuchungen mit einbezogen.

Der mittlere quadratische Fehler der realen Monitoring-Historien ist in Abbildung 40 dargestellt. Die Grafik zeigt die gleiche Charakteristik wie dies bereits bei der Analyse des mittleren quadratischen Fehlers der simulierten Monitoring-Historien identifiziert wurde: Die Abnahme des mittleren quadratischen Fehlers mit zunehmender Länge n der untersuchten Monitoring-Historie. Diese Tatsache lässt sich auf die gleiche Weise wie bei den simulierten Teildiensten erklären.

Im Unterschied zu den simulierten Monitoring-Historien weisen die realen Historien jedoch einen größeren mittleren quadratischen Fehler auf, da reale Dienste weit weniger beständig in ihrem Verhalten sind als simulierte. Generell gilt, dass der mittlere quadratische Fehler umso größer ist, je heterogener und zufälliger ein Dienst in seinem Verhalten ist, da dies eine zuverlässige Vorhersage erschwert bzw. unmöglich macht. Insgesamt beträgt der mittlere Fehler aller fünf Teildienste maximal 0,1 und schwingt sich ab einer Länge von 150 Monitoring-Einträgen ein. Dies entspricht einer äußerst genauen Vorhersage.

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgütezverlässigkeit eines Teildienstes

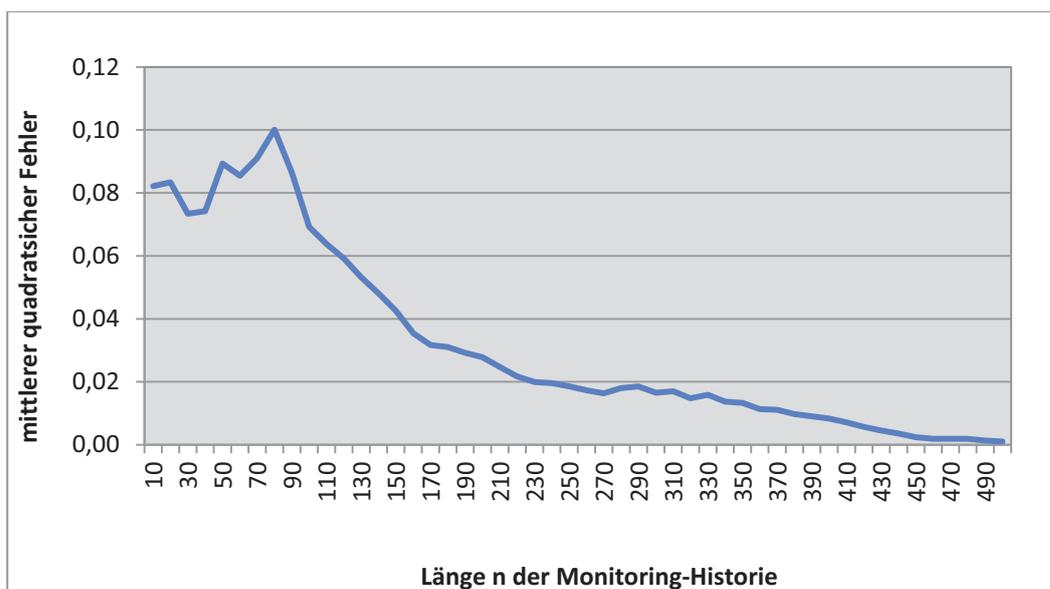


Abbildung 40: mittlerer quadratischer Fehler realer Monitoring-Historien bei der Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit

Fasst man die Testergebnisse sowohl der generierten als auch der realen Monitoring-Historien zusammen, so lässt sich folgendes über die Korrektheit bei der Vorhersage der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit sagen:

1. Je länger die verwendete Monitoring-Historie desto genauer werden die Vorhersagewerte. Als hinreichend genau wird eine Länge von 150 Einträgen angesehen. In diesem Fall beträgt der mittlere quadratische Fehler mit einer 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit maximal 0,03669¹.
2. Je homogener der betrachtete Teildienst in seinem Verhalten ist, desto zuverlässiger sind die vorhergesagten Werte. Beständiges Verhalten stellt die Grundlage jeglicher Vorhersagestrategien dar und ist keine Schwäche der in dieser Arbeit skizzierten Methode.

7.3 Zusammenfassung

Kapitel 7 widmete sich der Evaluierung zur Vorhersage der Dienstgütezverlässigkeit von Teildiensten. Diese wird je nach Kontext in Form der relativen oder der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit gemessen und auf Basis der Monitoring-Historie der Dienste bestimmt. Im Fokus der Evaluierung standen Performanz- sowie Korrektheitsuntersuchungen.

Die Performanz-Untersuchungen zeigen, dass die Vorhersage beider Verletzungswahrscheinlichkeiten eine lineare Zeitkomplexität in Abhängigkeit der Anzahl der Monitoring-Einträge aufweist. Hierbei erfolgt die Ermittlung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis einer Markov-Kette in wenigen hundert Mikrosekunden, die der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis des arithmetischen Mittels in wenigen Millisekunden. Dies macht die Vorhersage der Verletzungswahrscheinlichkeiten zu einer äußerst effizienten Methode.

Im Rahmen der Korrektheitstests wurde die Zuverlässigkeit beider Vorhersageverfahren auf Basis von Monitoring-Historien neun simulierter und fünf realer Dienste untersucht. Unter der

¹ Obere Grenze des 95-prozentigen Konfidenzintervalls unter Annahme einer Normalverteilung der quadratischen Fehler aller Monitoring-Historien. (Mittelwert der quadratischen Fehler aller 14 Messungen der Länge 150: $\mu = 0,01595$; Standardabweichung der quadratischen Fehler aller 14 Messungen der Länge 150: $\sigma = 0,036$; geschätzter Standardfehler: $S.E = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,036}{\sqrt{14}} = 0,0096$).

Annahme, dass das zukünftige Verhalten eines Dienstes dem vergangenen ähnelt, kann die Vorhersage der relativen wie der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit als äußerst genau eingestuft werden. Für die Bestimmung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit ist eine Markov-Kette erster Ordnung mit mind. 150 Einträgen zu verwenden, für die Ermittlung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit sind mind. 250 Einträge erforderlich. Der mittlere quadratische Fehler beträgt im ersten Fall mit einer 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit maximal 0,0238, im zweiten Fall maximal 0,03669.

7. Evaluation zur Vorhersage der Dienstgütezuerlässigkeit eines Teildienstes

8. Evaluation zur Bestimmung der Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans

Die Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans kann gemäß Kapitel 4 in Form der Verletzungsmatrizen der einzelnen Dienstgütegarantien der zusammengesetzten Dienstleistung bewertet werden oder in Form der Verletzungszahl als einfacher numerischer Wert. Erstere Metrik ist immer dann sinnvoll, wenn in Abhängigkeit der Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans Entscheidungen über die Dienstgüte der Komposition, über den Einsatz von Kompensierungsstrategien oder über die Wirtschaftlichkeit getroffen werden sollen. Die Metrik der Verletzungszahl dient als einfaches Vergleichskriterium zwischen mehreren Ausführungsplänen. Zur Evaluierung der Bestimmung der Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans waren zwei Aspekte zu untersuchen: (1) die Übereinstimmung der berechneten Werte mit den tatsächlichen Werten und (2) die konkrete Darstellung des Laufzeitverhaltens.

Die Aufstellung der Verletzungsmatrizen bzw. der Verletzungszahl eines Ausführungsplans basiert auf den in Kapitel 5.2 angegebenen Gleichungen (5.20) bis (5.23) bzw. auf Basis der Gleichungen (5.31) bis (5.33). Als vorbereitender Schritt ist für jeden Teildienst der zusammengesetzten Dienstleistung anhand des Ablaufplans die Anzahl von Aufrufen zu ermitteln. Die Liste der Teildienstaufrufe bildet zusammen mit den Dienstgütegarantien die Eingaben für die eigentliche Berechnung. Auf diese Weise wird die Ermittlung der Dienstgütezuverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung unabhängig von ihrer Kontrollstruktur.

Die Liste der Teildienstaufrufe enthält die Teildienste sowie deren erwartete Dienstgütezuverlässigkeit als absolute oder relative Verletzungswahrscheinlichkeit. Wird die relative Wahrscheinlichkeit verwendet, so hat auch die berechnete Dienstgütezuverlässigkeit des Ausführungsplans relativen Charakter. Analoges gilt für die Verarbeitung der absoluten Wahrscheinlichkeit. Die Ermittlung der absoluten und der relativen Dienstgütezuverlässigkeit eines Ausführungsplans unterscheidet sich demzufolge lediglich in den Eingaben.

In den folgenden zwei Kapiteln werden Details und Ergebnisse der Performanz- und Korrektheitstests erläutert. Für die Durchführung der Tests wurden die in Kapitel 5.2 angegebenen Formeln als Java-Programme implementiert. Die dazugehörigen Struktogramme sind in Anhang B zu finden.

8.1 Performanz

8.1.1 Verletzungsmatrix

8.1.1.1 *Aufbau der Testumgebung*

Ziel der Performanz-Untersuchungen ist es, den Einfluss der Anzahl z von Teildienstaufrufen und der Anzahl d von Dienstgütegarantien einer zusammengesetzten Dienstleistung auf die Berechnungszeit $t_{z,d}$ der Verletzungsmatrizen zu analysieren. Hierfür werden 10 Testfälle durchgeführt, wobei sich für jeden Testfall die Anzahl von Dienstgütegarantien schrittweise von 1 auf 10 erhöht. Für die Analyse der Abhängigkeit der Berechnungszeit von der Anzahl von Teildienstaufrufen wird jeder Testfall 30-mal wiederholt. Hierbei erhöht sich die Anzahl von Teildienstaufrufen schrittweise von 1 auf 30. Um den Einfluss von sporadisch auftretenden Prozessen, wie z.B. den Java-Garbage-Collector, zu reduzieren, erfolgen pro Wiederholung 50 Messungen der Berechnungszeit. Die Vorgehensweise bei der Durchführung der Performanz-Tests ist in Abbildung 41 verdeutlicht.

8. Evaluation zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans

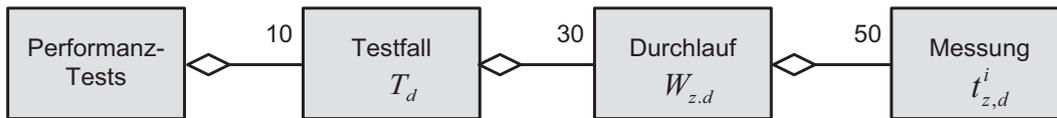


Abbildung 41: Methodik der Performanz-Tests zur Bestimmung aller Verletzungsmatrizen eines Ausführungsplans

Die Dienstgütezuerlässigkeit der Teildienste, gemessen als Verletzungswahrscheinlichkeit, wurde für jede Messung zufällig bestimmt und lag im Bereich von 0,1 bis 0,9. Eine getrennte Betrachtung von absoluter und relativer Dienstgütezuerlässigkeit war nicht nötig, da die Berechnungsverfahren in beiden Fällen identisch sind. Als Basis für die Berechnung dienten Gleichung (5.20) bis Gleichung (5.23).

Zur Automatisierung der Performanz-Tests wurde ein entsprechendes Java-Programm erstellt und der Algorithmus direkt mit den notwendigen Java-Objekten angesteuert. Die Testdurchführung fand auf einem Lenovo T61 (Duo-Core, 3 GB RAM) mit Windows XP Service Pack 3 als Betriebssystem statt.

8.1.1.2 Testergebnisse

Als Maß für die Berechnungszeit $t_{z,d}$ zur Ermittlung der Verletzungsmatrizen dient die mittlere Berechnungszeit. Sie ermittelt sich aus dem arithmetischen Mittel der Berechnungszeiten aller 50 Messungen einer Wiederholung eines Testfalls (siehe Gleichung 7.6).

$$t_{z,d} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} t_{z,d}^i \quad (7.6)$$

Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse der Performanz-Untersuchungen in Abhängigkeit der Anzahl z der Teildienste und der Anzahl d von Dienstgütegarantien (SLO) für $z \leq 20$. Die genauen Messwerte für die Berechnungszeiten können Anhang C entnommen werden.

In der graphischen Darstellung ist deutlich das exponentielle Laufzeitverhalten bei der Ermittlung aller Verletzungsmatrizen zu erkennen. Es wurde bereits während der Komplexitätsbetrachtung in Kapitel 6.2.2.1 identifiziert. Trotzdem arbeitet der Algorithmus verhältnismäßig schnell. In rund zwei Sekunden erfolgt die Ermittlung aller Verletzungsmatrizen für einen Ausführungsplan einer zusammengesetzten Dienstleistung mit 20 Teildiensten und 10 Dienstgütegarantien. Für zusammengesetzte Dienstleistungen kleiner und mittlerer Größe ist die Berechnung daher unproblematisch.

Eine weitere wichtige Erkenntnis der Performanz-Untersuchungen ist die Tatsache, dass die Anzahl der Dienstgütegarantien, die während der Berechnung zu berücksichtigen sind, nur geringfügigen Einfluss auf die Berechnungszeit hat. Tatsächlich liegt der Performanz-Unterschied zwischen einer und zehn Dienstgütegarantien im Bereich von Millisekunden.

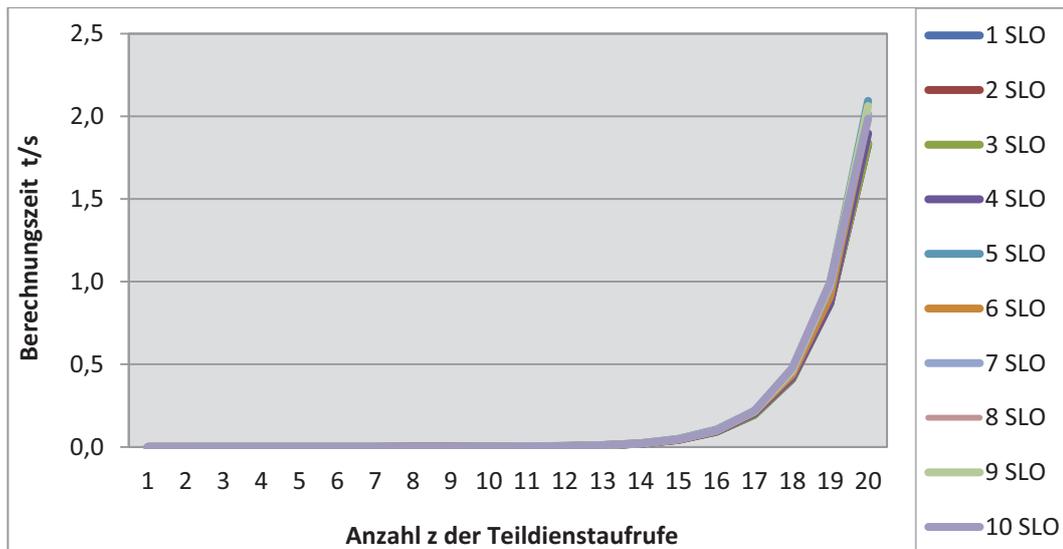


Abbildung 42: Berechnungszeit für die Aufstellung aller Verletzungsmatrizen eines Ausführungsplans für $z \leq 20$

Abbildung 43 zeigt die Ergebnisse der Performanz-Untersuchungen für Kompositionen mit mehr als 20 Teildiensten. Die genauen Messwerte für die Berechnungszeit sind in Anhang C zu finden. Wie auch schon in Abbildung 42 ist das exponentielle Wachstum der Berechnungszeit zu erkennen. Zusätzlich wird deutlich, dass zusammengesetzte Dienstleistungen mit mehr als 20 Teildienstaufrufen nicht effizient bearbeitet werden können. Die Berechnungszeit liegt in diesem Fall bei knapp einer Stunde.

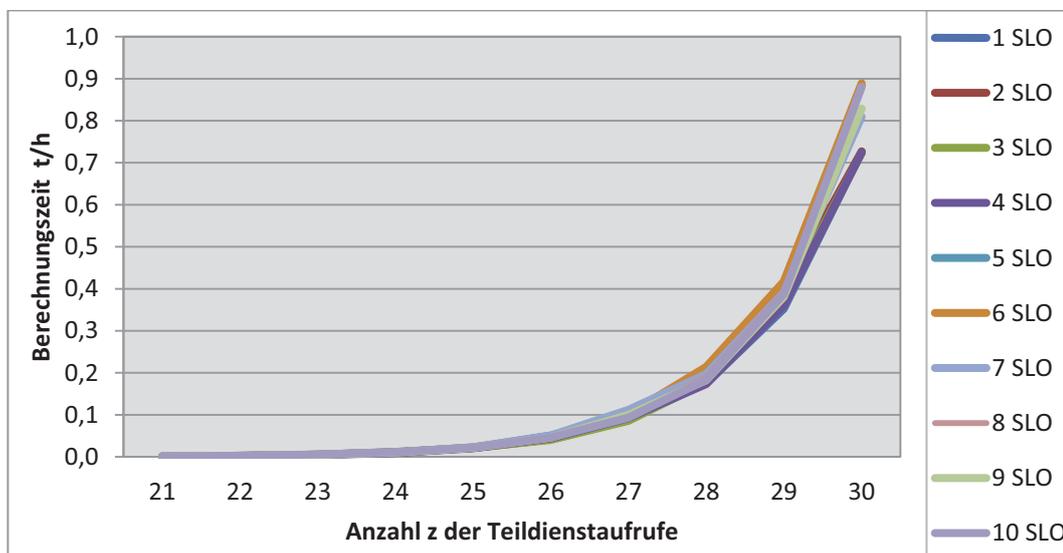


Abbildung 43: Berechnungszeit für die Aufstellung aller Verletzungsmatrizen eines Ausführungsplans für $z > 20$

Wie die Performanz-Untersuchungen (siehe Abbildung 42 und Abbildung 43) sowie die Betrachtung der Zeitkomplexität zur Aufstellung aller Verletzungsmatrizen zeigen, können zusammengesetzte Dienstleistungen mit einer großen Anzahl von Teildienstaufrufen aufgrund der inakzeptablen Berechnungszeit nicht verarbeitet werden. Dies ist erst möglich, wenn die Berechnung optimiert wird. Eine Optimierung hat bereits in Kapitel 5.2.1 stattgefunden. Hierbei wurde auf die vollständige Auflistung aller Fehlerfälle (Gleichung (5.18)) verzichtet und stattdessen zur Berech-

8. Evaluation zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans

nung der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine bestimmte Anzahl von Dienstgüterverletzungen die aggregierte Formel in Gleichung (5.20) bis Gleichung (5.23) verwendet. Zur Bewertung dieser Optimierung wurden beide Varianten implementiert sowie die Berechnungszeit mit dem in Kapitel 8.1.1.1 skizzierten Versuchsaufbau gemessen.

Abbildung 44 zeigt die Ergebnisse der vergleichenden Messungen zwischen dem originalen und dem optimierten Berechnungsverfahren exemplarisch für eine zusammengesetzte Dienstleistung mit fünf Dienstgütegarantien. Die genauen Messwerte aller Testfälle finden sich in Anhang C. In Abbildung 44 ist deutlicher der Performanz-Unterschied bei Einsatz der Optimierung zu erkennen. Für eine numerische Beurteilung wurde der Performanz-Gewinn $pg_{z,d}$ pro Anzahl z von Teildienstaufrufen und Anzahl d von Dienstgüteeigenschaften ermittelt. Er berechnet sich nach Gleichung (7.7) aus der prozentualen Differenz zwischen der mittleren Berechnungszeit $t_{z,d}^{org}$ des originalen und der mittleren Berechnungszeit $t_{z,d}^{opt}$ des optimierten Verfahrens.

$$pg_{z,d} = \frac{t_{z,d}^{org} - t_{z,d}^{opt}}{t_{z,d}^{org}} \quad (7.7)$$

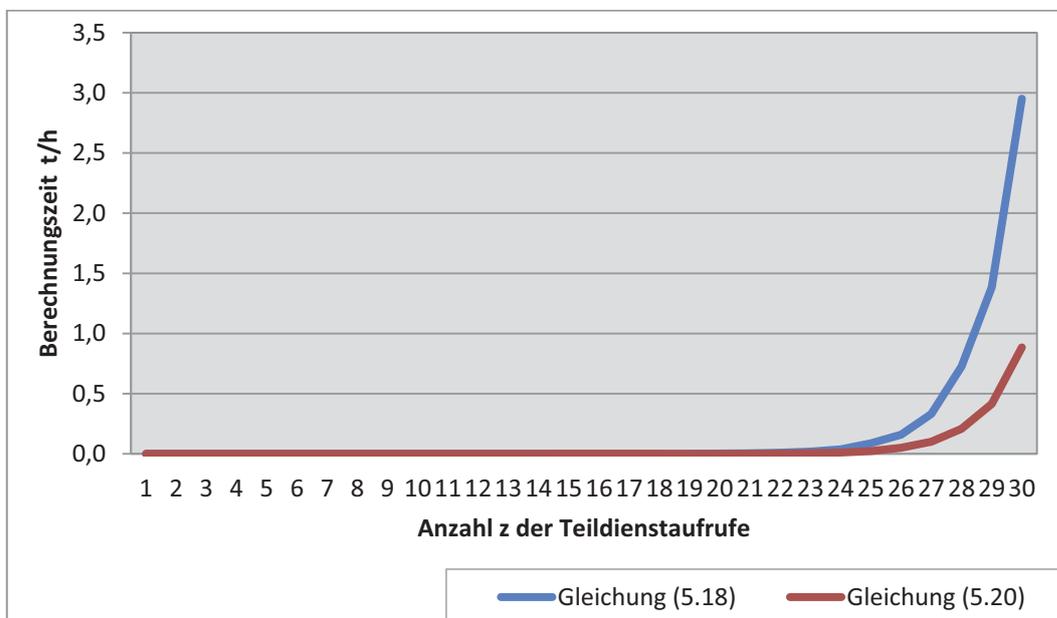


Abbildung 44: Performanz-Unterschied bei der Aufstellung aller Verletzungsmatrizen eines Ausführungsplans

Auf Basis des Performanz-Gewinnes kann der mittlere Performanz-Gewinn pg_z in Abhängigkeit der Anzahl z von Teildienstaufrufen über alle Testergebnisse bestimmt werden. Er liefert einen aussagenkräftigen Wert als Maß für die Optimierung und berechnet sich nach Gleichung (7.8) aus dem arithmetischen Mittel der Performanz-Gewinne aller Messungen.

$$pg_z = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d pg_{z,i} \quad (7.8)$$

Abbildung 45 zeigt den mittleren Performanz-Gewinn in Abhängigkeit der Anzahl z von Teildienstaufrufen bei Einsatz der in Kapitel 5.2.1.1 identifizierten Optimierung. Die Optimierung erzielt einen Performanz-Gewinn von ca. 70 Prozent und ist äußerst lohnenswert.

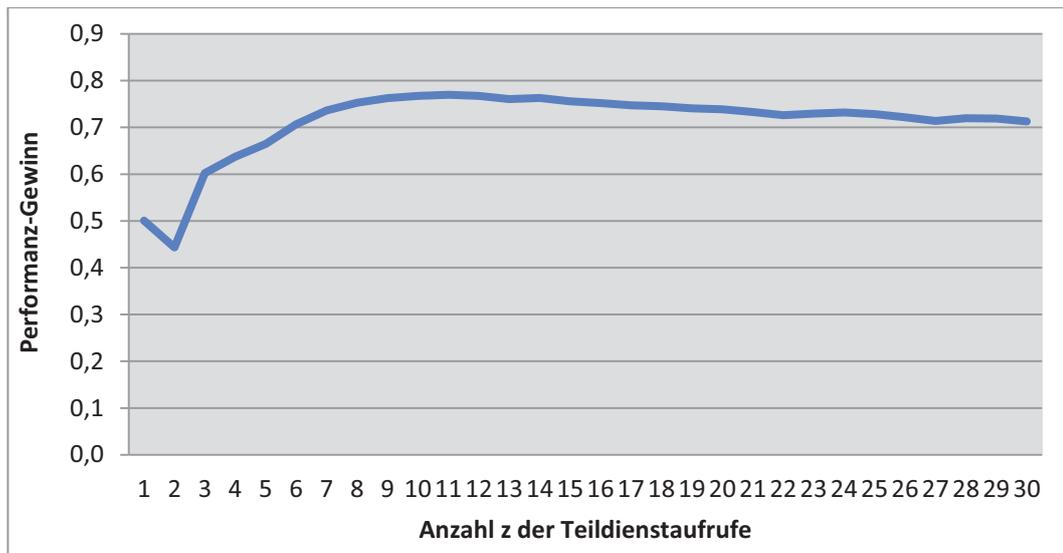


Abbildung 45: Mittlerer Performanz-Gewinn beim Einsatz des optimierten Verfahrens zur Aufstellung aller Verletzungsmatrizen eines Ausführungsplans

Zur weiteren Optimierung kann die Aufstellung aller Verletzungsmatrizen parallelisiert werden. Dies ist vor allem auf Multi-Core-Systemen vorteilhaft. In der Praxis ist davon auszugehen, dass die Berechnung der Dienstgütezulässigkeit eines Ausführungsplans auf leistungsfähigen Servern erfolgt, die in der Regel mit vier bzw. acht Prozessoren ausgestattet sind. Dies führt zu einem weiteren deutlichen Performanz-Gewinn, so dass auch die Verarbeitung von zusammengesetzten Dienstleistungen mit mehr als 20 Teildienstaufrufen in einer akzeptablen Ausführungszeit erfolgen kann. Darüber hinaus erfolgt die Aufstellung der Verletzungsmatrizen in der Regel vor Einsatz und Ausführung einer Dienstleistung, um z.B. Entscheidungen über die Wirtschaftlichkeit eines Ausführungsplans zu treffen. Die exponentielle Zeitkomplexität ist daher weniger dramatisch. Für einen effizienten Vergleich verschiedener Ausführungspläne u.a. während der Laufzeit von zusammengesetzten Dienstleistungen z.B. im Rahmen erneuten Bindens, sollte die Verletzungszahl gewählt werden, die eine lineare Berechnungszeit besitzt.

8.1.2 Verletzungszahl

8.1.2.1 Aufbau der Testumgebung

Mit Hilfe der Performanz-Tests zur Bestimmung der Verletzungszahl eines Ausführungsplans sollte geprüft werden, welchen Einfluss die Anzahl z von Teildienstaufrufen und die Anzahl d von Dienstgüteverletzungen der zusammengesetzten Dienstleistung auf die Berechnungszeit $t_{z,d}$ hat. Zu diesem Zweck werden 10 Testfälle durchgeführt. Pro Testfall erhöht sich die Anzahl von Dienstgüteverletzungen schrittweise von 1 auf 10. Um die Abhängigkeit der Berechnungszeit von der Anzahl der Teildienstaufrufe zu bestimmen, werden pro Testfall 30 Durchläufe durchgeführt, wobei sich die Anzahl von Teildienstaufrufen schrittweise von 1 auf 30 erhöhte. Zur Reduktion des Einfluss unregelmäßig auftretender Prozesse auf die Berechnungszeit, wird diese pro Testfall 50-mal gemessen. Abbildung 46 fasst die Vorgehensweise bei der Durchführung der Performanz-Tests für die allgemeine Verletzungszahl zusammen.

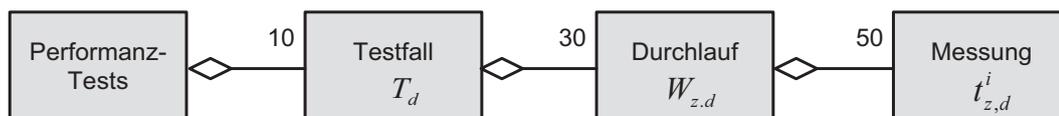


Abbildung 46: Methodik der Performanz-Tests zur Bestimmung der Verletzungszahl eines Ausführungsplans

8. Evaluation zur Bestimmung der Dienstgütezulverlässigkeit eines Ausführungsplans

Als Berechnungszeit $t_{z,d}$ für die allgemeine Verletzungszahl eines Ausführungsplans einer zusammengesetzten Dienstleistung mit d Dienstgütegarantien und z Teildienstaufrufen gilt das arithmetische Mittel aus den 50 Messungen eines Testfalls (siehe Gleichung 7.9).

$$t_{z,d} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} t_{z,d}^i \quad (7.9)$$

Wie auch schon bei der Durchführung der Performanz-Tests zur Aufstellung aller Verletzungsmatrizen, lag die Dienstgütezulverlässigkeit der Teildienste, gemessen als Verletzungswahrscheinlichkeit, im Bereich von 0,1 bis 0,9 und wurde für jede Messung zufällig bestimmt. Eine getrennte Betrachtung von absoluter und relativer Dienstgütezulverlässigkeit war nicht nötig, da die Berechnungsverfahren in beiden Fällen identisch sind. Die Durchführung der Tests fand auf einem Lenovo T61 (Duo-Core, 3 GB RAM) mit Windows XP Service Pack 3 als Betriebssystem statt.

8.1.2.2 Testergebnisse

Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse der Performanz-Untersuchungen zur Ermittlung der allgemeinen Verletzungszahl eines Ausführungsplans in Abhängigkeit der Anzahl z von Teildienstaufrufen und der Anzahl d von Dienstgüteverletzungen der zusammengesetzten Dienstleistung. Die genauen Messwerte sind in Anhang C zu finden. Deutlich zu erkennen ist der Anstieg der Berechnungszeit mit zunehmender Anzahl von Teildienstaufrufen. Dies ergibt sich aus der Arbeitsweise des Algorithmus (siehe Struktogramm in Anhang B), der mit jedem zusätzlichen Teildienstaufrufe eine weitere Addition ausführen muss (siehe Gleichung (5.31) in Kapitel 5.2.2.1 Dies führt zu einer linearen Zeitkomplexität für die Ermittlung der allgemeinen Verletzungszahl in Abhängigkeit der Anzahl von Teildienstaufrufen. Die Zeitkomplexität ist im Diagramm in Abbildung 47 deutlich zu erkennen und wurde bereits im Kapitel 6.2.2.2 identifiziert. Folglich ist die Berechnung der allgemeinen Verletzungszahl äußerst effizient mit einer Berechnungszeit von ca. 40 Mikrosekunden für eine Dienstleistung mit 30 Teildienstaufrufen und 10 Dienstgüteverletzungen.

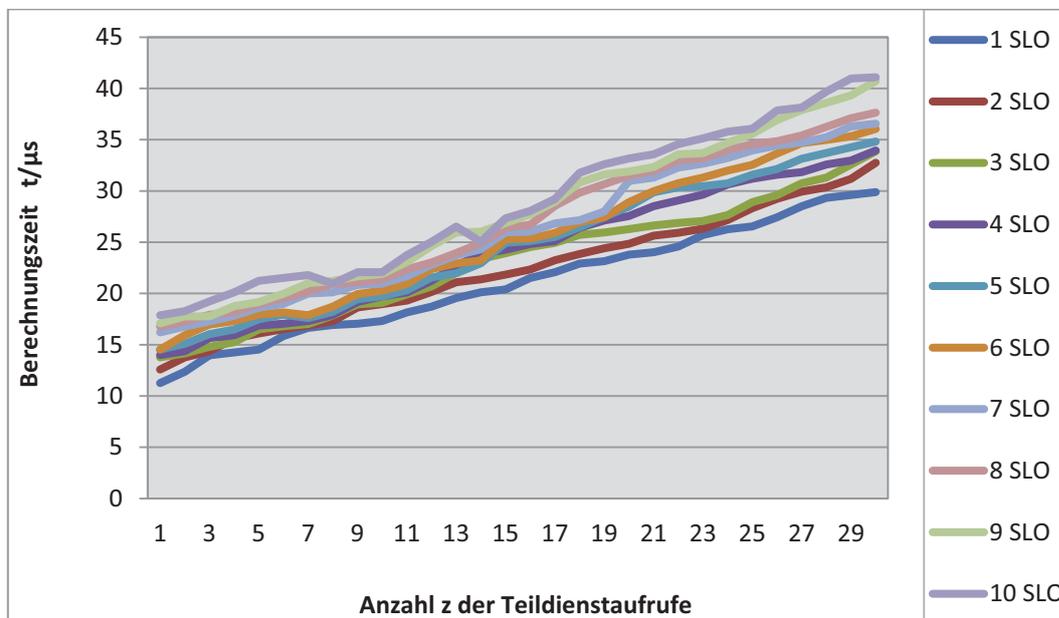


Abbildung 47: Berechnungszeit für die Ermittlung der allgemeinen Verletzungszahl

Zu erwarten war auch der Anstieg der Berechnungszeit mit zunehmender Anzahl d von Dienstgütegarantien. Gemäß Gleichung (5.32) und (5.33) in Kapitel 5.2.2, muss für jede zusätzli-

che Dienstgütegarantie eine weitere Verletzungszahl berechnet werden, die gewichtet zur allgemeinen Verletzungszahl hinzuaddiert wird.

8.2 Korrektheit

8.2.1 Verletzungsmatrix

8.2.1.1 Aufbau der Testumgebung

Ziel der Korrektheitsuntersuchungen ist es zu zeigen, dass der Algorithmus zur Ermittlung einer Verletzungsmatrix hinreichend genauer Werte liefert. Die Verletzungsmatrix besteht aus der Menge aller Zweitupel, die jeder Anzahl k von Dienstgüteverletzungen innerhalb des Ausführungsplans ihre Eintrittswahrscheinlichkeit zuordnen. Die Zweitupel sind hinreichend korrekt, wenn die Abweichung zwischen den berechneten Eintrittswahrscheinlichkeiten und den tatsächlichen Werten gering ist. Zu diesem Zweck werden die Verletzungsmatrizen von acht BPEL Prozessen rechnerisch sowie empirisch ermittelt. Die BPEL Prozesse mit insgesamt drei bis zehn Teildienstaufrufen unterschiedlicher Struktur sind im Anhang E dargestellt. Jeder BPEL Prozess besitzt drei Dienstgütegarantien: (1) SLO1, (2) SLO2 und (3) SLO3.

Als Teildienste dienen 19 JAX-WS Web Services. Ihre Aufgabe besteht darin, zurückzugeben, ob eine Dienstgüteverletzung für die SLO1, SLO2 und SLO3 beim Aufruf des Teildienstes stattgefunden hat. Die Verletzungswahrscheinlichkeiten der einzelnen Teildienste für die SLO1, SLO2 und SLO3 sind in Tabelle 17 dargestellt.

| Teildienst | Dienstgütezuverlässigkeit | | |
|---------------|---------------------------|------|------|
| | SLO1 | SLO2 | SLO3 |
| SLOViolator05 | 0,05 | 0,07 | 0,09 |
| SLOViolator10 | 0,10 | 0,12 | 0,14 |
| SLOViolator15 | 0,15 | 0,17 | 0,19 |
| SLOViolator20 | 0,20 | 0,22 | 0,24 |
| SLOViolator25 | 0,25 | 0,27 | 0,29 |
| SLOViolator30 | 0,30 | 0,32 | 0,34 |
| SLOViolator35 | 0,35 | 0,37 | 0,39 |
| SLOViolator40 | 0,40 | 0,42 | 0,44 |
| SLOViolator45 | 0,45 | 0,47 | 0,49 |
| SLOViolator50 | 0,50 | 0,52 | 0,54 |
| SLOViolator55 | 0,55 | 0,57 | 0,59 |
| SLOViolator60 | 0,60 | 0,62 | 0,64 |
| SLOViolator65 | 0,65 | 0,67 | 0,69 |
| SLOViolator70 | 0,70 | 0,72 | 0,74 |
| SLOViolator75 | 0,75 | 0,77 | 0,79 |
| SLOViolator80 | 0,80 | 0,82 | 0,84 |
| SLOViolator85 | 0,85 | 0,87 | 0,89 |
| SLOViolator90 | 0,90 | 0,92 | 0,94 |
| SLOViolator95 | 0,95 | 0,97 | 0,99 |

Tabelle 17: Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienste

Die Simulation der Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes erfolgt auf Basis eines Zufallsgenerators. Dieser erzeugt eine Zufallszahl vom Typ double im Wertebereich von 0 bis 1. Ist die Zufallszahl kleiner oder gleich der Verletzungswahrscheinlichkeit, so liegt eine Dienstgüteverletzung bei Aufruf des Teildienstes vor. Um dies zu publizieren, besitzt jeder Teildienst die Methode „run()“, welche ein drei-elementiges Feld vom Typ Integer zurückgibt. Das erste Element enthält die Information über eine Dienstgüteverletzung der SLO1. Analoges gilt für das

8. Evaluation zur Bestimmung der Dienstgütezverlässigkeit eines Ausführungsplans

zweite und dritte Element. Hierbei kennzeichnet eine Null die Einhaltung und eine Eins die Verletzung der Dienstgütegarantie. Listing 1 zeigt den Quellcode der Teildienste.

```
public int[] run()
{
    int[] errors = { 0, 0, 0 };
    double next = 0;

    for (int i = 1; i <= 3; i++)
    {
        next = getRandom().get().nextDouble();
        if (next <= getProb(i))
            errors[i - 1] = 1;
        else
            errors[i - 1] = 0;
    }
    return errors;
}
```

Listing 1: Funktionsweise und Simulation der Dienstgütezverlässigkeit der Teildienste

Die Aufgabe der BPEL Prozesse besteht darin, eine bestimmte Anzahl von Teildiensten in einer vorgegebenen Reihenfolge aufzurufen (siehe Anhang E). Die durch die Teildienste verursachten Dienstgüteverletzungen pro Eigenschaft werden gezählt, indem die entsprechenden Felder addiert werden. Den Rückgabewert des BPEL Prozesses bildet ebenfalls ein drei-elementiges Feld, welches die Anzahl von Dienstgüteverletzungen für die SLO1, SLO2 und SLO 3 enthält.

Für die empirische Ermittlung der Dienstgütezverlässigkeit eines BPEL Prozesses wird dieser wiederholt aufgerufen und protokolliert wie viele Dienstgüteverletzungen für die SLO1, die SLO2 und die SLO3 auftraten. Insgesamt gibt es vier Versuchsreihen mit jeweils 100, 1.000, 10.000 und 1000.000 Prozessaufrufen. Tabelle 18 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung beispielhaft für Prozess 1 bei 100 Aufrufen. Die genauen Messwerte der Korrektheitsuntersuchungen aller vier Testreihen sind in Anhang D zu finden. Auf Basis der empirisch gewonnenen Informationen war es möglich die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Verletzungsmatrizen zu evaluieren.

| Anzahl von Dienstgüteverletzungen | Häufigkeit | | |
|-----------------------------------|------------|------|------|
| | SLO1 | SLO2 | SLO3 |
| 0 | 1 | 3 | 0 |
| 1 | 61 | 60 | 51 |
| 2 | 26 | 25 | 38 |
| 3 | 10 | 11 | 8 |
| 4 | 2 | 1 | 3 |
| 5 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle 18: Häufigkeit von Dienstgüteverletzungen von Prozess 1 bei 100 Aufrufen

Da sowohl die relative als auch die absolute Dienstgütezuvverlässigkeit eines Ausführungsplans nach demselben Verfahren bestimmt wird, dient die oben skizzierte Testumgebung sowohl zur Evaluation der Berechnung der relativen als auch der absoluten Verletzungsmatrizen.

Die relative Verletzungsmatrix enthält die Eintrittswahrscheinlichkeiten für Dienstgüteverletzungen zum nächsten Aufruf der Komposition. Um dies zu evaluieren, wird die Komposition mehrmals aufgerufen und die Häufigkeit jeder Anzahl von Dienstgüteverletzungen gemessen. Genau dies erfolgt im Rahmen der verschiedenen Versuchsreihen.

Die absolute Verletzungsmatrix definiert die Eintrittswahrscheinlichkeiten, die im Mittel für jede Anzahl von Dienstgüteverletzungen zu erwarten sind. Um dies zu evaluieren, muss die Komposition über einen längeren Zeitraum hinweg beobachtet werden. Dieses Vorgehen entspricht ebenfalls dem skizzierten Versuchsaufbau.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Evaluierung zur Berechnung der relativen und der absoluten Verletzungsmatrizen identisch sind und sich lediglich in der Interpretation des Versuchsaufbaus und der ermittelten Werte unterscheiden. Aus diesem Grund wird im Folgenden allgemein von der Evaluierung der Berechnung der Verletzungsmatrix eines Ausführungsplans gesprochen.

8.2.1.2 Testergebnisse

Für die Aufstellung einer Verletzungsmatrix ist die Eintrittswahrscheinlichkeit für jede mögliche Anzahl von Dienstgüteverletzungen zu bestimmen. Bei z Teildienstaufrufen kann es zu 0 bis z möglichen Verletzungen der Dienstgütegarantie e kommen. Ersteres ist der Fall, wenn jeder Teildienst seine vorgegebene Dienstgüte einhält, letzteres ist der Fall, wenn die Einhaltung der Dienstgüte bei jedem Teildienstaufruf misslingt.

Die untersuchten BPEL Prozesse besitzen drei Dienstgütegarantien: (1) SLO1, (2) SLO2 und (3) SLO3. Die Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{i,e}^F$ mit der es zu i Verletzungen der Garantie e kommt, wird auf Basis der Gleichungen (5.20) bis (5.23) aus Kapitel 5.2.1 sowie den in Tabelle 17 gegebenen Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienstaufrufe berechnet.

Die Bestimmung der tatsächlichen Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{i,e}^A$ erfolgt anhand der wiederholten Ausführung der BPEL Prozesse, wie dies im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde. Hierbei wird die Häufigkeit $m_{i,e}$ bestimmt, mit der i Verletzungen der Dienstgütegarantie e während l Ausführungen eines Prozesses auftraten. Die Wahrscheinlichkeit $p_{i,e}^A$ ermittelt sich daraufhin gemäß Gleichung (7.10) aus der Division der Häufigkeit $m_{i,e}$ durch die Anzahl l .

$$p_{i,e}^A = \frac{m_{i,e}}{l} \quad (7.10)$$

Auf Basis der Messergebnisse lässt sich der quadratische Fehler $\varepsilon_{i,e}^p$ bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für i Verletzungen der Dienstgüteeigenschaft e im Prozess p ermitteln. Der quadratische Fehler definiert sich nach Gleichung (7.11) aus dem Quadrat der Differenz zwischen berechneter und empirisch ermittelter Eintrittswahrscheinlichkeit.

$$\varepsilon_{i,e}^p = (p_{i,e}^F - p_{i,e}^A)^2 \quad (7.11)$$

Insgesamt gab es vier Versuchsreihen mit jeweils 100, 1.000, 10.000 und 100.000 Dienstauffufen. Pro Versuchsreihe, Prozess, Dienstgütegarantie und Anzahl von Dienstgüteverletzungen wurden die Eintrittswahrscheinlichkeit sowie ihr quadratischer Fehler berechnet. Tabelle 19 zeigt die Ergebnisse exemplarisch für die Eigenschaft „SLO3“ von Prozess1 bei 100 Aufrufen. Eine vollständige Auflistung aller Testergebnisse findet sich in Anhang D.

8. Evaluation zur Bestimmung der Dienstgütezverlässigkeit eines Ausführungsplans

| Anzahl i von Dienstgüteverletzungen | Wahrscheinlichkeit (berechnet) $P_{i,SLO3}^F$ | Wahrscheinlichkeit (gemessen) $P_{i,SLO3}^A$ | Berechnungsfehler $\varepsilon_{i,SLO3}$ |
|---------------------------------------|--|---|---|
| 0 | 0,00482 | 0,00000 | 0,00002321 |
| 1 | 0,48086 | 0,51000 | 0,00084896 |
| 2 | 0,38844 | 0,38000 | 0,00007116 |
| 3 | 0,11184 | 0,08000 | 0,00101360 |
| 4 | 0,01348 | 0,03000 | 0,00027300 |
| 5 | 0,00057 | 0,00000 | 0,00000032 |

Tabelle 19: Quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für i Verletzungen der Dienstgüteeigenschaften SLO3 bei 100 Aufrufen von Prozess1

Aufbauend auf den quadratischen Fehlern kann der mittlere quadratische Fehler $\bar{\varepsilon}$ einer Versuchsreihe als Maß für die Korrektheit bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt werden. Hierfür ist gemäß Gleichung (7.12) zuerst spezifisch für jeden der p Prozesse das arithmetische Mittel der $z+1$ Eintrittswahrscheinlichkeiten aller d Dienstgütegarantien zu bilden. Der Durchschnitt aus diesen p Werten bildet den mittleren quadratischen Fehler einer Versuchsreihe.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left[\frac{1}{z+1} \sum_{j=0}^z \left[\sum_{k=1}^d \varepsilon_{j,k}^i \right] \right] \quad (7.12)$$

Abbildung 48 zeigt den mittleren quadratischen Fehler für alle vier Versuchsreihen. Er liegt für die Testreihe mit 100 Prozessaufrufen bei 0,00355566, für die Testreihe mit 1.000 Prozessaufrufen bei 0,00008862, für die Testreihe mit 10.000 Prozessaufrufen bei 0,00001196 und für die Testreihe mit 100.000 Prozessaufrufen bei 0,00000373.

Deutlich zu erkennen ist, dass der mittlere quadratische Fehler mit zunehmender Anzahl von Prozessaufrufen geringer wird. Dies liegt darin begründet, dass bei zunehmender Anzahl von Prozessaufrufen längere Beobachtungszeiträume vorliegen, die wiederum genauere Werte liefern. Allerdings wird diese Abweichung umso geringer je länger der Beobachtungszeitraum ist. Den größten Unterschied zwischen benachbarten Versuchsreihen findet sich zwischen 100 und 1.000 Prozessaufrufen. Ein Beobachtungszeitraum von 1.000 Prozessaufrufen scheint für die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten ausreichend zu sein. Für die Ermittlung der absoluten Dienstgütezverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung bedeutet dies, dass der Algorithmus hinreichend korrekte Werte liefert, wenn mit mindestens 1.000 Dienstaufrufen zu rechnen ist.

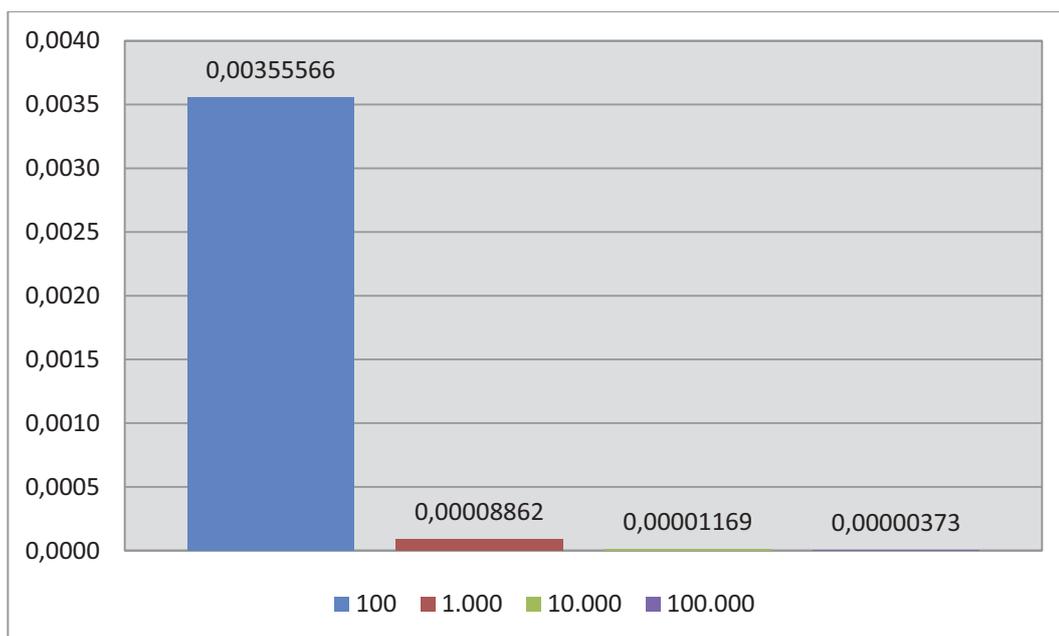


Abbildung 48: Mittlerer quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer bestimmten Anzahl von Dienstgütereinrichtungen

Fasst man die im vergangenen beschriebenen Testergebnisse zusammen, so lässt sich folgendes über die Korrektheit bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Verletzungsmatrizen sagen:

1. Je länger der Beobachtungszeitraum für die empirische Untersuchung der ist, desto genauer sind die ermittelten Werte für die Eintrittswahrscheinlichkeiten. Als hinreichend haben sich 1.000 Messungen erwiesen. In diesem Fall liegt der mittlere quadratische Fehler für die Eintrittswahrscheinlichkeit einer bestimmten Anzahl von Dienstgütereinrichtungen mit einer 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit bei maximal 0,0000886¹. Dies entspricht einer sehr guten Genauigkeit.
2. Die Verletzungsmatrix für die Dienstgütegarantie e im Ausführungsplan A enthält gültige Eintrittswahrscheinlichkeiten für jede mögliche Anzahl von Dienstgütereinrichtungen und kann daher zur detaillierten Bewertung der Dienstgütezuverlässigkeit des Ausführungsplans genutzt werden.

8.2.2 Verletzungszahl

8.2.2.1 Aufbau der Testumgebung

Aufgabe der Korrektheitsuntersuchungen zur Bestimmung der Verletzungszahl ist es, die hinreichende Übereinstimmung der berechneten mit den tatsächlichen Werten nachzuweisen. Hierfür werden die dienstgütespezifischen Verletzungszahlen der acht BPEL Prozesse aus Kapitel 8.1.1.1 rechnerisch bestimmt und mit den empirisch ermittelten Verletzungszahlen verglichen. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse der Korrektheitsuntersuchung für die Verletzungsmatrix aus Kapitel 8.1.1.2 wiederverwendet. Wie bereits in Kapitel 8.1.1.1 erläutert, ist eine getrennte Betrachtung von relativer und absoluter Dienstgütezuverlässigkeit nicht nötig, da beide Bestimmungsverfahren identisch sind.

¹ Obere Grenze des 95-prozentigen Konfidenzintervalls unter Annahme einer Normalverteilung der quadratischen Fehler 180 Berechnungen der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine bestimmte Anzahl von Dienstgütereinrichtungen der Versuchsreihe mit 1.000 Prozessaufrufen. (Mittelwert der quadratischen Fehler $\mu = 0,00008862$; Standardabweichung $\sigma = 0,000211$; geschätzter Standardfehler: $S.E. = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,00008862}{\sqrt{180}} = 0,00886$).

8. Evaluation zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans

8.2.2.2 Testergebnisse

Die Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl $a_{p,e}^F$ für die Garantie e und den Prozess p erfolgt auf Basis von Gleichung (5.31) aus Kapitel 5.2.2.1. Gleichung (5.31) berechnet die dienstgütespezifische Verletzungszahl aus der Summe der Verletzungswahrscheinlichkeiten aller Teildienstaufrufe. Als Eingabe dienen die Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienste aus Tabelle 17.

Die Bestimmung der tatsächlichen dienstgütespezifischen Verletzungszahl $a_{p,e}^A$ erfolgt nach Gleichung (5.26). Gleichung (5.26) bestimmt die Verletzungszahl indem jede Anzahl von Dienstgüteverletzungen mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit multipliziert und die Produkte anschließend addiert werden. Als Basis dienen die im vergangenen Kapitel 8.1.1.2 gemessenen Eintrittswahrscheinlichkeiten der vier Versuchsreihen.

Als Maß für die Korrektheit der Verletzungszahl für die Dienstgütegarantie e von Prozess p dient der quadratische Fehler $\varepsilon_{p,e}$ zwischen berechneter Verletzungszahl und gemessener Verletzungszahl. Die formale Definition des quadratischen Fehlers findet sich in Gleichung (7.13)

$$\varepsilon_{p,e} = (a_{p,e}^F - a_{p,e}^A)^2 \quad (7.13)$$

Wie in Kapitel 8.1.1.2 beschrieben gab es vier Versuchsreihen mit jeweils 100, 1.000, 10.000 und 100.000 Dienstaufrufen. Pro Versuchsreihe, Prozess und Dienstgütegarantie wurden die dienstgütespezifische Verletzungszahl sowie ihr quadratischer Fehler berechnet. Tabelle 19 zeigt die Ergebnisse exemplarisch für die Eigenschaft „SLO1“ für die Versuchsreihe mit 100 Aufrufen. Eine vollständige Auflistung aller Testergebnisse findet sich in Anhang D.

| Prozess | SLO1 | | |
|----------|----------------------------|---------------------------|------------------|
| | $a_{p,e}^F$ (berechnet) | $a_{p,e}^A$ (gemessen) | quadr. Fehler |
| Prozess1 | 1,45 | 1,5100 | 0,00360 |
| Prozess2 | 1,90 | 1,8100 | 0,00810 |
| Prozess3 | 2,75 | 2,6500 | 0,01000 |
| Prozess4 | 2,15 | 2,1600 | 0,00010 |
| Prozess5 | 2,40 | 2,2400 | 0,02560 |
| Prozess6 | 0,90 | 0,9300 | 0,00090 |
| Prozess7 | 0,95 | 0,9000 | 0,00250 |
| Prozess8 | 0,90 | 0,9600 | 0,00360 |

Tabelle 20: Quadratischer Fehler bei der Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl der Dienstgüteeigenschaften SLO1 für die Versuchsreihe mit 100 Aufrufen

Die quadratischen Fehler aller Dienstgütegarantien und Prozesse können zum mittleren quadratischen Fehler $\bar{\varepsilon}$ einer Versuchsreihe zusammengefasst werden. Der mittlere quadratische Fehler gilt als Maß für die Korrektheit bei der Berechnung der Verletzungszahl. Hierfür ist gemäß Gleichung (7.14) zuerst spezifisch für jeden der p Prozesse das arithmetische Mittel der quadratischen Fehler aller drei Dienstgütegarantien zu bilden. Der Durchschnitt aus diesen p Werten bildet den mittleren quadratischen Fehler einer Versuchsreihe.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left[\sum_{k=1}^d \varepsilon_{p,k} \right] \quad (7.14)$$

Die mittleren quadratischen Fehler aller vier Versuchsreihen zeigt Abbildung 49. Er liegt für die Testreihe mit 100 Prozessaufrufen bei 0,01068, für die Testreihe mit 1.000 Prozessaufrufen bei 0,00178, für die Testreihe mit 10.000 Prozessaufrufen bei 0,00009 und für die Testreihe mit 100.000 Prozessaufrufen bei 0,00007.

Wie auch schon bei der Evaluierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten für einen bestimmte Anzahl von Dienstgüeverletzungen reduziert sich auch der mittlere quadratische Fehler bei der Ermittlung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl mit zunehmender Anzahl von Prozessaufrufen. Dies lässt sich auf die gleiche Weise begründen, wie in Kapitel 8.1.1.2: Mit zunehmender Anzahl von Prozessaufrufen liegen längere Beobachtungszeiträume vor, die genauere Messwerte liefern. Als hinreichend genau hat sich ein Zeitraum von 1.000 Aufrufen erwiesen. Dies legt die Vermutung nahe, dass sowohl die Aufstellung der Verletzungsmatrizen als auch die Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahlen korrekte Werte liefern und die als quadratische Fehler registrierten Abweichungen das Ergebnis ungenauer Messwerte sind.

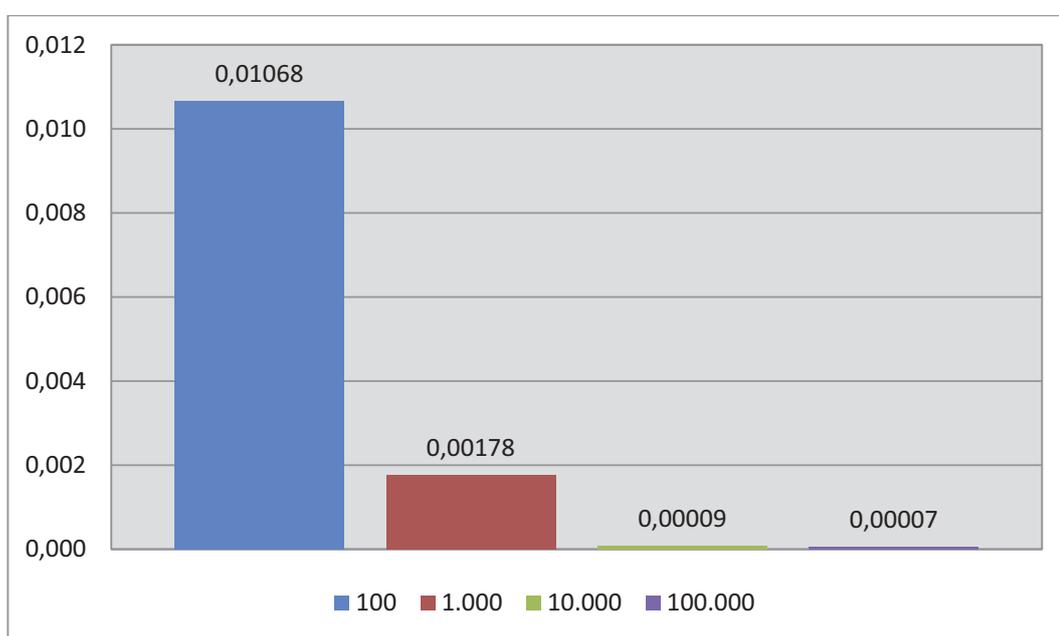


Abbildung 49: Mittlerer quadratischer Fehler bei der Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl

Vergleicht man die Verletzungszahlen für die Dienstgüteeigenschaften aller acht Prozesse (siehe Tabelle 21), so fällt auf, dass bei allen Prozessen die Dienstgütegarantie „SLO1“ stets die besten, d.h. kleinsten Werte und die Dienstgütegarantien „SLO3“ stets die schlechtesten, d.h. größten Werte aufweist. Diese Tatsache ist nicht überraschend, denn die Verletzungswahrscheinlichkeiten der Teildienste (siehe Tabelle 17) sind bewusst so definiert worden, dass jeder Teildienst für die Dienstgütegarantie „SLO1“ am zuverlässigsten und für die Dienstgütegarantie „SLO3“ am unzuverlässigsten ist. Je unzuverlässiger ein Teildienst bezüglich seiner Qualitätsversprechen ist, desto mehr Dienstgüeverletzungen wird er in seinen Interaktionen verursachen. Übertragen auf die Prozesse bedeutet dies, dass für die SLO1 weniger Dienstgüeverletzungen zu erwarten sind als für die SLO3. Dieser Sachverhalt spiegelt sich in den Verletzungszahlen in Tabelle 21 wieder und bekräftigt den Einsatz der Verletzungszahl für die schnelle und effiziente Bewertung der Dienstgütezuvverlässigkeit eines Ausführungsplans.

8. Evaluation zur Bestimmung der Dienstgütezverlässigkeit eines Ausführungsplans

| Prozess | SLO1 | SLO2 | SLO3 |
|----------|------|------|------|
| Prozess1 | 1,45 | 1,55 | 1,65 |
| Prozess2 | 1,90 | 2,04 | 2,18 |
| Prozess3 | 2,75 | 2,89 | 3,03 |
| Prozess4 | 2,15 | 2,29 | 2,43 |
| Prozess5 | 2,40 | 2,60 | 2,80 |
| Prozess6 | 0,90 | 1,10 | 1,30 |
| Prozess7 | 0,95 | 1,01 | 1,07 |
| Prozess8 | 0,90 | 0,96 | 1,02 |

Tabelle 21: Verletzungszahlen für die drei Dienstgütegarantien der acht Testprozesse

Fasst man die oben beschriebenen Ergebnisse zusammen, so lässt sich folgendes über die Korrektheit bei der Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl sagen

1. Je länger der Beobachtungszeitraum für die empirische Untersuchung der ist, desto genauer sind die ermittelten Werte für die dienstgütespezifische Verletzungszahl. Als hinreichend haben sich 1.000 Messungen erwiesen. In diesem Fall liegt der mittlere quadratische Fehler für die dienstgütespezifische Verletzungszahl mit einer 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit bei maximal $0,01523^1$. Dies entspricht einer sehr guten Genauigkeit
2. Je kleiner die dienstgütespezifische Verletzungszahl eines Ausführungsplans ist, desto weniger Dienstgüteverletzungen werden während der Ausführung erwartet. Die dienstgütespezifische Verletzungszahl kann daher für die Bewertung der Dienstgütezverlässigkeit eines Ausführungsplans eingesetzt werden.

Basierend auf den dienstgütespezifischen Verletzungszahlen eines Ausführungsplans kann die allgemeine Verletzungszahl bestimmt werden. Gleichung (5.32) und Gleichung (5.33) aus Kapitel 5.2.2.1 definieren die Aggregationsvorschrift. Aufgrund dieses direkten funktionalen Zusammenhangs können die Ergebnisse der Korrektheitsuntersuchungen für die dienstgütespezifische Verletzungszahl auf die allgemeine Verletzungszahl übertragen werden. Eine gesonderte Untersuchung ist daher nicht nötig.

8.3 Zusammenfassung

Kapitel 8 widmete sich der Evaluierung zur Bestimmung der Dienstgütezverlässigkeit eines Ausführungsplans, die detailliert in Form der Verletzungsmatrix aller Dienstgütegarantien der zusammengesetzten Dienstleistung gemessen werden kann oder allgemein in Form der Verletzungszahl. Im Fokus der Untersuchungen standen Performanz- sowie Korrektheitstests.

Die Performanz-Ergebnisse zur Bestimmung Verletzungsmatrizen zeigen eine exponentielle Komplexität, die jedoch für kleine bis mittlere zusammengesetzte Dienstleistungen effiziente Berechnungszeiten von wenigen Sekunden liefert. Schlechtere Ergebnisse liegen für Dienstleistungen größerer Struktur vor. Hier muss mit Antwortzeiten im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden gerechnet werden. Allerdings besteht erhebliches Optimierungspotential. Die durchgeführte Optimierung in Kapitel 5 bringt einen Performanz-Gewinn von ca. 70 Prozent. Aufgrund des großen Parallelisierungspotentials der Berechnungsvorschrift ist anzunehmen, dass dieser Gewinn vergrößert werden kann, wenn der Algorithmus auf einem leistungsfähigen Mehrprozessorsystem ausgeführt wird. Darüber hinaus ist die Bestimmung der Verletzungsmatrizen nur für wenige Ausführungspläne und vor der Laufzeit der Dienstleistung vorgesehen, um Kosten-Nutzen-Analysen für

¹ Obere Grenze des 95-prozentigen Konfidenzintervalls unter Annahme einer Normalverteilung der quadratischen Fehler 180 Berechnungen der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine bestimmte Anzahl von Dienstgüteverletzungen der Versuchsreihe mit 1.000 Prozessaufrufen. (Mittelwert der quadratischen Fehler $\mu = 0,00178$; Standardabweichung $\sigma = 0,031649$; geschätzter Standardfehler $S.E. = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,031649}{\sqrt{24}} = 0,01523$).

z.B. Fehlerkompensierungsstrategien vorzunehmen. Ein exponentieller Aufwand ist folglich vertretbar.

Die Ergebnisse der Performanz-Untersuchung für die Berechnung der allgemeinen Verletzungszahl bestätigten ihr effizientes Laufzeitverhalten. Die Berechnung besitzt eine lineare Zeitkomplexität im Bereich von wenigen Mikrosekunden.

Im Rahmen der Korrektheitstest konnte die Genauigkeit der Berechnungsvorschrift für die Aufstellung der Verletzungsmatrix nachgewiesen werden. Die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten für eine bestimmte Anzahl von Dienstgüteverletzungen erfolgt mit einer 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit mit einem mittleren quadratischen Fehler von maximal 0,0000886.

Die Korrektheitsmessungen der Verletzungszahl ergaben mit einer 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit einen mittleren quadratischen Fehler von max. 0,01523. Darüber hinaus konnte gezeigt, dass die Verletzungszahl ein gültiges Maß für die effiziente Bestimmung der Dienstgütezuvverlässigkeit eines Ausführungsplans darstellt.

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen in Kapitel 8 war die Ähnlichkeit bezüglich der mittleren quadratischen Fehler bei der Validierung der Verletzungsmatrix und der Verletzungszahl. Für beide Größen reduziert sich der Fehler mit zunehmender Länge der Versuchsreihen. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Berechnungsverfahren für die Verletzungsmatrix und die Verletzungszahl korrekte Ergebnisse liefern und lediglich die empirisch ermittelten Daten aufgrund einer unzureichenden Beobachtungsdauer ungenau sind.

8. Evaluation zur Bestimmung der Dienstgütezuerlässigkeit eines Ausführungsplans

9. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Arbeit war die Bestimmung der Dienstgütezverlässigkeit in zusammengesetzten Dienstleistungen. Die hierfür nötigen Konzepte wurden in Abschnitt II dieser Arbeit vorgestellt. Eine detaillierte Validierung der Ergebnisse bezüglich Korrektheit und Performanz erfolgte in Abschnitt III. Im neunten und letzten Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse noch einmal zusammengefasst sowie ein Ausblick auf weiterführende Forschungsaspekte gegeben.

9.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit gliederte sich in drei große Abschnitte. Abschnitt I widmete sich grundlegenden Themen. So gab Kapitel 1 eine ausführliche Motivation für die Beachtung der Dienstgütezverlässigkeit in zusammengesetzten Dienstleistungen und unterstreicht deren Bedeutung für das Internet der Dienste. Für die Bereitstellung hochzuverlässiger zusammengesetzter Dienstleistungen ist es notwendig die Dienstgütezverlässigkeit zu quantifizieren. Die Existenz einer solchen Berechnungsvorschrift wird durch These 1 der Arbeit behauptet.

These 1: Die Zuverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung bezüglich ihrer Qualitätsversprechen kann auf Basis der Dienstgütezverlässigkeit der genutzten Teildienste berechnet werden.

Für die Umsetzung von These 1 war eine zweite Berechnungsvorschrift zu definieren, die es gestattet, die Dienstgütezverlässigkeit eines Teildienstes vorherzusagen. Das Vorhandensein einer solchen Vorhersagemöglichkeit wird durch These 2 der Arbeit ausgedrückt.

These 2: Die Zuverlässigkeit bezüglich Qualitätsversprechen eines Teildienstes kann auf Basis seiner Monitoring-Historie vorhergesagt werden.

An Motivation und Zieldefinition in Kapitel 1 schließt sich Kapitel 2 an, welches wichtige Basiskonzepte und Begriffe definierte. So wurde das Internet der Dienste vorgestellt und genauer auf Dienstgüte und Dienstgütezverlässigkeit in zusammengesetzten Dienstleistungen eingegangen. Hierbei wurden zwei zentrale Erkenntnisse gewonnen: (1) sowohl die Dienstgüte als auch die Dienstgütezverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung hängt von den Teildiensten, d.h. dem genutzten Ausführungsplan, ab und (2) durch geschickte Wahl der Teildienste, d.h. des Ausführungsplans, kann die Dienstgüte und Dienstgütezverlässigkeit einer zusammengesetzten Dienstleistung gezielt beeinflusst werden. Dieser Aspekt wird im Rahmen qualitätssensitiver Bindungsvorgänge gezielt ausgenutzt.

In Kapitel 3 der Arbeit wurde der aktuelle Stand der Forschung vorgestellt. Als besonders relevant haben sich zwei Forschungsbereiche erwiesen: (1) das qualitätssensitive Binden unterteilt in Algorithmen und Infrastruktur sowie (2) die Qualitätsüberwachung im Internet der Dienste. In beiden Forschungsbereichen ist die Bedeutung der Dienstgütezverlässigkeit bekannt. Ansätze zur (Vor-) Bestimmung dieser in Teildiensten oder Ausführungsplänen existieren derzeit nicht.

Der zweite große Abschnitt der Arbeit beinhaltete die Konzeption zur Erfüllung der im ersten Abschnitt aufgestellten Thesen. Zu diesem Zweck analysierte Kapitel 4 die Problemstellung genauer, identifizierte die Anforderungen an die Bestimmungsvorschriften und legte erste Analyseentscheidungen fest. Hierzu zählten die Metrik und der Wertebereich der Dienstgütezverlässigkeit von Teildiensten sowie Ausführungsplänen. Die Dienstgütezverlässigkeit eines Teildienstes wird als Verletzungswahrscheinlichkeit $p_{s,e}$ gemessen. Sie ist eigenschaftsspezifisch und definiert die Wahrscheinlichkeit mit welcher der Teildienst s seine Garantie e nicht einhält. Je nach Kontext bezieht sich die Verletzungswahrscheinlichkeit auf den nächsten Interaktionszeitpunkt oder auf

9. Zusammenfassung und Ausblick

das Mittel der nächsten n Interaktionen des Teildienstes. Im ersten Fall spricht man von relativer im letzten Fall von absoluter Dienstgütezuvverlässigkeit.

Die Dienstgütezuvverlässigkeit eines Ausführungsplans einer zusammengesetzten Dienstleistung kann durch die Verletzungsmatrizen aller Dienstgütegarantien oder durch die allgemeine Verletzungszahl bestimmt werden. Auch hierbei ist eine Unterscheidung zwischen relativer und absoluter Dienstgütezuvverlässigkeit sinnvoll.

Die Verletzungsmatrix einer Dienstgütegarantie enthält für jede Anzahl k von Dienstgüteverletzungen die Eintrittswahrscheinlichkeit und bietet dem Betreiber der Dienstleistung so die Möglichkeit umfangreiche Kosten-Nutzen-Analysen für beispielsweise Fehlerkompensierungsstrategien durchzuführen. Die Verletzungszahl bietet einen numerischen Wert für den effizienten Vergleich mehrerer Ausführungspläne.

Die notwendigen Vorschriften zur Bestimmung der absoluten und relativen Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes sowie zur Ermittlung der Verletzungsmatrizen und der Verletzungszahl eines Ausführungsplans definierte Kapitel 5. Die Verletzungswahrscheinlichkeiten eines Teildienstes werden auf Basis seiner Monitoring-Historie bestimmt. Für die relative Verletzungswahrscheinlichkeit wird hierzu die Monitoring-Historie als Markov-Kette erster Ordnung interpretiert und Gleichung (5.2) ausgewertet. Sie definiert die relative Verletzungswahrscheinlichkeit als Division der Anzahl aller Zustandsübergänge $N_{v_m,1}$ vom letzten Zustand der Markov-Kette v_m zum Folgezustand $v_{m+1} = 1$ und der Anzahl N_{v_m} aller Zustandsübergänge vom letzten Zustand der Markov-Kette zu einem beliebigen Folgezustand.

$$P_{s,e} = P_{v_m,1} = \frac{N_{v_m,1}}{N_{v_m}} \quad (5.2)$$

Die Ermittlung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes basiert auf der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Hierzu ist Gleichung (5.12) auszuwerten, d.h. es ist zu zählen, wie oft es im vorhandenen Ausschnitt der Monitoring-Historie zu Dienstgüteverletzungen der Garantie e kam. Diese Anzahl N_1 ist durch die Länge m des Ausschnittes zu dividieren.

$$\overline{P_{s,e}} = p(v=1) = \frac{\sum_{i=1}^m v_i}{m} \quad (5.12)$$

Für die Aufstellung der Verletzungsmatrix einer Dienstgütegarantie ist für jede mögliche Anzahl k von Dienstgüteverletzungen im Ausführungsplan die Eintrittswahrscheinlichkeit zu ermitteln. Eine solche Berechnung erfolgt auf Basis der Verletzungswahrscheinlichkeiten der im Ausführungsplan definierten Teildienste. Hierfür sind zwei Schritte notwendig. Schritt eins ermittelt für jeden Teildienst die Anzahl von Aufrufen innerhalb der zusammengesetzten Dienstleistung. Die Information wird zusammen mit der Verletzungswahrscheinlichkeit der Teildienste im zweiten Schritt der Berechnungsvorschrift verarbeitet. An dieser Stelle entscheidet sich auch, ob die absolute oder relative Dienstgütezuvverlässigkeit eines Ausführungsplans ermittelt wird. Im ersten Fall ist mit der absoluten im zweiten mit der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit der Teildienste zu arbeiten.

Der zweite Arbeitsschritt bestimmt für jede Anzahl k von Dienstgüteverletzungen die Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Berechnungsvorschrift ist in Gleichung (5.20) bis Gleichung (5.23) aus Kapitel 5.2.2.1 definiert.

$$P_{A,e}^k = \begin{cases} 1 + g_{A,e}^k & \text{wenn } k = 0 \\ g_{A,e}^k & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.20)$$

Mit

$$\begin{aligned}
 g_{A,e}^k = & x_{k,1}(p_{1,e} + p_{2,e} + \dots + p_{z,e}) \\
 & + x_{k,2}(p_{1,e}p_{2,e} + p_{2,e}p_{3,e} + \dots + p_{z-1,e}p_{z,e}) \\
 & + x_{k,3}(p_{1,e}p_{2,e}p_{3,e} + p_{1,e}p_{2,e}p_{4,e} + \dots + p_{z-2,e}p_{z-1,e}p_{z,e}) \\
 & \vdots \\
 & + x_{k,z}(p_{1,e}p_{2,e}\dots p_{z,e})
 \end{aligned} \tag{5.21}$$

$$x_{k,i} = a_{k,i} \binom{i}{k} \text{ und } \binom{i}{k} = 0 \text{ wenn } k > i \tag{5.22}$$

$$a_{k,i} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } |k-i| \bmod 2 = 0 \\ -1 & \text{sonst} \end{cases} \tag{5.23}$$

Für die Ermittlung der allgemeinen Verletzungszahl ist die gewichtete Summe aller dienstgütespezifischen Verletzungszahlen zu bilden. Gleichung (5.32) und Gleichung (5.33) aus Kapitel 5.2.2.1 definieren diesen Schritt formal. Zur Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl eines Ausführungsplans sind die Verletzungswahrscheinlichkeiten aller Teildienstaufrufe zu addieren (siehe Gleichung (5.27)). Als vorbereitender Schritt ist, wie bei der Aufstellung der Verletzungsmatrix, die Gesamtanzahl von Teildienstaufrufen zu bestimmen.

$$a_A = \sum_{e \in E} w_e * a_{A,e} \tag{5.32}$$

Mit

$$a_{A,e} = \sum_{i=0}^z p_{z,e} \tag{5.33}$$

und

$$\sum_{e \in E} w_e = 1 \tag{5.29}$$

Neben der Definition der Bestimmungsvorschriften dokumentierte Kapitel 5 auch ihre Herleitung und illustriert ihre Anwendung anhand des Beispiels eines fiktiven Öko-Rechners. Eine kritische Diskussion der entwickelten Konzepte in Kapitel 6 schloss den zweiten Abschnitt der Arbeit ab. Ein Schwerpunkt dieser Diskussion stellte die Zeitkomplexität der Gleichungen dar. So ergaben die Betrachtungen eine lineare Zeitkomplexität bei der Berechnung der Verletzungswahrscheinlichkeiten, eine exponentielle Komplexität für die Aufstellung der Verletzungsmatrizen und eine lineare Zeitkomplexität für die Ermittlung der allgemeinen Verletzungszahl.

Im dritten großen Abschnitt der Arbeit erfolgte eine Validierung der entwickelten Konzepte, um die in Kapitel 1 aufgestellten Thesen zu belegen. Mit Hilfe von Performanz-Untersuchungen konnte die lineare Zeitkomplexität bei der Vorhersage der relativen sowie absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit nachgewiesen werden. Die Testergebnisse ergaben eine Berechnungszeit von wenigen hundert Mikrosekunden für die relative Verletzungswahrscheinlichkeit und von wenigen Millisekunden für die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit. Ebensolche positiven Ergebnisse weisen die Korrektheitsuntersuchungen auf, bei denen 14 Monitoring-Historien fiktiver als auch

9. Zusammenfassung und Ausblick

realer Dienste analysiert worden. Beim direkten Vergleich der vorhergesagten sowie empirisch ermittelten Verletzungswahrscheinlichkeiten konnte eine hohe Übereinstimmung gefunden werden. Der mittlere quadratische Fehler liegt bei der Ermittlung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit bei maximal 0,0238. Die Bestimmung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit weist einen maximalen mittleren quadratischen Fehler von 0,03669 auf. Voraussetzung ist die Verwendung einer hinreichend langen Monitoring-Historie von mind. 150 Einträgen für die relative und mind. 250 Einträge für die absolute Verletzungswahrscheinlichkeit. Die Ergebnisse der Performanz- und Korrektheitsuntersuchungen belegen die effiziente Vorhersage der Dienstgütezuvverlässigkeit eines Teildienstes auf Basis seiner Monitoring-Historie, wie dies in These 2 dieser Arbeit behauptet wurde.

Im zweiten Kapitel von Abschnitt III, wurde die Bestimmung der Verletzungsmatrix und der allgemeinen Verletzungszahl evaluiert, um auch die erste These der Arbeit beweisen zu können. Die Performanz-Untersuchen bestätigten das exponentielle Laufzeitverhalten bei der Aufstellung der Verletzungsmatrizen, zeigten aber gleichzeitig deren Effizienz bei zusammengesetzten Dienstleistungen mit maximal 20 Teildienstaufrufen. In diesem Fall sind nur wenige Sekunden notwendig. Die Berechnung der allgemeinen Verletzungszahl erfolgt linear innerhalb weniger Mikrosekunden. Für die Korrektheitsbetrachtungen wurden die Verletzungsmatrizen und die Verletzungszahlen von neun BPEL Prozessen untersucht. Die Tests verglichen die empirisch ermittelten Größen mit den vorberechneten Werten. Wie auch schon bei den Teildiensten waren die registrierten Abweichungen äußerst gering. Der mittlere quadratische Fehler für die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine bestimmte Anzahl von Dienstgüteverletzungen lag bei maximal 0,0000886, der mittlere quadratische Fehler bei der Ermittlung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl lag bei max. 0,01532. Eine solche Genauigkeit stellt sich ab einer Anzahl von mind. 1.000 Prozessaufrufen ein. Die Ergebnisse der Performanz- und Korrektheitsuntersuchungen belegen, dass die Dienstgütezuvverlässigkeit eines zusammengesetzten Dienstleistung effizient auf Basis der Dienstgütezuvverlässigkeit der genutzten Teildienste (vor-) bestimmt werden kann und damit auch These 1 der Arbeit.

9.2 Ausblick

Mit der Definition der Berechnungsvorschriften für die Dienstgütezuvverlässigkeit von Teildiensten und Ausführungsplänen zusammengesetzter Dienstleistungen in Abschnitt II und deren Evaluierung in Abschnitt III wurde der Grundstein für die Bereitstellung von Dienstleistungen gelegt, die nicht nur eine zufriedenstellende Dienstgüte anbieten, sondern darüber hinaus in ihren Qualitätszusagen auch äußerst zuverlässig sind. Dies ist nicht nur im Interesse zukünftiger Konsumenten, auch für den Dienstanbieter bestehen Vorteile, indem Dienstgüteverletzungen und damit Sanktionen, wie Strafzahlungen, reduziert werden.

Für die Bereitstellung hochqualitativer und hochzuverlässiger zusammengesetzter Dienstleistungen sind in weiterführenden Arbeiten die Algorithmen des qualitätssensitiven Bindens um ein zusätzliches Attribut, die Dienstgütezuvverlässigkeit in Form der Verletzungszahl, zu erweitern. Als Basis kann hierfür einer der zahlreichen Algorithmen aus Kapitel 3 dienen. Desweiteren ist der Algorithmus in Form einer Bindungskomponente zu implementieren, um die Prozesse des späten und erneuten Bindens im Internet der Dienste zu unterstützen. Auch hierfür existieren bereits gute Ansätze, die im Kapitel 3 vorgestellt worden sind.

Ein weiteres Anwendungsfeld der Dienstgütezuvverlässigkeit ist die Fehlerkompensierung und Fehlervorhersage. Mit Hilfe der Berechnungsformeln für die Verletzungswahrscheinlichkeit von Teildiensten sowie die Verletzungsmatrizen von Ausführungsplänen können wichtige Erkenntnisse über das zukünftige (Fehl-) Verhalten von Diensten gewonnen werden. Die Verletzungswahrscheinlichkeit und deren Zeitveränderlichkeit gestattet es beispielweise Dienstanbietern Tendenzen zu erkennen, um rechtzeitig geeignete Strategien zur Fehlerkompensierung einleiten zu können. Für Anbieter zusammengesetzter Dienstleistungen gilt ähnliches. Darüber hinaus ist es Kompositionsanbietern möglich unter Kenntnis von Art und Eintrittswahrscheinlichkeit der Dienstgüteverletzungen während der Ausführung einer zusammengesetzten Dienstleistung Kosten-Nutzen-Analysen für Kompensierungsstrategien der verschiedenen Fehlerarten sowie realistische Dienst-

gütegarantien aufzustellen, um somit den wirtschaftlichen Gewinn zu maximieren. Es ist daher lohnenswert in weiterführenden Arbeiten den Aspekt der Fehlerkompensierung, Fehlervorhersage und Dienstgütedefinition auf Basis der Dienstgütezuverlässigkeit und deren Veränderung genauer zu untersuchen.

Neben den Vorteilen der Dienstgütezuverlässigkeit für Dienstanbieter profitieren auch Dienstnutzer. So ist es denkbar, die Dienstgütezuverlässigkeit als Reputation eines Dienstes zu interpretieren. Aktuelle Suchalgorithmen für Dienste im Internet der Dienste verarbeiten bereits Dienstgüteangaben. Eine Berücksichtigung der Dienstgütezuverlässigkeit würde den potentiellen Konsumenten bei seiner Entscheidung zusätzlich unterstützen. Besondere Herausforderung stellt hierbei die geeignete Gewichtung der Dienstgütezuverlässigkeit gegenüber anderen Kriterien, wie Dienstgüte, Autor oder Preis dar. Eine detaillierte Betrachtung dieses Aspektes in weiterführenden Arbeiten könnte die Entwicklung des Internets der Dienste positiv beeinflussen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] A. Strunk, I. Braun, S. Reichert, A. Schill: „Supporting Rebinding in BPEL Processes”. In Proceedings of the *IEEE International Conference on Web Services (ICWS'09)*, IEEE Computer Society, L.A. USA, 6.-10. Juli, 2009, S. 864-871.
- [2] A. Strunk, S. Reichert, A. Schill: „An Architecture for Supporting Rebinding in BPEL Processes“. In Proceedings of the *1st Workshop on Service-Oriented Business Networks and Ecosystems 2009 (SOBNE'09) at the IEEE EDOC'09*, IEEE Computer Society, Auckland, Neuseeland, 02. September, 2009.
- [3] M.C. Jaeger, G. Muhl, S. Golze: „QoS-aware composition of Web services: a look at selection algorithms“. In Proceedings of *IEEE International Conference on Web Services, (ICWS'05)*, IEEE Computer Society, Orlando, Florida, USA, 11.-15. Juli, 2005, S.-808.
- [4] M.C. Jaeger, G. Rojec-Goldmann, G. Mühl: „QoS Aggregation for Service Composition using Workflow Patterns“. In Proceedings of the *8th International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC'04)*, IEEE Computer Society, Monterey, California, USA, 20.-24. September, 2004, S. 149-159.
- [5] S. Fickas and M. Feather: „Requirements Monitoring in Dynamic Environments“. In Proceedings of the *2nd IEEE Int. Symposium on Requirements Engineering*, IEEE Computer Society, York, U.K., 27.-29. März, 1995, S. 140–147.
- [6] W. N. Robinson: „Monitoring Web Service Requirements“. In Proceedings of the *11th IEEE International Conference on Requirements Engineering*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 8.-12. September, 2003, S. 65.
- [7] H. Ludwig: „Web service qos: external slas and internal policies or: How do we deliver what we promise?“. In Proceedings of the *4th International Conference on Web Information Systems Engineering Workshops (WISEW'03)*, LNCS, Rom, Italien, 13. Dezember, 2003, S.115-120.
- [8] G. Canfora, M. Di Penta, M. Villani: „An Approach on QoS-Aware Compositions based on Genetic Algorithm“. In Proceedings of the *Conference on Genetic an Evolutionary Computing (GECCO'05)*, ACM, Washington, DC, USA, 25.-29. Juni, 2005, S. 1069 - 1075.
- [9] G. Canfora, M. Di Penta, R. Esposito and M. L. Villani: „QoS-Aware Replanning of Composite Web Services“. In Proceedings of the *IEEE International Conference on Web Services (ICWS'05)*, IEEE Computer Society, Orlando, Florida, USA, 11.-15. Juli, 2005, S. 121–129.
- [10] G. Canfora, M. Di Penta, R. Esposito, M.L. Villani: „A framework for QoS-aware binding and re-binding of composite web services“. *Journal of Systems and Software*, Elsevier Science Inc., Vol. 81(10), 2008, S. 1754-1769.

-
- [11] M. Di Penta, R. Esposito, M. L. Villani, R. Codato, M. Colomo, E. Di Nitto: „WS Binder: a Framework to enable Dynamic Binding of Composite Web Services“. In Proceedings of the *International Workshop on Service Oriented Software Engineering (IW-SOSE'06)*, ACM, Shanghai, China, 27.-28. May, 2006, S. 74-80.
- [12] G. Canfora, R. Esposito: „A Lightweight Approach for QoS-Aware Service Composition“. In Proceedings of the *2nd International Conference on Service Oriented Computing (ICSOC'04)*, ACM, New York City, NY, USA, 15.-19. November, 2004, S. 1-10.
- [13] C. Gao, M. Cai, H. Chen: „QoS-aware Service Composition Based on Tree-Coded Genetic Algorithm“. In Proceedings of the *31st Annual International Computer Software and Application Conference (COMPSAC'07)*, IEEE Computer Society, Peking, China, 23.-27. Juli, 2007, S. 361–367.
- [14] Z. Chen, H. Wang, P. Pan: „An Approach to Optimal Web Service Composition Based on QoS and User Preferences“. In Proceedings of the *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'09)*, IEEE Computer Society, Hainan Island, China, 25.-26. April, 2009, S. 96-101.
- [15] L. Ai, M., Tang: „A Penalty-based Genetic Algorithm for QoS-Aware Web Service Composition with Inter-Service-Dependencies and Conflicts“. In Proceedings of the *2008 International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control & Automation (CIMCA'08)*, IEEE Computer Society, Wien, Österreich, 10.-12. Dezember, 2008, S. 738-743.
- [16] F. Raimondi, J. Skene, W. Emmerich: „Efficient Monitoring of Web Service SLAs“, In Proceedings of Proceedings of the *16th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering*, ACM, Atlanta, Georgia, USA, 9-14. November, 2008, S. 170-180.
- [17] J. Cardoso: „Modeling Quality of Service for Workflows and web processes“. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web Journal*, Vol. 1(3), Elsevier, 2004, S. 281-308.
- [18] Cardoso, J., Miller J., Sheth A., Arnold J.: „Modelling Quality of Service for Workflows and Web Service Processes“. *Technical Report# 02-002 v2*, LSDIS Lab, Computer Science, University of Georgia, December 2002.
- [19] J.J.M. Trienekens, J.J. Bouman, M. van der Zwan: „Specification of Service Level Agreements: Problems, Principles and Practices“. *Software Quality Journal*, Vol. 12(1), Springer Netherlands, 2004, S. 43-57.
- [20] G. Scheithauer, K. Voigt, V. Bicer., M. Heinrich, A. Strunk, M. Winkler: „Integrated Service Engineering Workbench: Service Engineering for digital Eco Systems“. In *Proceedings of the International ACM Conference on Management and Emergent Digital Ecosystems (MEDES)*, ACM, Lyon, Frankreich, 27.-30. Oktober, 2009, S. 446-449.
- [21] H. Mayer, D. Kuropka, P. Tröger: „ASG - Technique of Adaptivity“. *Dagstuhl Seminar Proceedings - Autonomous and Adaptive Web Services*, Internationales Begegnungs- und Forschungszentrum für Informatik (IBFI), Schloss Dagstuhl, Germany, 2007.
-

-
- [22] F.A.A. Lins, J. C. dos Santos Júnior, N. S. Rosa: „Adaptive Web Service Composition“. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, ACM, New York, NY, USA, Vol. 32(4), 2007.
- [23] A. Charfi, M. Mezini: „Aspect-Oriented Web Service Composition with AO4BPEL“. In Proceedings of the *European Conference on Web Services (ECOWS'04)*, Springer, Erfurt, Deutschland, 27.-30. September, 2004, S. 168-182.
- [24] R. Berbner, M. Spahn, N. Repp, O. Heckmann, R. Steinmetz: „Heuristics for QoS-aware Web Service Composition“. In Proceedings of the *IEEE International Conference on Web Services (ICWS'06)*, IEEE Computer Society, Chicago, USA, 18.-22. September, 2006, S. 72-82.
- [25] R. Berbner. „Dienstgüteunterstützung für Service-orientierte Workflows“ *Dissertation*, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, 2006.
- [26] R. Berbner, M. Spahn, N. Repp, O. Heckmann, R. Steinmetz: „Dynamic Replanning of Web Service Workflows“. In Proceedings of the *1st IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (IEEE DEST'07)*, Cairns, Australien, 21.-23. Februar, 2007, S. 211-216.
- [27] R. Berbner, T. Grollius, N. Repp, O. Heckmann, E. Ortner, R. Steinmetz: „An approach for the Management of Service-oriented Architectures (SoA) based Application Systems“. In Proceedings of the *Enterprise Modelling and Information Systems Architectures (EMISA'05)*, Klagenfurt, Österreich, 24.-25. Oktober, 2005, S. 208-221.
- [28] L. Zeng, A. Bentallah, A.H.H. Ngu., M. Dumas, J. Kalagnanam, H. Chang: „QoS-aware middleware for web services composition“. *IEEE Transactions on Software Engineering*, IEEE Computer Society, Vol. 30(5), 2004, S. 311-327.
- [29] Chatfield: „Analyse von Zeitreihen – Eine Einführung“, *BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft*, 1982, ISBN: 344-613-5979.
- [30] Christian Urbanik: „Entwicklung eines Vorhersagemodells für SLA Verletzungen“ *Diplomarbeit*, TU Dresden, 2009. Betreuer: Anja Strunk.
- [31] H. Akaike: „Information theory and an extension of the maximum likelihood principle“. In Proceedings of the *Second International Symposium on Information Theory*, Budapest, Ungarn, 1973. S. 267-281.
- [32] G. Schwarz: „Estimating the Dimension of a Model“. *Annals of Statistics*, Vol. 2(6), 1978, S. 461-464.
- [33] E. Chang, T. Dillon, F. K. Hussain: „Trust and Reputation for Service-Oriented Environments“. *Wiley Verlag*, 2006. ISBN 047 001-5470.
- [34] R. Harris, R. Sollis, „Applied time series modelling and forecasting“. *Wiley Verlag*, 2005. ISBN 047-084-4434.
-

-
- [35] K. Sirvio, J. Hollmén: „Spatio-temporal Road Condition Forecasting with Markov Chains and Artificial Neural Networks“. In Proceedings of the *3rd International Workshop on Hybrid Artificial Intelligence Systems (HAIS'08)*, Springer Verlag, Burgos, Spanien, 24.-26. September, 2008, S. 204-211.
- [36] Freedman: „Markov Chains“, *Springer Verlag*, 1971. ISBN: 354-090-8080
- [37] IMDS Datenbank der Automobilhersteller
http://www.mdsystem.com/html/de/home_de.htm.
- [38] Karastoyanova, A. Buchmann: „Extending Web Service Flow Models to Provide for Adaptability“. In Proceedings of *OOPSLA '04 Workshop on "Best Practices and Methodologies in Service-oriented Architectures: Paving the Way to Web-services Success"*, ACM, Vancouver, Kanada, 24.-28. Oktober, 2004.
- [39] Karastoyanova, A. Houspanossian, M. Cilia, Leymann und A. Buchmann: „Extending BPEL for Run Time Adaptability“, In Proceedings of *9th IEEE International Enterprise Computing Conference (EDOC'05)*, IEEE Computer Society, Washington, USA, 19.-23. September, 2005, S. 15-26.
- [40] D. Karastoyanova, F., Leymann und A. Buchmann: „An Approach to Parametrizing Web Service Flows“. In Proceedings of the *3rd International Conference on Service Computing (ICSOC'05)*, Springer Verlag, Amsterdam, Holland, 12.-15. Dezember, 2005, S. 533-538.
- [41] K. Verma, K. Gomadam, A. P. Sheth, J. S. Miller, Z. Wu: „The METEOR-S Approach for configuring and Executing Dynamic Web Processes“. *Technical Report*, 24. Juni, 2005.
- [42] T. Yu, K.-J. Lin: „The Design of QoS Broker Algorithms for QoS-Capable Web Services“. In Proceedings of the *IEEE International Conference on e-Technology, e-Commerce and e-Service (EEE'04)*, IEEE Computer Society, Taipeh, Taiwan, 27.-31. März, 2004, S. 17-24.
- [43] T. Yu, K.-J. Lin: „A Borker-Based Framework for QoS-Aware Web Service Composition“. In Proceedings of the *IEEE International Conference on e-Technology, e-Commerce and e-Service (EEE'05)*, IEEE Computer Society, Hong Kong, China, 29. März – 1. April, 2005, S. 22-29.
- [44] T. Yu, K.-J. Lin: „Service Selection Algorithms for Composing complex Services with Multiple QoS Constraints“. In Proceedings *3rd International Conference on Service-oriented Computing (ICSOC'05)*, Springer Verlag, Amsterdam, Holland, 12.-15. Dezember, 2005, S. 130-143.
- [45] T. Yu, K.-J. Lin: „Adaptive Algorithms for Finding Replacements Services in Autonomic Distributed Business Processes“. In Proceedings of the *Autonomous Decentralized Systems, (ISADS'05)*, IEEE, Chengdu, China, 4.-8. April, 2005, S. 427-434.
- [46] T. Yu, K.-J. Lin: „Efficient Algorithms for Web Services Selection with End-to-End QoS Constraints“. *ACM Transaction on Web*, Vol. 1(1), Article 6, ACM, 2007.
-

-
- [47] S. Berlik: „Optimierung“. *Vorlesungsfolien: Computational Intelligence*, Wintersemester 2007/2008, Universität Siegen, 2008.
- [48] W. Dück: „Diskrete Optimierung“ Akademie Verlag, Berlin, 1977.
- [49] Korte, J. Vygen: „Combinatorial Optimization“. 4. Auflage, *Springer Verlag*, 2008, ISBN 978-3-540-71843-7.
- [50] A. Martin: „Diskrete Optimierung“. *Vorlesungsskript*, Sommersemester 2006, TU Darmstadt, 2006.
- [51] Gerdes, F. Klawonn, R. Kruse: „Evolutionäre Algorithmen“. *Vieweg Verlag*, 1. Auflage. 2004. ISBN: 3-528-05570-7
- [52] Heistermann J.: „Genetische Algorithmen“. *Teubner Verlag*, Stuttgart, 1998, ISBN: 978-3815420577
- [53] M. Papageorgiou, O. von Stryk: „Optimierung – Statische, Dynamische, Stochastische Verfahren“. *Springer Verlag*, 3. Auflage, 2011, ISBN: 978-3-540-34012-6.
- [54] A.H. Land, A.G. Doig: „An automatic method of solving discrete programming problems“. *Econometrica* 8, 1960, S. 497-520.
- [55] D.A Van Veldhuizen, G.B. Lamont: „Multiobjective Evolutionary Algorithms: Analyzing the state-of-the-Art“. *Evolutionary Computation*, Vol. 8(2), 2000, S 125 – 147.
- [56] M. R. Garey, D. S. Johnson: „Computers and Intractability: a Guide to the Theory of NP-Completeness“. *W.H. Freeman & Co., New York, NY, USA*, 1990. ISBN 0-716-71045-5.
- [57] Z. Huang, W. Jiang, S. Hu, Z. Liu: „Effective Pruning Algorithm for QoS-Aware Service Composition“. In Proceedings of the *11th IEEE Conference on Commerce and Enterprise Computing (CEC'09)*, IEEE Computer Society, Wien, Österreich, 20.-23. Juli, 2009, S. 519-522.
- [58] L. Jian-hua, S. Song-qiao, L. Yong-jun, L. Gui-lin: „Application of Genetic Algorithm to QoS-Aware Web Service Composition“. In Proceedings of the *3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA'08)*. IEEE Computer Society, Singapur, 3.-5. Juni, 2008, S. 516-521.
- [59] M. Aiello, E. el Khoury, A. Lozovik, P. Ratelband: „Optimal QoS-Aware Web Service Composition“. In Proceedings of the *11th IEEE Conference on Commerce and Enterprise Computing (CEC'09)*, IEEE Computer Society, Wien, Österreich, 20.-23. Österreich, 2009, S. 491-494.
- [60] C. Wan, C. Ullrich, L. Chen, Rui. Huang, J. Luo, Z. Shi: „On Solving QoS-Aware Service Selection Problem with Service Composition“. In Proceedings of the *7th International Conference on Grid and Cooperative Computing (GCC'08)*, IEEE Computer Society, Shenzhen, China, 24.-26. Oktober, 2008, S. 467-474.
- [61] Y. Gao, B. Zeng, J. Na, L. Yang, Y. Dai, Q. Gong: „Optimal Selection of Web Services for Composition Based on Interface-Matching and Weighted Multistage Graph“. In Pro-
-

-
- ceedings of the 6th *International Conference on Parallel and Distributed Computing Applications and Technologies (DPCAT'05)*, IEEE Computer Society, Dalian, China, 5.-8. Dezember, 2005, S. 336-338.
- [62] Y. Gao, J. Na, B. Zeng, L. Yang, Q. Gong: „Optimal Selection Using Dynamic Programming“. In Proceedings of the 11th *IEEE International Symposium on Computers and Communications (ISCC'06)*, IEEE Computer Society, Pula-Cagliari, Italien, 26.-29. Juni, 2006, S. 365-370.
- [63] V. Cardellini, E. Casalichio, V. Grassi, F. Lo Presti: „Flow-Based Service Selection for Web Service Composition Supporting Multiple QoS Classes“. In Proceedings of the *IEEE International Conference on Web Services (ICWS'07)*, IEEE Computer Society, Salt Lake City, Utah, USA, 9.-13. Juli, 2007, S. 743-750.
- [64] H. Wada, P. Champrasert, J. Suzuki: „Multiobjective Optimization of SLA-aware Service Compositions“. In Proceedings of the *IEEE Congress on Services (Services'08)*, IEEE Computer Society, Honolulu, Hawaii, USA, 6.-8. Juli, 2008, S. 368-375.
- [65] Y. Yang, S. Tang, Y. Xu, W. Zhang, L. Fang: „An Approach to QoS-aware Service Selection in Dynamic Web Service Compositions“. In Proceedings of the 3rd *International Conference on Networking and Services (ICNS'07)*, IEEE Computer Society, Athens, Greece, June 19-25, 2007, pp. 18-23.
- [66] M. M. Akbar, M.S. Rahman, M. Kaykobad et al.: „Solving multidimensional multi-choice Knapsack Problem by constructing convex hulls“. *Computers and Operation Research*, 2006, Vol. 33, S. 1259-1273.
- [67] M. Mohabey, Y. Narahari, S. Mallick, P. Suresh, S.V. Subrahmanya: „A Combinatorial Procurement Auction for QoS-Aware Web Service Composition“. In Proceedings of the 3rd *Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CAISE'07)*, Scottsdale, IEEE, AZ, USA, 22.-25. September, 2007, S. 716-721.
- [68] D. Ardagna, B. Pernici: „Adaptive Service Composition in Flexible Processes“. *IEEE Transaction on Software Engineering*, Vol. 33 (6), 2007, S. 369-384.
- [69] Y. Li, J. Huai, T- Deng, H. Sun, H. Guo, Z. Du: „QoS-aware Service Composition in Service Overlay Networks“. In Proceedings of the *IEEE International Conference on Web Services (ICWS'07)*, IEE Computer Society, Salt Lake City, Utah, USA, 9.-13. Juli, 2007, S. 703-710.
- [70] X. Ye, R. Mounla: „A Hybrid Approach to QoS-aware Service Composition“. In Proceedings of the *IEEE International Conference on Web Services (ICWS'08)*, IEEE Computer Society, Peking, China, 23. -28. September, 2008, S. 62-69.
- [71] K. Deb. „Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms“. *Wiley-Interscience Series in Systems and Optimization*. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. ISBN 0-471-87339-6.
- [72] Y. Ma, C. Zhang: „Quick convergence of genetic algorithm for QoS-driven web service selection“. *The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, Vol. 52(5), Elsevier North-Holland, Inc. New York, NY, USA, 2008, S. 1093-1104.
- [73] C.-W. Zhanh, S. Su, J.-L. Chen: „Efficient population diversity handling genetic algorithm for QoS-aware web service selection“. In Proceedings of *International Conference*
-

on *Computational Science (ICCS'06)*, England, Springer-Verlag, LNCS, Berlin, 28.-31. Mai, 2006, S. 104-111.

- [74] F. Glover: „Tabu Search – part i“. *ORSA Journal in Computing*, Vol. 1, 1989, S. 190-206.
- [75] G. Duck, T. Scheuer: „Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing“. *Journal of Computational Physics*. Vol.- 90, 1990, S. 161-175.
- [76] M. Bronischewsky, J. Wollbold: „Kombinatorische Optimierung & Sintflut Algorithmus“. *Proseminar „ALGORITHMEN DER MUSTERERKENNUNG UND KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ“ im Wintersemester 2004/05*, Institut für Informatik, Universität Jena, 2004.
- [77] M. Dorigo, V. Maniezzo und A. Colorni: „The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents“. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics – Part B*, Vol. 26, 1990, S. 29-41.
- [78] Fernando Antônio Aires Lins, J. C. dos Santos Júnior, Nelson Souto Rosa: „Adaptive Web Service Composition“. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, Vol. 32(4), ACM, 2007
- [79] F. Rosenberg, P. Celikovic, A. Michlmayr, P. Leitner, S. Dustdar: „An End-to-End Approach for QoS-Aware Service Composition“. In Proceedings of the *IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC'09)*, IEEE Computer Society, Auckland, Neusee-land, 1.-4. September, 2009, S. 151-160.
- [80] BPEL Standard – Business Process Execution Language. http://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=wsbpel
- [81] A. Andrjeux, K. Czajkowski, A. Dan, K. Keahey, H. Ludwig, T. Nakata, J. Pruyne, J. Rofrano, S. Tuecke, M. Xi: „Web Service Agreement Specification (WS-Agreement)“. <http://www.ogf.org/documents/GFD.107.pdf>
- [82] E.M. Maximilien, P-M. Singh: „Conceptual Model of Web Service Reputation“. *ACM SIGMOND Record*, Vol. 30(4), SPECIAL ISSUE: Special section on semantic web and data management, ACM, 2002, S. 36-41.
- [83] D. Ameller, X. Franch: „Service level agreement monitor (SALMon)“. In Proceedings of the *Seventh International Conference on Composition-Based Software Systems (ICCBSS'08)*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 25.-29. Februar, 2008. S. 224–227.
- [84] U. Aßmann: „Invasive Software Composition“. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 2003. ISBN: 978-3540443858.
- [85] L. Baresi, S. Guinea, L. Pasquale: „Towards a unified framework for the monitoring and recovery of BPEL processes“. In Proceedings of the *2008 workshop on Testing, analysis, and verification of web services and applications (TAV-WEB '08)*, ACM, Seattle, USA, Washington, USA 21. Juli, 2008, S. 15–19.

-
- [86] L. Baresi, S. Guinea, M. Plebani: „Business process monitoring for dependability“. *Architecting dependable systems IV, Session: Architecting distributed systems*, Springer, 2007, S. 337–361.
- [87] A. Bertolino, G. De Angelis, A. Sabetta, S. Elbaum: „Scaling up SLA monitoring in pervasive environments“. In Proceedings of *the International workshop on Engineering of software services for pervasive environments (ESSPE'07)*, ACM, Dubrovnik, Croatia, 4. September, 2007, S. 65–68.
- [88] T. Chau, V. Muthusamy, H. Jacobsen, E. Litani, A. Chan, P. Coulthard: „Automating SLA modeling“. In Proceedings of *the 2008 conference of the center for advanced studies on collaborative research (CASCON'08)*, ACM, 2008, S. 126–143.
- [89] C. Chen, L. Li, J. Wei: „AOP based trustable SLA compliance monitoring for web services“. In: Proceedings of *the Seventh International Conference on Quality Software (QSIC'07)*, IEEE Computer Society, Portland, Oregon, USA, 11.-12. Oktober, 2007, S. 225–230.
- [90] M. Comuzzi, C. Kotsokalis, G. Spanoudakis, R. Yahyapour: „Establishing and monitoring SLAs in complex service based systems“. In Proceedings of *the 2009 IEEE International Conference on Web Services (ICWS'09)*, IEEE Computer Society, Los Angeles, Californien, USA, 6-10. Juli, 2009., S. 783–790.
- [91] M. Comuzzi, G. Spanoudakis: „A framework for hierarchical and recursive monitoring of service based systems“. In Proceedings of *the 2009 Fourth International Conference on Internet and Web Applications and Services (ICIW'09)*, IEEE Computer Society, Venedig, Italien, 24-28. Mai, 2009, S. 383–388.
- [92] M. Comuzzi, G. Spanoudakis: „Dynamic set-up of monitoring infrastructures for service based systems“. In Proceedings of *the 2010 ACM Symposium on Applied Computing (SAC'10)*, ACM, Sierre, Schweiz, 22. - 26. März, 2010, S. 2414–2421.
- [93] K. Fakhfakh, T. Chaari, S. Tazi, K. Drira, M. Jmaiel: „A comprehensive ontology-based approach for SLA obligations monitoring“. In Proceedings of *the 2008 The Second International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences (ADVCOMP'08)*, IEEE Computer Society, Valencia, Spanien, 29. September – 4. Oktober, 2008, S. 217–222.
- [94] L. Grunske, P. Zhang: „Monitoring probabilistic properties“. In Proceedings of *the 7th joint meeting of the European software engineering conference and the ACM SIGSOFT symposium on The foundations of software engineering (ESEC/FSE'09)*, ACM, Amsterdam, Die Niederlande 24.-28. August, 2009, S. 183–192.
- [95] C. Herssens, S. Faulkner, I. J. Jureta: „Context-driven autonomic adaptation of SLA“. In Proceedings of *the 6th International Conference on Service-Oriented Computing (ICSOC'08)*, LNCS Springer, Sydney, Australien, 1.-5. Dezember, 2008, S. 362–377.
- [96] M. Hosamani, H. Narayanappa, H. Rajan: „How to trust a web service monitor deployed in an untrusted environment?“. In Proceedings of *the Third International Conference on next Generation Web Services Practices (NWeSP'07)*, 29. – 31. Oktober, 2007, S. 79 –84.
- [97] R. Jurca, B. Faltings, W. Binder: „Reliable QoS monitoring based on client feedback“. In Proceedings of *the 16th international conference on World Wide Web (WWW '07)*, ACM, Banff, Alberta, Kanada, 8. - 12. Mai, 2007, S. 1003–1012.
-

-
- [98] A. Keller, H. Ludwig: „The WSLA framework: Specifying and monitoring service level agreements for web services“. *J. Netw. Syst. Manage* Vol. 11(1), 2003, S 57–81.
- [99] A. Michlmayr, F. Rosenberg, P. Leitner, S. Dustdar: „End-to-end support for QoS-aware service selection, binding and mediation in VRESCo“. *IEEE Transactions on Services Computing*, IEEE Computer Society, 2010.
- [100] A. Michlmayr, F. Rosenberg, P. Leitner, S. Dustdar: „Comprehensive QoS monitoring of web services and event-based SLA violation detection“. In Proceedings of the *4th International Workshop on Middleware for Service Oriented Computing (MWSOC'09)*, ACM, Urbana Champaign, Illinois, USA, 30. November – 4. Dezember, 2009, S. 1–6.
- [101] C. Molina-Jimenez, S. Shrivastava, J. Crowcroft, P. Gevros: „On the monitoring of contractual service level agreements“. In Proceedings of the *First IEEE International Workshop on Electronic Contracting (WEC'04)*, IEEE Computer Society, San Diego, California, USA, 6.-9. Juli, 2004, S. 1–8.
- [102] M. Momotko, M. Gajewski, A. Ludwig, R. Kowalczyk, M. Kowalkiewicz, J. Ying Zhang: Towards adaptive management of QoS-aware service compositions“. *Multiaгент Grid Syst.*, Vol. 3(3), 2007, S. 299–312.
- [103] O. Moser, F. Rosenberg, S. Dustdar: „Non-intrusive monitoring and service adaptation for WSBPEL“. In Proceeding of the *17th international conference on World Wide Web (WWW'08)*, ACM, 2008, Peking, China, 21.-25. April, S. 815–824.
- [104] S. Pearson: „Trusted computing platforms, the next security solution“. Technical Report HPL-2002-221, Trusted E-Services Laboratory, HP Laboratories Bristol, <http://www.hpl.hp.com/techreports/2002/HPL-2002-221.pdf>, 2002.
- [105] O. Rana, M. Warnier, T. B. Quillinan, F. Brazier: „Monitoring and reputation mechanisms for service level agreements“. In Proceedings of the *5th international workshop on Grid Economics and Business Models (GECON'08)*, Springer LNCS, Las Palmas, Spanien, 25.-26. August, 2008, S. 125–139.
- [106] F. Raimondi, J. Skene, W. Emmerich: „Efficient online monitoring of web-service SLAs“. In Proceedings of the *16th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of software engineering (SIGSOFT'08/FSE-16)*, ACM, Atlanta, Georgia, USA, 9. 14. November, S. 170–180, 2008.
- [107] S. Rosario, A. Benveniste, S. Haar, C. Jard: „Probabilistic QoS and soft contracts for transaction-based web services orchestrations“. *IEEE Trans. Service Computing*, Vol. 1(4), 2008, S. 187–200.
- [108] F. Rosenberg, C. Platzer, S. Dustdar: „Bootstrapping performance and dependability attributes of web services“. In Proceedings of the *International Conference on Web Services (ICWS'06)*, 2006, Chicago, USA, 18.-22. September, S. 205 –212.
- [109] J. Skene, A. Skene, J. Crampton, W. Emmerich: „The monitorability of service-level agreements for application-service provision“. In Proceedings of the *6th international workshop on Software and performance (WOSP'07)*, ACM, Buenos Aires, Argentinien, 5.-8. Februar, 2007, S. 3–14.
- [110] G. Spanoudakis, K. Mahbub: „Non-intrusive monitoring of service based systems“. *International Journal of Cooperative Information Systems*, Vol. 15, 2006, S. 25–358.
-

-
- [111] J. Spillner, M. Winkler, S. Reichert, J. Cardoso, A. Schill: „Distributed contracting and monitoring in the internet of services“. In *Distributed Applications and Interoperable Systems*, LNCS, Springer, 2009, S. 129–142.
- [112] Trusted Computing Group, <http://www.trustedcomputinggroup.org>.
- [113] G. Wu, J. Wei, T. Huang: „Towards self-healing web services composition“. In *Proceedings of the First Asia-Pacific Symposium on Internetware (Internetware'09)*, ACM, Peking, China, 17.-18. Oktober, 2009, S. 1–5.
- [114] L. Zeng, H. Lei, H. Chang: „Monitoring the QoS for web services“. In *Proceedings of the International Conference on Service-Oriented Computing (ICSOC'07)*, LNCS, Springer, Wien, Österreich, 17.-20. September, 2007, S. 132–144.
- [115] F. H. Zulkernine, P. Martin, K. Wilson: „A middleware solution to monitoring composite web service-based processes“. In *Proceedings of the 2008 IEEE Congress on Services Part II (SERVICES-2'08)*, IEEE Computer Society, 2008, S. 149–156.

ANHANG A

Beispiele für das Einsetzen von Gleichung (5.16) in Gleichung (5.18) zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{A,e}^k$ für k Verletzungen der Dienstgütegarantie e im Ausführungsplan A und Gegenüberstellung der Systematik mit der Berechnung nach Gleichung (5.24) bis Gleichung (5.27).

$$p_{FS_{A,e}} = \prod_{i=1}^z q_{i,e} \quad (5.16)$$

Mit

$$q_{i,e} = \begin{cases} 1 - p_{s,e} & \text{wenn } f_i \in FS_{A,e} = 0 \\ p_{s,e} & \text{wenn } f_i \in FS_{A,e} = 1 \end{cases} \quad (5.17)$$

$$p_{A,e}^k = \sum_{i=1}^{2^z} b_{k,i} * p_{FS_{A,e}^i} \quad (5.18)$$

Mit

$$b_{k,i} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } k \neq \sum_{f_i \in FS_{A,e}^i} f_i \\ 1 & \text{wenn } k = \sum_{f_i \in FS_{A,e}^i} f_i \end{cases} \quad (5.19)$$

$$p_{A,e}^k = \begin{cases} 1 + g_{A,e}^k & \text{wenn } k = 0 \\ g_{A,e}^k & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.20)$$

Mit

$$\begin{aligned} g_{A,e}^k = & x_{k,1}(p_{1,e} + p_{2,e} + \dots + p_{z,e}) \\ & + x_{k,2}(p_{1,e}p_{2,e} + p_{2,e}p_{3,e} + \dots + p_{z-1,e}p_{z,e}) \\ & + x_{k,3}(p_{1,e}p_{2,e}p_{3,e} + p_{1,e}p_{2,e}p_{4,e} + \dots + p_{z-2,e}p_{z-1,e}p_{z,e}) \\ & \vdots \\ & + x_{k,z}(p_{1,e}p_{2,e} \dots p_{z,e}) \end{aligned} \quad (5.21)$$

und

$$x_{k,i} = a_{k,i} \binom{i}{k} \text{ und } \binom{i}{k} = 0 \text{ wenn } k > i \quad (5.22)$$

und

$$a_{k,i} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } |k-i| \bmod 2 = 0 \\ -1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.23)$$

1 Teildienstaufruf

| Anzahl von Dienstgü- teverletzungen k | Fehlerszenario (f_1) | Eintrittswahrscheinlichkeit $P_{A,e}^k$ |
|---|---------------------------|--|
| 0 | 0 | $1 - p_1$ |
| 1 | 1 | p_1 |

Fehlerszenarien einer zusammengesetzten Dienstleistung mit einem Teildienst

Berechnung von $p_{A,e}^k$ durch Einsetzen von Gleichung (5.16) in Gleichung (5.18)

$$\begin{aligned}
 p_{A,e}^0 &= 1 - p_1 \\
 &= 1 - \binom{1}{0} p_1 \\
 &= \underline{\underline{1 - p_1}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_{A,e}^1 &= p_1 \\
 &= \binom{1}{1} p_1 \\
 &= \underline{\underline{p_1}}
 \end{aligned}$$

2 Teildienstaufrufe

| Anzahl von Dienstgü- teverletzungen k | Fehlerszenario (f_1, f_2) | Eintrittswahrscheinlichkeit $P_{A,e}^k$ |
|---|--------------------------------|--|
| 0 | 00 | $(1 - p_1)(1 - p_2)$ |
| 1 | 01 | $(1 - p_1)p_2$ |
| 1 | 10 | $p_1(1 - p_2)$ |
| 2 | 11 | $p_1 p_2$ |

Fehlerszenarien einer zusammengesetzten Dienstleistung mit zwei Teildiensten

Berechnung von $p_{A,e}^k$ durch Einsetzen von Gleichung (5.16) in Gleichung (5.18)

$$\begin{aligned}
 p_{A,e}^0 &= (1 - p_1)(1 - p_2) \\
 &= 1 - (p_1 + p_2) + (p_1 p_2) \\
 &= 1 - \binom{1}{0} (p_1 + p_2) + \binom{2}{0} (p_1 p_2) \\
 &= \underline{\underline{1 - p_1 - p_2 + p_1 p_2}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{A,e}^1 &= p_1(1-p_2) + (1-p_1)p_2 \\
&= p_1 - p_1p_2 + p_2 - p_1p_2 \\
&= (p_1 + p_2) - 2(p_1p_2) \\
&= \binom{1}{1}(p_1 + p_2) - \binom{2}{1}(p_1p_2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{A,e}^2 &= p_1p_2 \\
&= \binom{1}{2}(p_1 + p_2) + \binom{2}{2}p_1p_2
\end{aligned}$$

3 Teildienstaufrufe

| Anzahl von Dienstgü- teverletzungen k | Fehlerszenario $(f_1f_2f_3)$ | Eintrittswahrscheinlichkeit $P_{A,e}^k$ |
|---|---------------------------------|--|
| 0 | 000 | $(1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)$ |
| 1 | 001 | $(1-p_1)(1-p_2)p_3$ |
| 1 | 010 | $(1-p_1)p_2(1-p_3)$ |
| 2 | 011 | $(1-p_1)p_2p_3$ |
| 1 | 100 | $p_1(1-p_2)(1-p_3)$ |
| 2 | 101 | $p_1(1-p_2)p_3$ |
| 2 | 110 | $p_1p_2(1-p_3)$ |
| 3 | 111 | $p_1p_2p_3$ |

Fehlerszenarien einer zusammengesetzten Dienstleistung mit drei Teildiensten

Berechnung von $P_{A,e}^k$ durch Einsetzen von Gleichung (5.16) in Gleichung (5.18)

$$\begin{aligned}
P_{A,e}^0 &= (1-p_1)(1-p_2)(1-p_3) \\
&= (1-p_1-p_2+p_1p_2)(1-p_3) \\
&= 1 - (p_1 + p_2 + p_3) + (p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3) - (p_1p_2p_3) \\
&= 1 - \binom{1}{0}(p_1 + p_2 + p_3) + \binom{2}{0}(p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3) - \binom{3}{0}(p_1p_2p_3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_{A,e}^1 &= (1-p_1)(1-p_2)p_3 + (1-p_1)p_2(1-p_3) + p_1(1-p_2)(1-p_3) \\
&= p_3 - p_1p_3 - p_2p_3 + p_1p_2p_3 + p_2 - p_1p_2 - p_2p_3 + p_1p_2p_3 + p_1 - p_1p_2 - p_1p_3 + p_1p_2p_3 \\
&= (p_1 + p_2 + p_3) - 2(p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3) + 3(p_1p_2p_3) \\
&= \underline{\underline{\binom{1}{1}(p_1 + p_2 + p_3) - \binom{2}{1}(p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3) + \binom{3}{1}(p_1p_2p_3)}}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_{A,e}^2 &= (1-p_1)p_2p_3 + p_1(1-p_2)p_3 + p_1p_2(1-p_3) \\
&= p_2p_3 - p_1p_2p_3 + p_1p_3 - p_1p_2p_3 + p_1p_2 - p_1p_2p_3 \\
&= (p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3) - 3p_1p_2p_3 \\
&= \underline{\underline{\binom{1}{2}(p_1 + p_2 + p_3) + \binom{2}{2}(p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3) - \binom{3}{2}(p_1p_2p_3)}}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_{A,e}^3 &= p_1p_2p_3 \\
&= \underline{\underline{\binom{1}{3}(p_1 + p_2 + p_3) - \binom{2}{3}(p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3) + \binom{3}{3}(p_1p_2p_3)}}}
\end{aligned}$$

4 Teildienstaufrufe

| Anzahl von Dienstgü- teverletzungen k | Fehlerszenario $(f_1f_2f_3f_4)$ | Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{A,e}^k$ |
|---|------------------------------------|--|
| 0 | 0000 | $(1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)(1-p_4)$ |
| 1 | 0001 | $(1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)p_4$ |
| 1 | 0010 | $(1-p_1)(1-p_2)p_3(1-p_4)$ |
| 2 | 0011 | $(1-p_1)(1-p_2)p_3p_4$ |
| 1 | 0100 | $(1-p_1)p_2(1-p_3)(1-p_4)$ |
| 2 | 0101 | $(1-p_1)p_2(1-p_3)p_4$ |
| 2 | 0110 | $(1-p_1)p_2p_3(1-p_4)$ |
| 3 | 0111 | $(1-p_1)p_2p_3p_4$ |
| 1 | 1000 | $p_1(1-p_2)(1-p_3)(1-p_4)$ |
| 2 | 1001 | $p_1(1-p_2)(1-p_3)p_4$ |
| 2 | 1010 | $p_1(1-p_2)p_3(1-p_4)$ |
| 3 | 1011 | $p_1(1-p_2)p_3p_4$ |
| 2 | 1100 | $p_1p_2(1-p_3)(1-p_4)$ |
| 3 | 1101 | $p_1p_2(1-p_3)p_4$ |
| 3 | 1110 | $p_1p_2p_3(1-p_4)$ |
| 4 | 1111 | $p_1p_2p_3p_4$ |

Fehlerszenarien einer zusammengesetzten Dienstleistung mit drei Teildiensten

Berechnung von $p_{A,e}^k$ durch Einsetzen von Gleichung (5.16) in Gleichung (5.18)

$$\begin{aligned}
p_{A,e}^0 &= (1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)(1-p_4) \\
&= (1-p_1-p_2+p_1p_2)(1-p_3-p_4+p_3p_4) \\
&= 1-(p_1+p_2+p_3+p_4)+(p_1p_2+p_1p_3+p_1p_4+p_2p_3+p_2p_4+p_3p_4) \\
&\quad - (p_1p_2p_3+p_1p_2p_4+p_2p_3p_4)+(p_1p_2p_3p_4) \\
&= 1-\binom{1}{0}(p_1+p_2+p_3+p_4)+\binom{2}{0}(p_1p_2+p_1p_3+p_1p_4+p_2p_3+p_2p_4+p_3p_4) \\
&= \underline{\underline{-\binom{3}{0}(p_1p_2p_3+p_1p_2p_4+p_2p_3p_4)+\binom{4}{0}(p_1p_2p_3p_4)}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_{A,e}^1 &= (1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)p_4+(1-p_1)(1-p_2)p_3(1-p_4) \\
&\quad + (1-p_1)p_2(1-p_3)(1-p_4)+p_1(1-p_3)(1-p_3)(1-p_4) \\
&= (1-p_1-p_2+p_1p_2)(p_4-p_3p_4)+(1-p_1-p_2+p_1p_2)(p_3-p_3p_4) \\
&\quad + (1-p_3-p_4+p_3p_4)(p_2-p_1p_2)+(1-p_3-p_4+p_3p_4)(p_1-p_1p_2) \\
&= (p_1+p_2+p_3+p_4)-2(p_1p_2+p_1p_3+p_1p_4+p_2p_3+p_2p_4+p_3p_4) \\
&\quad + 3(p_1p_2p_3+p_1p_2p_4+p_2p_3p_4)-4(p_1p_2p_3p_4) \\
&= \binom{1}{1}(p_1+p_2+p_3+p_4)-\binom{2}{1}(p_1p_2+p_1p_3+p_1p_4+p_2p_3+p_2p_4+p_3p_4) \\
&= \underline{\underline{+\binom{3}{1}(p_1p_2p_3+p_1p_2p_4+p_2p_3p_4)-\binom{4}{1}(p_1p_2p_3p_4)}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_{A,e}^2 &= (1-p_1)(1-p_2)p_3p_4+(1-p_1)p_2(1-p_3)p_4+(1-p_1)p_2p_3(1-p_4) \\
&\quad + p_1(1-p_2)(1-p_3)(1-p_3)p_4+p_1(1-p_2)p_3(1-p_4)+p_1p_2(1-p_3)(1-p_4) \\
&= (1-p_1-p_2+p_1p_2)p_3p_4+(1-p_1-p_3+p_1p_3)p_2p_4+(1-p_1-p_4+p_1p_4)p_2p_3 \\
&\quad + (1-p_2-p_3+p_2p_3)p_1p_4+(1-p_2-p_4+p_2p_4)p_1p_3+(1-p_3-p_4+p_3p_4)p_1p_2 \\
&= (p_1p_2+p_1p_3+p_1p_4+p_2p_3+p_2p_4+p_3p_4) \\
&\quad - 3(p_1p_2p_3+p_1p_2p_4+p_2p_3p_4)+6(p_1p_2p_3p_4) \\
&= \binom{1}{2}(p_1+p_2+p_3+p_4)+\binom{2}{2}(p_1p_2+p_1p_3+p_1p_4+p_2p_3+p_2p_4+p_3p_4) \\
&\quad - \binom{3}{2}(p_1p_2p_3+p_1p_2p_4+p_2p_3p_4)+\binom{4}{2}(p_1p_2p_3p_4) \\
&= \underline{\underline{-\binom{3}{2}(p_1p_2p_3+p_1p_2p_4+p_2p_3p_4)+\binom{4}{2}(p_1p_2p_3p_4)}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_{A,e}^3 &= (1-p_1)p_2p_3p_4 + p_1(1-p_2)p_3p_4 + p_1p_2(1-p_3)p_4 + p_1p_2p_3(1-p_4) \\
&= p_2p_3p_4 - p_1p_2p_3p_4 + p_1p_3p_4 - p_1p_2p_3p_4 + p_1p_2p_4 - p_1p_2p_3p_4 \\
&= (p_1p_2p_4 + p_1p_3p_4 + p_2p_3p_4) - 4p_1p_2p_3p_4 \\
&= \binom{1}{3}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) - \binom{2}{3}(p_1p_2 + p_1p_3 + p_1p_4 + p_2p_3 + p_2p_4 + p_3p_4) \\
&= \binom{3}{3}(p_1p_2p_3 + p_1p_2p_4 + p_2p_3p_4) - \binom{4}{3}(p_1p_2p_3p_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_{A,e}^3 &= p_1p_2p_3p_4 \\
&\quad - \binom{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + \binom{2}{4}(p_1p_2 + p_1p_3 + p_1p_4 + p_2p_3 + p_2p_4 + p_3p_4) \\
&= \binom{3}{4}(p_1p_2p_3 + p_1p_2p_4 + p_2p_3p_4) + \binom{4}{4}(p_1p_2p_3p_4)
\end{aligned}$$

ANHANG B

Struktogramme der in Kapitel 5 definierten Gleichungen zur Berechnung der relativen und absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes und zur Bestimmung der Verletzungsmatrix und der Verletzungszahl eines Ausführungsplans.

Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes auf Basis einer Markov Kette der Länge n und der Ordnung k . Die zugrunde liegende Monitoring-Historie besitzt die Länge m .

$$p_{s,e} = p_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m, 1} = \frac{N_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m, 1}}{N_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m}} \quad (5.6)$$

Mit

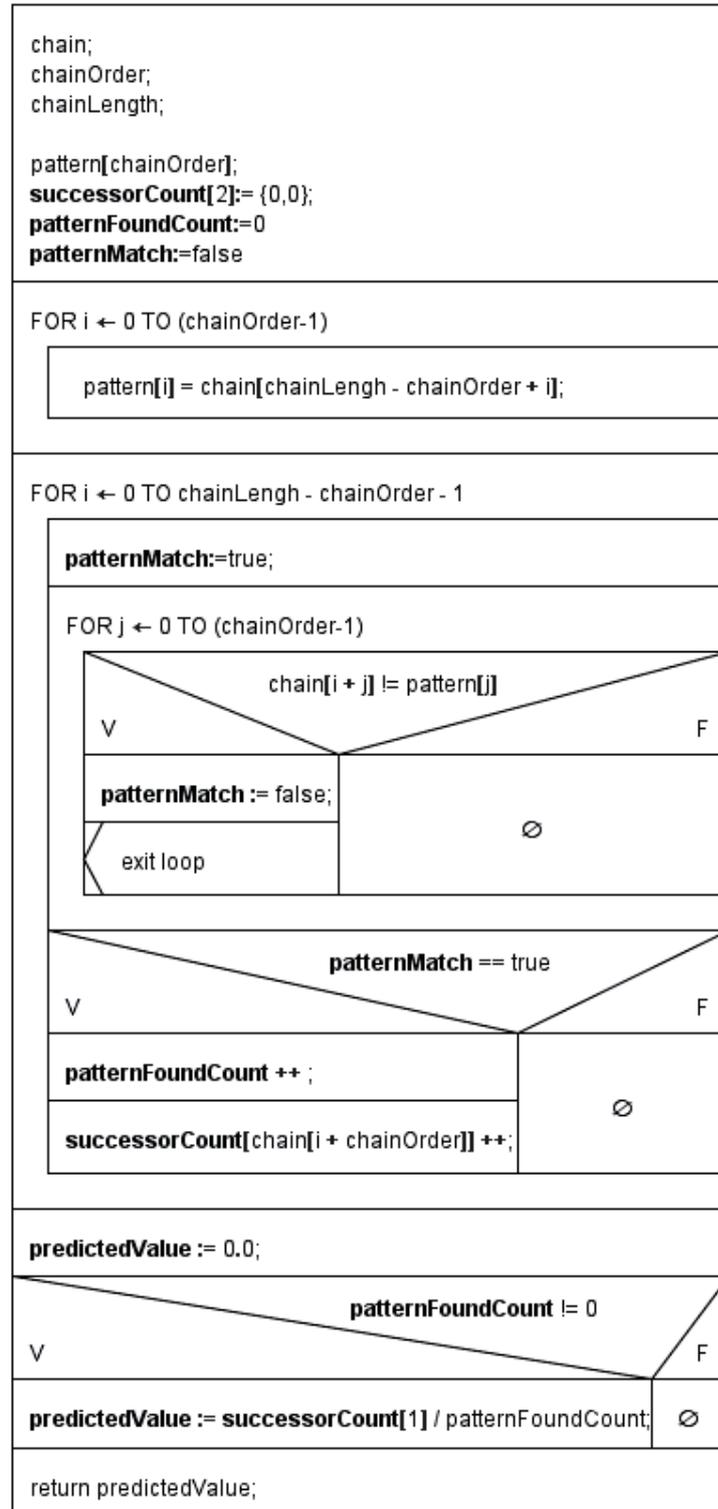
$$N_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m, 1} = \sum_{i=m-n+1}^{m-k} b_i$$

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{wenn } (v_i = v_{m-k+1}) \wedge \dots \wedge (v_{i+k-1} = v_m) \wedge (v_{i+k} = 1) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.7)$$

$$N_{v_{m-k+1} \dots v_{m-1} v_m} = \sum_{i=m-n+1}^{m-1} c_i$$

$$c_i = \begin{cases} 1 & \text{wenn } (v_i = v_{m-k+1}) \wedge (v_{i+1} = v_{m-k+2}) \wedge \dots \wedge (v_{i+k-1} = v_m) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.8)$$

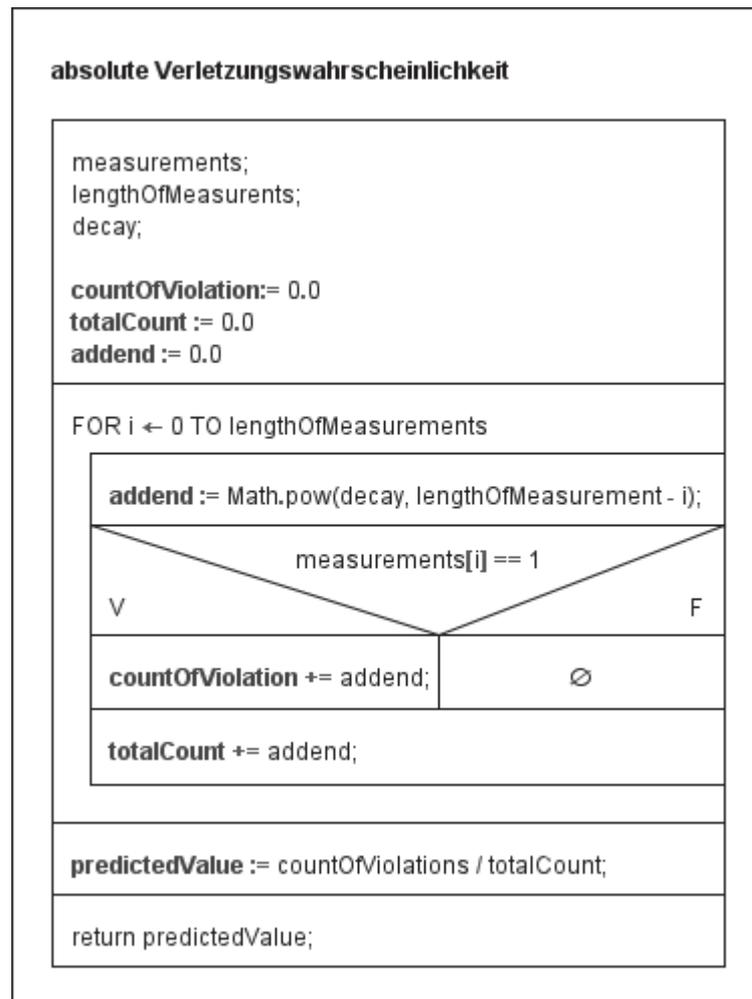
relative Verletzungswahrscheinlichkeit



Struktogramm zur Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes

Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes auf Basis einer Monitoring-Historie der Länge m . Für die Berechnung wird ein Monitoring-Historie-Ausschnitt der Länge n verwendet.

$$\overline{p_{s,e}} = p(v=1) = \frac{\sum_{i=m-n+1}^m w^{m-i} * v_i}{\sum_{i=m-n+1}^m w^{m-i}} \quad (5.13)$$



Struktogramm zur Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes

Aufstellen der Verletzungsmatrix durch Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für jede Anzahl k von Dienstgüteverletzungen eines Ausführungsplans.

$$p_{A,e}^k = \begin{cases} 1 + g_{A,e}^k & \text{wenn } k = 0 \\ g_{A,e}^k & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.20)$$

Mit

$$g_{A,e}^k = \begin{aligned} & x_{k,1}(p_{1,e} + p_{2,e} + \dots + p_{z,e}) \\ & + x_{k,2}(p_{1,e}p_{2,e} + p_{2,e}p_{3,e} + \dots + p_{z-1,e}p_{z,e}) \\ & + x_{k,3}(p_{1,e}p_{2,e}p_{3,e} + p_{1,e}p_{2,e}p_{4,e} + \dots + p_{z-2,e}p_{z-1,e}p_{z,e}) \\ & \quad \vdots \\ & + x_{k,z}(p_{1,e}p_{2,e}\dots p_{z,e}) \end{aligned} \quad (5.21)$$

und

$$x_{k,i} = a_{k,i} \binom{i}{k} \text{ und } \binom{i}{k} = 0 \text{ wenn } k > i \quad (5.22)$$

und

$$a_{k,i} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } |k - i| \bmod 2 = 0 \\ -1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.23)$$

Aufstellung der Verletzungsmatrix für eine Dienstgütegarantie

```

slo; // Dienstgüteeigenschaft für die Zuverlässigkeit berechnet wird
subServices; // alle Teildienste der zusammengesetzten Dienstleistung
probs[]; // Liste aller Eintrittswahrscheinlichkeiten
combinationLengthToProb; // kombinierte Wahrscheinlichkeiten

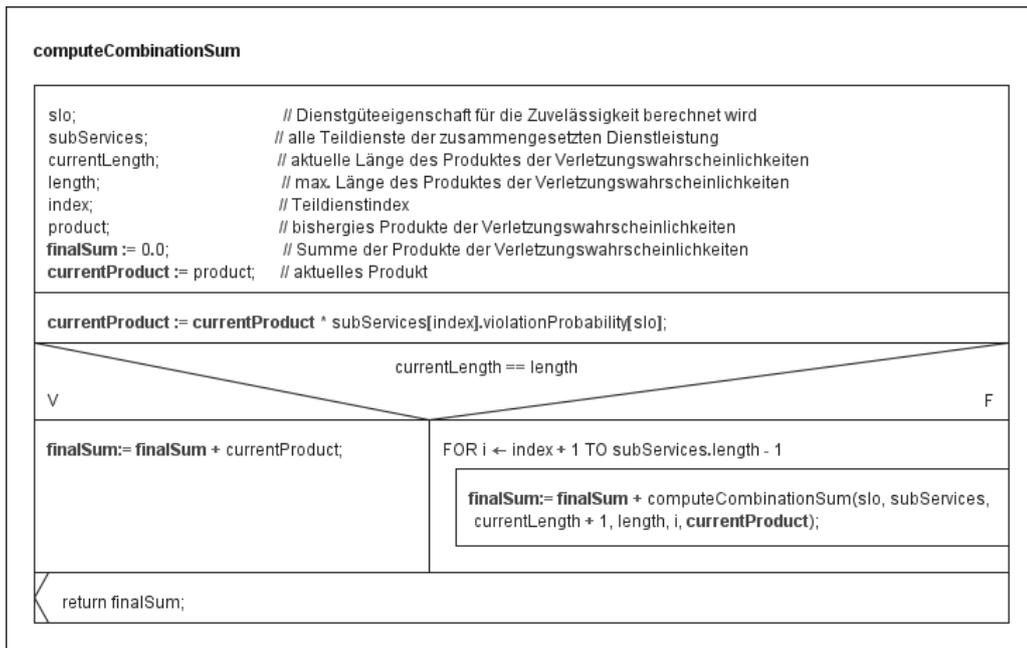
FOR i ← 0 TO subServices.length - 1
  sum := 0.0;
  FOR j ← 0 TO subServices.length - i - 1
    sum := sum + c computeCombinationSum(slo, subServices, 0, i, j, 1.0);
  combinationLengthToProb.put(i, sum);

FOR i ← 0 TO services.length
  probs[i] := getProbabilityForNumberOfSLOViolation(i, subServices, slo, combinationLengthToProb);

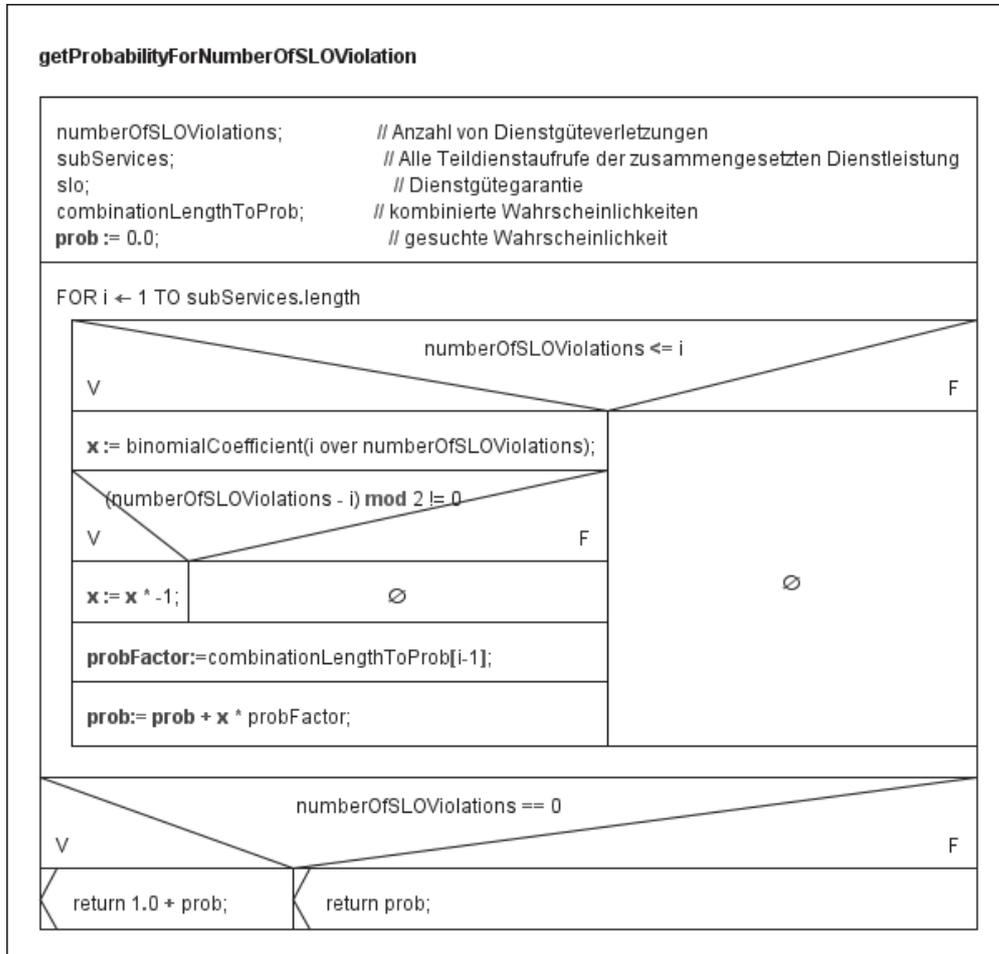
return probs[];

```

Aufstellen der Verletzungsmatrix für eine Dienstgütegarantie



Struktogramm zur Vorberechnung der Produkte und Summen aller Verletzungswahrscheinlichkeiten aus Gleichung (5.20)



Struktogramm zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit eine bestimmte Anzahl von Dienstgüeverletzungen

Berechnung der Verletzungszahl für einen Ausführungsplan einer zusammengesetzten Dienstleistung mit z Teildienstaufrufen.

$$a_A = \sum_{e \in E} w_e * a_{A,e} \quad (5.28)$$

Mit

$$\sum_{e \in E} w_e = 1 \quad (5.29)$$

Und

$$a_{A,e} = \sum_{i=0}^z i * p_{A,e}^k \quad (5.27)$$

Berechnung der Verletzungszahl eines Ausführungsplans

```

probOfSubServices[z][d]; // Liste mit den Verletzungswahrscheinlichkeiten aller z Teildienstaufrufe
weights[d]; // Gewichtung der einzelnen Dienstgütegarantien
d; // Anzahl aller Dienstgütegarantien

ad := 0 // dienstgütespezifische Verletzungsanzahl
a := 0 // allgemeine Verletzungsanzahl

FOR i ← 0 TO d
  FOR j ← 0 TO probOfSubServices.length;
    ad := ad + probOfSubServices[j][i];
  a := a + weights[j]*ad;
  ad := 0;

```

Berechnung der allgemeinen Verletzungszahl

ANHANG C

Ergebnisse der Performanz-Untersuchungen zur Berechnung der relativen und absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes sowie der Verletzungsmatrix eines Ausführungsplans.

Performanz-Messungen zur Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes in Abhängigkeit der Länge n und der Ordnung k der Markov Kette:

| n | Berechnungszeit $t_{n,k}$ in Nanosekunden | | | | | | | | | |
|-------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | k = 1 | k = 2 | k = 3 | k = 4 | k = 5 | k = 6 | k = 7 | k = 8 | k = 9 | k = 10 |
| 10 | 239.818 | 264.229 | 263.343 | 243.709 | 256.116 | 266.176 | 271.802 | 261.365 | 257.002 | 223.788 |
| 110 | 232.853 | 211.395 | 200.003 | 221.419 | 219.413 | 226.816 | 202.791 | 209.831 | 229.800 | 225.835 |
| 210 | 223.620 | 221.491 | 204.498 | 209.454 | 210.750 | 206.934 | 223.243 | 227.763 | 203.833 | 204.481 |
| 310 | 225.307 | 216.873 | 204.981 | 210.778 | 205.176 | 208.875 | 207.967 | 206.241 | 221.028 | 214.678 |
| 410 | 221.391 | 222.703 | 211.792 | 203.120 | 207.283 | 243.908 | 228.176 | 209.655 | 210.057 | 230.993 |
| 510 | 223.036 | 235.767 | 216.035 | 231.629 | 239.192 | 224.193 | 221.469 | 215.700 | 222.874 | 227.847 |
| 610 | 232.258 | 232.280 | 232.769 | 217.318 | 223.958 | 220.379 | 221.114 | 227.190 | 216.954 | 216.829 |
| 710 | 212.317 | 225.766 | 211.507 | 218.857 | 224.059 | 234.406 | 210.110 | 230.118 | 235.082 | 228.283 |
| 810 | 216.826 | 233.702 | 213.613 | 236.734 | 233.834 | 217.712 | 221.818 | 241.958 | 226.263 | 236.703 |
| 910 | 231.211 | 228.537 | 226.688 | 218.561 | 226.221 | 217.644 | 230.048 | 236.331 | 228.604 | 222.028 |
| 1.010 | 217.848 | 213.116 | 242.874 | 221.083 | 218.488 | 225.394 | 222.017 | 225.741 | 220.360 | 247.883 |
| 1.110 | 224.078 | 233.901 | 232.917 | 253.576 | 245.668 | 244.754 | 224.939 | 250.395 | 220.203 | 230.336 |
| 1.210 | 245.145 | 215.988 | 232.766 | 233.012 | 224.439 | 234.686 | 239.499 | 236.549 | 227.408 | 234.482 |
| 1.310 | 230.040 | 218.329 | 222.762 | 238.812 | 233.605 | 245.587 | 226.414 | 242.410 | 227.478 | 246.098 |
| 1.410 | 273.857 | 237.077 | 239.142 | 231.473 | 241.684 | 240.678 | 250.333 | 259.678 | 227.442 | 236.624 |
| 1.510 | 256.367 | 226.045 | 234.585 | 237.893 | 236.845 | 230.934 | 229.107 | 250.512 | 239.421 | 247.210 |
| 1.610 | 232.853 | 221.743 | 247.657 | 253.241 | 249.632 | 254.029 | 235.789 | 251.029 | 244.698 | 243.994 |
| 1.710 | 263.505 | 251.721 | 248.093 | 249.830 | 258.013 | 236.250 | 241.650 | 253.409 | 237.521 | 253.026 |
| 1.810 | 245.436 | 228.364 | 255.621 | 237.563 | 255.261 | 237.725 | 237.781 | 257.476 | 251.562 | 261.164 |
| 1.910 | 267.126 | 227.671 | 249.283 | 245.017 | 267.961 | 244.785 | 244.329 | 251.761 | 260.343 | 251.062 |
| 2.010 | 249.337 | 241.614 | 258.155 | 260.896 | 258.136 | 251.252 | 260.549 | 256.574 | 265.187 | 258.083 |
| 2.110 | 268.355 | 253.928 | 255.579 | 268.634 | 264.745 | 273.311 | 247.830 | 242.279 | 261.974 | 255.018 |
| 2.210 | 258.125 | 260.773 | 256.946 | 245.112 | 259.689 | 273.355 | 263.111 | 265.639 | 244.584 | 273.224 |
| 2.310 | 259.896 | 251.939 | 251.992 | 247.045 | 266.173 | 257.616 | 256.778 | 268.168 | 256.404 | 271.123 |
| 2.410 | 253.853 | 250.557 | 265.097 | 263.603 | 257.988 | 264.569 | 254.049 | 250.881 | 256.253 | 261.636 |
| 2.510 | 255.065 | 268.218 | 253.305 | 250.808 | 271.084 | 272.406 | 264.642 | 269.143 | 250.079 | 276.018 |
| 2.610 | 256.811 | 258.664 | 259.337 | 259.317 | 271.615 | 271.947 | 261.988 | 263.695 | 260.298 | 288.575 |
| 2.710 | 266.123 | 242.027 | 267.335 | 277.593 | 291.662 | 266.586 | 268.176 | 258.538 | 282.488 | 270.559 |
| 2.810 | 263.835 | 248.009 | 251.043 | 263.645 | 285.474 | 271.299 | 264.866 | 269.704 | 265.352 | 310.394 |
| 2.910 | 261.326 | 243.095 | 264.838 | 285.955 | 278.010 | 269.252 | 269.536 | 288.723 | 259.474 | 277.781 |
| 3.010 | 263.301 | 261.477 | 281.326 | 261.709 | 293.707 | 276.012 | 269.821 | 279.689 | 280.946 | 290.179 |
| 3.110 | 299.141 | 264.245 | 275.062 | 262.913 | 268.358 | 267.536 | 287.958 | 279.152 | 269.855 | 282.675 |
| 3.210 | 276.954 | 265.293 | 286.491 | 277.554 | 271.805 | 271.146 | 276.632 | 285.807 | 286.360 | 280.552 |
| 3.310 | 268.321 | 254.015 | 260.312 | 266.030 | 273.601 | 298.345 | 290.282 | 282.524 | 265.807 | 305.172 |
| 3.410 | 278.432 | 273.786 | 284.323 | 279.214 | 267.117 | 272.822 | 291.981 | 287.413 | 274.738 | 313.651 |
| 3.510 | 274.012 | 262.097 | 279.124 | 289.450 | 282.762 | 285.823 | 269.310 | 279.180 | 289.888 | 311.467 |
| 3.610 | 272.079 | 263.801 | 266.477 | 285.242 | 281.493 | 298.797 | 309.455 | 287.100 | 276.512 | 305.762 |
| 3.710 | 273.026 | 268.559 | 287.075 | 302.518 | 311.626 | 296.892 | 280.124 | 296.593 | 285.198 | 315.243 |
| 3.810 | 271.489 | 269.615 | 282.692 | 295.925 | 289.263 | 300.839 | 288.927 | 310.140 | 289.204 | 304.823 |
| 3.910 | 280.122 | 273.601 | 279.312 | 304.231 | 298.831 | 308.835 | 287.162 | 285.030 | 323.421 | 332.397 |
| 4.010 | 282.396 | 283.150 | 293.302 | 311.056 | 300.515 | 303.024 | 351.192 | 285.136 | 285.474 | 319.386 |
| 4.110 | 262.111 | 278.309 | 278.281 | 308.212 | 287.234 | 309.693 | 310.704 | 306.865 | 281.887 | 329.541 |
| 4.210 | 274.758 | 287.963 | 285.678 | 310.095 | 315.026 | 306.212 | 294.962 | 316.973 | 312.126 | 312.346 |
| 4.310 | 287.634 | 292.213 | 294.121 | 322.306 | 295.699 | 310.084 | 288.790 | 322.541 | 292.173 | 325.245 |
| 4.410 | 282.779 | 293.749 | 318.914 | 312.075 | 296.171 | 296.199 | 311.447 | 308.324 | 296.713 | 315.609 |
| 4.510 | 290.942 | 295.682 | 286.748 | 291.179 | 308.656 | 307.941 | 301.233 | 310.793 | 292.182 | 327.608 |
| 4.610 | 296.367 | 299.132 | 284.463 | 302.161 | 297.764 | 326.044 | 308.290 | 324.605 | 316.316 | 327.851 |
| 4.710 | 295.255 | 286.561 | 329.980 | 320.364 | 296.294 | 325.527 | 313.674 | 334.955 | 310.617 | 335.456 |

Berechnungszeit der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit für $n \leq 4.710$ und $1 \leq k \leq 10$

| n | Berechnungszeit $t_{n,k}$ in Nanosekunden | | | | | | | | | |
|--------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | k = 1 | k = 2 | k = 3 | k = 4 | k = 5 | k = 6 | k = 7 | k = 8 | k = 9 | k = 10 |
| 4.810 | 292.545 | 290.240 | 289.101 | 312.196 | 300.127 | 304.985 | 332.050 | 309.497 | 304.871 | 326.929 |
| 4.910 | 296.126 | 303.273 | 293.006 | 299.194 | 308.525 | 328.441 | 319.593 | 362.180 | 300.566 | 344.577 |
| 5.010 | 302.004 | 295.529 | 296.389 | 307.555 | 308.438 | 333.042 | 334.229 | 331.159 | 315.414 | 334.380 |
| 5.110 | 309.042 | 307.768 | 321.127 | 313.260 | 307.351 | 330.941 | 336.361 | 343.431 | 325.778 | 349.709 |
| 5.210 | 296.937 | 298.303 | 327.751 | 320.546 | 319.660 | 323.460 | 334.321 | 337.945 | 313.464 | 334.975 |
| 5.310 | 300.202 | 290.726 | 296.574 | 307.122 | 318.087 | 332.531 | 329.924 | 320.730 | 311.835 | 364.286 |
| 5.410 | 293.324 | 308.366 | 300.672 | 316.079 | 314.129 | 331.064 | 324.890 | 315.383 | 349.306 | 344.135 |
| 5.510 | 291.584 | 310.614 | 308.561 | 348.846 | 322.661 | 337.475 | 316.436 | 340.350 | 325.896 | 364.482 |
| 5.610 | 301.602 | 282.804 | 326.186 | 327.089 | 335.078 | 329.737 | 320.993 | 339.942 | 339.350 | 350.388 |
| 5.710 | 294.950 | 288.793 | 339.744 | 318.026 | 321.661 | 331.083 | 324.211 | 330.947 | 336.590 | 375.533 |
| 5.810 | 296.219 | 306.402 | 334.880 | 351.737 | 320.951 | 343.761 | 339.319 | 323.759 | 351.622 | 370.767 |
| 5.910 | 285.921 | 307.136 | 336.059 | 322.214 | 320.403 | 329.553 | 322.387 | 343.999 | 350.335 | 385.951 |
| 6.010 | 325.256 | 292.051 | 330.966 | 350.432 | 346.077 | 345.909 | 340.825 | 341.805 | 361.341 | 361.691 |
| 6.110 | 306.843 | 292.386 | 346.630 | 328.237 | 336.526 | 348.046 | 333.299 | 341.501 | 359.819 | 378.729 |
| 6.210 | 317.565 | 318.180 | 344.080 | 344.348 | 344.325 | 333.207 | 353.050 | 333.436 | 346.479 | 362.196 |
| 6.310 | 295.984 | 298.186 | 333.849 | 344.580 | 331.433 | 361.850 | 332.232 | 374.086 | 334.425 | 373.371 |
| 6.410 | 330.888 | 309.128 | 315.235 | 365.535 | 354.533 | 347.560 | 348.147 | 357.643 | 343.596 | 383.582 |
| 6.510 | 299.968 | 301.703 | 330.930 | 333.042 | 332.299 | 368.493 | 367.901 | 347.558 | 356.838 | 392.223 |
| 6.610 | 319.702 | 354.450 | 356.869 | 341.264 | 361.828 | 340.998 | 347.228 | 341.806 | 363.967 | 383.721 |
| 6.710 | 299.728 | 325.884 | 343.817 | 341.515 | 336.131 | 350.661 | 359.202 | 383.903 | 366.230 | 408.761 |
| 6.810 | 336.685 | 323.462 | 323.644 | 349.929 | 362.403 | 380.961 | 358.894 | 376.966 | 366.398 | 397.779 |
| 6.910 | 304.354 | 304.413 | 338.540 | 348.848 | 368.683 | 362.719 | 344.007 | 371.270 | 364.417 | 419.377 |
| 7.010 | 322.496 | 332.402 | 330.664 | 360.847 | 363.468 | 361.864 | 365.962 | 370.292 | 361.590 | 411.395 |
| 7.110 | 307.276 | 333.204 | 367.432 | 348.292 | 381.704 | 390.049 | 350.502 | 394.030 | 349.385 | 423.285 |
| 7.210 | 320.752 | 330.340 | 329.301 | 374.150 | 394.234 | 372.804 | 362.330 | 384.708 | 377.433 | 392.904 |
| 7.310 | 334.916 | 335.137 | 368.016 | 364.510 | 375.539 | 395.097 | 374.662 | 380.900 | 354.721 | 398.528 |
| 7.410 | 319.791 | 339.193 | 367.800 | 372.005 | 368.373 | 388.946 | 361.928 | 361.314 | 391.035 | 396.664 |
| 7.510 | 312.148 | 339.953 | 353.757 | 374.564 | 355.855 | 394.910 | 362.579 | 386.180 | 359.059 | 405.506 |
| 7.610 | 319.303 | 339.520 | 340.878 | 399.561 | 379.266 | 401.531 | 393.960 | 386.820 | 375.212 | 414.340 |
| 7.710 | 323.236 | 341.705 | 373.684 | 361.671 | 359.028 | 374.801 | 363.300 | 408.579 | 361.450 | 415.935 |
| 7.810 | 333.207 | 357.785 | 343.261 | 394.064 | 376.410 | 373.974 | 396.659 | 389.130 | 383.356 | 446.020 |
| 7.910 | 319.973 | 327.795 | 363.180 | 362.523 | 371.879 | 395.184 | 370.010 | 385.750 | 367.267 | 410.510 |
| 8.010 | 336.199 | 329.558 | 368.454 | 379.721 | 384.210 | 384.227 | 382.048 | 383.492 | 383.833 | 412.351 |
| 8.110 | 329.499 | 330.243 | 367.728 | 368.018 | 367.113 | 398.830 | 393.237 | 389.194 | 404.984 | 441.751 |
| 8.210 | 344.652 | 348.167 | 367.395 | 377.813 | 384.750 | 402.227 | 375.759 | 395.469 | 388.912 | 428.752 |
| 8.310 | 350.251 | 332.061 | 371.555 | 402.961 | 373.762 | 400.916 | 375.206 | 387.281 | 382.744 | 468.771 |
| 8.410 | 364.185 | 337.045 | 355.033 | 383.596 | 416.547 | 390.035 | 390.345 | 385.794 | 409.339 | 441.583 |
| 8.510 | 348.047 | 350.575 | 367.390 | 393.147 | 385.191 | 395.161 | 390.789 | 406.560 | 411.149 | 427.559 |
| 8.610 | 365.845 | 359.062 | 357.506 | 381.386 | 390.943 | 407.677 | 382.135 | 388.437 | 395.379 | 433.599 |
| 8.710 | 334.022 | 338.897 | 394.896 | 393.312 | 421.592 | 422.553 | 401.095 | 412.706 | 418.433 | 435.303 |
| 8.810 | 345.281 | 342.381 | 368.974 | 385.292 | 420.877 | 413.192 | 417.729 | 409.390 | 407.870 | 435.739 |
| 8.910 | 335.914 | 366.328 | 394.276 | 399.525 | 407.775 | 418.866 | 417.083 | 429.481 | 418.614 | 434.706 |
| 9.010 | 352.360 | 368.728 | 386.755 | 419.709 | 405.864 | 399.553 | 426.079 | 420.285 | 393.279 | 467.581 |
| 9.110 | 343.619 | 362.498 | 395.089 | 410.691 | 416.684 | 409.809 | 424.146 | 420.265 | 399.313 | 446.917 |
| 9.210 | 358.713 | 381.188 | 377.724 | 429.493 | 427.766 | 425.101 | 422.849 | 424.875 | 405.087 | 478.370 |
| 9.310 | 343.543 | 369.502 | 405.766 | 423.900 | 405.456 | 438.309 | 427.082 | 409.362 | 433.465 | 460.829 |
| 9.410 | 391.940 | 395.248 | 378.827 | 424.475 | 411.515 | 433.376 | 434.365 | 424.763 | 420.017 | 471.462 |
| 9.510 | 341.987 | 380.059 | 388.635 | 435.167 | 413.099 | 430.674 | 436.357 | 449.889 | 428.409 | 460.357 |
| 9.610 | 358.537 | 387.809 | 378.120 | 401.539 | 421.953 | 439.715 | 443.645 | 443.936 | 409.420 | 463.109 |
| 9.710 | 361.425 | 356.285 | 393.918 | 407.540 | 405.112 | 416.938 | 440.648 | 453.512 | 428.588 | 480.622 |
| 9.810 | 379.302 | 379.861 | 410.136 | 410.175 | 435.099 | 423.263 | 440.961 | 450.761 | 419.667 | 476.946 |
| 9.910 | 366.233 | 381.872 | 412.071 | 426.738 | 413.831 | 420.849 | 430.451 | 419.491 | 422.115 | 485.849 |
| 10.010 | 368.678 | 391.331 | 396.349 | 426.635 | 435.499 | 416.200 | 427.464 | 456.717 | 439.438 | 467.414 |
| 10.110 | 360.425 | 359.330 | 410.725 | 464.000 | 431.283 | 427.467 | 438.477 | 457.686 | 414.200 | 497.538 |
| 10.210 | 368.303 | 375.980 | 399.475 | 420.966 | 424.665 | 437.927 | 455.032 | 432.683 | 414.530 | 509.573 |
| 10.310 | 356.553 | 368.359 | 409.971 | 413.918 | 410.619 | 451.183 | 432.596 | 430.076 | 451.979 | 475.473 |
| 10.410 | 374.771 | 401.349 | 427.073 | 424.291 | 432.644 | 437.941 | 449.314 | 430.462 | 425.785 | 518.610 |
| 10.510 | 370.946 | 380.285 | 404.146 | 448.378 | 420.126 | 447.051 | 428.411 | 447.475 | 466.218 | 481.186 |
| 10.610 | 376.461 | 370.977 | 424.864 | 432.825 | 448.649 | 442.894 | 429.339 | 475.784 | 452.769 | 488.104 |
| 10.710 | 363.143 | 387.976 | 402.246 | 450.330 | 447.707 | 462.248 | 429.632 | 452.311 | 439.100 | 489.154 |
| 10.810 | 371.846 | 374.016 | 398.829 | 439.729 | 460.823 | 448.730 | 453.873 | 461.737 | 455.929 | 488.500 |

Berechnungszeit der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit für $4.810 \leq n \leq 10.810$ und $1 \leq k \leq 10$

| n | Berechnungszeit $t_{n,k}$ in Nanosekunden | | | | | | | | | |
|--------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | k = 1 | k = 2 | k = 3 | k = 4 | k = 5 | k = 6 | k = 7 | k = 8 | k = 9 | k = 10 |
| 10.910 | 366.535 | 394.972 | 411.652 | 446.978 | 457.633 | 442.846 | 456.253 | 473.255 | 432.845 | 493.738 |
| 11.010 | 395.044 | 391.437 | 408.646 | 432.554 | 442.397 | 448.367 | 465.642 | 459.731 | 448.562 | 499.764 |
| 11.110 | 407.241 | 400.101 | 408.792 | 449.789 | 458.303 | 444.081 | 466.120 | 459.052 | 469.224 | 494.945 |
| 11.210 | 382.897 | 405.347 | 416.329 | 435.513 | 464.589 | 469.682 | 468.165 | 495.188 | 438.812 | 512.749 |
| 11.310 | 400.416 | 378.754 | 415.195 | 467.059 | 461.368 | 452.630 | 455.962 | 462.863 | 447.274 | 528.245 |
| 11.410 | 405.492 | 397.084 | 411.348 | 447.283 | 460.594 | 457.211 | 454.960 | 480.996 | 441.729 | 547.686 |
| 11.510 | 382.191 | 407.685 | 440.455 | 462.407 | 470.126 | 467.391 | 461.184 | 470.339 | 463.368 | 533.455 |
| 11.610 | 378.056 | 399.053 | 426.939 | 467.481 | 474.889 | 466.346 | 448.291 | 471.437 | 453.820 | 508.763 |
| 11.710 | 398.014 | 394.899 | 435.052 | 455.443 | 463.603 | 500.465 | 453.677 | 498.920 | 481.019 | 521.770 |
| 11.810 | 406.895 | 398.802 | 448.693 | 459.161 | 467.419 | 498.138 | 461.449 | 497.200 | 462.793 | 512.140 |
| 11.910 | 417.891 | 397.511 | 423.442 | 465.830 | 498.532 | 474.160 | 449.663 | 534.838 | 475.409 | 528.972 |
| 12.010 | 429.590 | 454.191 | 461.069 | 463.570 | 447.847 | 477.222 | 455.130 | 530.181 | 455.013 | 532.374 |
| 12.110 | 409.596 | 389.689 | 434.379 | 462.240 | 491.908 | 465.332 | 453.716 | 525.868 | 482.860 | 521.136 |
| 12.210 | 424.112 | 399.025 | 434.493 | 469.864 | 455.887 | 470.224 | 471.325 | 544.577 | 458.862 | 544.750 |
| 12.310 | 402.375 | 393.038 | 446.363 | 486.483 | 463.930 | 467.704 | 484.656 | 504.849 | 481.340 | 555.673 |
| 12.410 | 401.486 | 396.888 | 464.195 | 460.131 | 470.585 | 500.541 | 503.460 | 515.448 | 494.350 | 551.902 |
| 12.510 | 399.670 | 403.459 | 434.882 | 482.332 | 495.409 | 502.186 | 467.634 | 482.214 | 466.285 | 568.594 |
| 12.610 | 430.803 | 403.718 | 453.887 | 475.306 | 479.407 | 493.668 | 483.237 | 489.299 | 477.250 | 541.286 |
| 12.710 | 411.946 | 397.274 | 448.006 | 498.381 | 501.032 | 507.164 | 470.584 | 489.076 | 501.239 | 547.267 |
| 12.810 | 419.556 | 415.231 | 435.569 | 464.092 | 503.083 | 477.163 | 468.431 | 499.152 | 478.320 | 545.851 |
| 12.910 | 405.822 | 435.488 | 435.608 | 474.926 | 506.776 | 498.451 | 501.317 | 515.210 | 475.775 | 570.022 |
| 13.010 | 448.182 | 415.941 | 472.096 | 489.017 | 498.345 | 496.510 | 479.125 | 523.348 | 504.050 | 561.778 |
| 13.110 | 419.522 | 462.460 | 449.356 | 492.914 | 502.667 | 527.687 | 476.630 | 541.627 | 499.136 | 568.723 |
| 13.210 | 420.877 | 422.444 | 473.096 | 476.018 | 492.875 | 531.698 | 519.043 | 544.521 | 491.783 | 590.832 |
| 13.310 | 432.217 | 414.887 | 463.159 | 517.278 | 479.636 | 534.059 | 494.350 | 507.114 | 519.362 | 550.385 |
| 13.410 | 434.222 | 409.264 | 455.292 | 478.644 | 478.873 | 534.864 | 503.097 | 501.837 | 488.229 | 563.515 |
| 13.510 | 438.131 | 418.120 | 451.266 | 497.398 | 481.002 | 538.115 | 506.505 | 507.251 | 498.147 | 573.626 |
| 13.610 | 408.915 | 431.560 | 492.448 | 490.484 | 482.016 | 525.055 | 507.114 | 509.595 | 519.716 | 602.545 |
| 13.710 | 415.854 | 421.215 | 454.225 | 506.868 | 498.669 | 513.140 | 509.075 | 517.887 | 531.818 | 607.607 |
| 13.810 | 425.017 | 416.195 | 468.961 | 513.266 | 518.345 | 570.103 | 487.846 | 535.417 | 530.307 | 614.553 |
| 13.910 | 418.885 | 417.860 | 484.120 | 489.944 | 531.729 | 507.265 | 520.904 | 519.348 | 531.592 | 576.698 |
| 14.010 | 446.143 | 426.598 | 460.038 | 507.860 | 493.897 | 510.956 | 519.202 | 505.494 | 543.546 | 613.924 |
| 14.110 | 471.864 | 421.117 | 462.687 | 511.718 | 525.318 | 503.527 | 534.827 | 544.002 | 503.614 | 603.018 |
| 14.210 | 437.273 | 418.706 | 482.287 | 502.918 | 496.965 | 533.375 | 535.889 | 530.430 | 514.355 | 585.404 |
| 14.310 | 450.931 | 425.207 | 463.254 | 536.836 | 513.939 | 550.407 | 536.928 | 515.101 | 514.928 | 602.665 |
| 14.410 | 457.426 | 471.297 | 462.888 | 539.954 | 531.983 | 507.746 | 532.229 | 551.410 | 512.827 | 597.575 |
| 14.510 | 426.923 | 438.944 | 469.897 | 499.423 | 509.363 | 552.117 | 513.428 | 531.070 | 562.856 | 611.787 |
| 14.610 | 443.986 | 437.399 | 497.948 | 523.401 | 513.922 | 537.221 | 522.113 | 538.065 | 530.525 | 589.781 |
| 14.710 | 447.095 | 453.163 | 492.179 | 515.504 | 499.999 | 541.996 | 558.126 | 536.596 | 525.955 | 592.402 |
| 14.810 | 426.378 | 456.946 | 474.923 | 534.925 | 503.728 | 532.391 | 554.648 | 531.098 | 524.812 | 629.806 |
| 14.910 | 437.821 | 457.097 | 469.931 | 522.644 | 510.838 | 545.390 | 555.484 | 566.965 | 530.170 | 602.288 |
| 15.010 | 435.748 | 456.052 | 493.146 | 555.514 | 509.805 | 560.736 | 566.940 | 569.337 | 540.881 | 604.571 |
| 15.110 | 455.166 | 470.034 | 477.233 | 521.773 | 567.658 | 545.457 | 531.514 | 568.530 | 542.373 | 611.837 |
| 15.210 | 444.548 | 467.190 | 507.209 | 531.377 | 527.544 | 537.490 | 553.503 | 532.525 | 531.260 | 648.970 |
| 15.310 | 450.641 | 458.351 | 487.682 | 527.642 | 556.914 | 577.358 | 525.139 | 575.721 | 523.253 | 608.990 |
| 15.410 | 454.988 | 454.616 | 518.582 | 543.949 | 527.438 | 569.312 | 552.760 | 542.982 | 545.882 | 632.477 |
| 15.510 | 472.294 | 454.225 | 502.217 | 557.788 | 550.966 | 550.282 | 549.041 | 555.514 | 541.744 | 623.718 |
| 15.610 | 470.878 | 476.736 | 493.241 | 538.808 | 553.726 | 560.766 | 537.107 | 554.869 | 591.656 | 645.914 |
| 15.710 | 496.345 | 477.912 | 506.799 | 529.765 | 544.496 | 537.808 | 541.568 | 562.180 | 540.811 | 641.492 |
| 15.810 | 488.455 | 468.933 | 503.628 | 536.593 | 548.466 | 549.301 | 540.521 | 585.065 | 553.534 | 633.382 |
| 15.910 | 463.927 | 472.638 | 503.066 | 552.349 | 592.569 | 553.983 | 583.001 | 597.419 | 558.185 | 623.272 |
| 16.010 | 453.512 | 468.724 | 534.749 | 579.936 | 613.963 | 548.969 | 572.335 | 560.409 | 577.450 | 634.237 |
| 16.110 | 467.673 | 454.331 | 507.494 | 603.694 | 550.595 | 546.703 | 584.518 | 572.226 | 547.047 | 626.465 |
| 16.210 | 481.770 | 466.226 | 505.793 | 550.396 | 574.352 | 567.468 | 603.283 | 574.167 | 561.359 | 649.367 |
| 16.310 | 474.898 | 479.823 | 525.712 | 559.423 | 569.731 | 600.199 | 566.991 | 573.153 | 583.205 | 644.567 |
| 16.410 | 493.392 | 457.438 | 524.083 | 564.331 | 552.525 | 588.150 | 549.837 | 577.995 | 580.411 | 670.719 |
| 16.510 | 478.647 | 483.955 | 522.535 | 546.684 | 553.341 | 579.858 | 579.498 | 583.535 | 593.966 | 648.188 |
| 16.610 | 473.378 | 497.901 | 541.850 | 565.719 | 555.869 | 564.999 | 541.188 | 571.525 | 567.211 | 659.676 |
| 16.710 | 464.391 | 481.407 | 516.881 | 556.243 | 574.165 | 571.768 | 561.048 | 588.907 | 552.383 | 646.822 |
| 16.810 | 463.360 | 512.190 | 527.145 | 577.176 | 594.089 | 570.793 | 558.481 | 597.726 | 590.932 | 667.509 |
| 16.910 | 500.778 | 501.393 | 507.028 | 589.871 | 575.927 | 580.445 | 598.970 | 598.064 | 570.600 | 652.169 |

Berechnungszeit der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit für $10.910 \leq n < 16.910$ und $1 \leq k \leq 10$

| n | Berechnungszeit $t_{n,k}$ in Nanosekunden | | | | | | | | | |
|--------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | k = 1 | k = 2 | k = 3 | k = 4 | k = 5 | k = 6 | k = 7 | k = 8 | k = 9 | k = 10 |
| 17.010 | 468.567 | 460.955 | 520.689 | 562.096 | 589.806 | 571.201 | 597.855 | 605.739 | 602.260 | 663.950 |
| 17.110 | 480.315 | 464.693 | 534.104 | 595.997 | 562.359 | 586.216 | 585.485 | 595.142 | 607.169 | 675.331 |
| 17.210 | 488.796 | 475.725 | 514.232 | 587.284 | 552.235 | 610.270 | 555.430 | 601.439 | 590.717 | 711.009 |
| 17.310 | 500.630 | 468.827 | 520.415 | 575.763 | 561.205 | 612.661 | 570.681 | 605.766 | 610.627 | 672.660 |
| 17.410 | 528.097 | 467.916 | 549.427 | 607.278 | 597.542 | 641.433 | 578.679 | 601.769 | 587.510 | 681.413 |
| 17.510 | 505.678 | 517.607 | 537.411 | 580.934 | 579.123 | 608.920 | 571.086 | 601.813 | 577.567 | 662.014 |
| 17.610 | 509.265 | 493.545 | 548.608 | 588.044 | 584.772 | 617.955 | 579.970 | 615.309 | 596.156 | 676.809 |
| 17.710 | 494.557 | 512.442 | 521.789 | 581.825 | 576.380 | 627.236 | 595.019 | 631.583 | 614.363 | 672.141 |
| 17.810 | 516.501 | 522.376 | 553.824 | 601.520 | 583.023 | 590.262 | 579.643 | 601.118 | 594.849 | 691.191 |
| 17.910 | 506.717 | 500.999 | 578.034 | 590.996 | 568.566 | 598.598 | 614.125 | 618.522 | 614.192 | 709.327 |
| 18.010 | 481.779 | 478.253 | 549.980 | 586.144 | 593.086 | 620.911 | 584.864 | 606.406 | 591.826 | 730.581 |
| 18.110 | 490.755 | 492.096 | 556.570 | 606.683 | 581.037 | 638.033 | 591.306 | 646.637 | 624.844 | 740.110 |
| 18.210 | 484.502 | 489.263 | 551.321 | 600.503 | 582.213 | 598.679 | 593.972 | 609.387 | 589.493 | 737.657 |
| 18.310 | 520.373 | 494.330 | 560.224 | 582.051 | 574.508 | 607.800 | 638.262 | 614.566 | 639.025 | 738.635 |
| 18.410 | 500.166 | 485.486 | 580.766 | 598.573 | 616.304 | 632.231 | 610.186 | 638.408 | 588.172 | 732.330 |
| 18.510 | 503.871 | 505.891 | 551.318 | 611.175 | 600.358 | 648.702 | 627.090 | 643.553 | 607.197 | 704.494 |
| 18.610 | 483.452 | 506.265 | 551.617 | 624.601 | 651.459 | 603.635 | 613.974 | 617.539 | 644.207 | 758.166 |
| 18.710 | 494.699 | 516.177 | 551.436 | 588.211 | 609.546 | 616.868 | 636.874 | 635.745 | 644.889 | 732.112 |
| 18.810 | 512.858 | 497.725 | 592.231 | 621.506 | 648.291 | 623.394 | 609.996 | 622.179 | 641.145 | 734.040 |
| 18.910 | 532.863 | 511.872 | 600.389 | 610.418 | 639.047 | 661.961 | 632.116 | 640.980 | 637.388 | 709.098 |
| 19.010 | 525.622 | 501.770 | 601.830 | 652.987 | 649.663 | 615.589 | 614.902 | 634.871 | 656.597 | 723.661 |
| 19.110 | 491.216 | 512.109 | 556.185 | 625.453 | 608.596 | 633.220 | 652.683 | 666.539 | 645.889 | 705.028 |
| 19.210 | 523.186 | 522.298 | 564.798 | 633.776 | 620.900 | 643.064 | 629.174 | 659.435 | 610.510 | 778.797 |
| 19.310 | 500.541 | 497.624 | 561.789 | 606.169 | 608.345 | 651.621 | 652.080 | 654.281 | 652.591 | 719.577 |
| 19.410 | 529.142 | 518.347 | 578.419 | 637.008 | 615.986 | 631.203 | 651.077 | 641.687 | 634.524 | 769.092 |
| 19.510 | 535.473 | 523.105 | 572.958 | 660.575 | 621.023 | 633.368 | 638.416 | 667.257 | 631.630 | 740.052 |
| 19.610 | 537.316 | 530.815 | 607.180 | 644.632 | 649.951 | 657.997 | 611.206 | 647.557 | 645.470 | 731.783 |
| 19.710 | 572.944 | 507.458 | 562.457 | 616.134 | 643.472 | 667.998 | 637.474 | 655.938 | 644.467 | 730.235 |
| 19.810 | 534.808 | 510.419 | 570.958 | 625.238 | 653.619 | 634.133 | 633.887 | 655.781 | 657.670 | 744.653 |
| 19.910 | 538.135 | 516.624 | 568.354 | 620.179 | 638.921 | 657.256 | 642.550 | 683.441 | 626.289 | 736.088 |

Berechnungszeit der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit für $17.010 \leq n < 19.910$ und $1 \leq k \leq 10$

Performanz-Messungen zur Berechnung der absolute Verletzungswahrscheinlichkeit auf Basis eines Monitoring-Historie-Ausschnittes der Länge n :

| n | Berechnungszeit t_n | |
|-------|-----------------------|------------------|
| | in Nanosekunden | in Millisekunden |
| 10 | 19.681 | 0,01968 |
| 110 | 28.470 | 0,02847 |
| 210 | 32.112 | 0,03211 |
| 310 | 45.866 | 0,04587 |
| 410 | 58.965 | 0,05897 |
| 510 | 71.050 | 0,07105 |
| 610 | 83.041 | 0,08304 |
| 710 | 106.245 | 0,10625 |
| 810 | 106.943 | 0,10694 |
| 910 | 126.485 | 0,12649 |
| 1.010 | 139.827 | 0,13983 |
| 1.110 | 154.500 | 0,15450 |
| 1.210 | 163.423 | 0,16342 |
| 1.310 | 172.991 | 0,17299 |
| 1.410 | 187.518 | 0,18752 |
| 1.510 | 207.816 | 0,20782 |
| 1.610 | 211.417 | 0,21142 |
| 1.710 | 234.543 | 0,23454 |
| 1.810 | 234.789 | 0,23479 |
| 1.910 | 261.027 | 0,26103 |
| 2.010 | 273.059 | 0,27306 |
| 2.110 | 291.011 | 0,29101 |
| 2.210 | 308.220 | 0,30822 |
| 2.310 | 313.500 | 0,31350 |
| 2.410 | 316.051 | 0,31605 |
| 2.510 | 323.758 | 0,32376 |
| 2.610 | 331.857 | 0,33186 |
| 2.710 | 347.946 | 0,34795 |
| 2.810 | 365.521 | 0,36552 |
| 2.910 | 380.157 | 0,38016 |
| 3.110 | 412.951 | 0,41295 |
| 3.210 | 414.343 | 0,41434 |
| 3.310 | 450.914 | 0,45091 |
| 3.410 | 455.323 | 0,45532 |
| 3.510 | 461.379 | 0,46138 |
| 3.610 | 481.139 | 0,48114 |
| 3.710 | 486.539 | 0,48654 |
| 3.810 | 488.363 | 0,48836 |
| 3.910 | 522.834 | 0,52283 |
| 4.010 | 513.808 | 0,51381 |
| 4.110 | 547.209 | 0,54721 |
| 4.210 | 548.726 | 0,54873 |
| 4.310 | 557.137 | 0,55714 |
| 4.410 | 577.551 | 0,57755 |
| 4.510 | 582.381 | 0,58238 |
| 4.610 | 592.927 | 0,59293 |
| 4.710 | 608.806 | 0,60881 |
| 4.810 | 629.593 | 0,62959 |
| 4.910 | 631.342 | 0,63134 |
| 5.010 | 644.743 | 0,64474 |
| 5.110 | 663.290 | 0,66329 |
| 5.210 | 680.519 | 0,68052 |
| 5.310 | 691.534 | 0,69153 |
| 5.410 | 700.913 | 0,70091 |
| 5.510 | 720.840 | 0,72084 |
| 5.610 | 744.826 | 0,74483 |

Berechnungszeit der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit für $n \leq 5.610$

| n | Berechnungszeit t_n | |
|--------|-----------------------|------------------|
| | in Nanosekunden | in Millisekunden |
| 5.710 | 730.441 | 0,73044 |
| 5.810 | 759.205 | 0,75921 |
| 5.910 | 822.093 | 0,82209 |
| 6.010 | 808.566 | 0,80857 |
| 6.110 | 790.673 | 0,79067 |
| 6.210 | 821.257 | 0,82126 |
| 6.310 | 815.436 | 0,81544 |
| 6.410 | 832.848 | 0,83285 |
| 6.510 | 853.326 | 0,85333 |
| 6.610 | 871.689 | 0,87169 |
| 6.710 | 874.929 | 0,87493 |
| 6.810 | 888.453 | 0,88845 |
| 6.910 | 919.153 | 0,91915 |
| 7.010 | 907.900 | 0,90790 |
| 7.110 | 931.565 | 0,93157 |
| 7.210 | 924.838 | 0,92484 |
| 7.310 | 942.857 | 0,94286 |
| 7.410 | 978.263 | 0,97826 |
| 7.510 | 957.663 | 0,95766 |
| 7.610 | 987.284 | 0,98728 |
| 7.710 | 995.025 | 0,99503 |
| 7.810 | 1.052.021 | 1,05202 |
| 7.910 | 1.020.520 | 1,02052 |
| 8.010 | 1.050.027 | 1,05003 |
| 8.110 | 1.046.490 | 1,04649 |
| 8.210 | 1.074.131 | 1,07413 |
| 8.310 | 1.082.073 | 1,08207 |
| 8.410 | 1.092.186 | 1,09219 |
| 8.510 | 1.120.044 | 1,12004 |
| 8.610 | 1.126.299 | 1,12630 |
| 8.710 | 1.122.399 | 1,12240 |
| 8.810 | 1.130.221 | 1,13022 |
| 8.910 | 1.149.023 | 1,14902 |
| 9.010 | 1.147.148 | 1,14715 |
| 9.110 | 1.190.967 | 1,19097 |
| 9.210 | 1.192.212 | 1,19221 |
| 9.310 | 1.193.623 | 1,19362 |
| 9.410 | 1.245.602 | 1,24560 |
| 9.510 | 1.270.519 | 1,27052 |
| 9.610 | 1.290.001 | 1,29000 |
| 9.710 | 1.257.126 | 1,25713 |
| 9.810 | 1.266.484 | 1,26648 |
| 9.910 | 1.292.776 | 1,29278 |
| 10.010 | 1.304.193 | 1,30419 |
| 10.110 | 1.294.455 | 1,29446 |
| 10.210 | 1.311.018 | 1,31102 |
| 10.310 | 1.343.751 | 1,34375 |
| 10.410 | 1.336.910 | 1,33691 |
| 10.510 | 1.356.356 | 1,35636 |
| 10.610 | 1.367.592 | 1,36759 |
| 10.710 | 1.420.202 | 1,42020 |
| 10.810 | 1.386.614 | 1,38661 |
| 10.910 | 1.399.038 | 1,39904 |
| 11.010 | 1.416.498 | 1,41650 |
| 11.110 | 1.394.696 | 1,39470 |
| 11.210 | 1.470.198 | 1,47020 |

Berechnungszeit der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit für 5.710 n 11.210

Performanz-Messungen zur Aufstellung aller Verletzungsmatrizen für einen Ausführungsplan einer zusammengesetzten Dienstleistung mit z Teildienstaufrufen und d Dienstgüteeigenschaften:

| z | d = 1 | | | | | | | |
|-----|--------------------------------------|-------------|----------|--------|---------------------------------------|------------|---------|--------|
| | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (original) | | | | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (optimized) | | | |
| | ns | s | min | h | ns | s | min | h |
| 1 | 7.811 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 3.860 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 11.180 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 6.565 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 24.735 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 10.761 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | 57.376 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 19.315 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | 96.844 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 32.383 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | 208.506 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 67.360 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 448.151 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0000 | 115.461 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | 947.125 | 0,0009 | 0,0000 | 0,0000 | 230.520 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | 2.021.647 | 0,0020 | 0,0000 | 0,0000 | 483.871 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 |
| 10 | 4.316.699 | 0,0043 | 0,0001 | 0,0000 | 996.299 | 0,0010 | 0,0000 | 0,0000 |
| 11 | 9.264.428 | 0,0093 | 0,0002 | 0,0000 | 2.167.035 | 0,0022 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | 19.520.508 | 0,0195 | 0,0003 | 0,0000 | 4.428.534 | 0,0044 | 0,0001 | 0,0000 |
| 13 | 40.812.684 | 0,0408 | 0,0007 | 0,0000 | 9.599.477 | 0,0096 | 0,0002 | 0,0000 |
| 14 | 85.914.399 | 0,0859 | 0,0014 | 0,0000 | 20.367.845 | 0,0204 | 0,0003 | 0,0000 |
| 15 | 184.614.541 | 0,1846 | 0,0031 | 0,0001 | 45.797.317 | 0,0458 | 0,0008 | 0,0000 |
| 16 | 384.445.447 | 0,3844 | 0,0064 | 0,0001 | 92.368.219 | 0,0924 | 0,0015 | 0,0000 |
| 17 | 803.086.017 | 0,8031 | 0,0134 | 0,0002 | 194.380.699 | 0,1944 | 0,0032 | 0,0001 |
| 18 | 1.680.115.064 | 1,6801 | 0,0280 | 0,0005 | 412.156.181 | 0,4122 | 0,0069 | 0,0001 |
| 19 | 3.490.626.875 | 3,4906 | 0,0582 | 0,0010 | 874.948.095 | 0,8749 | 0,0146 | 0,0002 |
| 20 | 7.271.319.008 | 7,2713 | 0,1212 | 0,0020 | 1.828.627.493 | 1,8286 | 0,0305 | 0,0005 |
| 21 | 15.792.369.142 | 15,7924 | 0,2632 | 0,0044 | 4.057.835.283 | 4,0578 | 0,0676 | 0,0011 |
| 22 | 31.708.778.350 | 31,7088 | 0,5285 | 0,0088 | 8.280.559.959 | 8,2806 | 0,1380 | 0,0023 |
| 23 | 65.869.945.202 | 65,8699 | 1,0978 | 0,0183 | 17.461.892.224 | 17,4619 | 0,2910 | 0,0049 |
| 24 | 133.033.590.582 | 133,0336 | 2,2172 | 0,0370 | 34.951.164.743 | 34,9512 | 0,5825 | 0,0097 |
| 25 | 286.350.373.022 | 286,3504 | 4,7725 | 0,0795 | 74.231.557.363 | 74,2316 | 1,2372 | 0,0206 |
| 26 | 577.659.239.652 | 577,6592 | 9,6277 | 0,1605 | 153.723.307.012 | 153,7233 | 2,5621 | 0,0427 |
| 27 | 1.216.803.957.766 | 1.216,8040 | 20,2801 | 0,3380 | 371.121.330.784 | 371,1213 | 6,1854 | 0,1031 |
| 28 | 2.297.799.591.289 | 2.297,7996 | 38,2967 | 0,6383 | 626.941.268.513 | 626,9413 | 10,4490 | 0,1742 |
| 29 | 4.695.581.095.362 | 4.695,5811 | 78,2597 | 1,3043 | 1.268.026.038.226 | 1.268,0260 | 21,1338 | 0,3522 |
| 30 | 10.068.106.567.455 | 10.068,1066 | 167,8018 | 2,7967 | 2.611.613.984.730 | 2.611,6140 | 43,5269 | 0,7254 |

Berechnungszeit der Verletzungsmatrizen für $d = 1$

| z | d = 2 | | | | | | | |
|----|--------------------------------------|-----------|----------|--------|---------------------------------------|-----------|---------|--------|
| | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (original) | | | | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (optimized) | | | |
| | ns | s | min | h | ns | s | min | h |
| 1 | 6.218 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 3140 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 10.330 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 5721 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 24.086 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 9.498 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | 47.765 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 17.616 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | 105.443 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 32.339 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | 208.786 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 62.348 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 447.766 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0000 | 137.112 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | 991.299 | 0,0009 | 0,0000 | 0,0000 | 238.354 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | 2.108.631 | 0,0021 | 0,0000 | 0,0000 | 475.350 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0000 |
| 10 | 4.410.074 | 0,0044 | 0,0000 | 0,0000 | 1.034.589 | 0,0010 | 0,0000 | 0,0000 |
| 11 | 9.475.729 | 0,0094 | 0,0001 | 0,0000 | 2.175.706 | 0,0021 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | 20.056.342 | 0,0200 | 0,0003 | 0,0000 | 4.565.373 | 0,0045 | 0,0000 | 0,0000 |
| 13 | 41.672.944 | 0,0416 | 0,0006 | 0,0000 | 9.567.238 | 0,0095 | 0,0001 | 0,0000 |
| 14 | 87.250.709 | 0,0872 | 0,0014 | 0,0000 | 20.297.272 | 0,0203 | 0,0003 | 0,0000 |
| 15 | 183.040.559 | 0,1830 | 0,0030 | 0,0000 | 43.317.734 | 0,0433 | 0,0007 | 0,0000 |
| 16 | 383.635.903 | 0,3836 | 0,0063 | 0,0001 | 92.437.960 | 0,0924 | 0,0015 | 0,0000 |
| 17 | 802.383.610 | 0,8023 | 0,0133 | 0,0002 | 195.584.751 | 0,1955 | 0,0032 | 0,0000 |
| 18 | 1.678.192.256 | 1,6781 | 0,0279 | 0,0004 | 411.020.138 | 0,4110 | 0,0068 | 0,0001 |
| 19 | 3.491.894.617 | 3,4918 | 0,0582 | 0,0009 | 866.810.480 | 0,8668 | 0,0144 | 0,0002 |
| 20 | 7.284.286.701 | 7,2842 | 0,1214 | 0,0020 | 1.835.533.516 | 1,8355 | 0,0305 | 0,0005 |
| 21 | 15.087.695.224 | 15,0877 | 0,2514 | 0,0041 | 3.924.634.835 | 3,9246 | 0,0654 | 0,0010 |
| 22 | 32.213.200.561 | 32,2132 | 0,5368 | 0,0089 | 8.576.171.273 | 8,5761 | 0,1429 | 0,0023 |
| 23 | 68.631.315.712 | 68,6313 | 1,1438 | 0,0190 | 1.882.758.758 | 18,8275 | 0,3137 | 0,0052 |
| 24 | 169.377.218.333 | 169,3772 | 2,8229 | 0,0470 | 41.738.717.910 | 41,7387 | 0,6956 | 0,0115 |
| 25 | 287.959.987.373 | 287,9599 | 4,7993 | 0,0799 | 76.085.920.696 | 76,0859 | 1,2681 | 0,0211 |
| 26 | 556.488.780.278 | 556,4887 | 9,2748 | 0,1545 | 150.626.268.981 | 150,6262 | 2,5104 | 0,0418 |
| 27 | 1.150.088.524.101 | 1150,0885 | 19,1681 | 0,3194 | 315.957.196.794 | 315,9572 | 5,2659 | 0,0877 |
| 28 | 2.381.277.720.492 | 2381,2777 | 39,6879 | 0,6614 | 691.001.029.181 | 691,0010 | 11,5166 | 0,1919 |
| 29 | 5.066.576.557.076 | 5066,5765 | 84,4429 | 1,4073 | 1.416.750.734.521 | 1416,7507 | 23,6125 | 0,3935 |
| 30 | 9.788.132.505.668 | 9788,1325 | 163,1355 | 2,7180 | 2.617.471.278.330 | 2617,4712 | 43,6245 | 0,7270 |

Berechnungszeit der Verletzungsmatrizen für $d = 2$

| z | d = 3 | | | | | | | |
|----|--------------------------------------|-----------|----------|--------|---------------------------------------|-----------|---------|--------|
| | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (original) | | | | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (optimized) | | | |
| | ns | s | min | h | ns | s | min | h |
| 1 | 6.263 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 3.039 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 9.610 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 5.754 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 24.841 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 10.017 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | 49.285 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 18.426 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | 109.444 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 33.792 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | 215.139 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 60.314 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 462.751 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0000 | 114.237 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | 971.855 | 0,0009 | 0,0000 | 0,0000 | 245.237 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | 2.095.808 | 0,0021 | 0,0000 | 0,0000 | 487.246 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 |
| 10 | 4.513.333 | 0,0045 | 0,0000 | 0,0000 | 1.004.077 | 0,0010 | 0,0000 | 0,0000 |
| 11 | 9.262.741 | 0,0092 | 0,0001 | 0,0000 | 2.074.839 | 0,0021 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | 20.017.521 | 0,0200 | 0,0003 | 0,0000 | 4.447.336 | 0,0044 | 0,0001 | 0,0000 |
| 13 | 41.005.993 | 0,0410 | 0,0006 | 0,0000 | 9.699.785 | 0,0097 | 0,0002 | 0,0000 |
| 14 | 86.962.616 | 0,0869 | 0,0014 | 0,0000 | 20.136.620 | 0,0201 | 0,0003 | 0,0000 |
| 15 | 181.585.167 | 0,1815 | 0,0030 | 0,0000 | 43.244.714 | 0,0432 | 0,0007 | 0,0000 |
| 16 | 381.128.685 | 0,3811 | 0,0063 | 0,0001 | 92.852.795 | 0,0929 | 0,0015 | 0,0000 |
| 17 | 798.761.401 | 0,7987 | 0,0133 | 0,0002 | 194.204.732 | 0,1942 | 0,0032 | 0,0001 |
| 18 | 1.670.177.276 | 1,6701 | 0,0278 | 0,0004 | 413.737.131 | 0,4137 | 0,0069 | 0,0001 |
| 19 | 3.459.732.083 | 3,4597 | 0,0576 | 0,0009 | 870.826.079 | 0,8708 | 0,0145 | 0,0002 |
| 20 | 7.238.109.709 | 7,2381 | 0,1206 | 0,0020 | 1.834.053.260 | 1,8341 | 0,0306 | 0,0005 |
| 21 | 14.750.407.385 | 14,7504 | 0,2458 | 0,0041 | 4.090.060.050 | 4,0901 | 0,0682 | 0,0011 |
| 22 | 30.827.064.054 | 30,8270 | 0,5137 | 0,0085 | 8.743.472.145 | 8,7435 | 0,1457 | 0,0024 |
| 23 | 64.744.977.643 | 64,7449 | 1,0790 | 0,0179 | 18.114.260.890 | 18,1143 | 0,3019 | 0,0050 |
| 24 | 133.710.056.725 | 133,7100 | 2,2285 | 0,0371 | 37.877.917.445 | 37,8779 | 0,6313 | 0,0105 |
| 25 | 277.000.125.435 | 277,0001 | 4,6166 | 0,0769 | 77.466.671.603 | 77,4667 | 1,2911 | 0,0215 |
| 26 | 567.683.084.023 | 567,6830 | 9,4613 | 0,1576 | 144.237.751.446 | 144,2378 | 2,4040 | 0,0401 |
| 27 | 1.149.092.671.275 | 1149,0926 | 19,1515 | 0,3191 | 308.787.773.027 | 308,7878 | 5,1465 | 0,0858 |
| 28 | 2.412.291.632.876 | 2412,2916 | 40,2048 | 0,6700 | 636.201.561.372 | 636,2016 | 10,6034 | 0,1767 |
| 29 | 5.432.812.800.230 | 5432,8128 | 90,5468 | 1,5091 | 1.345.086.588.379 | 1345,0866 | 22,4181 | 0,3736 |
| 30 | 9.858.932.207.305 | 9858,9322 | 164,3155 | 2,7385 | 2.600.757.157.960 | 2600,7572 | 43,3460 | 0,7224 |

Berechnungszeit der Verletzungsmatrizen für $d = 3$

| z | d = 4 | | | | | | | |
|----|--------------------------------------|-----------|----------|--------|---------------------------------------|-----------|---------|--------|
| | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (original) | | | | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (optimized) | | | |
| | ns | s | min | h | ns | s | min | h |
| 1 | 6.185 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 3.257 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 10.666 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 5.749 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 31.043 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 9.978 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | 49.877 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 17.387 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | 103.460 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 40.910 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | 221.290 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 60.242 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 484.843 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0000 | 114.126 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | 975.805 | 0,0009 | 0,0000 | 0,0000 | 239.695 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | 2.121.034 | 0,0021 | 0,0000 | 0,0000 | 502.739 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 |
| 10 | 4.465.673 | 0,0044 | 0,0000 | 0,0000 | 1.010.105 | 0,0010 | 0,0000 | 0,0000 |
| 11 | 9.509.722 | 0,0095 | 0,0001 | 0,0000 | 2.079.431 | 0,0020 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | 20.156.416 | 0,0201 | 0,0003 | 0,0000 | 4.491.151 | 0,0044 | 0,0000 | 0,0000 |
| 13 | 42.431.024 | 0,0424 | 0,0007 | 0,0000 | 9.564.304 | 0,0095 | 0,0001 | 0,0000 |
| 14 | 88.229.202 | 0,0882 | 0,0014 | 0,0000 | 20.374.628 | 0,0203 | 0,0003 | 0,0000 |
| 15 | 185.976.988 | 0,1859 | 0,0031 | 0,0000 | 43.461.417 | 0,0434 | 0,0007 | 0,0000 |
| 16 | 392.158.455 | 0,3921 | 0,0065 | 0,0001 | 93.895.039 | 0,0939 | 0,0015 | 0,0000 |
| 17 | 821.221.568 | 0,8212 | 0,0136 | 0,0002 | 202.331.296 | 0,2023 | 0,0033 | 0,0000 |
| 18 | 1.721.637.241 | 1,7216 | 0,0286 | 0,0004 | 419.808.411 | 0,4198 | 0,0070 | 0,0001 |
| 19 | 3.573.306.953 | 3,5733 | 0,0595 | 0,0009 | 868.750.860 | 0,8687 | 0,0144 | 0,0002 |
| 20 | 7.434.272.652 | 7,4342 | 0,1239 | 0,0020 | 1.896.582.090 | 1,8965 | 0,0316 | 0,0005 |
| 21 | 15.248.099.409 | 15,2481 | 0,2541 | 0,0042 | 3.676.213.597 | 3,6762 | 0,0612 | 0,0010 |
| 22 | 29.523.044.688 | 29,5230 | 0,4920 | 0,0082 | 7.852.165.568 | 7,8521 | 0,1308 | 0,0021 |
| 23 | 63.849.134.178 | 63,8491 | 1,0641 | 0,0177 | 16.388.021.941 | 16,3880 | 0,2731 | 0,0045 |
| 24 | 131.731.160.524 | 131,7311 | 2,1955 | 0,0365 | 33.276.859.210 | 33,2768 | 0,5546 | 0,0092 |
| 25 | 287.914.872.421 | 287,9148 | 4,7985 | 0,0799 | 75.866.521.584 | 75,8665 | 1,2644 | 0,0210 |
| 26 | 577.200.597.283 | 577,2006 | 9,6200 | 0,1603 | 158.196.390.603 | 158,1963 | 2,6366 | 0,0439 |
| 27 | 1.242.130.151.458 | 1242,1301 | 20,7021 | 0,3450 | 332.006.643.582 | 332,0066 | 5,5334 | 0,0922 |
| 28 | 2.302.884.706.296 | 2302,8847 | 38,3814 | 0,6396 | 622.581.853.560 | 622,5818 | 10,3763 | 0,1729 |
| 29 | 4.781.184.498.868 | 4781,1845 | 79,6864 | 1,3281 | 1.299.747.760.959 | 1299,7477 | 21,6624 | 0,3610 |
| 30 | 9.847.050.903.956 | 9847,0509 | 164,1175 | 2,7352 | 2.608.415.974.377 | 2608,4159 | 43,4736 | 0,7245 |

Berechnungszeit der Verletzungsmatrizen für $d = 4$

| z | d = 5 | | | | | | | | | |
|-----|--------------------------------------|------------|----------|--------|--|---------------------------------------|-----------|---------|--------|--|
| | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (original) | | | | | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (optimized) | | | | |
| | ns | s | min | h | | ns | s | min | h | |
| 1 | 6.414 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 3.447 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 2 | 10.409 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 5.967 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 3 | 24.405 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 10.733 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 4 | 57.532 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 18.823 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 5 | 104.136 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | | 34.177 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 6 | 227.386 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | | 64.902 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 7 | 507.019 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 | | 124.781 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 8 | 1.094.172 | 0,0010 | 0,0000 | 0,0000 | | 261.491 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 9 | 2.209.711 | 0,0022 | 0,0000 | 0,0000 | | 512.914 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 10 | 4.754.257 | 0,0047 | 0,0000 | 0,0000 | | 1.131.925 | 0,0011 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 11 | 10.306.773 | 0,0103 | 0,0001 | 0,0000 | | 2.548.977 | 0,0025 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 12 | 20.845.861 | 0,0208 | 0,0003 | 0,0000 | | 4.807.186 | 0,0048 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 13 | 43.751.046 | 0,0437 | 0,0007 | 0,0000 | | 11.631.517 | 0,0116 | 0,0001 | 0,0000 | |
| 14 | 92.582.655 | 0,0925 | 0,0015 | 0,0000 | | 22.241.435 | 0,0222 | 0,0003 | 0,0000 | |
| 15 | 195.056.651 | 0,1950 | 0,0032 | 0,0000 | | 49.005.882 | 0,0490 | 0,0008 | 0,0000 | |
| 16 | 402.721.284 | 0,4027 | 0,0067 | 0,0001 | | 104.943.387 | 0,1049 | 0,0017 | 0,0000 | |
| 17 | 845.298.773 | 0,845 | 0,0140 | 0,0002 | | 216.322.169 | 0,2163 | 0,0036 | 0,0000 | |
| 18 | 1.769.535.251 | 1,7695 | 0,0294 | 0,0004 | | 450.747.639 | 0,4507 | 0,0075 | 0,0001 | |
| 19 | 3.673.494.111 | 3,6734 | 0,0612 | 0,0010 | | 985.721.146 | 0,9857 | 0,0164 | 0,0002 | |
| 20 | 7.541.308.121 | 7,5413 | 0,1256 | 0,0020 | | 2.093.053.206 | 2,0930 | 0,0348 | 0,0005 | |
| 21 | 16.232.327.013 | 16,2323 | 0,2705 | 0,0045 | | 4.508.137.208 | 4,5081 | 0,0751 | 0,0012 | |
| 22 | 34.593.925.765 | 34,5939 | 0,5765 | 0,0096 | | 9.167.168.453 | 9,1671 | 0,1527 | 0,0025 | |
| 23 | 68.872.479.324 | 68,8724 | 1,1478 | 0,0191 | | 18.482.389.242 | 18,4823 | 0,3080 | 0,0051 | |
| 24 | 136.055.729.150 | 136,0557 | 2,2676 | 0,0377 | | 37.991.645.028 | 37,9916 | 0,6331 | 0,0105 | |
| 25 | 316.642.312.641 | 316,6423 | 5,2773 | 0,0879 | | 81.014.762.770 | 81,0147 | 1,3502 | 0,0225 | |
| 26 | 572.668.719.349 | 572,6687 | 9,5444 | 0,1590 | | 182.709.617.284 | 182,7096 | 3,0451 | 0,0507 | |
| 27 | 1.196.856.896.058 | 1196,8569 | 19,9476 | 0,3324 | | 366.004.369.550 | 366,0043 | 6,1000 | 0,1016 | |
| 28 | 2.615.210.401.880 | 2615,2104 | 43,5868 | 0,7264 | | 750.833.125.439 | 750,8331 | 12,5139 | 0,2085 | |
| 29 | 4.990.211.017.601 | 4990,2110 | 83,1701 | 1,3861 | | 1.493.928.564.384 | 1493,9285 | 24,8988 | 0,4149 | |
| 30 | 10.621.068.580.225 | 10621,0685 | 177,0178 | 2,9503 | | 3.186.691.276.120 | 3186,6912 | 53,1115 | 0,8851 | |

Berechnungszeit der Verletzungsmatrizen für $d = 5$

| z | d = 6 | | | | | | | |
|----|--------------------------------------|------------|----------|--------|---------------------------------------|-----------|---------|--------|
| | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (original) | | | | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (optimized) | | | |
| | ns | s | min | h | ns | s | min | h |
| 1 | 6.078 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 3.039 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 9.828 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 5.363 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 23.131 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 9.716 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | 46.218 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 21.002 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | 111.070 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 34.289 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | 218.307 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 61.197 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 482.044 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0000 | 131.189 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | 1.029.499 | 0,0010 | 0,0000 | 0,0000 | 257.239 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | 2.225.958 | 0,0022 | 0,0000 | 0,0000 | 513.143 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 |
| 10 | 4.617.380 | 0,0046 | 0,0000 | 0,0000 | 1.062.677 | 0,0010 | 0,0000 | 0,0000 |
| 11 | 9.685.722 | 0,0096 | 0,0001 | 0,0000 | 2.201.715 | 0,0022 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | 20.149.834 | 0,0201 | 0,0003 | 0,0000 | 4.946.120 | 0,0049 | 0,0000 | 0,0000 |
| 13 | 41.719.771 | 0,0417 | 0,0007 | 0,0000 | 10.040.398 | 0,0100 | 0,0001 | 0,0000 |
| 14 | 87.638.445 | 0,0876 | 0,0014 | 0,0000 | 22.116.408 | 0,0221 | 0,0003 | 0,0000 |
| 15 | 184.850.398 | 0,1848 | 0,0030 | 0,0000 | 45.188.575 | 0,0451 | 0,0007 | 0,0000 |
| 16 | 389.222.322 | 0,3892 | 0,0064 | 0,0001 | 98.017.552 | 0,0980 | 0,0016 | 0,0000 |
| 17 | 811.832.509 | 0,8118 | 0,0135 | 0,0002 | 212.153.326 | 0,2121 | 0,0035 | 0,0000 |
| 18 | 1.694.906.173 | 1,6949 | 0,0282 | 0,0004 | 437.750.613 | 0,4377 | 0,0073 | 0,0001 |
| 19 | 3.535.373.467 | 3,5353 | 0,0589 | 0,0009 | 910.734.593 | 0,9107 | 0,0151 | 0,0002 |
| 20 | 7.491.226.795 | 7,4912 | 0,1248 | 0,0020 | 2.003.538.879 | 2,0035 | 0,0333 | 0,0005 |
| 21 | 15.757.596.286 | 15,7576 | 0,2626 | 0,0043 | 4.288.605.116 | 4,2886 | 0,0714 | 0,0011 |
| 22 | 32.815.105.272 | 32,8151 | 0,5469 | 0,0091 | 8.906.418.274 | 8,9064 | 0,1484 | 0,0024 |
| 23 | 66.819.820.955 | 66,8198 | 1,1136 | 0,0185 | 18.641.894.152 | 18,6418 | 0,3107 | 0,0051 |
| 24 | 137.226.056.943 | 137,2260 | 2,2871 | 0,0381 | 38.359.675.880 | 38,3596 | 0,6393 | 0,0106 |
| 25 | 282.784.960.099 | 282,7849 | 4,7130 | 0,0785 | 81.725.457.007 | 81,7254 | 1,3620 | 0,0227 |
| 26 | 625.619.239.316 | 625,6192 | 10,4269 | 0,1737 | 165.343.767.154 | 165,3437 | 2,7557 | 0,0459 |
| 27 | 1.270.704.906.629 | 1270,7049 | 21,1784 | 0,3529 | 366.322.772.587 | 366,3227 | 6,1053 | 0,1017 |
| 28 | 2.736.127.258.352 | 2736,1272 | 45,6021 | 0,7600 | 771.039.539.662 | 771,0395 | 12,8506 | 0,2141 |
| 29 | 4.991.331.772.055 | 4991,3317 | 83,1888 | 1,3864 | 1.502.276.389.597 | 1502,2763 | 25,0379 | 0,4173 |
| 30 | 10.098.066.243.894 | 10098,0662 | 168,3011 | 2,8050 | 3.201.048.692.200 | 3201,0486 | 53,3508 | 0,8891 |

Berechnungszeit der Verletzungsmatrizen für $d = 6$

| z | d = 7 | | | | | | | | | |
|----|--------------------------------------|------------|----------|--------|--|---------------------------------------|-----------|---------|--------|--|
| | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (original) | | | | | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (optimized) | | | | |
| | ns | s | min | h | | ns | s | min | h | |
| 1 | 6.386 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 3.011 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 2 | 10.403 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 5.788 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 3 | 22.902 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 9.716 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 4 | 55.604 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 18.795 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 5 | 113.969 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | | 34.646 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 6 | 238.466 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | | 63.963 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 7 | 496.627 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 | | 132.653 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 8 | 1.139.161 | 0,0011 | 0,0000 | 0,0000 | | 266.380 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 9 | 2.354.751 | 0,0023 | 0,0000 | 0,0000 | | 546.264 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 10 | 4.928.704 | 0,0049 | 0,0000 | 0,0000 | | 1.116.901 | 0,0011 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 11 | 10.283.849 | 0,0102 | 0,0001 | 0,0000 | | 2.248.101 | 0,0022 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 12 | 20.745.016 | 0,0207 | 0,0003 | 0,0000 | | 5.215.109 | 0,0052 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 13 | 44.438.038 | 0,0444 | 0,0007 | 0,0000 | | 10.865.297 | 0,0108 | 0,0001 | 0,0000 | |
| 14 | 93.844.010 | 0,0938 | 0,0015 | 0,0000 | | 21.240.403 | 0,0212 | 0,0003 | 0,0000 | |
| 15 | 189.724.817 | 0,1897 | 0,0031 | 0,0000 | | 46.009.026 | 0,0460 | 0,0007 | 0,0000 | |
| 16 | 413.613.300 | 0,4136 | 0,0068 | 0,0001 | | 103.285.819 | 0,1032 | 0,0017 | 0,0000 | |
| 17 | 823.510.552 | 0,8235 | 0,0137 | 0,0002 | | 214.101.462 | 0,2141 | 0,0035 | 0,0000 | |
| 18 | 1.751.636.847 | 1,7516 | 0,0291 | 0,0004 | | 461.936.380 | 0,4619 | 0,0077 | 0,0001 | |
| 19 | 3.644.676.035 | 3,6446 | 0,0607 | 0,0010 | | 966.698.862 | 0,9667 | 0,0161 | 0,0002 | |
| 20 | 7.539.202.395 | 7,5392 | 0,1256 | 0,0020 | | 2.012.183.766 | 2,0121 | 0,0335 | 0,0005 | |
| 21 | 15.655.508.731 | 15,6555 | 0,2609 | 0,0043 | | 4.289.126.411 | 4,2891 | 0,0714 | 0,0011 | |
| 22 | 32.586.118.068 | 32,5861 | 0,5431 | 0,0090 | | 8.824.899.812 | 8,8249 | 0,1470 | 0,0024 | |
| 23 | 66.839.703.929 | 66,8397 | 1,1140 | 0,0185 | | 18.916.953.133 | 18,9169 | 0,3152 | 0,0052 | |
| 24 | 139.207.702.376 | 139,2077 | 2,3201 | 0,0386 | | 40.804.866.261 | 40,8048 | 0,6800 | 0,0113 | |
| 25 | 289.821.106.873 | 289,8211 | 4,8303 | 0,0805 | | 80.836.865.858 | 80,8368 | 1,3472 | 0,0224 | |
| 26 | 600.768.006.269 | 600,7680 | 10,0128 | 0,1668 | | 183.638.728.385 | 183,6387 | 3,0606 | 0,0510 | |
| 27 | 1.280.595.708.952 | 1280,5957 | 21,3432 | 0,3557 | | 403.625.056.537 | 403,6250 | 6,7270 | 0,1121 | |
| 28 | 2.436.287.258.297 | 2436,2872 | 40,6047 | 0,6767 | | 709.432.717.287 | 709,4327 | 11,8238 | 0,1970 | |
| 29 | 4.922.157.865.595 | 4922,1578 | 82,0359 | 1,3672 | | 1.410.403.471.950 | 1410,4034 | 23,5067 | 0,3917 | |
| 30 | 10.097.298.667.289 | 10097,2986 | 168,2883 | 2,8048 | | 2.914.300.758.895 | 2914,3007 | 48,5716 | 0,8095 | |

Berechnungszeit der Verletzungsmatrizen für $d = 7$

| z | d = 8 | | | | | | | |
|----|--------------------------------------|------------|----------|--------|---------------------------------------|-----------|---------|--------|
| | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (original) | | | | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (optimized) | | | |
| | ns | s | min | h | ns | s | min | h |
| 1 | 6.587 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 3.515 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 10.990 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 5.995 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 31.635 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 10.006 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | 49.632 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 18.628 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | 103.488 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 41.742 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | 225.771 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 70.070 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 462.606 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0000 | 126.060 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | 976.526 | 0,0009 | 0,0000 | 0,0000 | 253.177 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | 2.130.382 | 0,0021 | 0,0000 | 0,0000 | 497.297 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 |
| 10 | 4.507.969 | 0,0045 | 0,0000 | 0,0000 | 1.099.095 | 0,0011 | 0,0000 | 0,0000 |
| 11 | 9.675.212 | 0,0096 | 0,0001 | 0,0000 | 2.360.758 | 0,0023 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | 20.236.694 | 0,0202 | 0,0003 | 0,0000 | 4.859.505 | 0,0048 | 0,0000 | 0,0000 |
| 13 | 42.603.129 | 0,0426 | 0,0007 | 0,0000 | 10.307.907 | 0,0103 | 0,0001 | 0,0000 |
| 14 | 89.085.568 | 0,0890 | 0,0014 | 0,0000 | 21.711.072 | 0,0217 | 0,0003 | 0,0000 |
| 15 | 187.579.108 | 0,1875 | 0,0031 | 0,0000 | 47.199.026 | 0,0472 | 0,0007 | 0,0000 |
| 16 | 391.699.151 | 0,3917 | 0,0065 | 0,0001 | 101.378.348 | 0,1013 | 0,0016 | 0,0000 |
| 17 | 823.996.273 | 0,8240 | 0,0137 | 0,0002 | 207.447.924 | 0,2074 | 0,0034 | 0,0000 |
| 18 | 1.719.432.039 | 1,7194 | 0,0286 | 0,0004 | 445.226.334 | 0,4452 | 0,0074 | 0,0001 |
| 19 | 3.635.891.645 | 3,6358 | 0,0606 | 0,0010 | 968.569.983 | 0,9685 | 0,0161 | 0,0002 |
| 20 | 7.509.988.856 | 7,5099 | 0,1251 | 0,0020 | 1.990.298.046 | 1,9903 | 0,0331 | 0,0005 |
| 21 | 15.464.577.202 | 15,4645 | 0,2577 | 0,0043 | 4.460.859.969 | 4,4608 | 0,0743 | 0,0012 |
| 22 | 32.079.205.598 | 32,0792 | 0,5346 | 0,0089 | 8.908.490.605 | 8,9084 | 0,1484 | 0,0024 |
| 23 | 65.695.728.647 | 65,6957 | 1,0949 | 0,0182 | 18.969.294.142 | 18,9692 | 0,3161 | 0,0052 |
| 24 | 138.580.917.966 | 138,5809 | 2,3096 | 0,0384 | 39.072.617.889 | 39,0726 | 0,6512 | 0,0108 |
| 25 | 288.041.513.656 | 288,0415 | 4,8006 | 0,0800 | 78.237.460.069 | 78,2374 | 1,3039 | 0,0217 |
| 26 | 598.201.639.594 | 598,2016 | 9,9700 | 0,1661 | 168.188.986.031 | 168,1889 | 2,8031 | 0,0467 |
| 27 | 1.204.667.501.875 | 1204,6675 | 20,0777 | 0,3346 | 344.689.914.500 | 344,6899 | 5,7448 | 0,0957 |
| 28 | 2.382.407.157.613 | 2382,4071 | 39,7067 | 0,6617 | 686.933.565.858 | 686,9335 | 11,4488 | 0,1908 |
| 29 | 4.867.425.002.340 | 4867,4250 | 81,1237 | 1,3520 | 1.416.105.967.378 | 1416,1059 | 23,6017 | 0,3933 |
| 30 | 10.159.825.579.508 | 10159,8255 | 169,3304 | 2,8221 | 3.147.003.678.121 | 3147,0036 | 52,4500 | 0,8741 |

Berechnungszeit der Verletzungsmatrizen für $d = 8$

| z | d = 9 | | | | | | | | | |
|----|--------------------------------------|------------|----------|--------|--|---------------------------------------|-----------|---------|--------|--|
| | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (original) | | | | | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (optimized) | | | | |
| | ns | s | min | h | | ns | s | min | h | |
| 1 | 6.285 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 3.112 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 2 | 10.431 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 5.900 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 3 | 24.695 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 10.107 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 4 | 57.565 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | | 18.723 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 5 | 104.281 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | | 36.071 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 6 | 225.112 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | | 75.272 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 7 | 484.737 | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | | 125.183 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 8 | 1.105.106 | 0,0011 | 0,0000 | 0,0000 | | 280.147 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 9 | 2.239.044 | 0,0022 | 0,0000 | 0,0000 | | 563.077 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 10 | 4.747.843 | 0,0047 | 0,0000 | 0,0000 | | 1.116.734 | 0,0011 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 11 | 10.059.786 | 0,0100 | 0,0001 | 0,0000 | | 2.245.274 | 0,0022 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 12 | 20.984.382 | 0,0209 | 0,0003 | 0,0000 | | 4.852.622 | 0,0048 | 0,0000 | 0,0000 | |
| 13 | 44.159.640 | 0,0441 | 0,0007 | 0,0000 | | 10.737.079 | 0,0107 | 0,0001 | 0,0000 | |
| 14 | 92.440.229 | 0,0924 | 0,0015 | 0,0000 | | 21.747.071 | 0,0217 | 0,0003 | 0,0000 | |
| 15 | 191.249.502 | 0,1912 | 0,0031 | 0,0000 | | 48.044.262 | 0,0480 | 0,0008 | 0,0000 | |
| 16 | 403.341.245 | 0,4033 | 0,0067 | 0,0001 | | 99.496.919 | 0,0995 | 0,0016 | 0,0000 | |
| 17 | 828.475.646 | 0,8284 | 0,0138 | 0,0002 | | 216.519.702 | 0,2165 | 0,0036 | 0,0000 | |
| 18 | 1.751.934.287 | 1,7519 | 0,0292 | 0,0004 | | 462.105.479 | 0,4621 | 0,0077 | 0,0001 | |
| 19 | 3.628.077.412 | 3,6280 | 0,0604 | 0,0011 | | 986.527.444 | 0,9865 | 0,0164 | 0,0002 | |
| 20 | 7.948.703.614 | 7,9487 | 0,1324 | 0,0022 | | 2.062.789.438 | 2,0627 | 0,0343 | 0,0005 | |
| 21 | 15.749.588.565 | 15,7495 | 0,2624 | 0,0043 | | 4.124.352.955 | 4,1243 | 0,0687 | 0,0011 | |
| 22 | 32.072.691.082 | 32,0726 | 0,5345 | 0,0089 | | 9.186.467.275 | 9,1864 | 0,1531 | 0,0025 | |
| 23 | 66.162.613.684 | 66,1626 | 1,1027 | 0,0183 | | 19.265.311.653 | 19,2653 | 0,3210 | 0,0053 | |
| 24 | 139.138.804.513 | 139,1388 | 2,3189 | 0,0386 | | 36.855.206.178 | 36,8552 | 0,6142 | 0,0102 | |
| 25 | 283.700.128.927 | 283,7001 | 4,7283 | 0,0788 | | 77.427.507.406 | 77,4275 | 1,2904 | 0,0215 | |
| 26 | 589.027.204.854 | 589,0272 | 9,8171 | 0,1636 | | 164.596.088.050 | 164,5960 | 2,7432 | 0,0457 | |
| 27 | 1.237.406.383.493 | 1237,4063 | 20,6234 | 0,3437 | | 358.838.423.040 | 358,8384 | 5,9806 | 0,0996 | |
| 28 | 2.354.835.869.642 | 2354,8358 | 39,2472 | 0,6541 | | 656.660.554.624 | 656,6605 | 10,9443 | 0,1824 | |
| 29 | 4.894.294.435.746 | 4894,2944 | 81,5715 | 1,3595 | | 1.371.187.521.599 | 1371,1875 | 22,8531 | 0,3808 | |
| 30 | 10.120.167.654.269 | 10120,1676 | 168,6694 | 2,8111 | | 2.983.886.015.122 | 2983,8860 | 49,7314 | 0,8288 | |

Berechnungszeit der Verletzungsmatrizen für $d = 9$

| z | d = 10 | | | | | | | |
|----|--------------------------------------|------------|----------|---------|---------------------------------------|-----------|---------|--------|
| | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (original) | | | | Berechnungszeit $t_{z,d}$ (optimized) | | | |
| | ns | s | min | h | ns | s | min | h |
| 1 | 6.877 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 3.050 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 10.945 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 5.497 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 23.159 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 9.554 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | 46.704 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 17.689 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | 105.946 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 33.557 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | 217.005 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 60.638 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 459.438 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0000 | 126.736 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | 969.782 | 0,0009 | 0,0000 | 0,0000 | 248.769 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | 2.120.716 | 0,0021 | 0,0000 | 0,0000 | 554.048 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 |
| 10 | 4.489.760 | 0,0044 | 0,0000 | 0,0000 | 1.069.381 | 0,0010 | 0,0000 | 0,0000 |
| 11 | 9.522.774 | 0,0095 | 0,0001 | 0,0000 | 2.233.283 | 0,0022 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | 20.421.042 | 0,0204 | 0,0003 | 0,0000 | 4.638.528 | 0,0046 | 0,0000 | 0,0000 |
| 13 | 43.042.163 | 0,0430 | 0,0007 | 0,0000 | 10.018.139 | 0,0100 | 0,0001 | 0,0000 |
| 14 | 90.382.520 | 0,0903 | 0,0015 | 0,0000 | 21.858.733 | 0,0218 | 0,0003 | 0,0000 |
| 15 | 190.808.798 | 0,1908 | 0,0031 | 0,0000 | 46.705.807 | 0,0467 | 0,0007 | 0,0000 |
| 16 | 398.484.801 | 0,3984 | 0,0066 | 0,0001 | 98.922.013 | 0,0989 | 0,0016 | 0,0000 |
| 17 | 829.956.237 | 0,8299 | 0,0138 | 0,0002 | 218.891.568 | 0,2188 | 0,0036 | 0,0000 |
| 18 | 1.790.153.290 | 1,7901 | 0,0298 | 0,0005 | 476.158.791 | 0,4761 | 0,0079 | 0,0001 |
| 19 | 3.696.073.143 | 3,6960 | 0,0616 | 0,0010 | 996.300.384 | 0,9963 | 0,0166 | 0,0002 |
| 20 | 7.463.396.822 | 7,4634 | 0,1243 | 0,0020 | 1.985.158.923 | 1,9851 | 0,0330 | 0,0005 |
| 21 | 16.908.290.858 | 16,9082 | 0,2818 | 0,0047 | 4.396.032.456 | 4,3960 | 0,0732 | 0,0012 |
| 22 | 34.135.165.782 | 34,1351 | 0,5689 | 0,0094 | 9.958.250.839 | 9,9582 | 0,1659 | 0,0027 |
| 23 | 89.830.962.315 | 89,8309 | 1,4971 | 0,0249 | 19.745.884.463 | 19,7458 | 0,3291 | 0,0054 |
| 24 | 166.020.790.910 | 166,0207 | 2,7670 | 0,0461 | 39.332.203.674 | 39,3322 | 0,6555 | 0,0109 |
| 25 | 288.468.160.618 | 288,4681 | 4,8078 | 0,0801 | 80.569.597.253 | 80,5696 | 1,3428 | 0,0223 |
| 26 | 613.938.398.316 | 613,9384 | 10,2323 | 0,1705 | 164.620.065.400 | 164,6200 | 2,7436 | 0,0457 |
| 27 | 1.288.393.066.996 | 1288,3930 | 21,4732 | 0,35789 | 336.335.913.364 | 336,3359 | 5,6056 | 0,0934 |
| 28 | 2.376.490.811.542 | 2376,4908 | 39,6081 | 0,6601 | 661.057.386.064 | 661,0573 | 11,0176 | 0,1836 |
| 29 | 4.919.167.469.608 | 4919,1674 | 81,9861 | 1,3664 | 1.395.737.198.443 | 1395,7372 | 23,2622 | 0,3877 |
| 30 | 10.337.822.764.904 | 10337,8227 | 172,2970 | 2,8716 | 3.169.835.459.814 | 3169,8354 | 52,8305 | 0,8805 |

Berechnungszeit der Verletzungsmatrizen für $d = 10$

Performanz-Messungen zur Aufstellung der allgemeinen Verletzungszahl für einen Ausführungsplan einer zusammengesetzten Dienstleistung mit z Teildienstaufrufen und d Dienstgüteeigenschaften:

| z | d = 1 | | d = 2 | | d = 3 | | d = 4 | | d = 5 | |
|-----|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| | Ausführungszeit | | Ausführungszeit | | Ausführungszeit | | Ausführungszeit | | Ausführungszeit | |
| | ns | μ s |
| 1 | 11257,00 | 11,26 | 12581,00 | 12,58 | 13762,00 | 13,76 | 14006,00 | 14,01 | 14527,00 | 14,53 |
| 2 | 12365,00 | 12,37 | 13762,00 | 13,76 | 14158,00 | 14,16 | 14365,00 | 14,37 | 15086,00 | 15,09 |
| 3 | 13968,00 | 13,97 | 14362,00 | 14,36 | 14800,00 | 14,80 | 15645,00 | 15,65 | 16041,00 | 16,04 |
| 4 | 14247,00 | 14,25 | 15600,00 | 15,60 | 15244,00 | 15,24 | 15924,00 | 15,92 | 16483,00 | 16,48 |
| 5 | 14527,00 | 14,53 | 16097,00 | 16,10 | 16512,00 | 16,51 | 16880,00 | 16,88 | 17483,00 | 17,48 |
| 6 | 15851,00 | 15,85 | 16515,00 | 16,52 | 16800,00 | 16,80 | 17042,00 | 17,04 | 17941,00 | 17,94 |
| 7 | 16645,00 | 16,65 | 16873,00 | 16,87 | 17011,00 | 17,01 | 17320,00 | 17,32 | 17600,00 | 17,60 |
| 8 | 16927,00 | 16,93 | 17291,00 | 17,29 | 17859,00 | 17,86 | 17900,00 | 17,90 | 18216,00 | 18,22 |
| 9 | 17042,00 | 17,04 | 18629,00 | 18,63 | 18952,00 | 18,95 | 19159,00 | 19,16 | 19438,00 | 19,44 |
| 10 | 17321,00 | 17,32 | 18967,00 | 18,97 | 19091,00 | 19,09 | 19718,00 | 19,72 | 19718,00 | 19,72 |
| 11 | 18159,00 | 18,16 | 19305,00 | 19,31 | 19908,00 | 19,91 | 20097,00 | 20,10 | 20318,00 | 20,32 |
| 12 | 18717,00 | 18,72 | 20143,00 | 20,14 | 20673,00 | 20,67 | 21238,00 | 21,24 | 21555,00 | 21,56 |
| 13 | 19555,00 | 19,56 | 21099,00 | 21,10 | 22026,00 | 22,03 | 22717,00 | 22,72 | 21973,00 | 21,97 |
| 14 | 20115,00 | 20,12 | 21378,00 | 21,38 | 23363,00 | 23,36 | 23835,00 | 23,84 | 22952,00 | 22,95 |
| 15 | 20394,00 | 20,39 | 21839,00 | 21,84 | 23922,00 | 23,92 | 24276,00 | 24,28 | 24953,00 | 24,95 |
| 16 | 21511,00 | 21,51 | 22333,00 | 22,33 | 24539,00 | 24,54 | 24835,00 | 24,84 | 25111,00 | 25,11 |
| 17 | 22070,00 | 22,07 | 23245,00 | 23,25 | 24937,00 | 24,94 | 25114,00 | 25,11 | 25511,00 | 25,51 |
| 18 | 22908,00 | 22,91 | 23848,00 | 23,85 | 25715,00 | 25,72 | 26394,00 | 26,39 | 26467,00 | 26,47 |
| 19 | 23146,00 | 23,15 | 24407,00 | 24,41 | 25952,00 | 25,95 | 27114,00 | 27,11 | 27466,00 | 27,47 |
| 20 | 23787,00 | 23,79 | 24845,00 | 24,85 | 26276,00 | 26,28 | 27556,00 | 27,56 | 28466,00 | 28,47 |
| 21 | 24025,00 | 24,03 | 25641,00 | 25,64 | 26629,00 | 26,63 | 28511,00 | 28,51 | 29864,00 | 29,86 |
| 22 | 24584,00 | 24,58 | 25921,00 | 25,92 | 26890,00 | 26,89 | 29069,00 | 29,07 | 30346,00 | 30,35 |
| 23 | 25701,00 | 25,70 | 26318,00 | 26,32 | 27070,00 | 27,07 | 29629,00 | 29,63 | 30467,00 | 30,47 |
| 24 | 26260,00 | 26,26 | 27156,00 | 27,16 | 27650,00 | 27,65 | 30628,00 | 30,63 | 30746,00 | 30,75 |
| 25 | 26540,00 | 26,54 | 28317,00 | 28,32 | 28908,00 | 28,91 | 31187,00 | 31,19 | 31584,00 | 31,58 |
| 26 | 27423,00 | 27,42 | 29229,00 | 29,23 | 29587,00 | 29,59 | 31584,00 | 31,58 | 32143,00 | 32,14 |
| 27 | 28495,00 | 28,50 | 29929,00 | 29,93 | 30746,00 | 30,75 | 31829,00 | 31,83 | 33143,00 | 33,14 |
| 28 | 29333,00 | 29,33 | 30346,00 | 30,35 | 31305,00 | 31,31 | 32584,00 | 32,58 | 33701,00 | 33,70 |
| 29 | 29613,00 | 29,61 | 31184,00 | 31,18 | 32584,00 | 32,58 | 32963,00 | 32,96 | 34260,00 | 34,26 |
| 30 | 29892,00 | 29,89 | 32743,00 | 32,74 | 33864,00 | 33,86 | 33943,00 | 33,94 | 34819,00 | 34,82 |

Berechnungszeit für die allgemeine Verletzungszahl eines Ausführungsplans, $d < 6$

| z | d = 6 | | d = 7 | | d = 8 | | d = 49 | | d = 10 | |
|----|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| | Ausführungszeit | | Ausführungszeit | | Ausführungszeit | | Ausführungszeit | | Ausführungszeit | |
| | ns | µs | ns | µs | ns | µs | ns | µs | ns | µs |
| 1 | 14527,00 | 14,53 | 16204,00 | 16,20 | 16.761 | 16,76100 | 17.080 | 17,08000 | 17.879 | 17,87900 |
| 2 | 15924,00 | 15,92 | 16762,00 | 16,76 | 17.279 | 17,27900 | 17.762 | 17,76200 | 18.276 | 18,27600 |
| 3 | 16968,00 | 16,97 | 17262,00 | 17,26 | 17.924 | 17,92400 | 17.761 | 17,76100 | 19.232 | 19,23200 |
| 4 | 17320,00 | 17,32 | 17821,00 | 17,82 | 18.203 | 18,20300 | 18.762 | 18,76200 | 20.115 | 20,11500 |
| 5 | 17942,00 | 17,94 | 18600,00 | 18,60 | 18.997 | 18,99700 | 19.159 | 19,15900 | 21.232 | 21,23200 |
| 6 | 18158,00 | 18,16 | 18997,00 | 19,00 | 19.555 | 19,55500 | 19.977 | 19,97700 | 21.511 | 21,51100 |
| 7 | 17879,00 | 17,88 | 19997,00 | 20,00 | 20.188 | 20,18800 | 20.997 | 20,99700 | 21.791 | 21,79100 |
| 8 | 18718,00 | 18,72 | 20114,00 | 20,11 | 20.931 | 20,93100 | 21.215 | 21,21500 | 20.952 | 20,95200 |
| 9 | 19941,00 | 19,94 | 20835,00 | 20,84 | 21.114 | 21,11400 | 21.673 | 21,67300 | 22.069 | 22,06900 |
| 10 | 20276,00 | 20,28 | 20953,00 | 20,95 | 21.378 | 21,37800 | 21.911 | 21,91100 | 22.069 | 22,06900 |
| 11 | 20935,00 | 20,94 | 21673,00 | 21,67 | 22.349 | 22,34900 | 23.070 | 23,07000 | 23.746 | 23,74600 |
| 12 | 22393,00 | 22,39 | 22790,00 | 22,79 | 23.026 | 23,02600 | 24.629 | 24,62900 | 25.026 | 25,02600 |
| 13 | 22932,00 | 22,93 | 23729,00 | 23,73 | 23.946 | 23,94600 | 25.946 | 25,94600 | 26.524 | 26,52400 |
| 14 | 23231,00 | 23,23 | 24305,00 | 24,31 | 24.923 | 24,92300 | 26.025 | 26,02500 | 25.054 | 25,05400 |
| 15 | 25290,00 | 25,29 | 25967,00 | 25,97 | 26.422 | 26,42200 | 26.864 | 26,86400 | 27.330 | 27,33000 |
| 16 | 25350,00 | 25,35 | 26025,00 | 26,03 | 26.701 | 26,70100 | 27.702 | 27,70200 | 28.054 | 28,05400 |
| 17 | 25908,00 | 25,91 | 26842,00 | 26,84 | 28.540 | 28,54000 | 28.937 | 28,93700 | 29.216 | 29,21600 |
| 18 | 26966,00 | 26,97 | 27143,00 | 27,14 | 29.819 | 29,81900 | 30.819 | 30,81900 | 31.775 | 31,77500 |
| 19 | 27425,00 | 27,43 | 27981,00 | 27,98 | 30.657 | 30,65700 | 31.613 | 31,61300 | 32.612 | 32,61200 |
| 20 | 28905,00 | 28,91 | 30981,00 | 30,98 | 31.495 | 31,49500 | 31.892 | 31,89200 | 33.172 | 33,17200 |
| 21 | 29984,00 | 29,98 | 31304,00 | 31,30 | 31.954 | 31,95400 | 32.333 | 32,33300 | 33.568 | 33,56800 |
| 22 | 30760,00 | 30,76 | 32278,00 | 32,28 | 32.989 | 32,98900 | 33.569 | 33,56900 | 34.569 | 34,56900 |
| 23 | 31301,00 | 31,30 | 32657,00 | 32,66 | 33.172 | 33,17200 | 33.685 | 33,68500 | 35.127 | 35,12700 |
| 24 | 31981,00 | 31,98 | 33216,00 | 33,22 | 33.989 | 33,98900 | 34.686 | 34,68600 | 35.788 | 35,78800 |
| 25 | 32540,00 | 32,54 | 33954,00 | 33,95 | 34.568 | 34,56800 | 35.568 | 35,56800 | 36.070 | 36,07000 |
| 26 | 33657,00 | 33,66 | 34434,00 | 34,43 | 34.847 | 34,84700 | 36.921 | 36,92100 | 37.847 | 37,84700 |
| 27 | 34657,00 | 34,66 | 34730,00 | 34,73 | 35.406 | 35,40600 | 37.877 | 37,87700 | 38.127 | 38,12700 |
| 28 | 34975,00 | 34,98 | 35243,00 | 35,24 | 36.244 | 36,24400 | 38.597 | 38,59700 | 39.686 | 39,68600 |
| 29 | 35333,00 | 35,33 | 36289,00 | 36,29 | 37.082 | 37,08200 | 39.317 | 39,31700 | 40.965 | 40,96500 |
| 30 | 36054,00 | 36,05 | 36568,00 | 36,57 | 37.641 | 37,64100 | 40.714 | 40,71400 | 41.083 | 41,08300 |

Berechnungszeit für die allgemeine Verletzungszahl eines Ausführungsplans, $d > 5$

ANHANG D:

Ergebnisse der Korrektheitsuntersuchungen zur Berechnung der relativen und absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes sowie des Zweitupels $eVE_A = (a_A, p_A)$ einer zusammengesetzten Dienstleistung.

Korrektheitsmessungen zur Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes in Abhängigkeit der Länge n und der Ordnung k der Markov Kette:

| n | Testreihe 1 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,00047 | 0,00295 | 0,00705 | 0,00841 | 0,00896 | 0,00885 | 0,01078 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,00057 | 0,00223 | 0,01929 | 0,01929 | 0,02441 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 31 | 0,00047 | 0,01000 | 0,01000 | 0,01235 | 0,01665 | 0,01665 | 0,02041 | 0,01331 | 0,01331 | 0,01701 |
| 41 | 0,00310 | 0,00745 | 0,01929 | 0,01929 | 0,01563 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,00047 | 0,00154 | 0,00001 | 0,00011 | 0,00055 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00071 | 0,00327 | 0,01480 |
| 61 | 0,00000 | 0,00017 | 0,00031 | 0,00026 | 0,00012 | 0,00126 | 0,00131 | 0,00076 | 0,00041 | 0,00001 |
| 71 | 0,00022 | 0,00005 | 0,00113 | 0,00122 | 0,00111 | 0,00304 | 0,00352 | 0,00308 | 0,00294 | 0,00162 |
| 81 | 0,00076 | 0,00049 | 0,00216 | 0,00250 | 0,00261 | 0,00511 | 0,00619 | 0,00540 | 0,00568 | 0,00417 |
| 91 | 0,00143 | 0,00117 | 0,00319 | 0,00384 | 0,00427 | 0,00668 | 0,00829 | 0,00764 | 0,00737 | 0,00567 |
| 101 | 0,00125 | 0,00790 | 0,00790 | 0,01000 | 0,01169 | 0,01306 | 0,01469 | 0,01000 | 0,01070 | 0,01440 |
| 111 | 0,00083 | 0,00057 | 0,00295 | 0,00324 | 0,00359 | 0,00537 | 0,00672 | 0,00610 | 0,01440 | 0,01440 |
| 121 | 0,00157 | 0,00133 | 0,00430 | 0,00448 | 0,00508 | 0,00714 | 0,00900 | 0,00861 | 0,00869 | 0,00717 |
| 131 | 0,00222 | 0,00208 | 0,00503 | 0,00492 | 0,00562 | 0,00764 | 0,00967 | 0,00932 | 0,00934 | 0,00762 |
| 141 | 0,00168 | 0,00148 | 0,00370 | 0,00381 | 0,00430 | 0,00584 | 0,00111 | 0,00111 | 0,00137 | 0,00174 |
| 151 | 0,00204 | 0,00167 | 0,00376 | 0,00383 | 0,00427 | 0,00558 | 0,00692 | 0,00623 | 0,00589 | 0,00427 |
| 161 | 0,00204 | 0,00167 | 0,00376 | 0,00383 | 0,00427 | 0,00558 | 0,00692 | 0,00623 | 0,00589 | 0,00427 |
| 171 | 0,00066 | 0,00090 | 0,00701 | 0,00701 | 0,00945 | 0,04798 | 0,05596 | 0,05285 | 0,02609 | 0,02560 |
| 181 | 0,00092 | 0,00124 | 0,00243 | 0,00211 | 0,00222 | 0,00379 | 0,00467 | 0,00587 | 0,00553 | 0,00395 |
| 191 | 0,00048 | 0,00063 | 0,00216 | 0,00185 | 0,00195 | 0,00340 | 0,00119 | 0,00119 | 0,00137 | 0,00000 |
| 201 | 0,00082 | 0,00106 | 0,00286 | 0,00259 | 0,00251 | 0,00409 | 0,00516 | 0,00651 | 0,00641 | 0,00399 |
| 211 | 0,00028 | 0,00069 | 0,00206 | 0,01052 | 0,01052 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 221 | 0,00032 | 0,00074 | 0,00206 | 0,00149 | 0,00153 | 0,00776 | 0,00776 | 0,01574 | 0,08794 | 0,08101 |
| 231 | 0,00027 | 0,00062 | 0,01144 | 0,01144 | 0,01774 | 0,06363 | 0,07335 | 0,07111 | 0,06250 | 0,06250 |
| 241 | 0,00064 | 0,00127 | 0,00257 | 0,00174 | 0,00154 | 0,00239 | 0,00295 | 0,00520 | 0,00496 | 0,00270 |
| 251 | 0,00071 | 0,00136 | 0,00241 | 0,00189 | 0,00144 | 0,00221 | 0,00128 | 0,00128 | 0,00137 | 0,00160 |
| 261 | 0,00090 | 0,00165 | 0,00275 | 0,00224 | 0,00184 | 0,00276 | 0,00300 | 0,00514 | 0,00492 | 0,00259 |
| 271 | 0,00083 | 0,00151 | 0,00248 | 0,01487 | 0,01487 | 0,01644 | 0,01384 | 0,01778 | 0,02195 | 0,02367 |
| 281 | 0,00045 | 0,00130 | 0,00152 | 0,00152 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 291 | 0,00071 | 0,00175 | 0,00270 | 0,00219 | 0,00123 | 0,00171 | 0,00205 | 0,00342 | 0,00452 | 0,00233 |
| 301 | 0,00068 | 0,00170 | 0,00229 | 0,00174 | 0,00082 | 0,00340 | 0,00340 | 0,00760 | 0,02274 | 0,01929 |
| 311 | 0,00022 | 0,00075 | 0,00209 | 0,02041 | 0,02041 | 0,02142 | 0,04000 | 0,04000 | 0,04000 | -1,00000 |
| 321 | 0,00027 | 0,00083 | 0,00216 | 0,00141 | 0,02778 | 0,02778 | 0,02041 | 0,00416 | 0,00592 | 0,00826 |
| 331 | 0,00031 | 0,00090 | 0,00221 | 0,00146 | 0,00062 | 0,00144 | 0,00177 | 0,00240 | 0,00475 | 0,00189 |
| 341 | 0,00021 | 0,00067 | 0,00170 | 0,00098 | 0,00028 | 0,00076 | 0,00086 | 0,00111 | 0,00241 | 0,04726 |
| 351 | 0,00013 | 0,00047 | 0,00127 | 0,00061 | 0,00008 | 0,00032 | 0,00030 | 0,00034 | 0,00094 | 0,01100 |
| 361 | 0,00011 | 0,00042 | 0,00113 | 0,00049 | 0,00004 | 0,00020 | 0,00017 | 0,00017 | 0,00058 | 0,00227 |
| 371 | 0,00018 | 0,00055 | 0,00132 | 0,00065 | 0,00010 | 0,00033 | 0,00032 | 0,00034 | 0,00089 | 0,00065 |
| 381 | 0,00033 | 0,00085 | 0,00182 | 0,00087 | 0,00020 | 0,00050 | 0,00050 | 0,00052 | 0,00113 | 0,00083 |
| 391 | 0,00010 | 0,00060 | 0,00133 | 0,00066 | 0,02939 | 0,03114 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 401 | 0,00020 | 0,00084 | 0,00171 | 0,00099 | 0,00044 | 0,00068 | 0,00073 | 0,00080 | 0,00162 | 0,00327 |
| 411 | 0,00027 | 0,00101 | 0,00198 | 0,00104 | 0,00047 | 0,00072 | 0,00079 | 0,00086 | 0,00170 | 0,00135 |
| 421 | 0,00025 | 0,00095 | 0,00185 | 0,00093 | 0,00038 | 0,00055 | 0,00148 | 0,00148 | 0,00148 | 0,00160 |
| 431 | 0,00032 | 0,00109 | 0,00181 | 0,00107 | 0,00048 | 0,00069 | 0,00148 | 0,00148 | 0,00148 | 0,00160 |
| 441 | 0,00050 | 0,00148 | 0,00237 | 0,00164 | 0,00099 | 0,00143 | 0,00135 | 0,00108 | 0,00146 | 0,00183 |
| 451 | 0,00048 | 0,00142 | 0,00151 | 0,00151 | 0,00394 | 0,00260 | 0,00306 | 0,00504 | 0,00002 | 0,00002 |
| 461 | 0,00058 | 0,00139 | 0,00214 | 0,00140 | 0,00075 | 0,00104 | 0,00092 | 0,00093 | 0,00128 | 0,00159 |
| 471 | 0,00026 | 0,00089 | 0,00137 | 0,02142 | 0,02142 | 0,02142 | 0,02041 | 0,02778 | 0,06250 | 0,06250 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 1

| n | Testreihe 1 (Fortsetzung) | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 481 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 491 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 1

| n | Testreihe 2 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,00981 | 0,01156 | 0,01055 | 0,01169 | 0,01216 | 0,01151 | 0,01459 | 0,01615 | 0,01789 | 0,01778 |
| 21 | 0,01039 | 0,01228 | 0,01132 | 0,01260 | 0,01321 | 0,01267 | 0,01609 | 0,01798 | 0,01836 | 0,01804 |
| 31 | 0,23306 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 41 | 0,00268 | 0,00760 | 0,00579 | 0,00642 | 0,00588 | 0,00499 | 0,00576 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,00002 | 0,00091 | 0,11111 | 0,11111 | 0,03062 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 61 | 0,00000 | 0,06250 | 0,06250 | 0,11111 | 0,25000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 71 | 0,00029 | 0,00125 | 0,00169 | 0,00168 | 0,00107 | 0,00042 | 0,00032 | 0,00007 | 0,00174 | 0,00670 |
| 81 | 0,00880 | 0,05090 | 0,09507 | 0,14063 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 91 | 0,00002 | 0,00035 | 0,00031 | 0,00018 | 0,00061 | 0,00013 | 0,00005 | 0,00003 | 0,00034 | 0,00166 |
| 101 | 0,00391 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 111 | 0,00013 | 0,00064 | 0,00049 | 0,00035 | 0,00071 | 0,00020 | 0,00011 | 0,00000 | 0,00031 | 0,05444 |
| 121 | 0,00069 | 0,00153 | 0,00138 | 0,00136 | 0,00180 | 0,00107 | 0,00082 | 0,00050 | 0,00165 | 0,00337 |
| 131 | 0,00030 | 0,00077 | 0,00001 | 0,00001 | 0,01731 | 0,01731 | 0,01469 | 0,01665 | 0,01148 | 0,01563 |
| 141 | 0,00001 | 0,00008 | 0,00062 | 0,00346 | 0,00346 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 151 | 0,00000 | 0,00005 | 0,00042 | 0,00029 | 0,00019 | 0,00028 | 0,00174 | 0,00174 | 0,00189 | 0,00189 |
| 161 | 0,00000 | 0,00002 | 0,00033 | 0,00021 | 0,00010 | 0,00014 | 0,00174 | 0,00174 | 0,00189 | 0,00189 |
| 171 | 0,00369 | 0,02698 | 0,04283 | 0,06250 | 0,04938 | 0,04938 | 0,06250 | 0,08163 | 0,08163 | 0,08163 |
| 181 | 0,00001 | 0,00002 | 0,00016 | 0,00031 | 0,00007 | 0,00009 | 0,00009 | 0,01440 | 0,01440 | 0,02041 |
| 191 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00103 | 0,00103 | 0,00255 | 0,00391 | 0,00435 | 0,00751 | 0,01190 |
| 201 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00014 | 0,00000 | 0,00189 | 0,00189 | 0,00207 | 0,00227 |
| 211 | 0,00004 | 0,00007 | 0,00010 | 0,00017 | 0,00000 | 0,00016 | 0,00009 | 0,00000 | 0,00071 | 0,00042 |
| 221 | 0,00164 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 231 | 0,00046 | 0,00056 | 0,00055 | 0,00045 | 0,00009 | 0,00022 | 0,00015 | 0,00001 | 0,00039 | 0,00023 |
| 241 | 0,00098 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 251 | 0,00121 | 0,00788 | 0,01135 | 0,01798 | 0,01778 | 0,02041 | 0,02367 | 0,03306 | 0,03306 | -1,00000 |
| 261 | 0,00027 | 0,00021 | 0,00035 | 0,00023 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00003 | 0,00022 | 0,00008 |
| 271 | 0,00031 | 0,00024 | 0,00037 | 0,00023 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00016 | 0,03306 | 0,03306 |
| 281 | 0,00029 | 0,00157 | 0,00157 | 0,00020 | 0,00031 | 0,00028 | 0,00064 | 0,00136 | 0,00207 | 0,00187 |
| 291 | 0,00019 | 0,00011 | 0,00040 | 0,00015 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00011 | 0,00086 | 0,00086 | 0,00059 |
| 301 | 0,00033 | 0,00025 | 0,00066 | 0,00024 | 0,00000 | 0,00003 | 0,00016 | 0,00002 | 0,02778 | 0,02778 |
| 311 | 0,00080 | 0,00080 | 0,00136 | 0,00062 | 0,00004 | 0,00000 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00054 | 0,00026 |
| 321 | 0,00042 | 0,00199 | 0,00280 | 0,00556 | 0,00533 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 331 | 0,00018 | 0,00010 | 0,00018 | 0,00008 | 0,00779 | 0,00779 | 0,02193 | 0,02551 | 0,01100 | 0,04000 |
| 341 | 0,00032 | 0,00135 | 0,00188 | 0,00417 | 0,00399 | 0,00459 | 0,01235 | 0,01563 | 0,01563 | 0,02041 |
| 351 | 0,00021 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 361 | 0,00036 | 0,00018 | 0,00024 | 0,00011 | 0,00000 | 0,00019 | 0,00054 | 0,00042 | 0,00026 | 0,00131 |
| 371 | 0,00013 | 0,00279 | 0,00279 | 0,00105 | 0,00131 | 0,00178 | 0,00274 | 0,25000 | 0,25000 | 0,25000 |
| 381 | 0,00012 | 0,00004 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00132 | 0,00132 | 0,00664 | 0,00809 | 0,00064 | 0,00766 |
| 391 | 0,00016 | 0,00049 | 0,00066 | 0,00213 | 0,00207 | 0,00218 | 0,00826 | 0,01108 | 0,01108 | 0,01384 |
| 401 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00004 | 0,00572 | 0,00572 | 0,00629 | 0,00336 | 0,00574 | 0,00184 | 0,00105 |
| 411 | 0,00016 | 0,00006 | 0,00001 | 0,00005 | 0,00022 | 0,00024 | 0,00062 | 0,00057 | 0,00046 | 0,00094 |
| 421 | 0,00035 | 0,00023 | 0,00013 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00004 | 0,00019 | 0,00027 | 0,00017 | 0,00047 |
| 431 | 0,00033 | 0,00021 | 0,00010 | 0,00546 | 0,00546 | 0,00600 | 0,00318 | 0,00635 | 0,00227 | 0,00151 |
| 441 | 0,00033 | 0,00021 | 0,00152 | 0,00152 | 0,00429 | 0,00579 | 0,01159 | 0,00425 | 0,00092 | 0,00028 |
| 451 | 0,00060 | 0,00051 | 0,00037 | 0,00008 | 0,00005 | 0,00008 | 0,00030 | 0,00049 | 0,00079 | 0,00073 |
| 461 | 0,00055 | 0,00034 | 0,00040 | 0,00010 | 0,01497 | 0,01497 | 0,02799 | 0,03325 | 0,16000 | 0,16000 |
| 471 | 0,00085 | 0,00066 | 0,00065 | 0,00028 | 0,00000 | 0,00002 | 0,00030 | 0,00055 | 0,00097 | 0,00107 |
| 481 | 0,00084 | 0,00064 | 0,00080 | 0,00040 | 0,00000 | 0,00000 | 0,01000 | 0,01000 | 0,01235 | 0,01563 |
| 491 | 0,00103 | 0,00085 | 0,00102 | 0,00056 | 0,00003 | 0,00001 | 0,00006 | 0,00016 | 0,00067 | 0,00079 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 2

| n | Testreihe 3 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,00137 | 0,00148 | 0,00174 | 0,00238 | 0,00069 | 0,00111 | 0,00148 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 31 | 0,00001 | 0,00012 | 0,00179 | 0,00619 | 0,00536 | 0,01778 | 0,01902 | 0,02367 | 0,02041 | 0,02493 |
| 41 | 0,00098 | 0,00039 | 0,00278 | 0,00592 | 0,00292 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,00000 | 0,00026 | 0,00003 | 0,00044 | 0,00032 | 0,00214 | 0,00725 | 0,02281 | 0,07627 | 0,02329 |
| 61 | 0,00000 | 0,00008 | 0,00019 | 0,00094 | 0,00133 | 0,00483 | 0,01344 | 0,01860 | 0,02041 | 0,02493 |
| 71 | 0,00167 | 0,00181 | 0,00207 | 0,00292 | 0,00087 | 0,00137 | 0,00189 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 81 | 0,00061 | 0,00061 | 0,00120 | 0,00324 | 0,00588 | 0,01511 | 0,02062 | 0,02041 | 0,02250 | 0,02778 |
| 91 | 0,00157 | 0,00111 | 0,00091 | 0,00130 | 0,00438 | 0,00391 | 0,00395 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,00135 | 0,00187 | 0,00184 | 0,00250 | 0,00058 | 0,00000 | 0,00007 | 0,00096 | 0,00028 | 0,02493 |
| 111 | 0,00237 | 0,00288 | 0,00340 | 0,00378 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 121 | 0,00272 | 0,00418 | 0,00592 | 0,00556 | 0,00270 | 0,00111 | 0,00072 | 0,00323 | 0,00023 | 0,02778 |
| 131 | 0,00245 | 0,00002 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00043 | 0,00070 | 0,00028 | 0,00025 | 0,00062 | 0,00101 |
| 141 | 0,00127 | 0,00195 | 0,00405 | 0,00605 | 0,01298 | 0,02234 | 0,02789 | 0,05098 | 0,10710 | 0,05809 |
| 151 | 0,00067 | 0,00102 | 0,00231 | 0,00330 | 0,00744 | 0,01290 | 0,01367 | 0,02102 | 0,03234 | 0,00506 |
| 161 | 0,00089 | 0,00139 | 0,00301 | 0,00437 | 0,01360 | 0,01689 | 0,01929 | 0,02889 | 0,02983 | 0,01929 |
| 171 | 0,00119 | 0,00216 | 0,01572 | 0,01605 | 0,01326 | 0,01148 | 0,01033 | 0,01860 | 0,01222 | -1,00000 |
| 181 | 0,00130 | 0,00213 | 0,00491 | 0,00554 | 0,00885 | 0,01467 | 0,01204 | 0,01861 | 0,00524 | 0,00482 |
| 191 | 0,00082 | 0,00136 | 0,00338 | 0,00355 | 0,00570 | 0,00920 | 0,00637 | 0,00906 | 0,01213 | 0,00112 |
| 201 | 0,00029 | 0,00076 | 0,00222 | 0,00216 | 0,00361 | 0,00581 | 0,00337 | 0,00457 | 0,00551 | 0,00004 |
| 211 | 0,00064 | 0,00128 | 0,01937 | 0,02172 | 0,01741 | 0,01782 | 0,01579 | 0,02996 | 0,25000 | 0,25000 |
| 221 | 0,00074 | 0,00147 | 0,00374 | 0,00433 | 0,00376 | 0,00659 | 0,00822 | 0,01909 | 0,01447 | 0,00227 |
| 231 | 0,00074 | 0,00148 | 0,00375 | 0,00440 | 0,00571 | 0,00701 | 0,00510 | 0,00517 | 0,00664 | 0,16000 |
| 241 | 0,00071 | 0,00145 | 0,02123 | 0,02574 | 0,02130 | 0,02507 | 0,02334 | 0,03361 | 0,02111 | 0,04938 |
| 251 | 0,00069 | 0,00144 | 0,00377 | 0,00461 | 0,00472 | 0,00586 | 0,00481 | 0,02778 | 0,02778 | 0,03306 |
| 261 | 0,00097 | 0,00194 | 0,00520 | 0,00674 | 0,01215 | 0,00949 | 0,00938 | 0,00380 | 0,00751 | 0,44444 |
| 271 | 0,00108 | 0,00215 | 0,00561 | 0,00592 | 0,00160 | 0,00174 | 0,00189 | 0,00227 | 0,00391 | 0,00510 |
| 281 | 0,00096 | 0,00196 | 0,00527 | 0,00554 | 0,00479 | 0,00630 | 0,00586 | 0,00400 | 0,00000 | -1,00000 |
| 291 | 0,00026 | 0,00032 | 0,00176 | 0,00136 | 0,00003 | 0,00013 | 0,00019 | 0,00189 | 0,00189 | 0,00227 |
| 301 | 0,00155 | 0,00300 | 0,00498 | 0,00524 | 0,00932 | 0,00945 | 0,00949 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 311 | 0,00135 | 0,00522 | 0,00575 | 0,00772 | 0,00491 | 0,00451 | 0,00490 | 0,00561 | 0,00546 | 0,00353 |
| 321 | 0,00114 | 0,00259 | 0,00357 | 0,00361 | 0,00308 | 0,00453 | 0,00474 | 0,00391 | 0,00020 | 0,00028 |
| 331 | 0,00195 | 0,00327 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 341 | 0,00227 | 0,00383 | 0,00447 | 0,00937 | 0,00476 | 0,00510 | 0,00694 | 0,00826 | 0,01384 | -1,00000 |
| 351 | 0,00169 | 0,00290 | 0,00329 | 0,00369 | 0,00342 | 0,00338 | 0,00347 | 0,00275 | 0,00453 | 0,00307 |
| 361 | 0,00165 | 0,00286 | 0,00331 | 0,00342 | 0,00319 | 0,00316 | 0,00101 | 0,00090 | 0,00046 | 0,00088 |
| 371 | 0,00181 | 0,00305 | 0,00342 | 0,00431 | 0,00152 | 0,00119 | 0,00134 | 0,00061 | 0,00021 | 0,00089 |
| 381 | 0,00105 | 0,00136 | 0,11111 | 0,11111 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 391 | 0,00246 | 0,00349 | 0,00349 | 0,00372 | 0,00373 | 0,00286 | 0,00342 | 0,00295 | 0,00495 | 0,00422 |
| 401 | 0,00212 | 0,00299 | 0,00291 | 0,00300 | 0,00289 | 0,00202 | 0,00235 | 0,00181 | 0,00302 | 0,00234 |
| 411 | 0,00182 | 0,00255 | 0,00242 | 0,00240 | 0,00223 | 0,00140 | 0,00157 | 0,00133 | 0,00222 | 0,00166 |
| 421 | 0,00200 | 0,00282 | 0,00277 | 0,00254 | 0,00077 | 0,00002 | 0,00017 | 0,00057 | 0,00005 | 0,00003 |
| 431 | 0,00155 | 0,00243 | 0,00237 | 0,00238 | 0,00230 | 0,00157 | 0,00185 | 0,00143 | 0,00238 | 0,00201 |
| 441 | 0,00135 | 0,00194 | 0,00232 | 0,00235 | 0,00234 | 0,00194 | 0,00241 | 0,00210 | 0,00157 | 0,00273 |
| 451 | 0,00173 | 0,00201 | 0,00218 | 0,00219 | 0,00249 | 0,00959 | 0,00949 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 461 | 0,00132 | 0,00149 | 0,00156 | 0,00147 | 0,00161 | 0,00146 | 0,00185 | 0,00192 | 0,00329 | 0,00350 |
| 471 | 0,00170 | 0,00068 | 0,00051 | 0,00081 | 0,02778 | 0,02778 | 0,04000 | 0,06250 | 0,06250 | 0,06250 |
| 481 | 0,00168 | 0,00200 | 0,00409 | 0,00349 | 0,00217 | 0,00100 | 0,00167 | 0,00300 | 0,00619 | 0,00814 |
| 491 | 0,00188 | 0,00233 | 0,00302 | 0,00237 | 0,00128 | 0,00036 | 0,00073 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 3

| n | Testreihe 4 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,02220 | 0,06954 | 0,06367 | 0,07314 | 0,08234 | 0,07377 | 0,06688 | 0,08163 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,02239 | 0,03783 | 0,03036 | 0,03104 | 0,02841 | 0,01345 | 0,00145 | 0,01778 | 0,01778 | -1,00000 |
| 31 | 0,01129 | 0,01379 | 0,00491 | 0,04150 | 0,04150 | 0,03393 | 0,04340 | 0,03628 | 0,06250 | -1,00000 |
| 41 | 0,00754 | 0,00645 | 0,00413 | 0,00049 | 0,05669 | 0,05669 | 0,07111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,01129 | 0,01058 | 0,01989 | 0,01989 | 0,02098 | 0,01648 | 0,00009 | 0,00000 | 0,02778 | 0,00000 |
| 61 | 0,00931 | 0,01133 | 0,00645 | 0,00152 | 0,05949 | 0,05949 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 71 | 0,00395 | 0,02683 | 0,02683 | 0,02111 | 0,02354 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 81 | 0,00573 | 0,00472 | 0,00517 | 0,00375 | 0,00000 | 0,00856 | 0,00002 | 0,00063 | 0,13223 | 0,13223 |
| 91 | 0,00228 | 0,00352 | 0,00169 | 0,00103 | 0,02250 | 0,02250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 111 | 0,00226 | 0,00937 | 0,00985 | 0,01515 | 0,00826 | 0,01068 | 0,01477 | 0,02531 | 0,06250 | 0,00092 |
| 121 | 0,00454 | 0,00553 | 0,00840 | 0,00778 | 0,00113 | 0,01071 | 0,00010 | 0,00024 | 0,01235 | 0,00000 |
| 131 | 0,00460 | 0,00826 | 0,00826 | 0,00971 | 0,00510 | 0,00579 | 0,00882 | 0,00769 | -1,00000 | -1,00000 |
| 141 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 151 | 0,00443 | 0,00156 | 0,00156 | 0,00539 | 0,00173 | 0,00114 | 0,00245 | 0,00914 | 0,06250 | 0,00198 |
| 161 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 171 | 0,00203 | 0,00182 | 0,00204 | 0,01417 | 0,01417 | 0,07438 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 181 | 0,00121 | 0,00191 | 0,00648 | 0,00648 | 0,00529 | 0,00529 | 0,03516 | 0,06250 | 0,04938 | -1,00000 |
| 191 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 201 | 0,00042 | 0,00053 | 0,00020 | 0,00012 | 0,04124 | 0,04388 | 0,11111 | 0,14793 | 0,14793 | 0,14063 |
| 211 | 0,00042 | 0,00035 | 0,00000 | 0,00034 | 0,00034 | 0,00141 | 0,00057 | 0,00335 | 0,00101 | 0,04000 |
| 221 | 0,00010 | 0,00041 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00492 | 0,02105 | 0,02105 | 0,01235 | 0,01235 | 0,00000 |
| 231 | 0,00001 | 0,00002 | 0,00173 | 0,00207 | 0,00159 | 0,00403 | 0,00403 | 0,06250 | 0,04938 | 0,00000 |
| 241 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00003 | 0,00011 | 0,01417 | 0,01417 | 0,03210 | 0,06925 | 0,03516 | 0,06250 |
| 251 | 0,00010 | 0,00008 | 0,00000 | 0,00006 | 0,00006 | 0,00343 | 0,00340 | 0,00095 | 0,00529 | 0,00630 |
| 261 | 0,00010 | 0,00020 | 0,00001 | 0,00115 | 0,00115 | 0,03628 | 0,03628 | 0,00694 | 0,02778 | 0,02778 |
| 271 | 0,00006 | 0,00001 | 0,00003 | 0,00049 | 0,00049 | 0,00273 | 0,00907 | 0,00805 | 0,00174 | 0,11111 |
| 281 | 0,00020 | 0,00006 | 0,00000 | 0,00005 | 0,00452 | 0,00551 | 0,00333 | 0,00333 | 0,00057 | 0,06250 |
| 291 | 0,00053 | 0,00041 | 0,00029 | 0,00022 | 0,00119 | 0,00230 | 0,00409 | 0,02469 | 0,02469 | 0,04592 |
| 301 | 0,00120 | 0,00130 | 0,00248 | 0,00248 | 0,00090 | 0,00254 | 0,01417 | 0,00121 | 0,00062 | 0,00000 |
| 311 | 0,00119 | 0,00343 | 0,00373 | 0,00686 | 0,00632 | 0,00057 | 0,00057 | 0,00000 | 0,00250 | 0,00694 |
| 321 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 331 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 341 | 0,00069 | 0,00084 | 0,00074 | 0,00096 | 0,00048 | 0,00016 | 0,00016 | 0,00336 | 0,03781 | 0,03781 |
| 351 | 0,00098 | 0,00091 | 0,00059 | 0,00045 | 0,02832 | 0,02832 | 0,04318 | 0,06925 | 0,04592 | 0,04000 |
| 361 | 0,00103 | 0,00119 | 0,00069 | 0,00051 | 0,02131 | 0,02131 | 0,00032 | 0,00032 | 0,04000 | 0,00000 |
| 371 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 381 | 0,00196 | 0,00272 | 0,00115 | 0,00118 | 0,01727 | 0,01727 | 0,02099 | 0,02420 | 0,06250 | 0,06250 |
| 391 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 401 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 411 | 0,00245 | 0,00142 | 0,00030 | 0,00640 | 0,00640 | 0,00010 | 0,00682 | 0,01778 | 0,00333 | 0,11111 |
| 421 | 0,00245 | 0,00128 | 0,00813 | 0,00813 | 0,00006 | 0,00478 | 0,00239 | 0,00009 | 0,03189 | 0,03189 |
| 431 | 0,00371 | 0,00267 | 0,00077 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00009 | 0,00187 | 0,01313 | 0,04314 |
| 441 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 451 | 0,00220 | 0,00199 | 0,00069 | 0,00002 | 0,00005 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00394 | 0,01778 | 0,03062 |
| 461 | 0,00220 | 0,00184 | 0,00069 | 0,00003 | 0,00012 | 0,00008 | 0,00051 | 0,00051 | 0,00263 | 0,16000 |
| 471 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 481 | 0,00092 | 0,00102 | 0,00118 | 0,00371 | 0,00371 | 0,02778 | 0,02778 | 0,04000 | 0,06250 | 0,06250 |
| 491 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 4

| n | Testreihe 5 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,00067 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,00266 | 0,00020 | 0,00257 | 0,41623 | 0,39063 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 31 | 0,00298 | 0,01014 | 0,00054 | 0,03346 | 0,03346 | 0,05796 | 0,09000 | 0,09000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 41 | 0,00410 | 0,00015 | 0,00787 | 0,00787 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,00015 | 0,00048 | 0,00134 | 0,06010 | 0,09049 | 0,00510 | 0,39889 | 0,40496 | -1,00000 | -1,00000 |
| 61 | 0,00040 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 71 | 0,00017 | 0,00120 | 0,00094 | 0,00500 | 0,00529 | 0,19753 | 0,19753 | 0,20661 | 0,00000 | 0,00000 |
| 81 | 0,00014 | 0,00001 | 0,04500 | 0,03698 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 91 | 0,00015 | 0,00188 | 0,04812 | 0,04812 | 0,10563 | 0,14793 | 0,14793 | 0,07438 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,00015 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 111 | 0,00091 | 0,00405 | 0,00143 | 0,00066 | 0,00327 | 0,00925 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 121 | 0,00224 | 0,00275 | 0,00094 | 0,00174 | 0,00148 | 0,05536 | 0,15123 | 0,15123 | 0,09000 | 1,00000 |
| 131 | 0,00013 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 141 | 0,00407 | 0,00286 | 0,00014 | 0,00046 | 0,00104 | 0,06007 | 0,06007 | 0,02778 | 0,06250 | 1,00000 |
| 151 | 0,00005 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 161 | 0,00077 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 171 | 0,00073 | 0,00971 | 0,01235 | 0,01952 | 0,01952 | 0,00351 | 0,00057 | 0,11111 | 0,44444 | -1,00000 |
| 181 | 0,00112 | 0,00004 | 0,00189 | 0,00039 | 0,00549 | 0,01589 | 0,01589 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 191 | 0,00057 | 0,00511 | 0,00511 | 0,02465 | 0,05290 | 0,05290 | 0,04886 | 0,01235 | 0,16000 | 0,25000 |
| 201 | 0,00000 | 0,00004 | 0,00964 | 0,00964 | 0,01873 | 0,02778 | 0,02778 | 0,00250 | 0,16000 | 0,16000 |
| 211 | 0,00049 | 0,00092 | 0,01607 | 0,01607 | 0,00008 | 0,00069 | 0,05252 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 |
| 221 | 0,00093 | 0,01163 | 0,01022 | 0,00233 | 0,00921 | 0,04340 | 0,03628 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 231 | 0,00035 | 0,00064 | 0,00064 | 0,00437 | 0,00379 | 0,00379 | 0,00068 | 0,00000 | 0,02778 | 0,25000 |
| 241 | 0,00072 | 0,00064 | 0,00388 | 0,01647 | 0,01647 | 0,14878 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 251 | 0,00143 | 0,00143 | 0,00204 | 0,00130 | 0,00895 | 0,00011 | 0,00011 | 0,05669 | 0,00000 | 0,02778 |
| 261 | 0,00283 | 0,00287 | 0,00026 | 0,00007 | 0,00362 | 0,00174 | 0,00174 | 0,00000 | 0,07111 | 0,02778 |
| 271 | 0,00703 | 0,01048 | 0,00291 | 0,00946 | 0,00779 | 0,00978 | 0,03393 | 0,01563 | 0,12250 | 1,00000 |
| 281 | 0,00961 | 0,01305 | 0,00311 | 0,00781 | 0,00961 | 0,00961 | 0,00057 | 0,02778 | 0,02778 | 0,06250 |
| 291 | 0,00878 | 0,01011 | 0,05173 | 0,05173 | 0,05714 | 0,05444 | 0,02429 | 0,02778 | 0,02778 | 0,11111 |
| 301 | 0,00068 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 311 | 0,00459 | 0,00442 | 0,02355 | 0,02355 | 0,03619 | 0,06740 | 0,06740 | 0,00694 | 0,25000 | 0,25000 |
| 321 | 0,00341 | 0,00246 | 0,01162 | 0,01162 | 0,02618 | 0,01111 | 0,01000 | 0,01000 | 0,11111 | 0,11111 |
| 331 | 0,00476 | 0,00376 | 0,00174 | 0,01157 | 0,01237 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00000 | 0,11111 | 0,11111 |
| 341 | 0,00478 | 0,00343 | 0,00944 | 0,00944 | 0,00111 | 0,00063 | 0,00653 | 0,00694 | 0,06250 | 0,06250 |
| 351 | 0,00020 | 0,00278 | 0,03361 | 0,02825 | 0,09000 | 0,09000 | 0,06250 | 0,02778 | -1,00000 | -1,00000 |
| 361 | 0,00224 | 0,00361 | 0,00361 | 0,00207 | 0,00423 | 0,00423 | 0,02778 | 0,02778 | 0,06250 | 0,25000 |
| 371 | 0,00000 | 0,00012 | 0,00012 | 0,00405 | 0,00735 | 0,05695 | 0,05695 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 |
| 381 | 0,00193 | 0,00178 | 0,01262 | 0,01262 | 0,02626 | 0,00006 | 0,01884 | 0,00000 | 0,00000 | 0,02778 |
| 391 | 0,00003 | 0,00037 | 0,00004 | 0,00991 | 0,00991 | 0,00541 | 0,06840 | 0,00907 | 0,00907 | -1,00000 |
| 401 | 0,00001 | 0,00028 | 0,00025 | 0,00835 | 0,00835 | 0,00253 | 0,06250 | 0,06250 | 0,00000 | 0,00000 |
| 411 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 421 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 431 | 0,00035 | 0,00011 | 0,00019 | 0,00019 | 0,00732 | 0,00396 | 0,07367 | 0,07367 | 0,06250 | -1,00000 |
| 441 | 0,00008 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 451 | 0,00023 | 0,00004 | 0,00059 | 0,03378 | 0,03378 | 0,00066 | 0,00229 | 0,06250 | 0,00000 | 0,00000 |
| 461 | 0,00005 | 0,00080 | 0,00033 | 0,00855 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00077 | 0,01000 | 0,00444 | 0,04592 |
| 471 | 0,00000 | 0,00003 | 0,00081 | 0,00081 | 0,01064 | 0,02778 | 0,06388 | 0,05975 | 0,01778 | 0,00694 |
| 481 | 0,00000 | 0,00001 | 0,02541 | 0,02502 | 0,06859 | 0,11111 | 0,11111 | 0,11111 | 0,16000 | 0,16000 |
| 491 | 0,00000 | 0,00003 | 0,00028 | 0,00028 | 0,00318 | 0,00181 | 0,01020 | 0,01020 | 0,00309 | 0,44444 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 5

| n | Testreihe 6 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,02256 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,00677 | 0,00996 | 0,00004 | 0,00001 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 31 | 0,04592 | 0,02531 | 0,01457 | 0,01731 | 0,00111 | 0,25000 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 41 | 0,04512 | 0,09745 | 0,25326 | 0,21807 | 0,10485 | 0,32653 | 0,14063 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,00108 | 0,00272 | 0,00444 | 0,02469 | 0,00309 | 0,00743 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 61 | 0,03017 | 0,04278 | 0,00007 | 0,03025 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 71 | 0,00018 | 0,00878 | 0,02193 | 0,03597 | 0,16282 | 0,39063 | 0,29752 | 0,36000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 81 | 0,01988 | 0,05911 | 0,07111 | 0,05669 | 0,01000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 91 | 0,00023 | 0,00442 | 0,00000 | 0,01235 | 0,06925 | 0,04000 | 0,04592 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,00417 | 0,01592 | 0,00888 | 0,00552 | 0,00422 | 0,00233 | 0,01316 | 0,00429 | 0,00011 | 0,04000 |
| 111 | 0,00519 | 0,00642 | 0,00040 | 0,00090 | 0,00398 | 0,00008 | 0,00092 | 0,00907 | 1,00000 | 1,00000 |
| 121 | 0,00324 | 0,00044 | 0,00890 | 0,01778 | 0,17729 | 0,22145 | 0,28994 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 131 | 0,00379 | 0,00003 | 0,01563 | 0,02980 | 0,00694 | 0,02850 | 0,04500 | 0,04938 | 0,69444 | -1,00000 |
| 141 | 0,00350 | 0,00028 | 0,00665 | 0,00012 | 0,04938 | 0,05444 | 0,25000 | 0,25000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 151 | 0,00007 | 0,00008 | 0,00037 | 0,00003 | 0,00337 | 0,00212 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 161 | 0,00335 | 0,00157 | 0,01810 | 0,02304 | 0,17729 | 0,25000 | 0,34028 | 0,29752 | 0,64000 | -1,00000 |
| 171 | 0,00350 | 0,00427 | 0,02676 | 0,04150 | 0,01417 | 0,01778 | 0,01235 | 0,04000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 181 | 0,00245 | 0,00373 | 0,02113 | 0,00840 | 0,00031 | 0,00043 | 0,04938 | 0,11111 | 0,00000 | 0,00000 |
| 191 | 0,00268 | 0,00434 | 0,00154 | 0,00160 | 0,01235 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 201 | 0,00142 | 0,00383 | 0,01599 | 0,01503 | 0,00779 | 0,02041 | 0,04000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 211 | 0,00074 | 0,00247 | 0,01115 | 0,00871 | 0,00848 | 0,02025 | 0,02778 | 0,11111 | 0,25000 | 0,00000 |
| 221 | 0,00060 | 0,00001 | 0,00053 | 0,00917 | 0,00111 | 0,04938 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 231 | 0,00259 | 0,00186 | 0,00306 | 0,00002 | 0,00012 | 0,00182 | 0,00988 | 0,03222 | 0,05224 | 0,05389 |
| 241 | 0,00637 | 0,00473 | 0,01337 | 0,00985 | 0,00694 | 0,03306 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 251 | 0,00075 | 0,00105 | 0,00961 | 0,01361 | 0,05444 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 261 | 0,00705 | 0,00721 | 0,00119 | 0,00525 | 0,00113 | 0,06250 | 0,06250 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 271 | 0,01091 | 0,01324 | 0,02030 | 0,05877 | 0,05325 | 0,11111 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 281 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00219 | 0,00377 | 0,01127 | 0,00313 | 0,01306 | 0,09878 | 0,25000 | 0,25000 |
| 291 | 0,01222 | 0,01458 | 0,02036 | 0,01037 | 0,00309 | 0,00000 | 0,06250 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 |
| 301 | 0,00004 | 0,00003 | 0,00007 | 0,00043 | 0,20465 | 0,36000 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 311 | 0,00023 | 0,00032 | 0,00106 | 0,01160 | 0,08163 | 0,04340 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 321 | 0,00679 | 0,01210 | 0,01878 | 0,03964 | 0,02250 | 0,09000 | 0,06250 | 0,11111 | 0,00000 | 0,00000 |
| 331 | 0,00020 | 0,00037 | 0,00155 | 0,00070 | 0,00066 | 0,00239 | 0,01842 | 0,03732 | 0,08421 | 0,11982 |
| 341 | 0,00038 | 0,00018 | 0,00154 | 0,00437 | 0,02514 | 0,00156 | 0,00000 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 |
| 351 | 0,00013 | 0,00006 | 0,00065 | 0,00549 | 0,05956 | 0,12250 | 0,25000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 361 | 0,00003 | 0,00030 | 0,00344 | 0,00510 | 0,10124 | 0,01778 | 0,04340 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 371 | 0,00055 | 0,00174 | 0,00014 | 0,00307 | 0,00037 | 0,01017 | 0,17361 | 0,14063 | -1,00000 | -1,00000 |
| 381 | 0,00061 | 0,00227 | 0,00775 | 0,00220 | 0,02842 | 0,04465 | 0,00000 | 0,01000 | 0,00000 | 0,25000 |
| 391 | 0,00005 | 0,00124 | 0,00364 | 0,00221 | 0,00313 | 0,01860 | 0,11111 | 0,02778 | 0,36000 | -1,00000 |
| 401 | 0,00102 | 0,00467 | 0,01148 | 0,00257 | 0,02086 | 0,01597 | 0,03732 | 0,00694 | 0,06250 | 0,00000 |
| 411 | 0,00194 | 0,00768 | 0,00081 | 0,00022 | 0,02778 | 0,17361 | 0,11111 | 0,25000 | 0,25000 | 1,00000 |
| 421 | 0,00026 | 0,00520 | 0,05009 | 0,06250 | 0,11111 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 431 | 0,00169 | 0,00022 | 0,00114 | 0,00028 | 0,03062 | 0,00510 | 0,06250 | 0,01860 | -1,00000 | -1,00000 |
| 441 | 0,00245 | 0,00045 | 0,00088 | 0,00000 | 0,00491 | 0,01010 | 0,10860 | 0,02250 | 0,00907 | -1,00000 |
| 451 | 0,00230 | 0,00377 | 0,00335 | 0,00322 | 0,00061 | 0,04622 | 0,02230 | 0,05877 | 0,04340 | 0,09000 |
| 461 | 0,00468 | 0,01489 | 0,00007 | 0,00447 | 0,02250 | 0,01000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 471 | 0,00422 | 0,00067 | 0,00489 | 0,01235 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 481 | 0,00503 | 0,01357 | 0,03200 | 0,01186 | 0,03272 | 0,02351 | 0,10124 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 |
| 491 | 0,00243 | 0,00822 | 0,02192 | 0,00483 | 0,01556 | 0,00340 | 0,05003 | 0,12755 | 0,00000 | -1,00000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 6

| n | Testreihe 7 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,00024 | 0,01809 | 0,01726 | 0,03354 | 0,03354 | 0,32283 | 0,32283 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 31 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 41 | 0,00619 | 0,00112 | 0,00131 | 0,01082 | 0,00978 | 0,02127 | 0,17361 | 0,17361 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 61 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 71 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 81 | 0,00006 | 0,00157 | 0,00157 | 0,00867 | 0,10576 | 0,09972 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 91 | 0,00022 | 0,00558 | 0,00558 | 0,00064 | 0,00064 | 0,00001 | 0,30864 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,00108 | 0,00173 | 0,00884 | 0,05252 | 0,37346 | 0,37346 | 0,29752 | 0,29752 | -1,00000 | -1,00000 |
| 111 | 0,00158 | 0,00184 | 0,02530 | 0,02530 | 0,01563 | 0,01331 | 0,00227 | 0,00227 | 0,11111 | 0,11111 |
| 121 | 0,00264 | 0,00176 | 0,02420 | 0,02229 | 0,02778 | 0,00028 | 0,16000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 131 | 0,00726 | 0,00001 | 0,01758 | 0,01758 | 0,01860 | 0,00092 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 141 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 151 | 0,00676 | 0,02507 | 0,02507 | 0,04035 | 0,04035 | 0,07560 | 0,42751 | 0,44444 | 0,44444 | 1,00000 |
| 161 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 171 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 181 | 0,00615 | 0,00126 | 0,00046 | 0,01271 | 0,09336 | 0,09336 | 0,00694 | 0,00694 | 0,14063 | 0,14063 |
| 191 | 0,00465 | 0,00333 | 0,01268 | 0,01268 | 0,01566 | 0,01566 | 0,00444 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 201 | 0,00131 | 0,01304 | 0,01254 | 0,01621 | 0,01519 | 0,00019 | 0,00003 | 0,02302 | 0,02939 | 0,19141 |
| 211 | 0,00023 | 0,00568 | 0,00412 | 0,03222 | 0,03222 | 0,00309 | 0,00309 | 0,33518 | 0,33518 | 0,25000 |
| 221 | 0,00076 | 0,00447 | 0,00234 | 0,00066 | 0,03202 | 0,03202 | 0,00207 | 0,00207 | 0,02778 | -1,00000 |
| 231 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 241 | 0,00005 | 0,00537 | 0,00537 | 0,00830 | 0,00830 | 0,00268 | 0,00268 | 0,00329 | 0,03490 | 0,03490 |
| 251 | 0,00151 | 0,00054 | 0,00018 | 0,00309 | 0,10588 | 0,13057 | 0,73469 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 261 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 271 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 281 | 0,00385 | 0,00815 | 0,00815 | 0,01290 | 0,01290 | 0,00007 | 0,00007 | 0,00037 | 0,00694 | 0,00694 |
| 291 | 0,00644 | 0,00221 | 0,01448 | 0,01755 | 0,00014 | 0,00444 | 0,00444 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 301 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 311 | 0,00372 | 0,00882 | 0,00840 | 0,00039 | 0,02367 | 0,00422 | 0,00422 | 0,00032 | 0,00032 | 0,01000 |
| 321 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 331 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 341 | 0,00075 | 0,00005 | 0,00082 | 0,00082 | 0,00391 | 0,00391 | 0,00379 | 0,00379 | 0,05165 | 0,05165 |
| 351 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 361 | 0,00068 | 0,00002 | 0,00004 | 0,00071 | 0,00071 | 0,06033 | 0,11111 | 0,11111 | 0,30864 | 0,30864 |
| 371 | 0,00030 | 0,00018 | 0,00125 | 0,00125 | 0,00358 | 0,00510 | 0,00763 | 0,00763 | 0,00309 | 0,02939 |
| 381 | 0,00005 | 0,00079 | 0,00099 | 0,01235 | 0,01235 | 0,05487 | 0,16178 | 0,15391 | 0,13444 | 0,16383 |
| 391 | 0,00001 | 0,00076 | 0,00076 | 0,01137 | 0,01137 | 0,00098 | 0,00098 | 0,00028 | 0,01884 | 0,01563 |
| 401 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 411 | 0,00065 | 0,00007 | 0,00023 | 0,00001 | 0,00069 | 0,00069 | 0,00309 | 0,00309 | 0,00510 | 0,00510 |
| 421 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 431 | 0,00007 | 0,00022 | 0,00149 | 0,00215 | 0,00138 | 0,00138 | 0,02367 | 0,02367 | 0,01046 | 0,01046 |
| 441 | 0,00008 | 0,00102 | 0,00000 | 0,00346 | 0,00346 | 0,05587 | 0,07111 | 0,07111 | 0,00000 | -1,00000 |
| 451 | 0,00000 | 0,00149 | 0,00945 | 0,00945 | 0,00057 | 0,00057 | 0,02683 | 0,02683 | 0,02395 | 0,02778 |
| 461 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 471 | 0,00019 | 0,00009 | 0,00009 | 0,00335 | 0,00335 | 0,00526 | 0,00232 | 0,00232 | 0,02949 | 0,02949 |
| 481 | 0,00001 | 0,00101 | 0,00007 | 0,00453 | 0,00453 | 0,08544 | 0,07111 | 1,00000 | 1,00000 | -1,00000 |
| 491 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 7

| n | Testreihe 8 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,29514 | 0,34028 | 0,34028 | 0,28610 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,02905 | 0,24131 | 0,26754 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 31 | 0,00632 | 0,06561 | 0,06561 | 0,28610 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 41 | 0,00000 | 0,00111 | 0,01563 | 0,02617 | 0,14984 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,02657 | 0,10307 | 0,10307 | 0,36560 | 0,47266 | 0,47266 | 0,39063 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 61 | 0,00714 | 0,04733 | 0,05304 | 0,00174 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 71 | 0,00247 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 81 | 0,00588 | 0,03337 | 0,10028 | 0,10028 | 0,03274 | 0,16955 | 0,01563 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 91 | 0,00013 | 0,00140 | 0,00002 | 0,00333 | 0,00069 | 0,00069 | 0,30864 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,00145 | 0,03256 | 0,00137 | 0,02233 | 0,02233 | 0,07807 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 111 | 0,00058 | 0,00416 | 0,01194 | 0,00003 | 0,00650 | 0,00650 | 0,25000 | 0,30864 | -1,00000 | -1,00000 |
| 121 | 0,00067 | 0,02561 | 0,02561 | 0,00852 | 0,02983 | 0,00066 | 0,04000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 131 | 0,00000 | 0,00006 | 0,00089 | 0,02944 | 0,08507 | 0,34602 | 0,34602 | 0,40496 | 0,44444 | 0,36000 |
| 141 | 0,00076 | 0,00955 | 0,00001 | 0,02023 | 0,02023 | 0,02778 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 151 | 0,00003 | 0,00004 | 0,00293 | 0,00580 | 0,00580 | 0,00111 | 0,01860 | 0,36000 | 0,36000 | 0,25000 |
| 161 | 0,00094 | 0,00394 | 0,01735 | 0,00001 | 0,07034 | 0,09878 | 0,00907 | 0,44444 | 0,44444 | 1,00000 |
| 171 | 0,00066 | 0,00241 | 0,01000 | 0,01000 | 0,00309 | 0,19753 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 181 | 0,00020 | 0,00135 | 0,00941 | 0,00941 | 0,03550 | 0,00057 | 0,06250 | 0,11111 | 0,11111 | 0,11111 |
| 191 | 0,00027 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 201 | 0,00002 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 211 | 0,00006 | 0,00014 | 0,00524 | 0,01170 | 0,01170 | 0,01482 | 0,05975 | 0,05975 | 1,00000 | -1,00000 |
| 221 | 0,00053 | 0,00209 | 0,00015 | 0,04096 | 0,04096 | 0,25000 | 0,07111 | 0,07111 | 1,00000 | -1,00000 |
| 231 | 0,00013 | 0,00724 | 0,00724 | 0,00154 | 0,00028 | 0,00028 | 0,12250 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 241 | 0,00001 | 0,00002 | 0,00444 | 0,00006 | 0,03263 | 0,04208 | 0,00082 | 0,56250 | 0,56250 | -1,00000 |
| 251 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 261 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 271 | 0,00235 | 0,00005 | 0,00186 | 0,01578 | 0,01578 | 0,00623 | 0,00000 | 0,00510 | 0,56250 | 0,56250 |
| 281 | 0,00006 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 291 | 0,00005 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 301 | 0,00001 | 0,00002 | 0,00008 | 0,00555 | 0,00137 | 0,01208 | 0,02778 | 0,02778 | -1,00000 | -1,00000 |
| 311 | 0,00002 | 0,00001 | 0,00009 | 0,01405 | 0,00004 | 0,03260 | 0,08163 | 0,08163 | 0,00444 | 0,25000 |
| 321 | 0,00002 | 0,00007 | 0,00017 | 0,00182 | 0,02583 | 0,02678 | 0,02678 | 0,11111 | 0,25000 | 1,00000 |
| 331 | 0,00117 | 0,00416 | 0,00416 | 0,05252 | 0,03062 | 0,01469 | 0,00174 | 0,36000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 341 | 0,00005 | 0,00068 | 0,00098 | 0,01685 | 0,02939 | 0,44444 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 351 | 0,00007 | 0,00010 | 0,00207 | 0,03286 | 0,11828 | 0,11828 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 361 | 0,00014 | 0,00051 | 0,00126 | 0,00011 | 0,00957 | 0,00111 | 0,00111 | 0,06250 | 0,11111 | -1,00000 |
| 371 | 0,00110 | 0,00005 | 0,00039 | 0,00039 | 0,00121 | 0,01249 | 0,06250 | 0,06250 | 0,11111 | -1,00000 |
| 381 | 0,00133 | 0,00329 | 0,00329 | 0,00218 | 0,00767 | 0,03062 | 0,03062 | 0,30864 | 0,56250 | -1,00000 |
| 391 | 0,00015 | 0,00012 | 0,00008 | 0,00413 | 0,01208 | 0,51020 | 0,51020 | 0,56250 | 1,00000 | 1,00000 |
| 401 | 0,00007 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 411 | 0,00006 | 0,00008 | 0,00450 | 0,01750 | 0,06583 | 0,06583 | 0,01653 | 0,06250 | 0,01000 | 0,01000 |
| 421 | 0,00003 | 0,00014 | 0,00073 | 0,00073 | 0,00040 | 0,02041 | 0,00907 | 0,02778 | 0,25000 | 0,25000 |
| 431 | 0,00001 | 0,00013 | 0,00137 | 0,00137 | 0,00050 | 0,02880 | 0,02778 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 |
| 441 | 0,00002 | 0,00009 | 0,00009 | 0,00503 | 0,00123 | 0,00227 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 451 | 0,00026 | 0,00023 | 0,00040 | 0,01786 | 0,05444 | 0,05444 | 0,06250 | 1,00000 | 1,00000 | -1,00000 |
| 461 | 0,00088 | 0,00151 | 0,00011 | 0,00967 | 0,00207 | 0,34028 | 0,34028 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 471 | 0,00081 | 0,00226 | 0,00012 | 0,01148 | 0,01148 | 0,04500 | 0,04592 | 0,04592 | 0,02778 | 0,00000 |
| 481 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 491 | 0,00000 | 0,00010 | 0,00281 | 0,00358 | 0,00358 | 0,02395 | 0,09878 | 0,02778 | 0,02778 | 0,02778 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 8

| n | Testreihe 9 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,00041 | 0,00074 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,04592 | 0,00850 | 0,00290 | 0,26538 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 31 | 0,00027 | 0,00046 | 0,03658 | 0,00111 | 0,28028 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 41 | 0,00754 | 0,05828 | 0,28028 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,01313 | 0,00014 | 0,00650 | 0,02041 | 0,04592 | 0,56250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 61 | 0,00044 | 0,01017 | 0,01148 | 0,04208 | 0,06250 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 71 | 0,00006 | 0,01626 | 0,02778 | 0,01563 | 0,00184 | 0,05669 | 0,06250 | 0,25000 | 1,00000 | -1,00000 |
| 81 | 0,01850 | 0,09125 | 0,00117 | 0,22438 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 91 | 0,01633 | 0,00782 | 0,03872 | 0,12457 | 0,09467 | 0,08163 | 0,11111 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,01012 | 0,01778 | 0,00857 | 0,01591 | 0,00207 | 0,04000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 111 | 0,00171 | 0,00028 | 0,02843 | 0,39063 | 0,46488 | 0,56250 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 121 | 0,00078 | 0,00017 | 0,00631 | 0,22896 | 0,14512 | 0,23508 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 131 | 0,00025 | 0,00046 | 0,00922 | 0,09878 | 0,39889 | 0,51020 | 0,36000 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 141 | 0,00052 | 0,00010 | 0,00060 | 0,12250 | 0,01469 | 0,44444 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 151 | 0,00145 | 0,00437 | 0,00002 | 0,00000 | 0,02778 | 0,00510 | 0,25000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 161 | 0,00188 | 0,00006 | 0,03252 | 0,03781 | 0,04592 | 0,56250 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 171 | 0,00161 | 0,01146 | 0,01723 | 0,00192 | 0,03858 | 0,02778 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 181 | 0,00079 | 0,00109 | 0,00030 | 0,01148 | 0,04639 | 0,02778 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 191 | 0,00008 | 0,00004 | 0,01631 | 0,00057 | 0,00028 | 0,22779 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 201 | 0,00201 | 0,02168 | 0,01457 | 0,05373 | 0,00694 | 0,00082 | 0,56250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 211 | 0,00000 | 0,01566 | 0,04291 | 0,00250 | 0,00422 | 0,25000 | 1,00000 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 221 | 0,00010 | 0,01256 | 0,00654 | 0,06531 | 0,05062 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 231 | 0,00312 | 0,00331 | 0,00039 | 0,00261 | 0,03628 | 0,00735 | 0,06250 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 |
| 241 | 0,00042 | 0,01166 | 0,00100 | 0,00354 | 0,02778 | 0,11111 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 251 | 0,00593 | 0,00732 | 0,00016 | 0,00889 | 0,18854 | 0,20465 | 0,16000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 261 | 0,00134 | 0,00021 | 0,00200 | 0,00298 | 0,00444 | 0,02778 | 0,02778 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 |
| 271 | 0,00144 | 0,00060 | 0,02337 | 0,11517 | 0,32111 | 0,60494 | 0,64000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 281 | 0,00013 | 0,00670 | 0,00136 | 0,00128 | 0,00212 | 0,20661 | 0,44444 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 291 | 0,00034 | 0,00810 | 0,00057 | 0,00024 | 0,00309 | 0,16000 | 0,36000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 301 | 0,00077 | 0,00900 | 0,00088 | 0,00884 | 0,00694 | 0,00207 | 0,05669 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 311 | 0,00016 | 0,00108 | 0,00036 | 0,00425 | 0,00025 | 0,06250 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 321 | 0,00013 | 0,00175 | 0,00560 | 0,00055 | 0,05122 | 0,31428 | 0,32653 | 0,06250 | 0,00000 | 0,00000 |
| 331 | 0,00627 | 0,01731 | 0,03374 | 0,05273 | 0,09183 | 0,00000 | 0,00694 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 341 | 0,00049 | 0,00002 | 0,00853 | 0,00522 | 0,05165 | 0,52893 | 0,39063 | 0,56250 | 0,00000 | -1,00000 |
| 351 | 0,00008 | 0,00001 | 0,01738 | 0,00207 | 0,00444 | 0,02778 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 361 | 0,00971 | 0,02222 | 0,03361 | 0,03824 | 0,00949 | 0,06250 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 371 | 0,00020 | 0,00101 | 0,00176 | 0,02205 | 0,00074 | 0,01563 | 0,00250 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 |
| 381 | 0,01014 | 0,00224 | 0,00016 | 0,00130 | 0,03858 | 0,05165 | 0,12755 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 391 | 0,00118 | 0,00043 | 0,00021 | 0,00287 | 0,07716 | 0,02778 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 401 | 0,00742 | 0,00266 | 0,00119 | 0,00008 | 0,02353 | 0,09000 | 0,21778 | 0,02778 | -1,00000 | -1,00000 |
| 411 | 0,00033 | 0,00042 | 0,00022 | 0,00128 | 0,00000 | 0,32653 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 421 | 0,00968 | 0,01709 | 0,03220 | 0,03259 | 0,00000 | 0,00510 | 0,02778 | 0,25000 | 0,44444 | 1,00000 |
| 431 | 0,00564 | 0,00208 | 0,00039 | 0,00082 | 0,00145 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 441 | 0,00525 | 0,01441 | 0,02468 | 0,03917 | 0,08308 | 0,00309 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 451 | 0,00516 | 0,00225 | 0,00631 | 0,01496 | 0,02944 | 0,07111 | 0,02778 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 461 | 0,00566 | 0,00125 | 0,00017 | 0,00249 | 0,00408 | 0,03781 | 0,21778 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 471 | 0,00202 | 0,00354 | 0,00087 | 0,00139 | 0,02008 | 0,02778 | 0,08163 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 |
| 481 | 0,00628 | 0,00141 | 0,00327 | 0,00084 | 0,01000 | 0,01653 | 0,04000 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 491 | 0,00783 | 0,02236 | 0,01170 | 0,00514 | 0,01794 | 0,05224 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 9

| n | Testreihe 10 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,01197 | 0,00055 | 0,07935 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,00084 | 0,10214 | 0,12755 | 0,09972 | 0,13223 | 0,16000 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 31 | 0,00080 | 0,00140 | 0,00045 | 0,00250 | 0,00736 | 0,04000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 41 | 0,00102 | 0,00146 | 0,00657 | 0,00694 | 0,00043 | 0,00030 | 0,02778 | 0,64000 | 0,44444 | 0,36000 |
| 51 | 0,00384 | 0,00452 | 0,00898 | 0,00654 | 0,07007 | 0,04432 | 0,01778 | 0,02778 | 0,02041 | 0,02778 |
| 61 | 0,01360 | 0,01922 | 0,02927 | 0,02778 | 0,02411 | 0,01985 | 0,00625 | 0,01052 | 0,01999 | 0,01046 |
| 71 | 0,02331 | 0,03195 | 0,04383 | 0,04334 | 0,04470 | 0,03909 | 0,01629 | 0,02896 | 0,03268 | 0,02086 |
| 81 | 0,01338 | 0,02104 | 0,00090 | 0,00042 | 0,03086 | 0,05796 | 0,44444 | 0,49000 | 0,64000 | 0,64000 |
| 91 | 0,01390 | 0,02098 | 0,03435 | 0,03768 | 0,03794 | 0,02479 | 0,16000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,00990 | 0,01232 | 0,02522 | 0,00357 | 0,05536 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 111 | 0,00325 | 0,00108 | 0,00152 | 0,01929 | 0,00227 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 121 | 0,00442 | 0,00755 | 0,01805 | 0,02275 | 0,02839 | 0,01366 | 0,00711 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 131 | 0,00048 | 0,02735 | 0,05853 | 0,04840 | 0,11111 | 0,11111 | 0,05325 | 0,08163 | 0,11111 | -1,00000 |
| 141 | 0,00093 | 0,00563 | 0,00043 | 0,04000 | 0,06985 | 0,04592 | 0,02778 | 0,19753 | 0,19753 | 1,00000 |
| 151 | 0,00559 | 0,00823 | 0,00006 | 0,00840 | 0,46814 | 0,32653 | 0,29752 | 0,25000 | 0,25000 | 0,06250 |
| 161 | 0,00785 | 0,01085 | 0,01493 | 0,00799 | 0,00420 | 0,12840 | 0,28444 | 0,21302 | 0,25000 | 0,25000 |
| 171 | 0,00468 | 0,00003 | 0,00059 | 0,00073 | 0,00574 | 0,02493 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 181 | 0,00625 | 0,01092 | 0,01417 | 0,00804 | 0,00406 | 0,00023 | 0,00113 | 0,00177 | 0,16000 | 1,00000 |
| 191 | 0,00309 | 0,00526 | 0,00451 | 0,01341 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 201 | 0,00182 | 0,00549 | 0,00647 | 0,03078 | 0,09766 | 0,44444 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 211 | 0,00308 | 0,00924 | 0,01303 | 0,00904 | 0,00846 | 0,00008 | 0,02250 | 0,00227 | 0,01306 | 0,04000 |
| 221 | 0,00622 | 0,01561 | 0,02394 | 0,01990 | 0,02075 | 0,00199 | 0,00691 | 0,01418 | 0,04176 | 0,05550 |
| 231 | 0,00558 | 0,01283 | 0,00221 | 0,00034 | 0,00845 | 0,01812 | 0,28699 | 0,32283 | -1,00000 | -1,00000 |
| 241 | 0,00429 | 0,01406 | 0,02085 | 0,02194 | 0,01720 | 0,11982 | 0,19141 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 251 | 0,00248 | 0,00574 | 0,00174 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 261 | 0,00157 | 0,00000 | 0,00354 | 0,00790 | 0,05444 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 271 | 0,00246 | 0,00472 | 0,01085 | 0,01769 | 0,60494 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 281 | 0,00152 | 0,00052 | 0,00001 | 0,00327 | 0,06250 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 291 | 0,00096 | 0,00729 | 0,01149 | 0,00245 | 0,00563 | 0,00033 | 0,25000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 301 | 0,00063 | 0,01230 | 0,02486 | 0,02717 | 0,27438 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 311 | 0,00036 | 0,00561 | 0,00852 | 0,00128 | 0,00248 | 0,09766 | 0,05695 | 0,04000 | 0,06250 | 0,25000 |
| 321 | 0,00084 | 0,00029 | 0,00137 | 0,04750 | 0,11111 | 0,14272 | 0,25000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 331 | 0,00019 | 0,00007 | 0,00168 | 0,00027 | 0,04938 | 0,34028 | 0,44444 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 |
| 341 | 0,00011 | 0,00256 | 0,00122 | 0,00014 | 0,02778 | 0,02613 | 0,01709 | 0,04592 | 0,76563 | -1,00000 |
| 351 | 0,00036 | 0,00366 | 0,00894 | 0,00960 | 0,00805 | 0,00694 | 0,04340 | 0,25000 | 0,44444 | 0,44444 |
| 361 | 0,00051 | 0,00743 | 0,00259 | 0,00227 | 0,01413 | 0,00152 | 0,00000 | 0,00111 | 0,06250 | -1,00000 |
| 371 | 0,00060 | 0,00421 | 0,01300 | 0,01544 | 0,01701 | 0,01543 | 0,00694 | 0,02778 | -1,00000 | -1,00000 |
| 381 | 0,00049 | 0,00439 | 0,00340 | 0,00031 | 0,04000 | 0,11111 | 0,16000 | 0,11111 | 0,00000 | 0,00000 |
| 391 | 0,00037 | 0,00053 | 0,00921 | 0,01125 | 0,00000 | 0,01000 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 401 | 0,00054 | 0,00592 | 0,01512 | 0,01487 | 0,02056 | 0,01622 | 0,02475 | 0,16000 | 0,25000 | 1,00000 |
| 411 | 0,00066 | 0,00560 | 0,01512 | 0,01031 | 0,01293 | 0,06385 | 0,01563 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 421 | 0,00083 | 0,00001 | 0,02250 | 0,06250 | 0,11111 | 0,25000 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 431 | 0,00059 | 0,00496 | 0,01371 | 0,02778 | 0,01010 | 0,03089 | 0,03655 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 441 | 0,00116 | 0,00170 | 0,00240 | 0,00055 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 451 | 0,00023 | 0,00285 | 0,00006 | 0,00259 | 0,00088 | 0,00028 | 0,18062 | 0,10332 | 0,51020 | 0,25000 |
| 461 | 0,00113 | 0,00099 | 0,00122 | 0,00001 | 0,00444 | 0,00082 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 471 | 0,00008 | 0,00151 | 0,00225 | 0,00049 | 0,00000 | 0,00694 | 0,25000 | 0,25000 | 1,00000 | -1,00000 |
| 481 | 0,00006 | 0,00089 | 0,00079 | 0,00155 | 0,00076 | 0,00049 | 0,00213 | 0,00023 | 0,02778 | -1,00000 |
| 491 | 0,00014 | 0,00069 | 0,00165 | 0,01391 | 0,00204 | 0,00467 | 0,10741 | 0,16736 | 0,04000 | 0,25000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 10

| n | Testreihe 11 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,01197 | 0,00055 | 0,07935 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,00084 | 0,10214 | 0,12755 | 0,09972 | 0,13223 | 0,16000 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 31 | 0,00080 | 0,00140 | 0,00045 | 0,00250 | 0,00736 | 0,04000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 41 | 0,00102 | 0,00146 | 0,00657 | 0,00694 | 0,00043 | 0,00030 | 0,02778 | 0,64000 | 0,44444 | 0,36000 |
| 51 | 0,00384 | 0,00452 | 0,00898 | 0,00654 | 0,07007 | 0,04432 | 0,01778 | 0,02778 | 0,02041 | 0,02778 |
| 61 | 0,01360 | 0,01922 | 0,02927 | 0,02778 | 0,02411 | 0,01985 | 0,00625 | 0,01052 | 0,01999 | 0,01046 |
| 71 | 0,02331 | 0,03195 | 0,04383 | 0,04334 | 0,04470 | 0,03909 | 0,01629 | 0,02896 | 0,03268 | 0,02086 |
| 81 | 0,01338 | 0,02104 | 0,00090 | 0,00042 | 0,03086 | 0,05796 | 0,44444 | 0,49000 | 0,64000 | 0,64000 |
| 91 | 0,01390 | 0,02098 | 0,03435 | 0,03768 | 0,03794 | 0,02479 | 0,16000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,00990 | 0,01232 | 0,02522 | 0,00357 | 0,05536 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 111 | 0,00325 | 0,00108 | 0,00152 | 0,01929 | 0,00227 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 121 | 0,00442 | 0,00755 | 0,01805 | 0,02275 | 0,02839 | 0,01366 | 0,00711 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 131 | 0,00048 | 0,02735 | 0,05853 | 0,04840 | 0,11111 | 0,11111 | 0,05325 | 0,08163 | 0,11111 | -1,00000 |
| 141 | 0,00093 | 0,00563 | 0,00043 | 0,04000 | 0,06985 | 0,04592 | 0,02778 | 0,19753 | 0,19753 | 1,00000 |
| 151 | 0,00559 | 0,00823 | 0,00006 | 0,00840 | 0,46814 | 0,32653 | 0,29752 | 0,25000 | 0,25000 | 0,06250 |
| 161 | 0,00785 | 0,01085 | 0,01493 | 0,00799 | 0,00420 | 0,12840 | 0,28444 | 0,21302 | 0,25000 | 0,25000 |
| 171 | 0,00468 | 0,00003 | 0,00059 | 0,00073 | 0,00574 | 0,02493 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 181 | 0,00625 | 0,01092 | 0,01417 | 0,00804 | 0,00406 | 0,00023 | 0,00113 | 0,00177 | 0,16000 | 1,00000 |
| 191 | 0,00309 | 0,00526 | 0,00451 | 0,01341 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 201 | 0,00182 | 0,00549 | 0,00647 | 0,03078 | 0,09766 | 0,44444 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 211 | 0,00308 | 0,00924 | 0,01303 | 0,00904 | 0,00846 | 0,00008 | 0,02250 | 0,00227 | 0,01306 | 0,04000 |
| 221 | 0,00622 | 0,01561 | 0,02394 | 0,01990 | 0,02075 | 0,00199 | 0,00691 | 0,01418 | 0,04176 | 0,05550 |
| 231 | 0,00558 | 0,01283 | 0,00221 | 0,00034 | 0,00845 | 0,01812 | 0,28699 | 0,32283 | -1,00000 | -1,00000 |
| 241 | 0,00429 | 0,01406 | 0,02085 | 0,02194 | 0,01720 | 0,11982 | 0,19141 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 251 | 0,00248 | 0,00574 | 0,00174 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 261 | 0,00157 | 0,00000 | 0,00354 | 0,00790 | 0,05444 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 271 | 0,00246 | 0,00472 | 0,01085 | 0,01769 | 0,60494 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 281 | 0,00152 | 0,00052 | 0,00001 | 0,00327 | 0,06250 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 291 | 0,00096 | 0,00729 | 0,01149 | 0,00245 | 0,00563 | 0,00033 | 0,25000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 301 | 0,00063 | 0,01230 | 0,02486 | 0,02717 | 0,27438 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 311 | 0,00036 | 0,00561 | 0,00852 | 0,00128 | 0,00248 | 0,09766 | 0,05695 | 0,04000 | 0,06250 | 0,25000 |
| 321 | 0,00084 | 0,00029 | 0,00137 | 0,04750 | 0,11111 | 0,14272 | 0,25000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 331 | 0,00019 | 0,00007 | 0,00168 | 0,00027 | 0,04938 | 0,34028 | 0,44444 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 |
| 341 | 0,00011 | 0,00256 | 0,00122 | 0,00014 | 0,02778 | 0,02613 | 0,01709 | 0,04592 | 0,76563 | -1,00000 |
| 351 | 0,00036 | 0,00366 | 0,00894 | 0,00960 | 0,00805 | 0,00694 | 0,04340 | 0,25000 | 0,44444 | 0,44444 |
| 361 | 0,00051 | 0,00743 | 0,00259 | 0,00227 | 0,01413 | 0,00152 | 0,00000 | 0,00111 | 0,06250 | -1,00000 |
| 371 | 0,00060 | 0,00421 | 0,01300 | 0,01544 | 0,01701 | 0,01543 | 0,00694 | 0,02778 | -1,00000 | -1,00000 |
| 381 | 0,00049 | 0,00439 | 0,00340 | 0,00031 | 0,04000 | 0,11111 | 0,16000 | 0,11111 | 0,00000 | 0,00000 |
| 391 | 0,00037 | 0,00053 | 0,00921 | 0,01125 | 0,00000 | 0,01000 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 401 | 0,00054 | 0,00592 | 0,01512 | 0,01487 | 0,02056 | 0,01622 | 0,02475 | 0,16000 | 0,25000 | 1,00000 |
| 411 | 0,00066 | 0,00560 | 0,01512 | 0,01031 | 0,01293 | 0,06385 | 0,01563 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 421 | 0,00083 | 0,00001 | 0,02250 | 0,06250 | 0,11111 | 0,25000 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 431 | 0,00059 | 0,00496 | 0,01371 | 0,02778 | 0,01010 | 0,03089 | 0,03655 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 441 | 0,00116 | 0,00170 | 0,00240 | 0,00055 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 451 | 0,00023 | 0,00285 | 0,00006 | 0,00259 | 0,00088 | 0,00028 | 0,18062 | 0,10332 | 0,51020 | 0,25000 |
| 461 | 0,00113 | 0,00099 | 0,00122 | 0,00001 | 0,00444 | 0,00082 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 471 | 0,00008 | 0,00151 | 0,00225 | 0,00049 | 0,00000 | 0,00694 | 0,25000 | 0,25000 | 1,00000 | -1,00000 |
| 481 | 0,00006 | 0,00089 | 0,00079 | 0,00155 | 0,00076 | 0,00049 | 0,00213 | 0,00023 | 0,02778 | -1,00000 |
| 491 | 0,00014 | 0,00069 | 0,00165 | 0,01391 | 0,00204 | 0,00467 | 0,10741 | 0,16736 | 0,04000 | 0,25000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 11

| n | Testreihe 12 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,03030 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,00002 | 0,12098 | 0,11111 | 0,06479 | 0,05224 | 0,06722 | 0,06925 | 0,08163 | 0,06250 | -1,00000 |
| 31 | 0,03446 | 0,03312 | 0,03816 | 0,02163 | 0,01617 | 0,00616 | 0,00009 | 0,04000 | 0,09766 | -1,00000 |
| 41 | 0,04402 | 0,04544 | 0,05617 | 0,04167 | 0,04340 | 0,03955 | 0,04056 | 0,01943 | 0,04340 | 0,12457 |
| 51 | 0,05116 | 0,05488 | 0,07049 | 0,05523 | 0,06194 | 0,05620 | 0,06089 | 0,03484 | 0,05165 | 0,09766 |
| 61 | 0,03997 | 0,04142 | 0,05188 | 0,03615 | 0,00046 | 0,00367 | 0,01778 | 0,01778 | 0,00000 | -1,00000 |
| 71 | 0,04946 | 0,05392 | 0,07224 | 0,06190 | 0,07979 | 0,08122 | 0,10428 | 0,07544 | 0,11919 | 0,28242 |
| 81 | 0,05045 | 0,05550 | 0,06931 | 0,05587 | 0,07275 | 0,11982 | 0,07111 | 0,07438 | 0,07438 | 0,11111 |
| 91 | 0,02499 | 0,02889 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,03818 | 0,04436 | 0,06257 | 0,04584 | 0,05625 | 0,09467 | 0,16000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 111 | 0,02564 | 0,00400 | 0,01313 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 121 | 0,01307 | 0,00047 | 0,00574 | 0,03516 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 131 | 0,01544 | 0,02135 | 0,03748 | 0,02583 | 0,03645 | 0,03897 | 0,03112 | 0,03408 | 0,01291 | 0,03781 |
| 141 | 0,00435 | 0,05963 | 0,07910 | 0,62674 | 0,59172 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 151 | 0,01128 | 0,01549 | 0,03034 | 0,02231 | 0,00077 | 0,05325 | 0,06250 | 0,25000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 161 | 0,01081 | 0,00003 | 0,00064 | 0,02041 | 0,05669 | 0,56250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 171 | 0,00680 | 0,00107 | 0,00631 | 0,00128 | 0,00250 | 0,00128 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 181 | 0,01608 | 0,01402 | 0,02678 | 0,15180 | 0,11111 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 191 | 0,01647 | 0,02812 | 0,06956 | 0,00510 | 0,00907 | 0,18367 | 0,44444 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 201 | 0,00130 | 0,00015 | 0,00255 | 0,08651 | 0,04592 | 0,07438 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 211 | 0,00133 | 0,00256 | 0,01545 | 0,00724 | 0,01283 | 0,01125 | 0,00000 | 0,25000 | 0,06250 | 0,00000 |
| 221 | 0,00107 | 0,00153 | 0,02541 | 0,02585 | 0,03404 | 0,01066 | 0,00019 | 0,00444 | 0,00000 | -1,00000 |
| 231 | 0,00046 | 0,00008 | 0,00049 | 0,00025 | 0,06250 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 241 | 0,00068 | 0,00049 | 0,00657 | 0,01148 | 0,06729 | 0,10064 | 0,11456 | 0,04000 | 0,08163 | -1,00000 |
| 251 | 0,00064 | 0,00229 | 0,00605 | 0,00030 | 0,00077 | 0,05325 | 0,09000 | 0,11111 | 0,14063 | -1,00000 |
| 261 | 0,00140 | 0,00082 | 0,00654 | 0,00350 | 0,01207 | 0,01650 | 0,01909 | 0,00270 | 0,00000 | 0,00000 |
| 271 | 0,00009 | 0,00284 | 0,00346 | 0,06250 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 281 | 0,00000 | 0,00043 | 0,00240 | 0,02717 | 0,01522 | 0,02617 | 0,00057 | 0,00694 | 0,02778 | 0,06250 |
| 291 | 0,00173 | 0,00110 | 0,00539 | 0,00353 | 0,00848 | 0,01885 | 0,03568 | 0,00174 | 0,01235 | 0,02041 |
| 301 | 0,00084 | 0,00094 | 0,00480 | 0,00283 | 0,00195 | 0,00001 | 0,11111 | 0,01000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 311 | 0,00067 | 0,00005 | 0,00067 | 0,05196 | 0,00250 | 0,00000 | 0,02778 | 0,11111 | 0,25000 | -1,00000 |
| 321 | 0,00006 | 0,00118 | 0,00287 | 0,02250 | 0,01563 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 331 | 0,00127 | 0,00125 | 0,00428 | 0,01592 | 0,05056 | 0,05036 | 0,06317 | 0,17605 | 0,11111 | 0,00000 |
| 341 | 0,00089 | 0,00021 | 0,00058 | 0,00027 | 0,02778 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 351 | 0,00004 | 0,00004 | 0,00189 | 0,08922 | 0,02420 | 0,07111 | 0,36000 | 0,56250 | -1,00000 | -1,00000 |
| 361 | 0,00038 | 0,00094 | 0,00376 | 0,00038 | 0,00339 | 0,00435 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 371 | 0,00005 | 0,00002 | 0,00304 | 0,07955 | 0,01563 | 0,06250 | 0,17361 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 381 | 0,00002 | 0,00084 | 0,00094 | 0,02447 | 0,01037 | 0,01508 | 0,11111 | 0,06250 | 0,00000 | -1,00000 |
| 391 | 0,00013 | 0,00079 | 0,00336 | 0,00118 | 0,00280 | 0,01123 | 0,07457 | 0,03306 | 0,04938 | 0,02778 |
| 401 | 0,00025 | 0,00099 | 0,00366 | 0,00746 | 0,01299 | 0,01425 | 0,01960 | 0,02654 | 0,00958 | 0,11934 |
| 411 | 0,00015 | 0,00130 | 0,00451 | 0,00358 | 0,00489 | 0,00549 | 0,02878 | 0,11111 | 0,25000 | -1,00000 |
| 421 | 0,00034 | 0,00193 | 0,00531 | 0,00421 | 0,00313 | 0,00007 | 0,00694 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 431 | 0,00062 | 0,00167 | 0,00044 | 0,00009 | 0,00327 | 0,00000 | 0,00945 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 |
| 441 | 0,00000 | 0,00065 | 0,00049 | 0,01506 | 0,10230 | 0,12642 | 0,03628 | 0,06612 | 0,00735 | 0,00000 |
| 451 | 0,00126 | 0,00000 | 0,00037 | 0,00280 | 0,00116 | 0,00987 | 0,00017 | 0,03222 | 0,69444 | -1,00000 |
| 461 | 0,00024 | 0,00261 | 0,00163 | 0,00031 | 0,02910 | 0,23246 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 471 | 0,00190 | 0,00277 | 0,00303 | 0,00074 | 0,00123 | 0,00071 | 0,00015 | 0,02056 | 0,06250 | 0,04000 |
| 481 | 0,00295 | 0,00387 | 0,00409 | 0,00468 | 0,00080 | 0,00171 | 0,02705 | 0,16000 | 1,00000 | -1,00000 |
| 491 | 0,00265 | 0,00157 | 0,00001 | 0,00764 | 0,01778 | 0,14063 | 0,11111 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 12

| n | Testreihe 13 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,06280 | 0,04291 | 0,01778 | 0,09467 | 0,11111 | 0,08507 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 21 | 0,02984 | 0,01109 | 0,00043 | 0,00605 | 0,06250 | 0,11111 | 0,25000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 31 | 0,01846 | 0,01017 | 0,16000 | 0,07438 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 41 | 0,14694 | 0,10588 | 0,69178 | 0,59510 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,17668 | 0,10460 | 0,12886 | 0,25840 | 0,03516 | 0,01860 | 0,02778 | 0,01000 | 0,44444 | -1,00000 |
| 61 | 0,01061 | 0,00880 | 0,00312 | 0,01420 | 0,11111 | 0,16000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 71 | 0,17235 | 0,22092 | 0,05627 | 0,03516 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 81 | 0,01574 | 0,02746 | 0,02834 | 0,06471 | 0,03943 | 0,00048 | 0,01235 | 0,00000 | 0,02778 | -1,00000 |
| 91 | 0,01504 | 0,00100 | 0,02041 | 0,10485 | 0,25000 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 101 | 0,01419 | 0,01577 | 0,00643 | 0,00000 | 0,02778 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 111 | 0,01390 | 0,00949 | 0,00167 | 0,03244 | 0,08163 | 0,11111 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 121 | 0,12503 | 0,22195 | 0,73279 | 0,74799 | 0,90250 | 0,85207 | 0,81000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 131 | 0,02607 | 0,02119 | 0,03639 | 0,07664 | 0,21302 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 141 | 0,03066 | 0,02817 | 0,05384 | 0,08457 | 0,25000 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 151 | 0,07625 | 0,01983 | 0,14373 | 0,40818 | 0,75111 | 0,71598 | 0,69444 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 161 | 0,05586 | 0,01873 | 0,11560 | 0,29287 | 0,46046 | 0,17361 | 0,16736 | 0,79012 | 0,79012 | -1,00000 |
| 171 | 0,04906 | 0,05057 | 0,06289 | 0,01785 | 0,07631 | 0,11560 | 0,21778 | 0,11111 | 0,25000 | 0,44444 |
| 181 | 0,06080 | 0,03753 | 0,00123 | 0,00120 | 0,14512 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 191 | 0,01787 | 0,01375 | 0,03504 | 0,06502 | 0,21302 | 0,16000 | 0,19753 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 201 | 0,05283 | 0,04851 | 0,07598 | 0,04011 | 0,00000 | 0,01891 | 0,01000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 211 | 0,01693 | 0,00845 | 0,01686 | 0,03690 | 0,08101 | 0,01000 | 0,00694 | 0,01563 | 0,18367 | -1,00000 |
| 221 | 0,03088 | 0,02269 | 0,02804 | 0,00866 | 0,01760 | 0,01581 | 0,01712 | 0,02073 | 0,13132 | 0,74253 |
| 231 | 0,01596 | 0,00401 | 0,00137 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 241 | 0,04183 | 0,02863 | 0,03540 | 0,02095 | 0,00078 | 0,01000 | 0,02778 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 251 | 0,03504 | 0,02319 | 0,01888 | 0,00555 | 0,01115 | 0,01041 | 0,01083 | 0,01430 | 0,06198 | 0,04340 |
| 261 | 0,02935 | 0,01885 | 0,01593 | 0,00479 | 0,01048 | 0,00810 | 0,01417 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 271 | 0,01147 | 0,03402 | 0,04320 | 0,03516 | 0,02266 | 0,02672 | 0,04500 | 0,02116 | 0,05003 | 0,06250 |
| 281 | 0,02477 | 0,01391 | 0,02214 | 0,04117 | 0,44444 | 0,25000 | 0,25000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 291 | 0,02411 | 0,02688 | 0,06688 | 0,02041 | 0,01000 | 0,25000 | 1,00000 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 301 | 0,01783 | 0,00938 | 0,00734 | 0,00205 | 0,00228 | 0,00209 | 0,00152 | 0,00313 | 0,01402 | 0,02706 |
| 311 | 0,01686 | 0,01048 | 0,00759 | 0,00272 | 0,00000 | 0,00028 | 0,06250 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 321 | 0,01812 | 0,02154 | 0,05116 | 0,06531 | 0,21556 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 331 | 0,01605 | 0,01258 | 0,01448 | 0,04657 | 0,05325 | 0,01235 | 0,02041 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 341 | 0,01437 | 0,01148 | 0,01281 | 0,00446 | 0,00438 | 0,00078 | 0,00735 | 0,01235 | 0,11111 | 1,00000 |
| 351 | 0,01463 | 0,01288 | 0,01603 | 0,00549 | 0,00444 | 0,04000 | 0,25000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 361 | 0,01154 | 0,00221 | 0,00280 | 0,00006 | 0,02334 | 0,01778 | 0,21778 | 0,17361 | 0,11111 | 0,02778 |
| 371 | 0,01087 | 0,00983 | 0,01307 | 0,00435 | 0,00246 | 0,03306 | 0,01563 | 0,02778 | 0,00000 | -1,00000 |
| 381 | 0,01724 | 0,01370 | 0,02469 | 0,02334 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 391 | 0,00855 | 0,00901 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00465 | 0,12250 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 401 | 0,00688 | 0,00730 | 0,01088 | 0,00575 | 0,00862 | 0,03315 | 0,01765 | 0,11111 | 0,06250 | 0,00000 |
| 411 | 0,01857 | 0,01535 | 0,02577 | 0,01000 | 0,02939 | 0,11111 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 421 | 0,00351 | 0,00489 | 0,00742 | 0,00353 | 0,00546 | 0,00287 | 0,00366 | 0,01123 | 0,04551 | 0,09450 |
| 431 | 0,00202 | 0,00283 | 0,00423 | 0,00125 | 0,00184 | 0,00032 | 0,00014 | 0,00150 | 0,01148 | 0,02180 |
| 441 | 0,00057 | 0,00092 | 0,00208 | 0,00020 | 0,00029 | 0,00011 | 0,00066 | 0,00009 | 0,00156 | 0,00337 |
| 451 | 0,00003 | 0,00006 | 0,00074 | 0,00003 | 0,00005 | 0,00083 | 0,00243 | 0,00136 | 0,00002 | 0,00033 |
| 461 | 0,01151 | 0,00756 | 0,00172 | 0,00367 | 0,00484 | 0,00000 | 0,01306 | 0,02778 | 0,02778 | 0,25000 |
| 471 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00056 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00049 | 0,00156 | 0,00556 | 0,01563 | 0,00000 |
| 481 | 0,00001 | 0,00004 | 0,00098 | 0,02009 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00000 | 0,56250 | 1,00000 | -1,00000 |
| 491 | 0,00020 | 0,00015 | 0,00009 | 0,00005 | 0,00033 | 0,00122 | 0,00215 | 0,00260 | 0,00009 | 0,00009 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 13

| n | Testreihe 14 | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | k = 1 quadr. Fehler | k = 2 quadr. Fehler | k = 3 quadr. Fehler | k = 4 quadr. Fehler | k = 5 quadr. Fehler | k = 6 quadr. Fehler | k = 7 quadr. Fehler | k = 8 quadr. Fehler | k = 9 quadr. Fehler | k = 10 quadr. Fehler |
| 11 | 0,05040 | 0,05455 | 0,06412 | 0,04522 | 0,05802 | 0,05325 | 0,04516 | 0,05669 | 0,07335 | -1,00000 |
| 21 | 0,02727 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 31 | 0,04003 | 0,04269 | 0,05089 | 0,03218 | 0,04380 | 0,03553 | 0,02621 | 0,02684 | 0,03146 | 0,13223 |
| 41 | 0,00510 | 0,08613 | 0,07716 | 0,08591 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 51 | 0,02270 | 0,02098 | 0,02202 | 0,01361 | 0,01929 | 0,01070 | 0,01331 | 0,00227 | -1,00000 | -1,00000 |
| 61 | 0,02382 | 0,02294 | 0,02552 | 0,01627 | 0,01793 | 0,03632 | 0,02794 | 0,03145 | 0,02778 | -1,00000 |
| 71 | 0,03142 | 0,03245 | 0,03981 | 0,03062 | 0,03704 | 0,06226 | 0,06012 | 0,08535 | 0,16107 | 0,24639 |
| 81 | 0,03539 | 0,03734 | 0,04501 | 0,03460 | 0,04232 | 0,06393 | 0,06076 | 0,08502 | 0,15919 | 0,23508 |
| 91 | 0,02853 | 0,02868 | 0,03475 | 0,00655 | 0,00029 | 0,00444 | 0,01000 | 0,12755 | 0,20661 | 0,11111 |
| 101 | 0,02378 | 0,02261 | 0,03579 | 0,03724 | 0,02420 | 0,02939 | 0,01563 | 0,02367 | 0,06250 | 0,25000 |
| 111 | 0,02014 | 0,01819 | 0,02380 | 0,00531 | 0,00027 | 0,00108 | 0,02332 | 0,14878 | 0,17488 | 0,25000 |
| 121 | 0,02246 | 0,02521 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 131 | 0,01149 | 0,00968 | 0,09263 | 0,12250 | 0,14063 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 141 | 0,01292 | 0,01459 | 0,02815 | 0,03209 | 0,03310 | 0,05648 | 0,06697 | 0,06250 | 0,09467 | 0,11111 |
| 151 | 0,00722 | 0,02195 | 0,01701 | 0,01235 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 161 | 0,01172 | 0,01410 | 0,00446 | 0,00748 | 0,01262 | 0,01119 | 0,00108 | 0,00327 | 0,01563 | 0,00694 |
| 171 | 0,01163 | 0,01206 | 0,02459 | 0,02780 | 0,02737 | 0,04676 | 0,05202 | 0,06250 | 0,08163 | 0,09467 |
| 181 | 0,01014 | 0,01798 | 0,00694 | 0,00965 | 0,01543 | 0,01432 | 0,00000 | 0,00057 | 0,04000 | -1,00000 |
| 191 | 0,00736 | 0,00233 | 0,00036 | 0,14512 | 0,19753 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 201 | 0,01257 | 0,01393 | 0,08651 | 0,09000 | 0,08163 | 0,08163 | 0,25000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 211 | 0,00434 | 0,00714 | 0,01665 | 0,01603 | 0,01452 | 0,01989 | 0,08091 | 0,09860 | 1,00000 | 1,00000 |
| 221 | 0,00974 | 0,01025 | 0,00377 | 0,01235 | 0,01563 | 0,04938 | 0,04000 | 0,06250 | -1,00000 | -1,00000 |
| 231 | 0,00200 | 0,00367 | 0,00339 | 0,00558 | 0,00023 | 0,00174 | 0,00043 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 241 | 0,00220 | 0,00333 | 0,00830 | 0,00399 | 0,00444 | 0,00198 | 0,06250 | 0,25000 | 0,36000 | 0,25000 |
| 251 | 0,00262 | 0,00407 | 0,00836 | 0,00670 | 0,00958 | 0,02558 | 0,00160 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 261 | 0,00372 | 0,00548 | 0,01184 | 0,00824 | 0,01137 | 0,02884 | 0,03690 | 0,01235 | 0,00766 | 0,00184 |
| 271 | 0,00434 | 0,00629 | 0,01344 | 0,01001 | 0,01245 | 0,01011 | 0,11111 | 0,25000 | 0,25000 | 0,25000 |
| 281 | 0,00345 | 0,00594 | 0,00027 | 0,00399 | 0,23508 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 291 | 0,00422 | 0,00723 | 0,01542 | 0,00813 | 0,01007 | 0,03145 | 0,02761 | 0,02608 | 0,01447 | 0,00854 |
| 301 | 0,00581 | 0,00936 | 0,01835 | 0,01161 | 0,01150 | 0,03353 | 0,03628 | 0,03732 | 0,02334 | 0,01563 |
| 311 | 0,00673 | 0,01040 | 0,01924 | 0,01193 | 0,01424 | 0,01284 | 0,06059 | 0,03074 | 0,00694 | 0,00403 |
| 321 | 0,00681 | 0,00011 | 0,00010 | 0,08163 | 0,04000 | 0,06250 | 0,11111 | 0,11111 | 0,25000 | 0,25000 |
| 331 | 0,00578 | 0,00015 | 0,00009 | 0,00536 | 0,00302 | 0,03628 | 0,04938 | 0,07111 | 0,16000 | -1,00000 |
| 341 | 0,00502 | 0,00048 | 0,00001 | 0,00645 | 0,00360 | 0,00023 | 0,00028 | 0,00585 | 0,02778 | 0,04000 |
| 351 | 0,00442 | 0,00036 | 0,00016 | 0,00493 | 0,00239 | 0,02250 | 0,03114 | 0,04592 | 0,11111 | 0,06250 |
| 361 | 0,00402 | 0,00799 | 0,01236 | 0,00664 | 0,00485 | 0,02413 | 0,00452 | 0,04592 | 0,06479 | 0,25000 |
| 371 | 0,00445 | 0,00860 | 0,01324 | 0,01096 | 0,00977 | 0,02487 | 0,00149 | 0,00000 | 0,00391 | 0,00105 |
| 381 | 0,00001 | 0,00086 | 0,00655 | 0,00354 | 0,02778 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 391 | 0,00314 | 0,00770 | 0,01314 | 0,01288 | 0,03190 | 0,01190 | 0,06250 | 0,25000 | 0,25000 | -1,00000 |
| 401 | 0,00437 | 0,00890 | 0,00181 | 0,00331 | 0,00142 | 0,00882 | 0,04274 | 0,04634 | 0,00396 | 0,00032 |
| 411 | 0,00001 | 0,00116 | 0,02991 | 0,09467 | 0,04000 | 0,06250 | 0,16000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 421 | 0,00003 | 0,00044 | 0,03329 | 0,09467 | 0,04000 | 0,08163 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 431 | 0,00282 | 0,00652 | 0,01045 | 0,00005 | 0,00071 | 0,01433 | 0,00189 | 0,00007 | 0,00020 | 0,04938 |
| 441 | 0,00001 | 0,00071 | 0,00700 | 0,00190 | 0,01745 | 0,33150 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | -1,00000 |
| 451 | 0,00154 | 0,00016 | 0,00035 | 0,00050 | 0,06250 | 0,04000 | 0,02041 | 0,02041 | -1,00000 | -1,00000 |
| 461 | 0,00148 | 0,00300 | 0,00609 | 0,00126 | 0,00174 | 0,00103 | 0,00025 | 0,04401 | 0,05975 | 0,08346 |
| 471 | 0,00196 | 0,00395 | 0,00788 | 0,01376 | 0,01255 | 0,02999 | 0,00415 | 0,01266 | 0,04340 | 0,02041 |
| 481 | 0,00184 | 0,00000 | 0,00007 | 0,00098 | 0,00014 | 0,00025 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -1,00000 |
| 491 | 0,00201 | 0,00253 | 0,00006 | 0,00020 | 0,00048 | 0,02041 | 0,02778 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der relativen Verletzungswahrscheinlichkeit - Testreihe 14

Korrektheitsmessungen zur Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit eines Teildienstes in Abhängigkeit der Länge n des Monitoring-Historie-Ausschnittes:

| n | Testreihe 1 | Testreihe 2 | Testreihe 3 | Testreihe 4 | Testreihe 5 | Testreihe 6 | Testreihe 7 |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Quadr. Fehler |
| 10 | 0,00706 | 0,00000 | 0,00810 | 0,01488 | 0,15366 | 0,00000 | 0,03168 |
| 20 | 0,00116 | 0,01124 | 0,00144 | 0,01538 | 0,03460 | 0,00292 | 0,00608 |
| 30 | 0,00257 | 0,00000 | 0,00020 | 0,00284 | 0,00030 | 0,01166 | 0,00608 |
| 40 | 0,00116 | 0,00109 | 0,00017 | 0,00203 | 0,00017 | 0,00000 | 0,00000 |
| 50 | 0,00068 | 0,00212 | 0,00078 | 0,00002 | 0,00336 | 0,00068 | 0,00020 |
| 60 | 0,00144 | 0,00000 | 0,00037 | 0,00037 | 0,00020 | 0,00051 | 0,00005 |
| 70 | 0,00262 | 0,00093 | 0,00108 | 0,00021 | 0,00370 | 0,00041 | 0,00036 |
| 80 | 0,00176 | 0,00360 | 0,00176 | 0,00065 | 0,01145 | 0,00226 | 0,00068 |
| 90 | 0,00054 | 0,00254 | 0,00226 | 0,00054 | 0,02016 | 0,00342 | 0,00100 |
| 100 | 0,00040 | 0,00212 | 0,00212 | 0,00032 | 0,01488 | 0,00176 | 0,00144 |
| 110 | 0,00037 | 0,00417 | 0,00156 | 0,00018 | 0,00749 | 0,00104 | 0,00046 |
| 120 | 0,00029 | 0,00360 | 0,00054 | 0,00019 | 0,00672 | 0,00168 | 0,00078 |
| 130 | 0,00023 | 0,00272 | 0,00052 | 0,00078 | 0,00442 | 0,00186 | 0,00115 |
| 140 | 0,00001 | 0,00478 | 0,00034 | 0,00124 | 0,00172 | 0,00206 | 0,00138 |
| 150 | 0,00010 | 0,00212 | 0,00028 | 0,00150 | 0,00051 | 0,00401 | 0,00160 |
| 160 | 0,00006 | 0,00053 | 0,00005 | 0,00146 | 0,00183 | 0,00200 | 0,00131 |
| 170 | 0,00000 | 0,00171 | 0,00000 | 0,00159 | 0,00128 | 0,00078 | 0,00044 |
| 180 | 0,00000 | 0,00114 | 0,00011 | 0,00321 | 0,00026 | 0,00065 | 0,00034 |
| 190 | 0,00000 | 0,00016 | 0,00016 | 0,00334 | 0,00064 | 0,00040 | 0,00094 |
| 200 | 0,00000 | 0,00002 | 0,00017 | 0,00281 | 0,00002 | 0,00062 | 0,00078 |
| 210 | 0,00006 | 0,00002 | 0,00018 | 0,00340 | 0,00000 | 0,00040 | 0,00066 |
| 220 | 0,00005 | 0,00003 | 0,00026 | 0,00332 | 0,00077 | 0,00014 | 0,00046 |
| 230 | 0,00017 | 0,00002 | 0,00020 | 0,00402 | 0,00033 | 0,00020 | 0,00038 |
| 240 | 0,00035 | 0,00000 | 0,00106 | 0,00366 | 0,00029 | 0,00000 | 0,00031 |
| 250 | 0,00014 | 0,00058 | 0,00090 | 0,00336 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00040 |
| 260 | 0,00030 | 0,00087 | 0,00066 | 0,00354 | 0,00001 | 0,00002 | 0,00068 |
| 270 | 0,00008 | 0,00047 | 0,00039 | 0,00307 | 0,00001 | 0,00002 | 0,00043 |
| 280 | 0,00008 | 0,00021 | 0,00063 | 0,00327 | 0,00000 | 0,00008 | 0,00062 |
| 290 | 0,00007 | 0,00001 | 0,00092 | 0,00230 | 0,00028 | 0,00017 | 0,00055 |
| 300 | 0,00004 | 0,00011 | 0,00061 | 0,00270 | 0,00003 | 0,00064 | 0,00040 |
| 310 | 0,00012 | 0,00000 | 0,00037 | 0,00314 | 0,00030 | 0,00091 | 0,00048 |
| 320 | 0,00031 | 0,00000 | 0,00037 | 0,00228 | 0,00109 | 0,00107 | 0,00018 |
| 330 | 0,00041 | 0,00002 | 0,00014 | 0,00220 | 0,00147 | 0,00104 | 0,00015 |
| 340 | 0,00051 | 0,00000 | 0,00014 | 0,00186 | 0,00155 | 0,00149 | 0,00002 |
| 350 | 0,00072 | 0,00020 | 0,00022 | 0,00149 | 0,00120 | 0,00092 | 0,00012 |
| 360 | 0,00084 | 0,00083 | 0,00028 | 0,00216 | 0,00069 | 0,00089 | 0,00003 |
| 370 | 0,00069 | 0,00107 | 0,00010 | 0,00199 | 0,00084 | 0,00146 | 0,00005 |
| 380 | 0,00077 | 0,00038 | 0,00005 | 0,00200 | 0,00113 | 0,00143 | 0,00000 |
| 390 | 0,00073 | 0,00011 | 0,00006 | 0,00162 | 0,00028 | 0,00095 | 0,00003 |
| 400 | 0,00040 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00099 | 0,00119 | 0,00044 | 0,00012 |
| 410 | 0,00023 | 0,00002 | 0,00000 | 0,00114 | 0,00219 | 0,00044 | 0,00003 |
| 420 | 0,00007 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00133 | 0,00280 | 0,00027 | 0,00000 |
| 430 | 0,00004 | 0,00000 | 0,00005 | 0,00103 | 0,00294 | 0,00034 | 0,00004 |
| 440 | 0,00014 | 0,00006 | 0,00002 | 0,00134 | 0,00221 | 0,00034 | 0,00015 |
| 450 | 0,00013 | 0,00050 | 0,00002 | 0,00186 | 0,00196 | 0,00034 | 0,00000 |
| 460 | 0,00013 | 0,00059 | 0,00004 | 0,00188 | 0,00140 | 0,00034 | 0,00004 |
| 470 | 0,00002 | 0,00041 | 0,00002 | 0,00140 | 0,00109 | 0,00021 | 0,00000 |
| 480 | 0,00007 | 0,00014 | 0,00000 | 0,00126 | 0,00135 | 0,00011 | 0,00001 |
| 490 | 0,00015 | 0,00040 | 0,00000 | 0,00114 | 0,00118 | 0,00004 | 0,00003 |
| 500 | 0,00014 | 0,00026 | 0,00004 | 0,00102 | 0,00116 | 0,00004 | 0,00014 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit Testreihe 1 - 7

| <i>n</i> | Testreihe 8 | Testreihe 9 | Testreihe 10 | Testreihe 11 | Testreihe 12 | Testreihe 13 | Testreihe 14 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Quadr. Fehler |
| 10 | 0,00640 | 0,01796 | 0,10758 | 0,01254 | 0,00518 | 0,27248 | 0,01300 |
| 20 | 0,00200 | 0,01796 | 0,14746 | 0,00384 | 0,01588 | 0,22090 | 0,02890 |
| 30 | 0,00058 | 0,00325 | 0,17029 | 0,00243 | 0,02210 | 0,15734 | 0,01488 |
| 40 | 0,00040 | 0,00922 | 0,21160 | 0,00017 | 0,03312 | 0,11022 | 0,01588 |
| 50 | 0,00003 | 0,00427 | 0,24010 | 0,00212 | 0,04244 | 0,15054 | 0,01166 |
| 60 | 0,00003 | 0,00233 | 0,22848 | 0,00846 | 0,03610 | 0,14038 | 0,01377 |
| 70 | 0,00005 | 0,00102 | 0,25430 | 0,01552 | 0,04422 | 0,12091 | 0,02016 |
| 80 | 0,00012 | 0,00090 | 0,26471 | 0,01177 | 0,04601 | 0,15406 | 0,02387 |
| 90 | 0,00014 | 0,00048 | 0,23019 | 0,00687 | 0,02177 | 0,15210 | 0,02132 |
| 100 | 0,00005 | 0,00002 | 0,16000 | 0,00212 | 0,01488 | 0,15054 | 0,01850 |
| 110 | 0,00001 | 0,00001 | 0,15913 | 0,00075 | 0,00904 | 0,13369 | 0,01634 |
| 120 | 0,00003 | 0,00105 | 0,11811 | 0,00197 | 0,00485 | 0,15445 | 0,01673 |
| 130 | 0,00003 | 0,00088 | 0,10588 | 0,00245 | 0,00740 | 0,14126 | 0,00919 |
| 140 | 0,00013 | 0,00006 | 0,08745 | 0,00253 | 0,00543 | 0,13458 | 0,01064 |
| 150 | 0,00014 | 0,00023 | 0,06970 | 0,00176 | 0,00257 | 0,12912 | 0,00987 |
| 160 | 0,00000 | 0,00024 | 0,05534 | 0,00300 | 0,00216 | 0,10758 | 0,00922 |
| 170 | 0,00000 | 0,00005 | 0,03764 | 0,00122 | 0,00084 | 0,10898 | 0,00979 |
| 180 | 0,00023 | 0,00003 | 0,03920 | 0,00141 | 0,00013 | 0,10657 | 0,00782 |
| 190 | 0,00116 | 0,00014 | 0,03715 | 0,00016 | 0,00002 | 0,10206 | 0,00654 |
| 200 | 0,00057 | 0,00000 | 0,03686 | 0,00000 | 0,00004 | 0,09610 | 0,00593 |
| 210 | 0,00143 | 0,00001 | 0,03104 | 0,00033 | 0,00000 | 0,08683 | 0,00527 |
| 220 | 0,00066 | 0,00066 | 0,00026 | 0,00332 | 0,00077 | 0,00014 | 0,00046 |
| 230 | 0,00109 | 0,00005 | 0,00020 | 0,00402 | 0,00033 | 0,00020 | 0,00038 |
| 240 | 0,00035 | 0,00000 | 0,00106 | 0,00366 | 0,00029 | 0,00000 | 0,00031 |
| 250 | 0,00090 | 0,00048 | 0,01904 | 0,00144 | 0,00020 | 0,07076 | 0,00130 |
| 260 | 0,00135 | 0,00034 | 0,01969 | 0,00082 | 0,00083 | 0,06327 | 0,00191 |
| 270 | 0,00100 | 0,00013 | 0,02565 | 0,00039 | 0,00066 | 0,05317 | 0,00188 |
| 280 | 0,00106 | 0,00007 | 0,02447 | 0,00022 | 0,00079 | 0,06329 | 0,00127 |
| 290 | 0,00103 | 0,00004 | 0,02397 | 0,00008 | 0,00093 | 0,06600 | 0,00167 |
| 300 | 0,00111 | 0,00005 | 0,02518 | 0,00001 | 0,00075 | 0,05382 | 0,00292 |
| 310 | 0,00168 | 0,00002 | 0,02809 | 0,00000 | 0,00087 | 0,05249 | 0,00347 |
| 320 | 0,00115 | 0,00005 | 0,02552 | 0,00001 | 0,00054 | 0,04452 | 0,00329 |
| 330 | 0,00178 | 0,00005 | 0,02447 | 0,00000 | 0,00069 | 0,05143 | 0,00292 |
| 340 | 0,00134 | 0,00003 | 0,01885 | 0,00001 | 0,00042 | 0,04645 | 0,00269 |
| 350 | 0,00247 | 0,00037 | 0,01705 | 0,00007 | 0,00075 | 0,04604 | 0,00267 |
| 360 | 0,00343 | 0,00020 | 0,01427 | 0,00008 | 0,00017 | 0,03965 | 0,00238 |
| 370 | 0,00357 | 0,00014 | 0,01398 | 0,00022 | 0,00007 | 0,03848 | 0,00285 |
| 380 | 0,00379 | 0,00040 | 0,01280 | 0,00029 | 0,00001 | 0,03335 | 0,00230 |
| 390 | 0,00394 | 0,00003 | 0,01075 | 0,00021 | 0,00005 | 0,03286 | 0,00132 |
| 400 | 0,00384 | 0,00007 | 0,01071 | 0,00026 | 0,00013 | 0,02856 | 0,00203 |
| 410 | 0,00375 | 0,00002 | 0,00892 | 0,00024 | 0,00016 | 0,02403 | 0,00226 |
| 420 | 0,00417 | 0,00003 | 0,00733 | 0,00022 | 0,00021 | 0,01876 | 0,00187 |
| 430 | 0,00355 | 0,00001 | 0,00558 | 0,00004 | 0,00032 | 0,01511 | 0,00168 |
| 440 | 0,00426 | 0,00002 | 0,00528 | 0,00001 | 0,00067 | 0,01068 | 0,00122 |
| 450 | 0,00342 | 0,00005 | 0,00418 | 0,00000 | 0,00036 | 0,00676 | 0,00083 |
| 460 | 0,00466 | 0,00000 | 0,00322 | 0,00001 | 0,00060 | 0,00492 | 0,00085 |
| 470 | 0,00429 | 0,00000 | 0,00349 | 0,00000 | 0,00078 | 0,00410 | 0,00112 |
| 480 | 0,00371 | 0,00000 | 0,00428 | 0,00001 | 0,00074 | 0,00359 | 0,00100 |
| 490 | 0,00296 | 0,00000 | 0,00332 | 0,00004 | 0,00082 | 0,00158 | 0,00101 |
| 500 | 0,00360 | 0,00006 | 0,00250 | 0,00014 | 0,00058 | 0,00090 | 0,00116 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der absoluten Verletzungswahrscheinlichkeit Testreihe 1 - 7

Korrektheitsmessungen zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten für einen bestimmte Anzahl von Dienstgütereletzungen der acht Testprozesse:

| Anzahl von Dienstgütereletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|
| | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,02907 | 0,01000 | 0,00036 | 0,01589 | 0,03000 | 0,00019 | 0,00482 | 0,00000 | 0,00002 |
| 1 | 0,56949 | 0,61000 | 0,00164 | 0,52504 | 0,60000 | 0,00561 | 0,48086 | 0,51000 | 0,00084 |
| 2 | 0,32947 | 0,26000 | 0,00482 | 0,36171 | 0,25000 | 0,01247 | 0,38844 | 0,38000 | 0,00007 |
| 3 | 0,06645 | 0,10000 | 0,00112 | 0,08819 | 0,11000 | 0,00047 | 0,11184 | 0,08000 | 0,00101 |
| 4 | 0,00538 | 0,02000 | 0,00021 | 0,00886 | 0,01000 | 0,00000 | 0,01348 | 0,03000 | 0,00027 |
| 5 | 0,00014 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00030 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00057 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütereletzungen - Prozess1, 100 Prozessaufrufe

| Anzahl von Dienstgütereletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|
| | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,04647 | 0,06000 | 0,00018 | 0,03473 | 0,03000 | 0,00002 | 0,02525 | 0,00000 | 0,00063 |
| 1 | 0,32448 | 0,41000 | 0,00731 | 0,28451 | 0,28000 | 0,00002 | 0,24701 | 0,30000 | 0,00280 |
| 2 | 0,37869 | 0,28000 | 0,00974 | 0,38003 | 0,37000 | 0,00010 | 0,37514 | 0,40000 | 0,00061 |
| 3 | 0,19171 | 0,18000 | 0,00013 | 0,22086 | 0,27000 | 0,00241 | 0,24783 | 0,20000 | 0,00228 |
| 4 | 0,05077 | 0,05000 | 0,00000 | 0,06755 | 0,05000 | 0,00030 | 0,08647 | 0,08000 | 0,00004 |
| 5 | 0,00731 | 0,02000 | 0,00016 | 0,01131 | 0,00000 | 0,00012 | 0,01660 | 0,02000 | 0,00001 |
| 6 | 0,00054 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00098 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00165 | 0,00000 | 0,00000 |
| 7 | 0,00002 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00007 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütereletzungen – Prozess2, 100 Prozessaufrufe

| Anzahl von Dienstgütereletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|
| | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,00744 | 0,01000 | 0,00000 | 0,00486 | 0,00000 | 0,00002 | 0,00295 | 0,00000 | 0,00000 |
| 1 | 0,09641 | 0,08000 | 0,00026 | 0,07705 | 0,05000 | 0,00073 | 0,06035 | 0,04000 | 0,00041 |
| 2 | 0,30367 | 0,32000 | 0,00026 | 0,27445 | 0,31000 | 0,00126 | 0,24465 | 0,22000 | 0,00060 |
| 3 | 0,36774 | 0,44000 | 0,00522 | 0,37335 | 0,35000 | 0,00054 | 0,37363 | 0,40000 | 0,00069 |
| 4 | 0,18395 | 0,14000 | 0,00193 | 0,21316 | 0,22000 | 0,00004 | 0,24165 | 0,28000 | 0,00147 |
| 5 | 0,03758 | 0,01000 | 0,00076 | 0,05166 | 0,07000 | 0,00033 | 0,06808 | 0,05000 | 0,00032 |
| 6 | 0,00312 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00530 | 0,00000 | 0,00002 | 0,00832 | 0,01000 | 0,00000 |
| 7 | 0,00008 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00019 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00036 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütereletzungen – Prozess3, 100 Prozessaufrufe

| Anzahl von Dienstgütere- verletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,04177 | 0,01000 | 0,00100 | 0,03207 | 0,04000 | 0,00006 | 0,02421 | 0,03000 | 0,00003 |
| 1 | 0,24385 | 0,32000 | 0,00579 | 0,21187 | 0,22000 | 0,00006 | 0,18223 | 0,24000 | 0,00333 |
| 2 | 0,36320 | 0,29000 | 0,00535 | 0,35357 | 0,36000 | 0,00004 | 0,33968 | 0,32000 | 0,00038 |
| 3 | 0,24530 | 0,28000 | 0,00120 | 0,26824 | 0,28000 | 0,00013 | 0,28788 | 0,29000 | 0,00000 |
| 4 | 0,08734 | 0,08000 | 0,00005 | 0,10784 | 0,05000 | 0,00334 | 0,12971 | 0,11000 | 0,00038 |
| 5 | 0,01684 | 0,02000 | 0,00001 | 0,02364 | 0,04000 | 0,00026 | 0,03202 | 0,01000 | 0,00048 |
| 6 | 0,00164 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00265 | 0,01000 | 0,00005 | 0,00407 | 0,00000 | 0,00001 |
| 7 | 0,00006 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00012 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00021 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
verletzungen – Prozess4,
100 Prozessaufrufe

| Anzahl von Dienstgütere- verletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,03042 | 0,03000 | 0,00000 | 0,02201 | 0,02000 | 0,00000 | 0,01569 | 0,02000 | 0,00001 |
| 1 | 0,17788 | 0,19000 | 0,00014 | 0,14393 | 0,14000 | 0,00001 | 0,11479 | 0,15000 | 0,00123 |
| 2 | 0,35111 | 0,41000 | 0,00346 | 0,32192 | 0,36000 | 0,00145 | 0,28985 | 0,27000 | 0,00039 |
| 3 | 0,28388 | 0,27000 | 0,00019 | 0,30327 | 0,30000 | 0,00001 | 0,31400 | 0,33000 | 0,00025 |
| 4 | 0,12102 | 0,08000 | 0,00168 | 0,15294 | 0,13000 | 0,00052 | 0,18398 | 0,16000 | 0,00057 |
| 5 | 0,03046 | 0,02000 | 0,00010 | 0,04611 | 0,04000 | 0,00003 | 0,06497 | 0,05000 | 0,00022 |
| 6 | 0,00474 | 0,00000 | 0,00002 | 0,00870 | 0,01000 | 0,00000 | 0,01448 | 0,02000 | 0,00003 |
| 7 | 0,00046 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00104 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00205 | 0,00000 | 0,00000 |
| 8 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00008 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00018 | 0,00000 | 0,00000 |
| 9 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00000 |
| 10 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
verletzungen – Prozess5,
100 Prozessaufrufe

| Anzahl von Dienstgütere- verletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,38610 | 0,38000 | 0,00003 | 0,30904 | 0,27000 | 0,00152 | 0,24611 | 0,36000 | 0,01297 |
| 1 | 0,38916 | 0,37000 | 0,00036 | 0,38821 | 0,35000 | 0,00145 | 0,37308 | 0,37000 | 0,00000 |
| 2 | 0,17242 | 0,19000 | 0,00030 | 0,21587 | 0,28000 | 0,00411 | 0,25138 | 0,20000 | 0,00263 |
| 3 | 0,04420 | 0,06000 | 0,00024 | 0,06997 | 0,08000 | 0,00010 | 0,09914 | 0,07000 | 0,00084 |
| 4 | 0,00726 | 0,00000 | 0,00005 | 0,01464 | 0,01000 | 0,00002 | 0,02534 | 0,00000 | 0,00064 |
| 5 | 0,00080 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00206 | 0,01000 | 0,00006 | 0,00439 | 0,00000 | 0,00001 |
| 6 | 0,00006 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00020 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00052 | 0,00000 | 0,00000 |
| 7 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00004 | 0,00000 | 0,00000 |
| 8 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 9 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 10 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
verletzungen – Prozess6,
100 Prozessaufrufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,25200 | 0,25000 | 0,00000 | 0,22651 | 0,19000 | 0,00133 | 0,20262 | 0,19000 | 0,01261 |
| 1 | 0,55900 | 0,61000 | 0,00260 | 0,55466 | 0,57000 | 0,00023 | 0,54795 | 0,61000 | 0,06204 |
| 2 | 0,17600 | 0,13000 | 0,00211 | 0,20114 | 0,22000 | 0,00035 | 0,22625 | 0,17000 | 0,05624 |
| 3 | 0,01300 | 0,01000 | 0,00000 | 0,01769 | 0,02000 | 0,00000 | 0,02318 | 0,03000 | 0,00681 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess7,
100 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,28800 | 0,26000 | 0,00078 | 0,26083 | 0,30000 | 0,00153 | 0,23530 | 0,26000 | 0,02470 |
| 1 | 0,53600 | 0,54000 | 0,00001 | 0,53470 | 0,49000 | 0,00199 | 0,53091 | 0,57000 | 0,03908 |
| 2 | 0,16400 | 0,18000 | 0,00025 | 0,18810 | 0,18000 | 0,00006 | 0,21229 | 0,15000 | 0,06228 |
| 3 | 0,01200 | 0,02000 | 0,00006 | 0,01637 | 0,03000 | 0,00018 | 0,02150 | 0,02000 | 0,00150 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess8,
100 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,02907 | 0,02300 | 0,00003 | 0,01589 | 0,01200 | 0,00001 | 0,00482 | 0,00600 | 0,00000 |
| 1 | 0,56949 | 0,57600 | 0,00004 | 0,52504 | 0,54500 | 0,00039 | 0,48086 | 0,51000 | 0,00084 |
| 2 | 0,32947 | 0,32900 | 0,00000 | 0,36171 | 0,33700 | 0,00061 | 0,38844 | 0,37000 | 0,00033 |
| 3 | 0,06645 | 0,06500 | 0,00000 | 0,08819 | 0,09600 | 0,00006 | 0,11184 | 0,10600 | 0,00003 |
| 4 | 0,00538 | 0,00700 | 0,00000 | 0,00886 | 0,01000 | 0,00000 | 0,01348 | 0,00800 | 0,00003 |
| 5 | 0,00014 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00030 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00057 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen - Prozess1,
1.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,04647 | 0,04100 | 0,00002 | 0,03473 | 0,04100 | 0,00003 | 0,02525 | 0,02600 | 0,00000 |
| 1 | 0,32448 | 0,34400 | 0,00038 | 0,28451 | 0,26700 | 0,00030 | 0,24701 | 0,25000 | 0,00000 |
| 2 | 0,37869 | 0,37400 | 0,00002 | 0,38003 | 0,39500 | 0,00022 | 0,37514 | 0,38200 | 0,00004 |
| 3 | 0,19171 | 0,17500 | 0,00027 | 0,22086 | 0,21500 | 0,00003 | 0,24783 | 0,23700 | 0,00011 |
| 4 | 0,05077 | 0,05600 | 0,00002 | 0,06755 | 0,06700 | 0,00000 | 0,08647 | 0,08500 | 0,00000 |
| 5 | 0,00731 | 0,01000 | 0,00000 | 0,01131 | 0,01500 | 0,00001 | 0,01660 | 0,01700 | 0,00000 |
| 6 | 0,00054 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00098 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00165 | 0,00300 | 0,00000 |
| 7 | 0,00002 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00007 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess2,
1.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- verletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,00744 | 0,00500 | 0,00000 | 0,00486 | 0,00200 | 0,00000 | 0,00295 | 0,00200 | 0,00000 |
| 1 | 0,09641 | 0,10300 | 0,00004 | 0,07705 | 0,06900 | 0,00006 | 0,06035 | 0,06300 | 0,00000 |
| 2 | 0,30367 | 0,31100 | 0,00005 | 0,27445 | 0,26200 | 0,00015 | 0,24465 | 0,25300 | 0,00006 |
| 3 | 0,36774 | 0,35700 | 0,00011 | 0,37335 | 0,40000 | 0,00071 | 0,37363 | 0,35900 | 0,00021 |
| 4 | 0,18395 | 0,18300 | 0,00000 | 0,21316 | 0,21200 | 0,00000 | 0,24165 | 0,23800 | 0,00001 |
| 5 | 0,03758 | 0,03800 | 0,00000 | 0,05166 | 0,05300 | 0,00000 | 0,06808 | 0,07400 | 0,00003 |
| 6 | 0,00312 | 0,00300 | 0,00000 | 0,00530 | 0,00200 | 0,00001 | 0,00832 | 0,01000 | 0,00000 |
| 7 | 0,00008 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00019 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00036 | 0,00100 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
verletzungen – Prozess3,
1.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- verletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,04177 | 0,03800 | 0,00001 | 0,03207 | 0,02800 | 0,00001 | 0,02421 | 0,02400 | 0,00000 |
| 1 | 0,24385 | 0,24200 | 0,00000 | 0,21187 | 0,25600 | 0,00194 | 0,18223 | 0,18000 | 0,00000 |
| 2 | 0,36320 | 0,35700 | 0,00003 | 0,35357 | 0,34200 | 0,00013 | 0,33968 | 0,33800 | 0,00000 |
| 3 | 0,24530 | 0,24700 | 0,00000 | 0,26824 | 0,25200 | 0,00026 | 0,28788 | 0,29200 | 0,00001 |
| 4 | 0,08734 | 0,09200 | 0,00002 | 0,10784 | 0,09700 | 0,00011 | 0,12971 | 0,13300 | 0,00001 |
| 5 | 0,01684 | 0,02300 | 0,00003 | 0,02364 | 0,02300 | 0,00000 | 0,03202 | 0,03300 | 0,00000 |
| 6 | 0,00164 | 0,00100 | 0,00000 | 0,00265 | 0,00200 | 0,00000 | 0,00407 | 0,00000 | 0,00001 |
| 7 | 0,00006 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00012 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00021 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
verletzungen – Prozess4,
1.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- verletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,03042 | 0,02800 | 0,00000 | 0,02201 | 0,02200 | 0,00000 | 0,01569 | 0,01400 | 0,00000 |
| 1 | 0,17788 | 0,17600 | 0,00000 | 0,14393 | 0,16400 | 0,00040 | 0,11479 | 0,11200 | 0,00000 |
| 2 | 0,35111 | 0,35400 | 0,00000 | 0,32192 | 0,31800 | 0,00001 | 0,28985 | 0,26900 | 0,00043 |
| 3 | 0,28388 | 0,28300 | 0,00000 | 0,30327 | 0,29600 | 0,00005 | 0,31400 | 0,35000 | 0,00129 |
| 4 | 0,12102 | 0,12700 | 0,00003 | 0,15294 | 0,16200 | 0,00008 | 0,18398 | 0,18200 | 0,00000 |
| 5 | 0,03046 | 0,02700 | 0,00001 | 0,04611 | 0,03100 | 0,00022 | 0,06497 | 0,06000 | 0,00002 |
| 6 | 0,00474 | 0,00500 | 0,00000 | 0,00870 | 0,00600 | 0,00000 | 0,01448 | 0,01100 | 0,00001 |
| 7 | 0,00046 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00104 | 0,00100 | 0,00000 | 0,00205 | 0,00200 | 0,00000 |
| 8 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00008 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00018 | 0,00000 | 0,00000 |
| 9 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00000 |
| 10 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
verletzungen – Prozess5,
1.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,38610 | 0,38800 | 0,00000 | 0,30904 | 0,31300 | 0,00001 | 0,24611 | 0,25500 | 0,00007 |
| 1 | 0,38916 | 0,39900 | 0,00009 | 0,38821 | 0,37400 | 0,00020 | 0,37308 | 0,36200 | 0,00012 |
| 2 | 0,17242 | 0,15900 | 0,00018 | 0,21587 | 0,23000 | 0,00019 | 0,25138 | 0,25400 | 0,00000 |
| 3 | 0,04420 | 0,04300 | 0,00000 | 0,06997 | 0,06800 | 0,00000 | 0,09914 | 0,09000 | 0,00008 |
| 4 | 0,00726 | 0,00900 | 0,00000 | 0,01464 | 0,01300 | 0,00000 | 0,02534 | 0,03200 | 0,00004 |
| 5 | 0,00080 | 0,00200 | 0,00000 | 0,00206 | 0,00200 | 0,00000 | 0,00439 | 0,00500 | 0,00000 |
| 6 | 0,00006 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00020 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00052 | 0,00200 | 0,00000 |
| 7 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00004 | 0,00000 | 0,00000 |
| 8 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 9 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 10 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess6,
1.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,25200 | 0,25000 | 0,00000 | 0,22651 | 0,24000 | 0,00018 | 0,20262 | 0,22000 | 0,00030 |
| 1 | 0,55900 | 0,57300 | 0,00019 | 0,55466 | 0,54400 | 0,00011 | 0,54795 | 0,52600 | 0,00048 |
| 2 | 0,17600 | 0,16400 | 0,00014 | 0,20114 | 0,19600 | 0,00002 | 0,22625 | 0,22700 | 0,00000 |
| 3 | 0,01300 | 0,01300 | 0,00000 | 0,01769 | 0,02000 | 0,00000 | 0,02318 | 0,02700 | 0,00001 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess7,
1.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,28800 | 0,30000 | 0,00014 | 0,26083 | 0,26900 | 0,00006 | 0,23530 | 0,24400 | 0,00007 |
| 1 | 0,53600 | 0,54200 | 0,00003 | 0,53470 | 0,51300 | 0,00047 | 0,53091 | 0,52300 | 0,00006 |
| 2 | 0,16400 | 0,16600 | 0,00000 | 0,18810 | 0,19900 | 0,00011 | 0,21229 | 0,20100 | 0,00012 |
| 3 | 0,01200 | 0,01200 | 0,00000 | 0,01637 | 0,01900 | 0,00000 | 0,02150 | 0,03200 | 0,00011 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess8,
1.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,02907 | 0,02660 | 0,00000 | 0,01589 | 0,01500 | 0,00000 | 0,00482 | 0,00620 | 0,00000 |
| 1 | 0,56949 | 0,56900 | 0,00000 | 0,52504 | 0,51610 | 0,00007 | 0,48086 | 0,47240 | 0,00007 |
| 2 | 0,32947 | 0,33220 | 0,00000 | 0,36171 | 0,36710 | 0,00002 | 0,38844 | 0,39510 | 0,00004 |
| 3 | 0,06645 | 0,06660 | 0,00000 | 0,08819 | 0,09110 | 0,00000 | 0,11184 | 0,11100 | 0,00000 |
| 4 | 0,00538 | 0,00500 | 0,00000 | 0,00886 | 0,01060 | 0,00000 | 0,01348 | 0,01500 | 0,00000 |
| 5 | 0,00014 | 0,00060 | 0,00000 | 0,00030 | 0,00010 | 0,00000 | 0,00057 | 0,00030 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen - Prozess1,
10.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,04647 | 0,04800 | 0,00000 | 0,03473 | 0,03550 | 0,00000 | 0,02525 | 0,02450 | 0,00000 |
| 1 | 0,32448 | 0,32630 | 0,00000 | 0,28451 | 0,28050 | 0,00001 | 0,24701 | 0,24580 | 0,00000 |
| 2 | 0,37869 | 0,37350 | 0,00002 | 0,38003 | 0,38470 | 0,00002 | 0,37514 | 0,38070 | 0,00003 |
| 3 | 0,19171 | 0,18940 | 0,00000 | 0,22086 | 0,22080 | 0,00000 | 0,24783 | 0,24560 | 0,00000 |
| 4 | 0,05077 | 0,05520 | 0,00001 | 0,06755 | 0,06430 | 0,00001 | 0,08647 | 0,08660 | 0,00000 |
| 5 | 0,00731 | 0,00700 | 0,00000 | 0,01131 | 0,01320 | 0,00000 | 0,01660 | 0,01530 | 0,00000 |
| 6 | 0,00054 | 0,00060 | 0,00000 | 0,00098 | 0,00100 | 0,00000 | 0,00165 | 0,00150 | 0,00000 |
| 7 | 0,00002 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00007 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess2,
10.000 Prozessaufäufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,00744 | 0,00690 | 0,00000 | 0,00486 | 0,00520 | 0,00000 | 0,00295 | 0,00290 | 0,00000 |
| 1 | 0,09641 | 0,09330 | 0,00000 | 0,07705 | 0,07440 | 0,00000 | 0,06035 | 0,06110 | 0,00000 |
| 2 | 0,30367 | 0,31060 | 0,00004 | 0,27445 | 0,27510 | 0,00000 | 0,24465 | 0,24180 | 0,00000 |
| 3 | 0,36774 | 0,36300 | 0,00002 | 0,37335 | 0,37450 | 0,00000 | 0,37363 | 0,37660 | 0,00000 |
| 4 | 0,18395 | 0,18880 | 0,00002 | 0,21316 | 0,20930 | 0,00001 | 0,24165 | 0,24360 | 0,00000 |
| 5 | 0,03758 | 0,03440 | 0,00001 | 0,05166 | 0,05460 | 0,00000 | 0,06808 | 0,06380 | 0,00001 |
| 6 | 0,00312 | 0,00280 | 0,00000 | 0,00530 | 0,00660 | 0,00000 | 0,00832 | 0,00950 | 0,00000 |
| 7 | 0,00008 | 0,00020 | 0,00000 | 0,00019 | 0,00030 | 0,00000 | 0,00036 | 0,00070 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess3,
10.000 Prozessaufäufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,04177 | 0,04140 | 0,00000 | 0,03207 | 0,03150 | 0,00000 | 0,02421 | 0,02510 | 0,00000 |
| 1 | 0,24385 | 0,25110 | 0,00005 | 0,21187 | 0,21390 | 0,00000 | 0,18223 | 0,18580 | 0,00001 |
| 2 | 0,36320 | 0,35950 | 0,00001 | 0,35357 | 0,35670 | 0,00000 | 0,33968 | 0,33820 | 0,00000 |
| 3 | 0,24530 | 0,24630 | 0,00000 | 0,26824 | 0,27040 | 0,00000 | 0,28788 | 0,28930 | 0,00000 |
| 4 | 0,08734 | 0,08210 | 0,00002 | 0,10784 | 0,10210 | 0,00003 | 0,12971 | 0,12410 | 0,00003 |
| 5 | 0,01684 | 0,01750 | 0,00000 | 0,02364 | 0,02280 | 0,00000 | 0,03202 | 0,03330 | 0,00000 |
| 6 | 0,00164 | 0,00180 | 0,00000 | 0,00265 | 0,00250 | 0,00000 | 0,00407 | 0,00410 | 0,00000 |
| 7 | 0,00006 | 0,00030 | 0,00000 | 0,00012 | 0,00010 | 0,00000 | 0,00021 | 0,00010 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess4,
10.000 Prozessaufäufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,03042 | 0,03110 | 0,00000 | 0,02201 | 0,02060 | 0,00000 | 0,01569 | 0,01510 | 0,00000 |
| 1 | 0,17788 | 0,17110 | 0,00004 | 0,14393 | 0,14540 | 0,00000 | 0,11479 | 0,11960 | 0,00002 |
| 2 | 0,35111 | 0,35090 | 0,00000 | 0,32192 | 0,32200 | 0,00000 | 0,28985 | 0,28710 | 0,00000 |
| 3 | 0,28388 | 0,28710 | 0,00001 | 0,30327 | 0,30270 | 0,00000 | 0,31400 | 0,30880 | 0,00002 |
| 4 | 0,12102 | 0,12610 | 0,00002 | 0,15294 | 0,15390 | 0,00000 | 0,18398 | 0,18920 | 0,00002 |
| 5 | 0,03046 | 0,02870 | 0,00000 | 0,04611 | 0,04520 | 0,00000 | 0,06497 | 0,06400 | 0,00000 |
| 6 | 0,00474 | 0,00470 | 0,00000 | 0,00870 | 0,00820 | 0,00000 | 0,01448 | 0,01370 | 0,00000 |
| 7 | 0,00046 | 0,00030 | 0,00000 | 0,00104 | 0,00160 | 0,00000 | 0,00205 | 0,00210 | 0,00000 |
| 8 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00008 | 0,00030 | 0,00000 | 0,00018 | 0,00030 | 0,00000 |
| 9 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00010 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00010 | 0,00000 |
| 10 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess5,
10.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,38610 | 0,38240 | 0,00001 | 0,30904 | 0,30610 | 0,00000 | 0,24611 | 0,24480 | 0,00000 |
| 1 | 0,38916 | 0,38850 | 0,00000 | 0,38821 | 0,38920 | 0,00000 | 0,37308 | 0,37490 | 0,00000 |
| 2 | 0,17242 | 0,17720 | 0,00002 | 0,21587 | 0,21640 | 0,00000 | 0,25138 | 0,25370 | 0,00000 |
| 3 | 0,04420 | 0,04420 | 0,00000 | 0,06997 | 0,06890 | 0,00000 | 0,09914 | 0,09440 | 0,00002 |
| 4 | 0,00726 | 0,00670 | 0,00000 | 0,01464 | 0,01700 | 0,00000 | 0,02534 | 0,02620 | 0,00000 |
| 5 | 0,00080 | 0,00100 | 0,00000 | 0,00206 | 0,00200 | 0,00000 | 0,00439 | 0,00540 | 0,00000 |
| 6 | 0,00006 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00020 | 0,00040 | 0,00000 | 0,00052 | 0,00060 | 0,00000 |
| 7 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00004 | 0,00000 | 0,00000 |
| 8 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 9 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 10 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess6,
10.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,25200 | 0,25970 | 0,00005 | 0,22651 | 0,22790 | 0,00000 | 0,20262 | 0,20170 | 0,00000 |
| 1 | 0,55900 | 0,56090 | 0,00000 | 0,55466 | 0,55550 | 0,00000 | 0,54795 | 0,54660 | 0,00000 |
| 2 | 0,17600 | 0,17030 | 0,00003 | 0,20114 | 0,20280 | 0,00000 | 0,22625 | 0,22310 | 0,00000 |
| 3 | 0,01300 | 0,00910 | 0,00001 | 0,01769 | 0,01380 | 0,00001 | 0,02318 | 0,02860 | 0,00002 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess7,
10.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,28800 | 0,28540 | 0,00000 | 0,26083 | 0,26950 | 0,00007 | 0,23530 | 0,23950 | 0,00001 |
| 1 | 0,53600 | 0,53680 | 0,00000 | 0,53470 | 0,53980 | 0,00002 | 0,53091 | 0,53780 | 0,00004 |
| 2 | 0,16400 | 0,16820 | 0,00001 | 0,18810 | 0,17630 | 0,00013 | 0,21229 | 0,20450 | 0,00006 |
| 3 | 0,01200 | 0,00960 | 0,00000 | 0,01637 | 0,01440 | 0,00000 | 0,02150 | 0,01820 | 0,00001 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess8,
10.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,02907 | 0,02795 | 0,00000 | 0,01589 | 0,01590 | 0,00000 | 0,00482 | 0,00503 | 0,00000 |
| 1 | 0,56949 | 0,57058 | 0,00000 | 0,52504 | 0,52084 | 0,00001 | 0,48086 | 0,47955 | 0,00000 |
| 2 | 0,32947 | 0,33123 | 0,00000 | 0,36171 | 0,36402 | 0,00000 | 0,38844 | 0,38824 | 0,00000 |
| 3 | 0,06645 | 0,06456 | 0,00000 | 0,08819 | 0,08988 | 0,00000 | 0,11184 | 0,11316 | 0,00000 |
| 4 | 0,00538 | 0,00553 | 0,00000 | 0,00886 | 0,00902 | 0,00000 | 0,01348 | 0,01349 | 0,00000 |
| 5 | 0,00014 | 0,00015 | 0,00000 | 0,00030 | 0,00034 | 0,00000 | 0,00057 | 0,00053 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen - Prozess1,
100.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,04647 | 0,04703 | 0,00000 | 0,03473 | 0,03532 | 0,00000 | 0,02525 | 0,02540 | 0,00000 |
| 1 | 0,32448 | 0,32342 | 0,00000 | 0,28451 | 0,28392 | 0,00000 | 0,24701 | 0,24613 | 0,00000 |
| 2 | 0,37869 | 0,37986 | 0,00000 | 0,38003 | 0,37958 | 0,00000 | 0,37514 | 0,37375 | 0,00000 |
| 3 | 0,19171 | 0,19111 | 0,00000 | 0,22086 | 0,22094 | 0,00000 | 0,24783 | 0,25027 | 0,00000 |
| 4 | 0,05077 | 0,05068 | 0,00000 | 0,06755 | 0,06773 | 0,00000 | 0,08647 | 0,08677 | 0,00000 |
| 5 | 0,00731 | 0,00730 | 0,00000 | 0,01131 | 0,01152 | 0,00000 | 0,01660 | 0,01594 | 0,00000 |
| 6 | 0,00054 | 0,00056 | 0,00000 | 0,00098 | 0,00094 | 0,00000 | 0,00165 | 0,00167 | 0,00000 |
| 7 | 0,00002 | 0,00004 | 0,00000 | 0,00003 | 0,00005 | 0,00000 | 0,00007 | 0,00007 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess2,
100.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,00744 | 0,00767 | 0,00000 | 0,00486 | 0,00494 | 0,00000 | 0,00295 | 0,00302 | 0,00000 |
| 1 | 0,09641 | 0,09739 | 0,00000 | 0,07705 | 0,07738 | 0,00000 | 0,06035 | 0,06021 | 0,00000 |
| 2 | 0,30367 | 0,30374 | 0,00000 | 0,27445 | 0,27346 | 0,00000 | 0,24465 | 0,24506 | 0,00000 |
| 3 | 0,36774 | 0,36588 | 0,00000 | 0,37335 | 0,37373 | 0,00000 | 0,37363 | 0,37191 | 0,00000 |
| 4 | 0,18395 | 0,18411 | 0,00000 | 0,21316 | 0,21372 | 0,00000 | 0,24165 | 0,24167 | 0,00000 |
| 5 | 0,03758 | 0,03810 | 0,00000 | 0,05166 | 0,05118 | 0,00000 | 0,06808 | 0,06948 | 0,00000 |
| 6 | 0,00312 | 0,00304 | 0,00000 | 0,00530 | 0,00541 | 0,00000 | 0,00832 | 0,00819 | 0,00000 |
| 7 | 0,00008 | 0,00007 | 0,00000 | 0,00019 | 0,00018 | 0,00000 | 0,00036 | 0,00046 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess3,
100.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- letzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berech- net) | Wahrsch. (gemes- sen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,04177 | 0,04164 | 0,00000 | 0,03207 | 0,03108 | 0,00000 | 0,02421 | 0,02433 | 0,00000 |
| 1 | 0,24385 | 0,24387 | 0,00000 | 0,21187 | 0,21121 | 0,00000 | 0,18223 | 0,18314 | 0,00000 |
| 2 | 0,36320 | 0,36193 | 0,00000 | 0,35357 | 0,35295 | 0,00000 | 0,33968 | 0,33754 | 0,00000 |
| 3 | 0,24530 | 0,24677 | 0,00000 | 0,26824 | 0,27074 | 0,00000 | 0,28788 | 0,28747 | 0,00000 |
| 4 | 0,08734 | 0,08747 | 0,00000 | 0,10784 | 0,10776 | 0,00000 | 0,12971 | 0,13103 | 0,00000 |
| 5 | 0,01684 | 0,01683 | 0,00000 | 0,02364 | 0,02342 | 0,00000 | 0,03202 | 0,03248 | 0,00000 |
| 6 | 0,00164 | 0,00143 | 0,00000 | 0,00265 | 0,00272 | 0,00000 | 0,00407 | 0,00383 | 0,00000 |
| 7 | 0,00006 | 0,00006 | 0,00000 | 0,00012 | 0,00012 | 0,00000 | 0,00021 | 0,00018 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
letzungen – Prozess4,
100.000 Prozessaufufe

| Anzahl von Dienstgütere- verletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|--|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|
| | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,03042 | 0,02978 | 0,00000 | 0,02201 | 0,02191 | 0,00000 | 0,01569 | 0,01620 | 0,00000 |
| 1 | 0,17788 | 0,17892 | 0,00000 | 0,14393 | 0,14330 | 0,00000 | 0,11479 | 0,11401 | 0,00000 |
| 2 | 0,35111 | 0,34977 | 0,00000 | 0,32192 | 0,32176 | 0,00000 | 0,28985 | 0,29227 | 0,00000 |
| 3 | 0,28388 | 0,28354 | 0,00000 | 0,30327 | 0,30287 | 0,00000 | 0,31400 | 0,31291 | 0,00000 |
| 4 | 0,12102 | 0,12225 | 0,00000 | 0,15294 | 0,15332 | 0,00000 | 0,18398 | 0,18366 | 0,00000 |
| 5 | 0,03046 | 0,03048 | 0,00000 | 0,04611 | 0,04698 | 0,00000 | 0,06497 | 0,06437 | 0,00000 |
| 6 | 0,00474 | 0,00480 | 0,00000 | 0,00870 | 0,00868 | 0,00000 | 0,01448 | 0,01405 | 0,00000 |
| 7 | 0,00046 | 0,00042 | 0,00000 | 0,00104 | 0,00111 | 0,00000 | 0,00205 | 0,00230 | 0,00000 |
| 8 | 0,00003 | 0,00004 | 0,00000 | 0,00008 | 0,00006 | 0,00000 | 0,00018 | 0,00022 | 0,00000 |
| 9 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00000 |
| 10 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
verletzungen – Prozess5,
100.000 Prozessaufrufe

| Anzahl von Dienstgütere- verletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|--|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|
| | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,38610 | 0,38551 | 0,00000 | 0,30904 | 0,30917 | 0,00000 | 0,24611 | 0,24524 | 0,00000 |
| 1 | 0,38916 | 0,39169 | 0,00000 | 0,38821 | 0,38936 | 0,00000 | 0,37308 | 0,37482 | 0,00000 |
| 2 | 0,17242 | 0,17111 | 0,00000 | 0,21587 | 0,21458 | 0,00000 | 0,25138 | 0,25133 | 0,00000 |
| 3 | 0,04420 | 0,04332 | 0,00000 | 0,06997 | 0,06967 | 0,00000 | 0,09914 | 0,09825 | 0,00000 |
| 4 | 0,00726 | 0,00748 | 0,00000 | 0,01464 | 0,01508 | 0,00000 | 0,02534 | 0,02495 | 0,00000 |
| 5 | 0,00080 | 0,00081 | 0,00000 | 0,00206 | 0,00197 | 0,00000 | 0,00439 | 0,00469 | 0,00000 |
| 6 | 0,00006 | 0,00007 | 0,00000 | 0,00020 | 0,00015 | 0,00000 | 0,00052 | 0,00071 | 0,00000 |
| 7 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00001 | 0,00002 | 0,00000 | 0,00004 | 0,00001 | 0,00000 |
| 8 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 9 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 10 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
verletzungen – Prozess6,
100.000 Prozessaufrufe

| Anzahl von Dienstgütere- verletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|--|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|
| | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,25200 | 0,25911 | 0,00005 | 0,22651 | 0,22672 | 0,00000 | 0,20262 | 0,20593 | 0,00001 |
| 1 | 0,55900 | 0,55334 | 0,00003 | 0,55466 | 0,55417 | 0,00000 | 0,54795 | 0,54467 | 0,00001 |
| 2 | 0,17600 | 0,17809 | 0,00000 | 0,20114 | 0,20342 | 0,00000 | 0,22625 | 0,22692 | 0,00000 |
| 3 | 0,01300 | 0,00946 | 0,00001 | 0,01769 | 0,01569 | 0,00000 | 0,02318 | 0,02248 | 0,00000 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
verletzungen – Prozess7,
100.000 Prozessaufrufe

| Anzahl von Dienstgütere- verletzungen | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|--|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|
| | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler | Wahrsch. (berechnet) | Wahrsch. (gemessen) | quadr. Fehler |
| 0 | 0,28800 | 0,28812 | 0,00000 | 0,26083 | 0,26729 | 0,00004 | 0,23530 | 0,23125 | 0,00001 |
| 1 | 0,53600 | 0,53704 | 0,00000 | 0,53470 | 0,53722 | 0,00000 | 0,53091 | 0,53446 | 0,00001 |
| 2 | 0,16400 | 0,16323 | 0,00000 | 0,18810 | 0,18313 | 0,00002 | 0,21229 | 0,21736 | 0,00002 |
| 3 | 0,01200 | 0,01161 | 0,00000 | 0,01637 | 0,01236 | 0,00001 | 0,02150 | 0,01693 | 0,00002 |

quadratischer Fehler bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für k Dienstgütere-
verletzungen – Prozess8,
100.000 Prozessaufrufe

Korrektheitsmessungen zur Berechnung der dienstgütespezifischen Verletzungszahl der acht BPEL Prozesse:

| Prozess | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|----------|--------------------|-------------------|---------------|--------------------|-------------------|---------------|--------------------|-------------------|---------------|
| | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler |
| Prozess1 | 1,45 | 1,5100 | 0,00360 | 1,55 | 1,4700 | 0,00640 | 1,65 | 1,6300 | 0,00040 |
| Prozess2 | 1,90 | 1,8100 | 0,00810 | 2,04 | 2,0300 | 0,00010 | 2,18 | 2,1000 | 0,00640 |
| Prozess3 | 2,75 | 2,6500 | 0,01000 | 2,89 | 2,9500 | 0,00360 | 3,03 | 3,1100 | 0,00640 |
| Prozess4 | 2,15 | 2,1600 | 0,00010 | 2,29 | 2,2400 | 0,00250 | 2,43 | 2,2400 | 0,03610 |
| Prozess5 | 2,40 | 2,2400 | 0,02560 | 2,60 | 2,5400 | 0,00360 | 2,80 | 2,6900 | 0,01210 |
| Prozess6 | 0,90 | 0,9300 | 0,00090 | 1,10 | 1,2400 | 0,01960 | 1,30 | 0,9800 | 0,10240 |
| Prozess7 | 0,95 | 0,9000 | 0,00250 | 1,10 | 1,0700 | 0,00090 | 1,07 | 1,0400 | 0,00090 |
| Prozess8 | 0,90 | 0,9600 | 0,00360 | 0,96 | 0,9400 | 0,00040 | 1,02 | 1,0210 | 0,00000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der Verletzungszahl aller acht Prozesse für die Versuchsreihe mit 100 Prozessaufrufen

| Prozess | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|----------|--------------------|-------------------|---------------|--------------------|-------------------|---------------|--------------------|-------------------|---------------|
| | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler |
| Prozess1 | 1,45 | 1,4500 | 0,00000 | 1,55 | 1,5400 | 0,00010 | 1,65 | 1,6000 | 0,00250 |
| Prozess2 | 1,90 | 1,8900 | 0,00010 | 2,04 | 2,0450 | 0,00002 | 2,18 | 2,1680 | 0,00014 |
| Prozess3 | 2,75 | 2,7360 | 0,00020 | 2,89 | 2,9180 | 0,00078 | 3,03 | 3,0350 | 0,00003 |
| Prozess4 | 2,15 | 2,1860 | 0,00130 | 2,29 | 2,1100 | 0,03240 | 2,43 | 2,4290 | 0,00000 |
| Prozess5 | 2,40 | 2,4060 | 0,00004 | 2,60 | 2,5340 | 0,00436 | 2,80 | 2,8080 | 0,00006 |
| Prozess6 | 0,90 | 0,8920 | 0,00006 | 1,10 | 1,1000 | 0,00000 | 1,30 | 1,3050 | 0,00002 |
| Prozess7 | 0,95 | 0,9400 | 0,00010 | 1,01 | 0,9960 | 0,00020 | 1,07 | 1,0610 | 0,00008 |
| Prozess8 | 0,90 | 0,9100 | 0,00010 | 0,96 | 0,9680 | 0,00006 | 1,02 | 1,0210 | 0,00000 |

Quadratischer Fehler bei der Berechnung der Verletzungszahl aller acht Prozesse für die Versuchsreihe mit 1.000 Prozessaufrufen

| Prozess | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|----------|--------------------|-------------------|---------------|--------------------|-------------------|---------------|--------------------|-------------------|---------------|
| | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler |
| Prozess1 | 1,45 | 1,4562 | 0,00004 | 1,55 | 1,5665 | 0,00027 | 1,65 | 1,6571 | 0,00005 |
| Prozess2 | 1,90 | 1,9009 | 0,00000 | 2,04 | 2,0415 | 0,00000 | 2,18 | 2,1759 | 0,00002 |
| Prozess3 | 2,75 | 2,7489 | 0,00000 | 2,89 | 2,9000 | 0,00010 | 3,03 | 3,0298 | 0,00000 |
| Prozess4 | 2,15 | 2,1378 | 0,00015 | 2,29 | 2,2766 | 0,00018 | 2,43 | 2,4183 | 0,00014 |
| Prozess5 | 2,40 | 2,4125 | 0,00016 | 2,60 | 2,6028 | 0,00001 | 2,80 | 2,7972 | 0,00001 |
| Prozess6 | 0,90 | 0,9077 | 0,00006 | 1,10 | 1,1091 | 0,00008 | 1,30 | 1,3009 | 0,00000 |
| Prozess7 | 0,95 | 0,9288 | 0,00045 | 1,01 | 1,0025 | 0,00006 | 1,07 | 1,0786 | 0,00007 |
| Prozess8 | 0,90 | 0,9020 | 0,00000 | 0,96 | 0,9656 | 0,00003 | 1,02 | 1,0014 | 0,00035 |

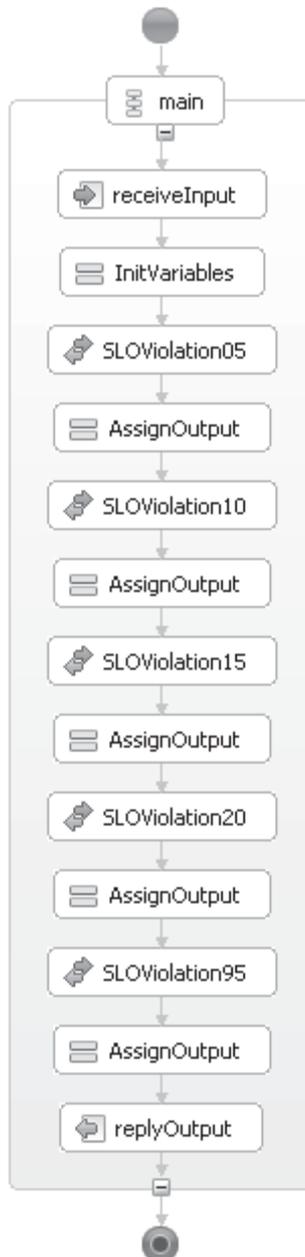
Quadratischer Fehler bei der Berechnung der Verletzungszahl aller acht Prozesse für die Versuchsreihe mit 10.000 Prozessaufrufen

| Prozess | SLO1 | | | SLO2 | | | SLO3 | | |
|----------|--------------------|-------------------|---------------|--------------------|-------------------|---------------|--------------------|-------------------|---------------|
| | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler | Verletz. (berech.) | Verletz. (gemes.) | quadr. Fehler |
| Prozess1 | 1,45 | 1,4496 | 0,00000 | 1,55 | 1,5563 | 0,00004 | 1,65 | 1,6521 | 0,00000 |
| Prozess2 | 1,90 | 1,8993 | 0,00000 | 2,04 | 2,0404 | 0,00000 | 2,18 | 2,1817 | 0,00000 |
| Prozess3 | 2,75 | 2,7482 | 0,00000 | 2,89 | 2,8900 | 0,00000 | 3,03 | 3,0325 | 0,00001 |
| Prozess4 | 2,15 | 2,1511 | 0,00000 | 2,29 | 2,2946 | 0,00002 | 2,43 | 2,4314 | 0,00000 |
| Prozess5 | 2,40 | 2,4053 | 0,00003 | 2,60 | 2,6040 | 0,00002 | 2,80 | 2,7690 | 0,00096 |
| Prozess6 | 0,90 | 0,8983 | 0,00000 | 1,10 | 1,0987 | 0,00000 | 1,30 | 1,2998 | 0,00000 |
| Prozess7 | 0,95 | 0,9379 | 0,00015 | 1,01 | 1,0081 | 0,00000 | 1,07 | 1,0660 | 0,00002 |
| Prozess8 | 0,90 | 0,8983 | 0,00000 | 0,96 | 0,9406 | 0,00038 | 1,02 | 1,0200 | 0,00000 |

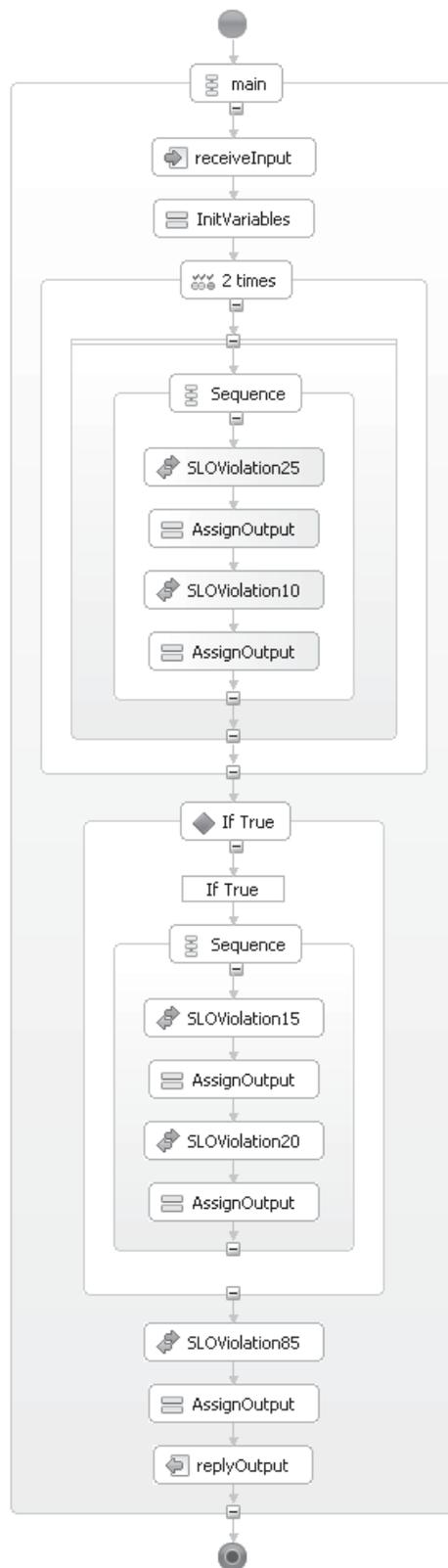
Quadratischer Fehler bei der Berechnung der Verletzungszahl aller acht Prozesse für die Versuchsreihe mit 100.000 Prozessaufrufen

ANHANG E

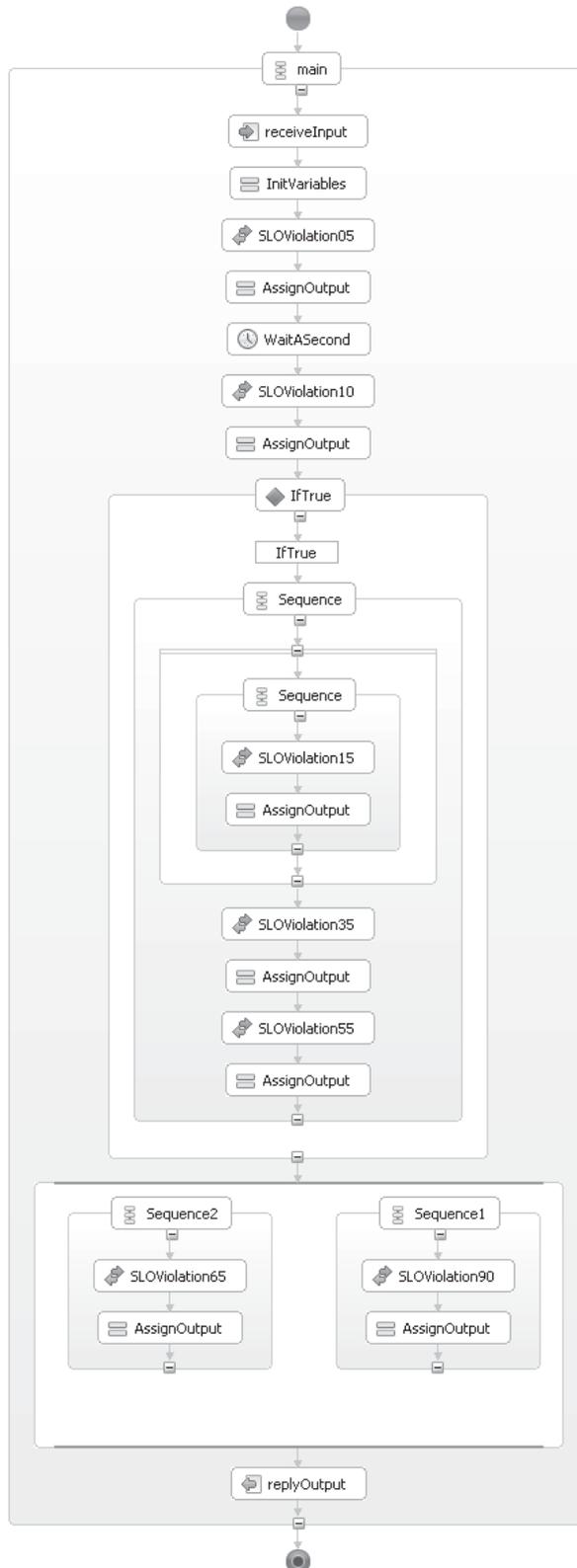
BPEL Prozesse als Basis der Korrektheitsuntersuchungen zur Berechnung des Zweitupels $eVE_A = (a_A, p_A)$. Die Prozesse wurden mit dem Eclipse BPEL Designer (<http://eclipse.org/bpel/>) erstellt. Der Name der Invoke-Aktivitäten bestimmt jeweils die Verletzungswahrscheinlichkeit des aufgerufenen Teildienstes.



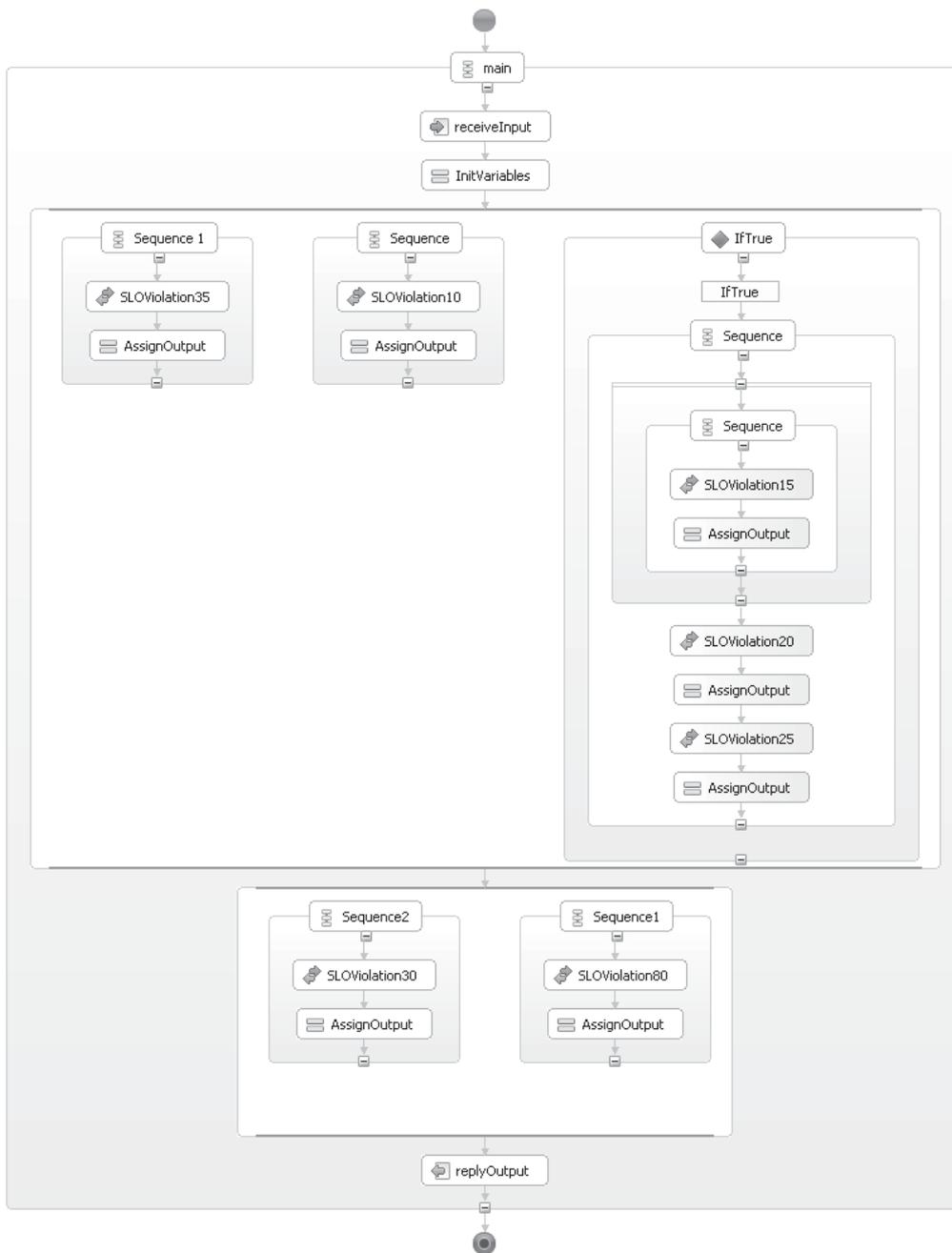
BPEL-Prozess 1 mit insgesamt fünf Teildienstaufrufen



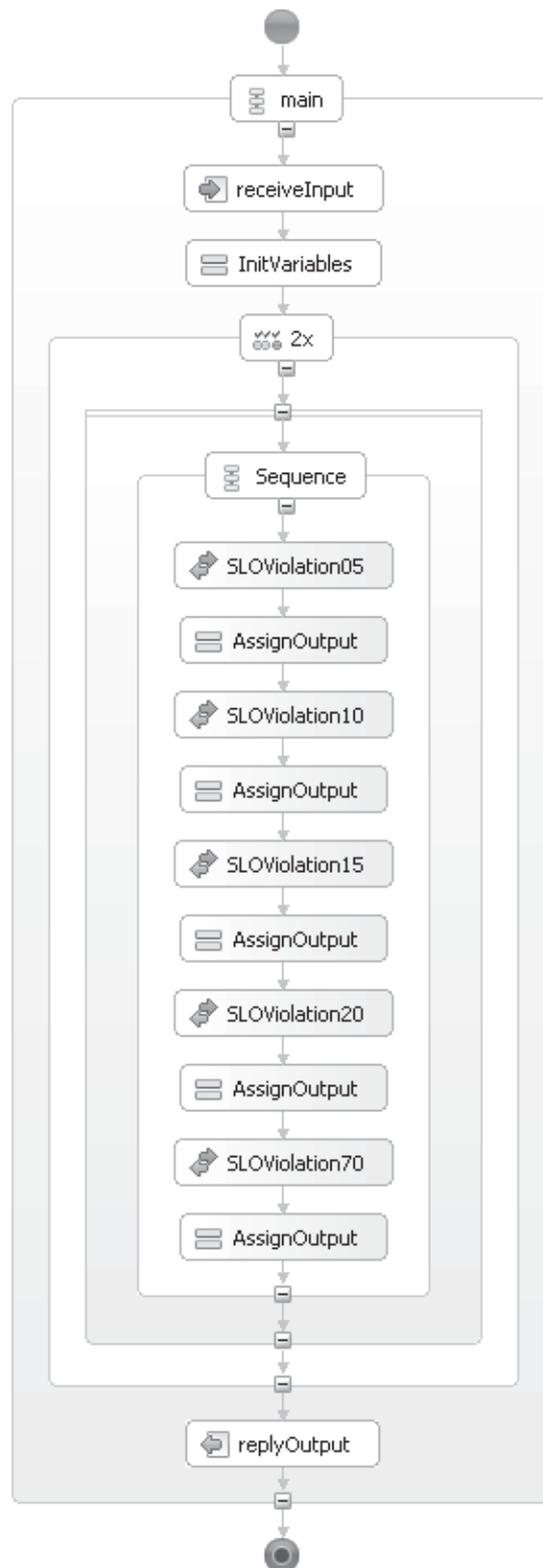
BPEL-Prozess 2 mit insgesamt sieben Teildienstaufrufen



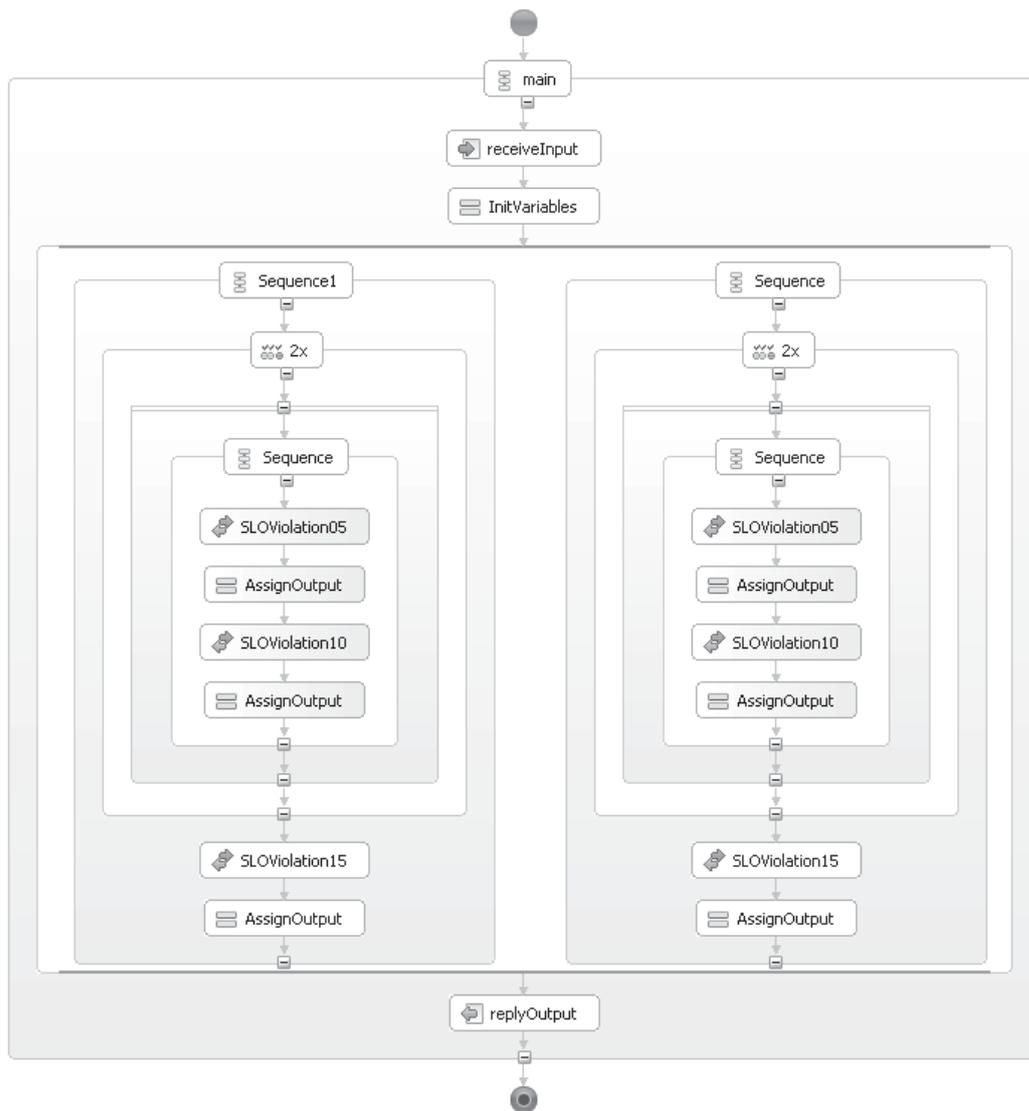
BPEL-Prozess 3 mit insgesamt sieben Teildienstaufrufen



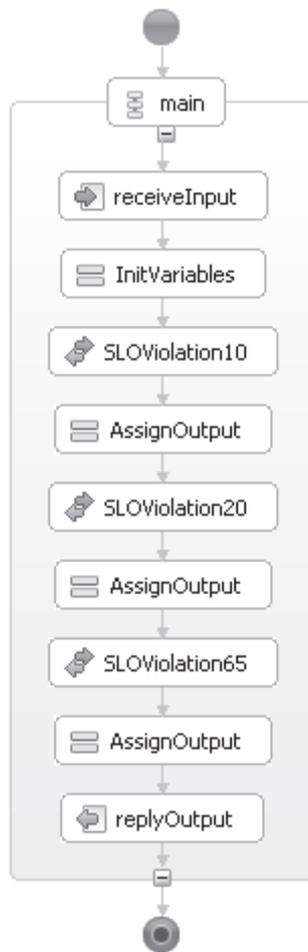
BPEL-Prozess 4 mit insgesamt sieben Teildienstaufrufen



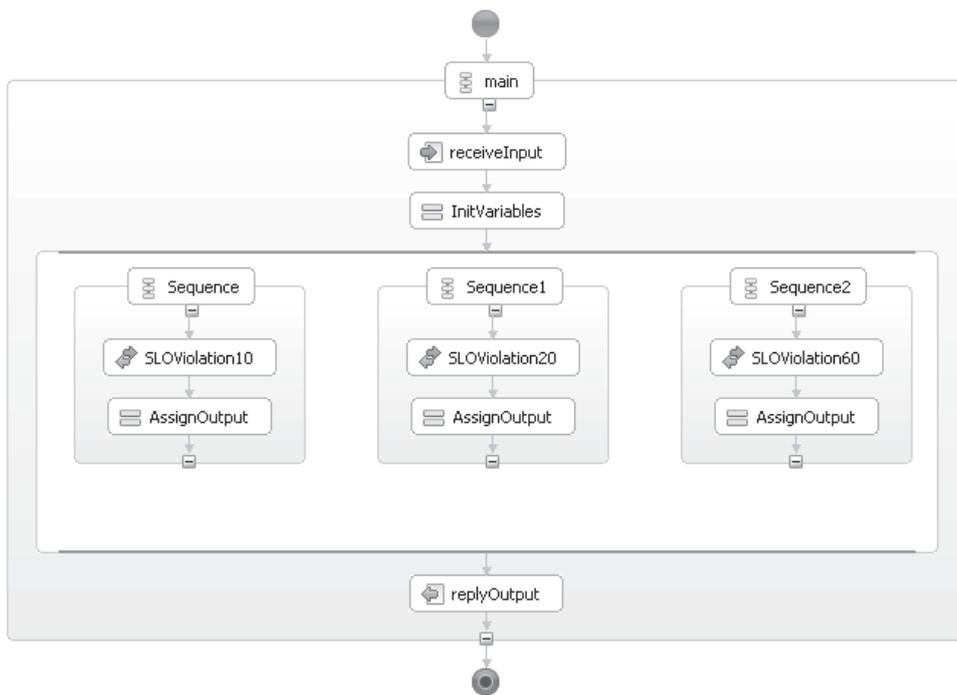
BPEL-Prozess 5 mit insgesamt 10 Teildienstaufrufen



BPEL-Prozess 6 mit insgesamt 10 Teildienstaufrufen



BPEL-Prozess 7 mit insgesamt drei Teildienstaufrufen



BPEL-Prozess 8 mit insgesamt drei Teildienstaufrufen