

# **Ein neues Verfahren zur Detektion von Cyber-Angriffen auf zukünftige Energiesysteme unter Nutzung physikalischer Modellansätze**

Zur Erlangung des akademischen Grades einer  
**Doktorin der Ingenieurwissenschaften**

von der KIT-Fakultät für Informatik  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

**Dissertation**

von

**Kathrin Bernadette Reibelt**

---

---

Tag der mündlichen Prüfung:

18. Juli 2025

1. Referent:

Prof. Dr. Veit Hagenmeyer

2. Referent:

Prof. Dr.-Ing. Tobias Kleinert





# Veröffentlichungen

REIBELT, K.; KELLER, H. B.; HAGENMEYER, V.; MATTHES, J.: Dynamic Model Based Detection of Cyberattacks in Industrial Facilities. In: *31st European Symposium on Computer Aided Process Engineering: ESCAPE-31. Ed.: M. Türkay*, Bd. 50 von *Computer aided chemical engineering*, S. 1339–1344, Elsevier, 37.12.01; LK 01, 2021

REIBELT, K.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.; HAGENMEYER, V.: Identification and Localization of Cyber-Attacks in Industrial Facilities. In: *ESCAPE 30, 30th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Milan, Italy, 30 August 2020 – 2 September 2020. Ed.: S. Pierucci*, Bd. 47 von *Computer-Aided Chemical Engineering*, S. 1747 – 1752, Elsevier, 34.14.02; LK 01, 2020

REIBELT, K.; ELBEZ, G.; SCHERER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.; HAGENMEYER, V.: Modellbasiertes IT-Sicherheitssystem für vernetzte Komponenten zukünftiger Energiesysteme. Vortrag gehalten auf 83. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (SAMOP), Arbeitskreis Energie (2019), Rostock, Deutschland, 10.–15. März 2019, 37.98.11; LK 01, 2019

REIBELT, K.; ELBEZ, G.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.; HAGENMEYER, V.: IT-security of cyber-physical systems for the future interacting energy system. Poster präsentiert auf 7. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie (2018), Karlsruhe, Deutschland, 26. Juni 2018, 37.98.11; LK 01, 2018

REIBELT, K.; EL BEZ, G.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.: IT-Sicherheit für die vernetzten cyber-physikalischen Komponenten zukünftiger Energiesysteme. Vortrag gehalten auf 82. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen, Fachverband Quantenoptik und Photonik (SAMOP 2018), Erlangen, Deutschland, 4.–9. März 2018, 37.98.11; LK 01, 2018

REIBELT, K.; EL BEZ, G.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.: Preliminary Approaches for improving the Smart Grid Cyber Security. In: *Ideen und Innovationen für die Energie von morgen : Wissenschaftliche Beiträge des KIT zu den Jahrestagungen 2014, 2016 und 2017 des KIT-Zentrums Energie. Hrsg.: W. Breh*, Bd. 7747 von *KIT Scientific Reports*, S. 115–122, KIT Scientific Publishing, 37.98.11; LK 01, 2018

REIBELT, K.; EL-BEZ, G.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H.: Preliminary approaches to improve the smart Grid cyber security. Poster präsentiert auf 6. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie, 2. Juni 2017, 34.15.01; LK 01, 2017

ELBEZ, G.; REIBELT, K.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.; HAGENMEYER, V.: Analysis of cyber-physical attacks against the future energy system. Poster präsentiert auf 7. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie (2018), Karlsruhe, Deutschland, 26. Juni 2018, 34.15.01; LK 01, 2018

# Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Automation und Angewandte Informatik des Karlsruher Instituts für Technologie. Dabei habe ich viel Unterstützung erfahren, die ich an dieser Stelle würdigen möchte, und für die ich mich sehr herzlich bedanke:

Bei Herrn Prof. Hagenmeyer dafür, dass er mir ermöglichte, die Arbeit an seinem Institut anzufertigen. Er schlug das Thema vor und gab mir wichtige Hinweise während der Einarbeitung und Entstehung der Arbeit.

Bei Herrn Prof. Kleinert für die Übernahme des Koreferats und seine hilfreichen Anregungen in unserem Gespräch zum Thema.

Bei apl. Prof. Dr. Jörg Matthes für seine umfassende fachliche Betreuung während der Anfertigung der Arbeit. Die zahlreichen Ratschläge und fachlichen Diskussionen waren enorm hilfreich, ebenso wie seine ansteckende Begeisterung für Herausforderungen und die über fachliche Fragen hinausgehenden interessanten Gespräche.

Bei Dr. Hubert B. Keller, der mich als Doktorandin in seine Arbeitsgruppe aufnahm, mich stets ermutigte und uns allen sehr interessante Einblicke in politische Aspekte der Wissenschaft bot.

Bei Bernadette Lehmann, die mich umfassend bei der Organisation meiner Dissertation unterstützte und mir in jeder Situation mit großer Herzlichkeit begegnete.

Bei Dr. Patrick Waibel dafür, dass er mir wichtige Hinweise und Hilfestellungen für das Anfertigen der Schriftfassung der Arbeit gab.

Bei Dr. Oliver Scherer und Dr. Simon Waczowicz, die mich mit ihrer freundlichen Art in das Cyber-Security-Projekt KASTEL und das Energy-Lab einführten.

Bei Dr. Markus Vogelbacher dafür, dass er mir die Regeln und Gepflogenheiten des Instituts näher brachte, mich herzlich in der Gruppe und seinem Büro aufnahm und mich auf vielfältige Weise während der Promotion unterstützte. Danke für die schöne gemeinsame Bürozeit!

Bei Dr. Ghada Elbez für die angenehme Zusammenarbeit und sehr hilfreiche und spannende fachliche Diskussionen.

Bei Qi Liu, der ebenfalls für eine sehr schöne gemeinsame Bürozeit mit gegenseitiger Unterstützung und vielen spannenden Diskussionen sorgte.

Bei Dr. Kaibin Bao für seine Unterstützung, u.a. durch seine mitreißende Begeisterung für Cyber-Security.

Bei zahlreichen Kollegen für das freundschaftliche, angenehme Arbeitsklima in der Gruppe, besonders bei Dr. Miao Zhang, Dr. Andreas Döring, Raoul Gabriel, Felix Langner, Max Kolmer und Dr. Moritz Frahm, allen zuvor genannten und den Gruppenleitern Dr. Hubert B. Keller und apl. Prof. Dr. Jörg Matthes.

Bei den Mitarbeitern der IAI-Infrastruktur; insbesondere Stefan Vollmannshauser, Claudia Greceanu und Jürgen Engelmann unterstützten mich bei allen Fragen zu Arbeitsmaterialien schnell und tatkräftig.

Zu guter Letzt bei meiner Familie. Auf die große moralische und fachliche Unterstützung meines Ehemanns Prof. (Univ. of Delaware, USA) Dr. Frank Schröder konnte ich mich immer verlassen. Die liebevolle Betreuung meines Sohnes Torin durch meine Eltern Godehard und Margot ermöglichten es

mir, trotz vorübergehend geschlossener Kita an meiner Dissertation weiterzuarbeiten. Mein Sohn Torin gibt allem weiteren Sinn, er macht mit seinem sonnigen Gemüt alles mit und heitert mich immer auf.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation: Energiewende . . . . .	1
1.2 Spezifische Angriffe auf Cyber-Physikalische Systeme . . . . .	2
1.3 Stand der Technik zu Schutzmaßnahmen gegen Cyber-Angriffe . . . . .	7
1.3.1 Bestehende Schutzmaßnahmen in Informationssystemen gegen Cyber-Angriffe . . . . .	9
1.3.2 Neue Anforderungen/Herausforderung bei cyber-physikalischen Systemen bzgl. Cyber-Angriffen . . . . .	12
1.3.3 Bestehende Schutzmaßnahmen in physikalischen Systemen gegen Defekte/lokale Sabotage . . . . .	14
1.4 Ziele und Gliederung der Arbeit . . . . .	25
<b>2 Grundlagen</b>	<b>27</b>
2.1 Data Reconciliation . . . . .	27
2.1.1 Lineare Statische Systeme . . . . .	27
2.1.2 Lineare Dynamische Systeme . . . . .	32
2.1.3 Nichtlineare Systeme . . . . .	43
2.2 Detektionsmethoden . . . . .	44
2.2.1 Messwerttest . . . . .	44
2.2.2 Globaltest . . . . .	48
2.2.3 Hypothesentest . . . . .	50
2.3 Übertragung der Detektion auf nichtlineare Systeme . . . . .	53
2.4 Grenzen der Detektionsmethoden . . . . .	54
2.4.1 Grenzen der Detektierbarkeit . . . . .	54
2.4.2 Grenzen der Lokalisierbarkeit . . . . .	57
2.5 Vergleich mit bestehenden Methoden zur Datenoptimierung . . . . .	62
2.5.1 Methoden . . . . .	62
2.5.2 Vergleich der Methoden . . . . .	64
2.5.3 Diskussion der Vergleichsergebnisse . . . . .	72
<b>3 Neues Konzept zur Detektion von Cyber-Angriffen auf cyber-physikalische Systeme</b>	<b>75</b>
3.1 Idee des neuen Verfahrens . . . . .	75

3.2	Formale Beschreibung . . . . .	76
3.2.1	Definition des Vorwissens . . . . .	77
3.2.2	Detektion . . . . .	78
3.2.3	ROC-Kurven . . . . .	82
3.2.4	Bestimmung der Schwellwertanpassung $SA_x$ . . . . .	83
3.2.5	Bestimmung der allgemeinen Schwellwerte $SW_0$ . . . . .	87
3.2.6	Schwellwert für die Vorauswahl möglicherweise manipulierter Kombinationen . . . . .	88
3.3	Statisches Beispiel . . . . .	89
3.3.1	Aufstellung des Vorwissens . . . . .	89
3.3.2	Data Reconciliation . . . . .	90
3.3.3	Messwerttest . . . . .	93
3.3.4	Globaltest . . . . .	106
3.3.5	Hypothesentest . . . . .	115
3.3.6	Vergleich . . . . .	125
3.4	Dynamisches Beispiel . . . . .	127
3.4.1	Aufstellen des Vorwissens . . . . .	129
3.4.2	Data Reconciliation . . . . .	129
3.4.3	Messwerttest . . . . .	135
3.4.4	Globaltest . . . . .	148
3.4.5	Hypothesentest . . . . .	157
<b>4</b>	<b>Evaluierung am Beispiel regelbarer Ortsnetztrafo (RONT)</b> . . . . .	<b>169</b>
4.1	Dynamische Beschreibung des verlustbehafteten RONT . . . . .	169
4.2	Aufstellung des Vorwissens . . . . .	176
4.3	Simulationsbeispiele . . . . .	176
4.4	Messwerttest . . . . .	181
4.4.1	Schwellwertanpassung . . . . .	181
4.4.2	Schwellwerte . . . . .	182
4.4.3	Beispiel Unmanipuliert . . . . .	184
4.4.4	Manipulationsbeispiel 1 . . . . .	187
4.4.5	Manipulationsbeispiel 2 . . . . .	189
4.5	Globaltest . . . . .	191
4.5.1	Schwellwertanpassung . . . . .	191
4.5.2	Schwellwerte . . . . .	192
4.5.3	Beispiel Unmanipuliert . . . . .	193
4.5.4	Manipulationsbeispiel 1 . . . . .	196
4.5.5	Manipulationsbeispiel 2 . . . . .	197

4.6 Hypothesentest . . . . .	198
4.6.1 Schwellwertanpassung . . . . .	198
4.6.2 Schwellwerte . . . . .	199
4.6.3 Beispiel Unmanipuliert . . . . .	201
4.6.4 Manipulationsbeispiel 1 . . . . .	203
4.6.5 Manipulationsbeispiel 2 . . . . .	204
4.7 Fazit der Evaluierung . . . . .	205
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>207</b>
<b>A Anhang</b>	<b>211</b>
A.1 Statisches Beispiel . . . . .	211
A.1.1 Messwerttest . . . . .	211
A.1.2 Globaltest . . . . .	216
A.1.3 Hypothesentest . . . . .	220
A.2 Statisches Beispiel mit vielfachheitsabhängiger Schwellwertanpassung . . . . .	224
A.2.1 Messwerttest . . . . .	224
A.2.2 Hypothesentest . . . . .	230
A.3 Dynamisches Beispiel . . . . .	238
A.3.1 Messwerttest . . . . .	238
A.3.2 Globaltest . . . . .	240
A.3.3 Hypothesentest . . . . .	240
A.4 Dynamisches Beispiel mit vielfachheitsabhängiger Schwellwertanpassung . . . . .	242
A.4.1 Messwerttest . . . . .	242
A.4.2 Hypothesentest . . . . .	248
A.5 Evaluierung . . . . .	257
A.5.1 Messwerttest . . . . .	257
A.5.2 Globaltest . . . . .	270
A.5.3 Hypothesentest . . . . .	275
A.6 Weiterführende Gedanken . . . . .	280
A.6.1 Bekanntheit des Systemzustands . . . . .	280
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>282</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation: Energiewende

Im Zuge der Energiewende wird in Deutschland die gesamte Energieinfrastruktur umgebaut. An die Stelle der großen, zentralen Kraftwerke tritt nach und nach eine große Anzahl kleiner, dezentraler Kraftwerke, die als cyber-physikalische Anlagen ausgeführt und remote gesteuert und gewartet werden. Die höhere Flexibilität cyber-physikalischer Komponenten ist im zukünftigen Energiesystem notwendig, um bei den fluktuiierenden Energiequellen, den verteilten, kleineren Erzeugungseinheiten und stärkeren Schwankungen im Verbrauch den Ausgleich von Angebot und Nachfrage in Echtzeit realisieren zu können. Aus der Vernetzung ergeben sich aber auch neue Risiken. Vernetzte informationstechnische Systeme können durch Cyber-Angriffe kompromittiert werden, während physikalische Systeme nur durch Defekte und lokale Sabotage gefährdet sind. Mögliche Schäden umfassen bei rein informationstechnischen Systemen den Verlust, das Ausspähen oder das Kompromittieren von Daten sowie fehlerhafte Ausgaben. Bei physikalischen Systemen können Fehlproduktionen, Beschädigungen am physikalischen System bis hin zur Zerstörung des Systems auftreten. Traditionell wird bei informationstechnischen Systemen ein gewisses Risiko durch Cyber-Angriffe in Kauf genommen. Neben dem in vielen Systemen geringeren Schadenpotential im Vergleich zu den hohen Kosten zusätzlicher Sicherheit, liegt der Grund überwiegend darin, dass die flexible, unkomplizierte und umfassende Nutzbarkeit informationstechnischer Systeme durch Schutzmaßnahmen eingeschränkt werden würde. Bei physikalischen Anlagen werden in der Regel stärkere Schutzmaßnahmen ergriffen. Diese richten sich gegen Defekte und lokale Sabotage und sind entweder Auflagen zum Mitarbeiter- und Umweltschutz geschuldet oder sollen lange Ausfallzeiten von Anlagen, einschließlich den Verlust der Anlage, verhindern. In cyber-physikalischen Systemen wird derzeit die hohe Vulnerabilität informationstechnischer Systeme mit dem hohen Schadenspotential physikalischer Systeme kombiniert. Bei cyber-physikalischen Systemen können also durch Cyber-Angriffe physikalische Schäden verursacht werden, die weder durch die klassischen informationstechnischen noch die klassischen physikalischen Schutzmaßnahmen verhindert werden. Bei Systemen der kritischen Infrastruktur, wie der Energieversorgung, ist dies besonders problematisch. In dieser Arbeit wird daher die Einführung einer zusätzlichen Diagnose- und Schutzschicht zum Schutz cyber-physikalischer Systeme vorgeschlagen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein neuer Ansatz verfolgt, der die enge Verknüpfung zwischen informationstechnischem Teil, also den kommunizierten Mess- und Stellwerten, und der physikalischen Anlage, die an die Gesetze der Physik gebunden ist, nutzt. Die Detektion von Angriffen zielt hier also nicht nur auf den informationstechnischen Teil ab, sondern betrachtet die Auswirkungen einer Manipulation auf die physikalische Anlage. Dazu werden zunächst etablierte Methoden eingesetzt, die zur Detektion von Sensorsausfällen und Identifikation des betroffenen Sensors auf Basis des Systemzustands entwickelt wurden und die seit den 1980er Jahren zu diesem Zweck erfolgreich eingesetzt und weiterentwickelt werden. Für die Detektion von Cyber-Angriffen werden die Methoden im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt, indem die Eigenschaften von Cyber-Angriffen, die sich von den Eigenschaften der Sensordefekte unterscheiden, explizit berücksichtigt werden.

## 1.2 Spezifische Angriffe auf Cyber-Physikalische Systeme

Gegen cyber-physikalische Systeme gibt es bereits spezifische Angriffe. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass durch einen informationstechnischen Angriff ein physikalischer Effekt erzielt wird oder werden kann. Die nachfolgende Übersicht zeigt außerdem, dass die für den jeweiligen Angriff anfälligen Geräte aufgrund des Angriffsvektors Gemeinsamkeiten aufweisen. In Vorgriff auf die Bedeutung dieser Gemeinsamkeiten, für die in dieser Arbeit vorgestellte, neue Detektionsmethode, werden die Gemeinsamkeiten für die hier aufgelisteten Angriffe in Tabelle 1.1 auf ihre Bedeutung, für die Betroffenheit von Komponenten von dem jeweiligen Angriff, analysiert.

**W32.Stuxnet** zielt auf Zugriff auf und Manipulation von SCADA<sup>1</sup>-Systemen und den damit verbundenen Speicherprogrammierbaren Steuerungen (PLCs). Es wurde zur physikalischen Zerstörung von Zentrifugen zur Urananreicherung im Iran eingesetzt. Die Infektion erfolgt über Windows-Betriebssysteme und nutzt Schwachstellen der Siemens-Automatisierungssoftware Simatic Step 7. Beim Angriff werden am SCADA<sup>1</sup>-System vorbei Befehle an die PLCs geschickt, die ein vom Angreifer gewünschtes Verhalten der Aktoren auslösen. Dazu kann die Firmware der PLCs ausgetauscht werden. Im Fall der Zentrifugen wurde die Drehzahl erhöht. Gleichzeitig werden dem SCADA<sup>1</sup>-System Daten eines normalen Betriebs vorgetäuscht und dadurch die schnelle Detektion des Angriffs verhindert und Gegenmaßnahmen verzögert [26]. Frühere Namen von Stuxnet lauten Rootkit.Tmphider und W32.Temphid [90].

**Duqu** ist eng verwandt mit Stuxnet und nutzt dessen Angriffsmethoden. Es kann PLCs verschiedener Hersteller angreifen, ist aber weiterhin hoch spezialisiert auf PLCs. Bekannte Ein-

---

<sup>1</sup>Supervisory Control and Data Acquisition: Steuerungs- und Überwachungssystem für Industrieanlagen

sätze umfassen nur das Ausspähen von Daten, obwohl Duqu auch Werkzeuge zur Injektion von Code enthält. [13]

**Havex** ist eine auf industrielle Steuerungsanlagen (ICS) bzw. SCADA<sup>1</sup>-Systeme spezialisierte Spähsoftware. Sie nutzt eine bestimmte Version des OPC<sup>2</sup>-Protokolls, um die Netzarchitektur aufzuklären und nach Geräten zu suchen, die über TCP auf Ports 44818, 105 oder 502 erreichbar sind. Die Ausbreitung erfolgte über die Websites der Gerätehersteller. Betroffene Unternehmen finden sich in der Luftfahrt, Pharmaindustrie, Verteidigung, Petrochemie und Energieinfrastruktur. Auch wenn die Software selbst nur Daten, einschließlich Zugangsdaten, ausspäht und keine physischen Schäden verursacht, ermöglicht sie Remote-Zugriff und das Aufspielen beliebiger anderer Schadsoftware. Zusammen mit den ausgespähten Informationen ist es damit möglich physische Schäden zu erzielen. [57]

**Industroyer** oder Crashoverride ist spezialisiert auf die Abschaltung von industriellen Steuerungen, insbesondere von steuerbaren Transformatoren. Es kam bei einem Angriff auf das Stromnetz der Ukraine 2015 zum Einsatz. Industroyer nutzt die industriellen Kommunikationsprotokolle IEC 60870-5-101, IEC 60870-5-104, IEC 61850 und OPC zur Aufklärung der Netzwerkstruktur und um Kommandos an Geräte zu verschicken. Zur Abschaltung der Geräte werden Registry-Schlüssel gelöscht und Daten überschrieben. Ein Modul richtet sich gezielt gegen Siemens SIPROTEC-Geräte. [19]

Der informationstechnische Angriff verursacht also Schäden im informationstechnischen Bereich der Geräte, was aber zu deren physischen Ausfall führt. Physische Schäden am Gerät entstehen nicht, die Geräte lassen sich manuell wieder zurücksetzen.

**BlackEnergy** ist im engeren Sinne keine spezifische Software für Angriffe auf Cyber-Physikalische Systeme. Die Aufnahme in diese Liste ist in der Nutzung für Angriffe auf das ukrainische Energiesystem begründet. Durch klassisches Ausspähen des IT-Systems von Energieversorgern wurden Zugangsdaten für den Remotezugriff auf zentrale Trafostationen erbeutet und diese abgeschaltet. Begleitende, klassische Denial of Service (DoS) - Angriffe auf die IT-Infrastruktur verhinderten die schnelle Registrierung der Ausfälle und Wiederherstellung der Stromversorgung. [12] [75]

**Mirai** ist eine Virusfamilie, die mit Hilfe von Standard- und Auslieferungs-Zugangsdaten smarte Geräte der Haustechnik auf Linux-Basis für den Aufbau eines Botnetzes nutzt. Die Ziele wurden durch einen Scan identifiziert, bei dem TCP Kontaktanfragen an zufällige IPv4-Adressen geschickt werden. Schäden an den (physischen) Geräten selbst sind hier nicht das

---

<sup>2</sup>Open Platform Communications: Herstellerübergreifendes Industrieprotokoll

Ziel des Angriffs, sondern Denial of Service (DoS) - Angriffe auf andere informationstechnische Systeme. Der Sourcecode von Mirai ist auf Github verfügbar, weshalb Mirai in zahlreichen Varianten im Umlauf ist. [16]

**BrickerBot** zerstörte 2017 schwach gesicherte Internet of Things (IoT)-Geräte, häufig smarte Haustechnik. Für den Zugang zu den Geräten wurden Techniken des Mirai-Virus verwendet. Zur Zerstörung der Geräte wurde der Speicher sehr umfassend gelöscht, einschließlich der für Kommunikation erforderlichen Elemente wie IP-Adresse und Zeitstempel. Die Anzahl der Threads, also der parallel ausführbaren Aufgaben, wurde auf 1 begrenzt. Diese Maßnahmen führen dazu, dass die Geräte weder ihre Funktion erfüllen noch Verbindungen aufbauen können, wobei vor allem letzteres dazu führt, dass die Geräte nicht wiederhergestellt werden können. [62]

**LogicLocker** ist eine Erpressungssoftware, die auf PLCs spezialisiert ist. Sie kann sowohl Aktoren ansteuern, als auch falsche Mess- oder Stellwerte anzeigen lassen. Betroffene reale Anlagen sind nicht bekannt, die Fähigkeiten und das Verhalten wurde am Georgia Institute of Technology an einem Testaufbau untersucht. [27]

**Triton** zielt auf physische Zerstörungen an cyber-physikalischen Anlagen ab. Bekannt ist ein Angriff auf eine petrochemische Anlage in Saudi-Arabien, bei dem eine Explosion ausgelöst werden sollte, die nur durch einen Softwarefehler in Triton verhindert wurde. Ein weiterer Angriff wurde von FireEye dokumentiert, wobei das betroffene Unternehmen geheim gehalten wird. Triton infiziert das Windows-Betriebssystem und späht längere Zeit die Sicherheitsmaßnahmen des Zielsystems, die Triconex Safety Instrumented System (SIS) Steuerungen von Schneider Electric und deren Kommunikationsprotokoll TriStation, aus. Die SIS-Steuerungen sollen Anlagen vor physischen Schäden schützen. [36] Triton dient also eindeutig dazu, physikalische Schäden durch einen informationstechnischen Angriff zu verursachen.

**VPNFilter** infiziert Router und damit verbundene Datenspeicher und enthält vielfältige Werkzeuge zum Ausspähen von Daten und Netzwerkverkehr und zum Zerstören von physischen Geräten, die über SCADA<sup>1</sup>-Steuerungen angebunden sind. Angreifbar sind Router einer kleinen Gruppe von Herstellern auf embedded Linux-Basis. Es enthält Komponenten zum Umleiten der Kommunikation und zur Unterdrückung von Verschlüsselung, was neben dem Ausspähen einen man-in-the-middle (MitM)-Angriff, also die Veränderung der kommunizierten Daten ermöglicht. Weitere Komponenten dienen der Kommunikation mit Geräten, die über das Modbus-Protokoll angesprochen werden und dem Flashen dieser Geräte, also dem Überschreiben der Firmware. Die Kommunikation mit den Geräten und das

Flashen erlaubt eine umfassende Veränderung der Gerätefunktion. Zur Zerstörung der Geräte wird eine defekte Firmware aufgespielt. VPNFilter ist eindeutig auf die Beschädigung cyber-physikalischer Systeme ausgelegt. [85]

**Pipedream** ist ein Werkzeugkasten für Angriffe auf PLCs und ICS. Es sucht nach und ermöglicht dem Angreifer Zugriff auf PLCs insbesondere von Schneider Electric und OMRON. Dabei können Parameter verändert oder neue Firmware installiert werden. Pipedream nutzt auch Technologien wie die Entwicklungsumgebung CODESYS, Modbus-Kommunikation und Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)-Server und kann Code im Windows-Kernel ausführen. [23]

Es richtet sich also gegen cyber-physikalische Industrieanlagen, wobei es nur Zugang für den eigentlichen Angriff herstellt. Der umfassende Zugang ermöglicht das Herbeiführen physischer Schäden.

**Sasser** war auf Windows XP und 2000 spezialisiert und verursachte Ausfälle des Betriebssystems. Es nutzte für die Infektion vulnerable Ports 445 und 139 und verursachte die Ausfälle durch Buffer-Overflow in der Rechteverwaltung. Bereits vor dem Auftreten von Sasser war ein Update verfügbar, das die genutzte Schwachstelle behob [52]. Dass der Wurm u.a. dennoch zu Ausfällen der Röntgengeräte eines Krankenhauses und der Navigation einer Küstenwache führen konnte, liefert ein Beispiel für das Problem, dass insbesondere Systeme der kritischen Infrastruktur spät gepatcht werden, weil sie häufig ohne Unterbrechung betrieben werden [89] oder weil Patches teilweise erst zertifiziert werden müssen.

Sasser greift ausschließlich informationstechnische Systeme an und ist nicht auf cyber-physikalische Systeme spezialisiert.

**WannaCry** ist eine Erpressungssoftware, die informationstechnische Systeme auf Windows-Basis befällt und Dateien verschlüsselt. Obwohl sich WannaCry ausschließlich gegen informationstechnische Systeme richtet, führte es zur Abschaltung einer Chip-Fabrik in Taiwan und damit zu physikalischen Schäden. [42]

**Drovorub** ist ein Werkzeugkasten für Angriffe auf Systeme auf Linux-Basis. Drovorub ist nicht auf cyber-physikalische Systeme spezialisiert. Durch den Umfang des erlangten Zugriffes ist ein Cyberangriff auf den physischen Teil des Systems möglich. [58]

**Shodan** ist eine Suchmaschine, mit der Geräte gefunden werden können, die mit dem Internet verbunden sind. [80] Dort findet sich eine Vielzahl von Geräten, die kaum gesichert sind und Zugriff selbst auf kritischste Parameter erlaubt. [84] [82] [83] [56]

	Kommunikationsprotokoll									
	Betriebssystem	Netzwerk	Netzwerkebene	Hardware/Firmware	Hardware-/Firmwarehersteller	geteilte Hardware	Software	Softwarehersteller	offene Ports	Exposition
W32.Stuxnet	•			•	•		•	•		
Duqu	•	•	•	•	•		•	•		
Havex	•		•		•			•		
Industroyer	•		•		○		○	○		○
BlackEnergy		•	•						•	
Mirai	•	•	•		•		•	•	•	•
BrickerBot	•	•	•		•		•	•	•	•
LogicLocker	•								•	
Triton	•	•	•	•	•		•	•		
VPNFilter	•	•	•	•	•	•				•
Pipedream	•	○	•	•	•				•	
Sasser	•	•	•				•	•	•	•
WannaCry		•	•						•	
Drovorub	•	•	•						•	
Shodan	•	•	•	○			○	•	•	•

**Tabelle 1.1:** Bekannte Gemeinsamkeiten und Exposition der betroffenen Geräte und Komponenten bei verschiedenen Cyber-Angriffen.

- Ausgenutzte Gemeinsamkeit/Exposition
- vermutlich zufällige Inzidenzen

Insbesondere bei den auf cyber-physikalische Systeme spezialisierten Angriffen finden sich zahlreiche Gemeinsamkeiten betroffener Geräte und Komponenten. Bei Angriffen, die den notwendigen Zugriff, aber selbst keine Manipulationen ermöglichen, sind Gemeinsamkeiten spätestens im Angriffsmodul durch die notwendige Spezialisierung auf die angegriffene Anlage zu erwarten.

## 1.3 Stand der Technik zu Schutzmaßnahmen gegen Cyber-Angriffe

Bestehende Schutzmaßnahmen können im Hinblick auf ihre Zielsysteme, Form und Umfang notwendiger Anlagenmodelle und erforderliches Expertenwissen bzw. erforderliche Daten, sowie ihrer Wirkung, präventiv, informativ oder kurativ unterschieden werden.

**Zielsysteme** sind eine Kategorie, hinsichtlich der Schutzmaßnahmen unterschieden werden können. Betrachtet werden cyber-physikalische Systeme, auf die auch das hier beschriebene neue Verfahren abzielt und die darin enthaltenen bzw. verwandten informationstechnischen Systeme und physikalischen (verfahrenstechnischen/mechanischen) Systeme.

Für informationstechnische Systeme gibt es eine Vielzahl etablierter Schutzmaßnahmen, denn durch die Vernetzung sind die Systeme für Angreifer leicht erreichbar. Aufgrund des im Vergleich mit physikalischen Anlagen geringeren Schadenspotentials und weil die Sicherheitsmaßnahmen mit Einschränkungen der Nutzbarkeit einher gehen, ist der Sicherheitsanspruch jedoch nicht absolut. Viele der Schutzmaßnahmen sind, ebenso wie die Zielsysteme, sehr weit verbreitet. Entsprechend verbreitet sind Angriffsformen, die diese umgehen können.

In Produktionsanlagen, beispielsweise in der Chemieindustrie, sind erprobte Sicherheitsmaßnahmen für physikalische Systeme im Einsatz, die bisher nicht auf die Erkennung von Cyber-Angriffen ausgelegt sind. Gegen Cyber-Angriffe wird häufig auf die Abschottung der Anlage gesetzt [73]. Andere Verfahren, die Sensordaten auswerten, zielen hier derzeit nicht auf die Detektion von Cyber-Angriffen ab. Sie verbessern Daten die mit sehr ungenauen Sensoren gemessen wurden oder detektieren und interpretieren Systemzustände außerhalb des Normalzustands, wie Verschleißzustände, Sensorsausfälle, Kalibrierprobleme oder Leckagen im System [54]. Im Unterschied zu den Risiken für informationstechnische Systeme, ist das Schadenspotential oft deutlich höher.

Für cyber-physikalische Systeme können sowohl Maßnahmen für informationstechnische als auch physikalische Systeme in ihrer jeweiligen Funktion genutzt werden. Durch die enge Verbindung zwischen informationstechnischem und physikalischem Teil ist in diesen Systemen jedoch die Vulnerabilität gegenüber Cyber-Angriffen aus den informationstechnischen Systemen mit dem hohen Schadenspotential der physikalischen Systeme kombiniert. Cyber-Angriffe erlauben Manipulationen aus der Ferne und sind unter gleichartigen Systemen übertragbar. Umgekehrt ermöglicht es die enge Verbindung aus informationstechnischem und physikalischem Teil, das informationstechnisch erfasste Verhalten mit den physikalischen Gegebenheiten auf Plausibilität zu prüfen.

**Modellbasiert, Wissensbasiert oder Datenbasiert** sind, im Vergleich zu trivialen Ansätzen, die höher entwickelten Schutzmaßnahmen, was zu unterschiedlichen Vor- und Nachteilen der Maßnahmen führt.

Schutzmaßnahmen nutzen entweder Vorwissen zu Normalbetrieb und bekannten möglichen Fehlern, oder Systemmodelle, die das System mathematisch modellieren. Das Vorwissen kann in Form analytischer Merkmale vorliegen, die als sogenanntes Expertenwissen aus der Analyse bereits aufgetretener Fehlfunktionen oder aus den Eigenschaften vorhergesagter Fehlfunktionen abgeleitet wird. In einigen Fällen werden zusätzliche Sensoren nur für die Erkennung bestimmter, bekannter Fehlfunktionen installiert [2] [32]. Das Vorwissen kann auch aus vorhandenen Messdaten generiert werden, indem z.B. neuronale Netze trainiert werden, was als datenbasierte Methode definiert wird. Für eine zuverlässige Klassifikation müssen dabei ausreichende Datenmengen für alle möglichen Systemzustände und alle möglichen Fehler vorhanden sein [71]. Bei modellbasierten Methoden werden aus Zwangsbedingungen, Erhaltungssätzen und anderen physikalischen Zusammenhängen mathematische Modelle gebildet. Im Betrieb werden Residuen ermittelt, entweder aus der Differenz zwischen gemessenen/beobachteten Werten und modellkonformen Werten oder direkt aus den Abweichungen von Systemgleichungen. Diese Residuen werden zur Detektion und Klassifikation von Fehlfunktionen, insbesondere zur Bestimmung der betroffenen Komponente, eingesetzt [54] [45]. Für den Einsatz gegen Cyber-Angriffe ist es, anders als beispielsweise für den Einsatz zur Erkennung von Verschleiß, von Vorteil, kein Wissen über bereits bekannte Angriffe zu nutzen. Unbekannte, neuartige Angriffe sind besonders erfolgversprechend, weil bekannte Bedrohungen durch kontinuierliche Patches im informationstechnischen Bereich reduziert werden.

**Präventiv, Informativ oder Kurativ** ist die Wirkung der Schutzmaßnahmen. Maßnahmen die präventiv wirken, sollen Angriffe verhindern. Informativ und kurativ wirkende Maßnahmen greifen dagegen erst, wenn ein Angriff bereits erfolgt ist. Informativ wirkende Maßnahmen detektieren Angriffe und 'informieren' darüber. Kurative Maßnahmen sollen Wirkungen von Angriffen unterbinden oder heilen.

Die grundlegenden Klassen von Maßnahmen sind in Tabelle 1.2 aufgeführt und werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert. In Abschnitt 1.3.1 werden informationstechnischen Schutzmaßnahmen diskutiert, wie sie bereits gegen Cyber-Angriffe genutzt werden. In Abschnitt 1.3.2 werden die Anforderungen an mögliche Maßnahmen zum Schutz vernetzter cyber-physikalischer Anlagen aufgestellt. In Abschnitt 1.3.3 werden schließlich Schutzmaßnahmen in physikalischen Systemen vorgestellt, die sich aktuell gegen Defekte und lokale Sabotage richten und hinsichtlich der in Abschnitt 1.3.2 formulierten Anforderungen bewertet.

	wissensbasiert	datenbasiert	modellbasiert	präventiv	informativ	kurativ
<b>Informationstechnisch (bereits für Cyberangriff-Erkennung genutzt)</b>						
Sichere Software	x	x		x		
Softwareupdates	x			x	x	
Firewall	x	x		x		
Authentifizierung	x			x		
Verschlüsselung	x			x		
Teilnehmeridentifikation	x			x		
VirensScanner	x	x			x	x
SIEM-System	x	x	x		x	x
Zweckgebundene Netze		x	x			
<b>Physikalisch (noch nicht für Cyberangriff-Erkennung genutzt)</b>						
Trivial:						
Intervallüberwachung	x	x		x	x	
Redundante Messungen		x		x	x	
Modellbasiert:						
Basierend auf paralleler Simulation (Prozessmodell)			x	x	x	
Basierend auf Data Reconciliation (Hypothesen-, Messwert-, Globaltest)			x	x	x	
Basierend auf Kalmanfilter (Parameter-/Zustandsschätzer)			x	x	x	
Petri-Netze	x	x		x	x	
Expertenwissensbasiert:						
In Form von Fuzzy-Regeln	x				x	
Fehlermodelle	x				x	
Fehlerfrühdagnostik	x		x	x		
Datenbasierte:						
Blackbox-Modelle/Klassifikatoren z.B. Neuronale Netze	x			x	x	
Grundlegende statistische Methoden	x			x		

**Tabelle 1.2:** Klassifizierung der Sicherheitsmaßnahmen

### 1.3.1 Bestehende Schutzmaßnahmen in Informationssystemen gegen Cyber-Angriffe

**Sichere Software** soll bereits bei der Softwareentwicklung durch die Einhaltung von Regeln, den Coding Standards, gewährleistet werden. Die Regeln fordern und unterstützen vor allem die Erstellung von Code, der verständlich, nachvollziehbar und auf seine Aufgabe beschränkt ist und damit geringere Möglichkeiten zur Nutzung für Cyber-Angriffe bietet [53]. Es gibt eine Vielzahl von Coding Standards, die bekanntesten sind MISRA [59] und CERT [78]. Durch die hohe Anzahl der Regeln ist die Umsetzung durch Entwickler nur mit maschineller Unterstützung, statischen Codeanalysen, möglich [53] und auch dann sehr aufwändig. Sie sind daher bei weitem nicht flächendeckend im Einsatz. Ein weiterer Ansatz ist, Coding Standards direkt in Programmiersprachen zu integrieren und dadurch ihre Einhaltung weitgehend zu erzwingen. Das wird in den Sprachen Ada mit Ravenscar-Profil [18], dem auf Ada

basierenden SPARK [51] und Rust [39] umgesetzt, deren Einsatz für die Erstimplementierung ebenfalls einen Mehraufwand darstellt.

**Softwareupdates** beheben Schwachstellen der Software, die von einem Angreifer zum Auslösen von unerwünschtem Verhalten genutzt werden können. Die teilweise stark verzögerte Anwendung, besonders bei kritischen Systemen, bedingt durch Zertifizierungsanforderungen, unterbrechungsfreien Betrieb [31] [11] [49] oder Inkompatibilität mit individuellen Softwarelösungen [38] oder die unterbleibende Anwendung der Updates wegen fehlender Bereitstellung durch Hersteller oder abhanden gekommener Hersteller [31] [11], untergräbt die Zuverlässigkeit dieser Maßnahme. Zusätzlich ist sie nur auf bekannte Sicherheitslücken anwendbar [31] [11] [63].

**Firewalls** werden eingesetzt, um die Kommunikation auf erlaubte Verbindungen zu beschränken. Zusammen mit den immer flexibleren und universeller verfügbaren Systemen, stellt eine ausreichend restriktive Konfiguration der Firewalls eine immer größere Herausforderung dar. [6]

**Authentifizierung/Teilnehmeridentifikation** kommt bei Kommunikation und Zugriffen über frei zugängliche Netze zum Einsatz. Bekannte Teilnehmer werden bei Kommunikations- oder Zugriffsanfragen authentifiziert, also ihre Identität bestätigt. Damit kann kommunizierten Werten hinsichtlich der Identität des Senders vertraut bzw. der Zugriff auf Basis eines Berechtigungsmanagements gesteuert werden. Dies betrifft nicht nur menschliche Teilnehmer, die mit Passwörtern, Pins, Tans oder biometrischen Daten authentifiziert werden, sondern auch elektronische Komponenten, die vorwiegend über kryptographische Signierung authentifiziert werden. Für die kryptographische Signierung wird durch einen bekannten Algorithmus über die kommunizierten Daten ein Hash-Wert gebildet, der mit Hilfe eines privaten Schlüssels oder eines zuvor sicher kommunizierten symmetrischen Schlüssels verschlüsselt wird. Die Entschlüsselung mittels des öffentlichen oder gemeinsamen Schlüssels ermöglicht die Authentifizierung des Senders. Der anschließende Abgleich des Hash-Wertes ermöglicht die Prüfung der Integrität der kommunizierten Daten [17]. In einer vereinfachten Variante wird eine Transaktionsnummer verschlüsselt, was nur die Authentifizierung erlaubt [17]. Beides setzt jedoch eine ausreichende Rechenleistung auf den Komponenten voraus, die nicht immer gegeben ist, insbesondere bei Echtzeitbetrieb [37].

**Verschlüsselung** ermöglicht es, kommunizierte Daten vor der Kenntnis Dritter zu schützen. Anstelle eines Hash-Wertes oder einer Transaktionsnummer kann auch die gesamte

Kommunikation verschlüsselt werden, was vor einer Manipulation der Daten auf dem Kommunikationsweg, sowie ihrer Ausspähung schützt [17]. Dies führt bei der Verschlüsselung des gesamten Inhalts in einem noch höheren Maße als bei der Signierung zu Einschränkungen der Einsetzbarkeit im Echtzeitbereich und bei Komponenten mit geringer Rechenleistung [37].

**VirensScanner** suchen nach bekannten Signaturen von Schadsoftware. Sie detektieren also ausschließlich bekannte Viren. Die Vielzahl der neu in Umlauf gebrachten Viren, sorgen dafür, dass die Scanner nie alle Schadprogramme erkennen können, mit denen sie konfrontiert sind [25].

**Security Information and Event Management (SIEM)** -Systeme dienen der Analyse von Verbindungen und Vorgängen in Netzen durch Auswertung und Korrelierung von Log- und Kommunikationsdaten. Ziel ist die Schaffung von Transparenz der Vorgänge im Netz. Die wirksame Einrichtung eines SIEM-Systems ist sehr komplex und aufwändig [15]. Ein weiterer Schwachpunkt ist der eingeschränkte Zeithorizont der Daten für die Identifikation von Korrelationen, verglichen mit den langen Zeiträumen die üblicherweise für die Vorbereitung gezielter Angriffe, also die Ausspähphase, aufgewandt werden.

**Zweckgebundene Netze** verbinden nur die legitimen Kommunikationsteilnehmer. Eine sehr wirksame aber teure Maßnahme ist die Nutzung isolierter, zweckgebundener Netze [30]. Für viele Anwendungen, wie z.B. die dezentrale Energieversorgung im Zuge der Energiewende, sind ein großes Kommunikationsnetz und viele Teilnehmer erforderlich. Ist ein zweckgebundenes Netz aber an nahezu jedem Haushalt verfügbar, stellt es keinen wirksamen Sicherheitsmechanismus mehr dar. Zusätzlich müssen zweckgebundene Netze physisch geschützt werden, was die Kosten zusätzlich erhöhen kann [30].

Unter den bestehenden Schutzmaßnahmen in Informationssystemen gegen Cyber-Angriffe, sind Updates für cyber-physikalische Systeme häufig nicht anwendbar. Insbesondere für die kritische Infrastruktur, wo Schutzmaßnahmen von großer Bedeutung sind, muss eingesetzte Software aufwändig zertifiziert werden, was für eine zuverlässige Wirkung zu viel Zeit in Anspruch nimmt [31] [11] [49]. Davon betroffen sind auch VirensScanner, deren Einsatz nur mit schnellen Aktualisierungen sinnvoll ist. Maßnahmen wie Firewalls und zweckgebundene Netze sind in gleicher Weise einzusetzen wie beim informationstechnischen System, mit der gleichen, zum Teil eingeschränkten, Zuverlässigkeit. Authentifizierung und Verschlüsselung erfordern eine ausreichende Rechenleistung der einzelnen Komponenten, die in smarten Sensoren teilweise nicht gegeben ist [37]. Ist die notwendige Rechenleistung vorhanden, ist der Einsatz wegen des höheren Schadenspotentials sinnvoller als bei informationstechnischen Systemen, auch wenn dadurch der Installationsaufwand erhöht wird. Die Entwick-

lung sicherer Software wäre sehr hilfreich und ist ein wichtiges Ziel, es ist aber aktuell nicht absehbar, dass sie sich flächendeckend durchsetzt, weil die hohe Anzahl der erforderlichen Maßnahmen einen großen Aufwand darstellen. Die informationstechnischen Maßnahmen sind für den Schutz cyber-physikalischer Anlagen also nicht ausreichend.

Für die Entwicklung eines neuen Verfahrens werden zunächst Anforderungen und Bewertungskriterien für den Einsatz für cyber-physikalische Anlagen aufgestellt. Anschließend werden Schutzmaßnahmen betrachtet, die in physikalischen Systemen aktuell gegen Defekte und lokale Sabotage eingesetzt werden, und ihre Eignung als Grundlage für ein Verfahren zum Schutz gegen Cyber-Angriffe diskutiert.

### **1.3.2 Neue Anforderungen/Herausforderung bei cyber-physikalischen Systemen bzgl. Cyber-Angriffen**

Aufgrund der speziellen Anforderungen sind nicht alle genannten Methoden für den Einsatz zur Detektion von Cyber-Angriffen in cyber-physikalischen Systemen, wie den Komponenten des Energiesystems, geeignet. Um eine sinnvolle Vorauswahl der betrachteten Methoden treffen zu können, wird zunächst herausgearbeitet, welche Bedingungen ein Detektionsverfahren zur Erkennung von Manipulationen erfüllen muss bzw. welche Kriterien ein vielversprechendes Verfahren kennzeichnen.

**Dynamische Prozesse** müssen durch Verfahren für den Einsatz in Komponenten des Energiesystems berücksichtigt werden können. Auch wenn bspw. Windkraftanlagen die meiste Zeit in einem stationären Zustand betrieben werden, müssen auch dynamische Änderungen bei An- und Abfahrprozessen und bei dynamischer Änderung der Energiequelle (hier: Wind, bei Photovoltaikanlagen z.B. Sonne) berücksichtigt werden. Die Auswirkungen einiger Manipulationen zeigen sich erst bei dynamischen Änderungen.

**Detektion ohne Vorannahmen zu den Fehlern** ist bei Cyber-Angriffen essentiell, da die genaue Form der Angriffe nicht vorhergesagt werden kann. Daher sind Verfahren die nach Mustern konkreter Ereignisse suchen, um beispielsweise Verschleiß frühzeitig zu erkennen oder den Ausfall von Sensoren anhand ihres Verhaltens vorherzusagen, ungeeignet.

**Transparenter Detektionsmechanismus** ist notwendig um sicherzustellen, dass Entscheidungen tatsächlich auf Eigenschaften basieren, die bezüglich der Fragestellung relevant sind. Das ist notwendig, um zu vermeiden, dass zur Detektion Eigenschaften herangezogen werden, die nur aufgrund äußerer Gegebenheiten, wie der Auswahl von Trainingsdaten für Neuronale Netze oder einfach zufällig, Korrelationen aufweisen, ohne einen Kausalzusammenhang. Es müssen also sowohl die Detektionskriterien bekannt sein um einzelne

Detektionsentscheidungen nachvollziehen zu können, als auch klar sein, woher Detektionskriterien stammen und warum sie eine Unterscheidung von Normalverhalten und manipuliertem Zustand erlauben [76].

**Keine Abhängigkeit von der Manipulationsgeschwindigkeit** ist für den Einsatz gegen Cyber-Angriffe wichtig, weil der Verlauf einer Manipulation vom Angreifer angepasst werden kann. Das Detektionsverfahren muss also auch Manipulationen erkennen, die besonders langsame oder besonders schnelle Verschiebungen der Werte verursachen. Schnelle Veränderungen sind dabei für die Verfahren einfacher detektierbar, in diesem Punkt wird also vorwiegend der Umgang mit langsamen Verschiebungen bewertet.

**Angemessener Rechenaufwand** zur Berechnung des Detektionsalgorithmus ist trotz der aktuellen, sehr leistungsfähigen Prozessoren von entscheidender Bedeutung, um die Überwachung in Echtzeit zu realisieren [35] [76] [37]. Er ist also die Voraussetzung für eine schnelle Detektion und für die Einsetzbarkeit auf Computern mit begrenzten Ressourcen.

**Schnelle Detektion** ist nicht nur vom Rechenaufwand abhängig und für die Nutzbarkeit gegen Cyber-Angriffe sehr wichtig. Ein weiteres Kriterium für die Detektionsgeschwindigkeit ist die Anzahl der für die Detektion erforderlichen Messzeitpunkte. Viele statistische Methoden erfordern eine große Menge an Messungen einer einzelnen Größe. In diesem Fall können Veränderungen erst nach einiger Zeit erkannt werden. Sind die statistischen Eigenschaften der Größen vorher bekannt, kann dagegen jeder neue Messpunkt unmittelbar bewertet werden. Eine zu schnelle Detektion ist allerdings ebenfalls nicht sinnvoll, weil kurzzeitig starke Abweichungen auch im normalen Betrieb auftreten können, bsw. durch statistische Fluktuation. Die Detektion sehr kurzer Abweichungen wird daher meist unterdrückt. Die Fähigkeit, Werte schnell zu bewerten, erlaubt diesbezüglich eine Anpassung an die Anforderungen eines konkreten Systems, beispielsweise durch die Bedingung, dass das Detektionskriterium über einen bestimmten Zeitraum erfüllt sein muss [29]. Ist die statistische Verteilung bekannt, können Messwerte auch auf Basis der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens unter der Hypothese des Normalbetriebs oder eines Fehlerzustandes bewertet werden [54].

**Nutzung vorhandener Sensoren** zur Detektion sollte vorgezogen werden. In einigen Fällen sind für die Fehlerdetektion zusätzliche Messungen von Größen notwendig, die nur mittelbar mit dem Systemzustand zusammenhängen. Ein Beispiel ist die Messung von Vibratiorionen, die Auskunft über Aktorzustände, Rotationsfrequenzen oder Resonanzen geben können. Solche Sensoren können eingebunden werden, wenn sie vorhanden sind [35] [76]. Aufgrund der zusätzlichen Kosten könnte eine erforderliche Installation zusätzlicher Sensoren

zumindest zu Beginn einem testweisen Einsatz entgegenstehen. Daher sollten Verfahren bevorzugt werden, die keine zusätzlichen Messungen benötigen.

**Große Tiefe der Fehlerdetektion** meint die Fähigkeit zur Bestimmung der manipulierten Variablen und damit Bestimmung der Fehlerursache [35] [76]. Diese hat insbesondere für die Detektion von Cyber-Angriffen Vorteile, weil dadurch der Angriffsvektor eingegrenzt werden kann, was gezielte Gegenmaßnahmen mit geringen Kollateralschäden ermöglicht.

**Robustheit** beschreibt, wie stabil ein Verfahren in der Anwendung insgesamt und in speziellen Situationen läuft. Bei einem Einsatz zur Manipulationsdetektion ist vor allem die Einsatzfähigkeit bei einer hohen Anzahl an Mehrfachfehlern und dadurch geringer verbleibender Systemredundanz interessant [35].

**Mehrfachfehler**, also das gleichzeitige Auftreten mehrerer Fehler, müssen für die Anwendung zur Manipulationsdetektion erkannt werden [35] [76]. Dies stellt einen Unterschied zur Anwendung der Detektionsverfahren für lokale Defekte dar.

**Kurative oder Präventive Maßnahmen** muss ein Verfahren gegen Cyber-Angriffe enthalten oder ermöglichen. Wegen der geringen Reaktionszeit zur Abwehr von Angriffen ist die reine Information zu einem erfolgten Angriff, die sicherlich von forensischem Interesse ist, nicht ausreichend und schützt nicht vor den hohen physikalischen Schäden die bei cyber-physikalischen Anlagen auftreten können.

**Hohe Sensitivität und Spezifität** sind wichtig um Angriffe zuverlässig zu detektieren und die Anzahl der Fehlalarme, also die Falsch-Positiv-Rate, möglichst gering zu halten. Sensitivität ist die Richtig-Positiv-Rate und Spezifität die Richtig-Negativ-Rate.

### 1.3.3 Bestehende Schutzmaßnahmen in physikalischen Systemen gegen Defekte/lokale Sabotage

Die Idee für das neue Schutzsystem für cyber-physikalische Systeme, das in dieser Arbeit entwickelt wird, umfasst u.a. die Nutzung der physikalischen Systemzusammenhänge für die Detektion von Manipulationen. Für die Auswertung dieser physikalischen Zusammenhänge können bestehende, bewährte Schutzmaßnahmen in physikalischen Systemen gegen Defekte und lokale Sabotage als Ausgangsbasis genutzt werden. Die bekannten, auf physikalischen Zusammenhängen basierenden Schutzmaßnahmen, werden in diesem Abschnitt

kurz vorgestellt und auf Basis der in Abschnitt 1.3.2 aufgestellten Kriterien hinsichtlich ihrer Eignung für die Detektion von Cyber-Angriffen bewertet. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 1.3 zusammengefasst. Die Überwachungsmaßnahmen in physikalischen Systemen basieren darauf, dass Residuen, also Abweichungen vom erwarteten Verhalten oder Zustand, gebildet und ausgewertet werden [28].

## Trivial

**Intervallüberwachung** ist die am häufigsten vertretene Überwachungsmaßnahme in industriellen Anlagen. Zum Schutz vor Schäden, werden für die gemessenen Größen zulässige Intervalle definiert, in denen sie im Normalbetrieb liegen müssen. Der Abgleich mit Intervallen kann nur im Betriebspunkt genutzt werden. Während dynamischer Systemzustände, beispielsweise bei Anfahr-, Abschalt- oder Anpassungsprozessen, liegen die Werte planmäßig außerhalb der Intervalle und die Überwachung bietet keinen Schutz. Spezielle Kombinationen der Werte können außerdem in einigen Fällen zu einer Gefährdung der Anlage führen, obwohl alle Werte innerhalb ihres zulässigen Intervalls liegen. Für die Fehler wird also die Vorannahme getroffen, dass Größen im Fehlerfall selbst außerhalb definierter Grenzen liegen, während die nicht fehlerbehafteten Größen ihre Intervalle einhalten. Die Detektion von Manipulationen ist sehr transparent und die Geschwindigkeit der Änderungen haben keinen Einfluss darauf. Der Rechenaufwand ist sehr gering. Die Detektionsgeschwindigkeit wird nur von der Baudrate begrenzt, wird aber üblicherweise geringer gewählt über die Bedingung, dass ein Intervall für einen definierten Zeitraum überschritten sein muss. Die Methode erfordert keine besondere Sensorsausstattung, kommt also mit vorhandenen Sensoren aus. Die Tiefe der Manipulationsdetektion ist gering. Zwar werden manipulierte Werte direkt auffallen, sofern sie die Intervalle überschreiten, sobald manipulierte Werte aber Einfluss auf Regelungen oder Steuerungen haben, werden auch in anderen Größen Überschreitungen auftreten und die Identifikation der manipulierten Werte wird schwierig. Von der Manipulation von Werten, die Einfluss auf das System haben, ist für den in dieser Arbeit betrachteten Fall von Cyber-Angriffen auszugehen. Dies betrifft auch die Detektion von Mehrfachfehlern, die nur richtig detektiert werden könnten, wenn die betroffenen Messungen unabhängig voneinander sind. Sind Abhängigkeiten von den manipulierten Größen vorhanden, wovon bei Cyber-Angriffen auszugehen ist, können auch zusammenhängende Größen falsch als fehlerbehaftet diagnostiziert werden. Der Mechanismus ist im normalen Betrieb sehr robust, weiß jedoch Schwächen auf, falls von Manipulationen betroffene Größen andere Größen beeinflussen. Die Intervallüberwachung wirkt kurativ, da im Fall von Intervallüberschreitungen durch Regelungen oder Steuerungen Maßnahmen zur Wiederherstellung eines sicheren Betriebszustandes ergriffen werden.

**Redundante Messungen** können zu einer sicheren Kenntnis des Systemzustands und genaueren Messwerten führen. Im einfachsten Fall werden mehrfach gemessene Werte korrigiert. Dieser Fall wird hier unter dem Punkt „Redundante Messungen“ betrachtet. Im komplexeren, hier nicht gemeinten Fall werden Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen gemessenen Größen genutzt. Diese sind Grundlage von Verfahren wie Data Reconciliation oder Kalman-Filter und werden aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften im folgenden als eigene Punkte betrachtet.

Redundante Messungen sind in der Regel unabhängig von der Dynamik des Prozesses und daher auch für dynamische Prozesse geeignet. Sie nutzen keine Vorannahmen zu den Fehlern. Es ist nur die entsprechende redundante Hardware-Instrumentierung, und damit zusätzliche Sensoren, notwendig. Die Detektion von Manipulationen ist sehr transparent und unabhängig von der Geschwindigkeit der Wertänderung. Der Rechenaufwand ist vernachlässigbar gering und die Detektion erfordert bei bekannten statistischen Eigenschaften der Sensoren keine Historie, was eine sehr schnelle Detektion ermöglicht. Redundante Messungen liefern direkt Ort und Umfang der Manipulation, weisen also eine große Tiefe bei der Fehlerdetektion, auch im Fall von Mehrfachfehlern, auf. Das Risiko liegt in der simultanen Manipulation aller Messungen der ausgewählten Größe, was durch eine uniforme Sensorausstattung begünstigt werden kann. Bei diverser Instrumentierung sind redundante Messungen sehr robust. Redundante Messungen wirken kurativ, weil in der Regel Mittelwerte der Messungen verwendet werden und Werte bei bekannten Sensordefekten verworfen werden.

## Modellbasiert

**Basierend auf paralleler Simulation** oder einem digitalen Zwilling werden Referenzwerte erzeugt, die mit den gemessenen Werten verglichen werden können. Zur Detektion von Sensor- und System-Fehlfunktionen oder Verschleiß, erfolgt ein Vergleich mit bekannten Fehlermustern [87] [88]. Vor allem in Produktionsanlagen, deren Umwelt- und Startbedingungen sehr genau bekannt sind, sind die Simulationen genau genug, um das System über den ausreichend langen Zeitraum zu beschreiben. Für Kraftwerke auf Basis erneuerbarer Energien sind die Umweltbedingungen allerdings schwer kontrollierbar. Das dynamische Verhalten des Systems wird in der parallelen Simulation abgebildet. Das System muss zur Fehlerdiagnose umfassend simuliert werden was einen sehr hohen Rechenaufwand bedingt. Das Vorhandensein eines Fehlers kann zwar ohne Vorannahmen diagnostiziert werden, die Bestimmung, welche Komponente von einer Fehlfunktion betroffen ist, erfolgt im klassischen Einsatz aber über Fehlermodelle, was Vorannahmen zu den Fehlern voraussetzt. Sofern keine Anpassung der Simulation an Messungen erfolgt, ist der Detektionsmechanismus transparent und unabhängig von der Geschwindigkeit von Änderungen. Falls während der Laufzeit eine Anpassung stattfindet, ist die Detektion nicht mehr transparent und langsame Änderungen können korrigiert und damit übersehen werden. Die Geschwindigkeit der klas-

sischen Detektion hängt von der Anzahl der zu vergleichenden Fehlermodelle ab, die hier im Unterschied zur Fehlerfrühdiagnose viele Größen enthalten können. Für den Einsatz gegen Cyber-Angriffe schränkt eine geringe Anzahl an Fehlermodellen die detektierbaren Manipulationen stark ein, weshalb hier, auch wegen der zu berücksichtigenden Mehrfachfehler, ein hoher Aufwand und damit eine langsame Detektion angenommen wird. Die Tiefe der Fehlerdetektion hängt ebenfalls vom Umfang und der Qualität der Fehlermodelle ab. Weicht allerdings, wegen der Manipulation von Stellgrößen oder unzureichend bekannten Umweltbedingungen, die Simulation stark vom Systemzustand ab, dürfte die Rekonstruktion schwierig werden. Dies führt für die Detektion von Cyber-Angriffen, insbesondere bei Kraftwerken auf Basis erneuerbarer Energien, zu einer sehr geringen Robustheit. Die Manipulationsdetektion auf Basis der parallelen Simulation wird auf vorhandene Sensoren zur Erfassung des Systemzustands angewandt. Es werden im Unterschied zu Fehlerfrühdiagnose keine zusätzlichen Sensoren zur gezielten Messung bestimmter Fehlerartefakte installiert. Da fehlerbehaftete Sensorwerte durch die simulierten Werte korrigiert werden können und durch Anpassung der Stellwerte unerwünschten Systemzuständen entgegen gewirkt werden kann, wirkt die Methode kurativ.

**Basierend auf Data Reconciliation** ist eine Anomaliedetektion möglich, die entweder die Residuen der Systemgleichungen oder Differenzen zwischen gemessenen/gesetzten und ihren optimierten Werten nutzt. Durch Data Reconciliation werden, bei ausreichender Redundanz in der Sensorausstattung, ungenaue Mess- und Stellwerte verbessert, also ihre statistischen Fehler reduziert. Das System wird durch ein mathematisches Systemmodell beschrieben, das physikalische Abhängigkeiten, Zwangsbedingungen, Erhaltungssätze und ähnliches enthält. Diese Systemgleichungen werden genutzt, um über eine Optimierung diejenigen Werte zu bestimmen, die bei Erfüllung der Systemgleichungen, die geringsten Abweichung zu den Mess- und Stellwerten aufweisen. Minimiert wird die Summe der Quadrate der Abweichungen [60]. Zur Fehlerdetektion werden die Gleichungsresiduen des mathematischen Systemmodells (Globaltest, Hypothesenstest) oder die Messwertabweichung, die Differenz zwischen optimierten und gemessenen/gesetzten Werten (Messwerttest) ausgewertet. Zur Anomaliedetektion wird beim Globaltest keine vollständige Rekonstruktion der Werte vorgenommen, sondern lediglich die Summe der Residuen der Systemgleichungen vor und nach Entfernen verdächtiger Größen ausgewertet [44]. Die Beschreibung erfolgt in Abschnitt 2.2.2. Beim Hypothesentest werden über die Systemgleichungen Residuen gebildet, die mit Erwartungswerten verglichen werden, die aus Hypothesen generiert wurden. Die Hypothesen umfassen hier, im Unterschied zu Expertensystemen, alle theoretisch möglichen Großfehler und Kombinationen fehlerbehafteter Größen. Die Höhe der Großfehler wird durch eine Normierung eliminiert [74]. Die Beschreibung des Hypothesentests erfolgt in Kapitel 2.2.3. Der Messwerttest nutzt die Abweichungen zwischen Messwerten und den reconcilierten, also auf das Systemmodell projizierten, Werten zur Detektion von Großfeh-

lern und zur Bestimmung der betroffenen Größen [86]. Eine genaue Beschreibung erfolgt in Abschnitt 2.2.1. Die klassische Data Reconciliation nutzt statische Systemzusammenhänge, die stationäre Betriebszustände in chemischen Anlagen ausreichend gut beschreiben. Es gibt aber zahlreiche Ansätze der Anwendung auf dynamische Systemzusammenhänge [14] [4] [43] [50] [91] [20] [8]. In Abschnitt 2.1.2 wird ein neuer, allgemeinerer Ansatz entwickelt. Die drei hier untersuchten Anomaliedektionsmethoden der Data Reconciliation kommen ohne Manipulationsmodelle aus. Der Hypothesentest untersucht zwar vordefinierte Fehlerhypothesen, diese sind aber so allgemein, dass sie keine Einschränkung der detektierbaren Fehler darstellen. Der Detektionsmechanismus ist bei allen drei Methoden sehr transparent, da sowohl die Herkunft der Testkriterien klar auf physikalische Gesetze zurückführbar, als auch ihre Anwendung nachvollziehbar ist. Da alle Detektionsmethoden die vollständige Erfüllung der Systemgleichungen fordern<sup>3</sup>, ist die Detektion nicht von der Änderungsgeschwindigkeit einer Anomalie bzw. Manipulation abhängig. Die Diagnose, dass ein Fehler vorhanden ist, ist bereits mit geringem Rechenaufwand möglich. Beim Rechenaufwand für die Bestimmung der manipulierten Variablen unterscheiden sich die drei Anomaliedektionsmethoden. Der Messwerttest erfordert eine Rekonstruktion der Messwerte für jede betrachtete Hypothese, was einen recht großen Rechenaufwand darstellt. Beim Globaltest werden die Residuen ausgewertet, die Systemgleichungen für die einzelnen Hypothesen können vorberechnet werden. Die Prüfung der einzelnen Hypothesen erfordert damit nur noch eine Matrixmultiplikation. Der Nachteil ist hier, dass die passenden Systemgleichungen nur bei ausreichender verbleibender Redundanz bestimmt werden können. Beim Hypothesentest werden ebenfalls die Residuen berechnet. Diese werden mit vorbereiteten Hypothesen zur normierten Ausprägung der Residuen bei konkreten Fehlerhypothesen verglichen. Der Rechenaufwand ist hier etwas höher als beim Globaltest, aber geringer als beim Messwerttest. Das Detektionsprinzip erlaubt eine schnelle Detektion, da im linearen System mit konzentrierten Parametern maximal ein historischer Wert erforderlich ist. Tatsächlich wird ein größerer Zeitabschnitt betrachtet, was bei einigen dynamischen Varianten tatsächlich notwendig ist, bei allen aber auch sinnvoll, um starke statistische Schwankungen auszugleichen und Fehlalarme durch statistische Fehler zu vermeiden. Ausgewertet werden vorhandene Sensoren, die den Systemzustand erfassen. Die drei betrachteten Detektionsmethoden der Data Reconciliation erlauben die Bestimmung der manipulierten Größen, auch bei der Manipulation mehrerer Größen, und weisen daher eine große Tiefe auf, was auch im klassischen Einsatz kurative Maßnahmen, wie das Ersetzen korrumpter Messungen durch virtuelle Sensoren erlaubt. Die Data Reconciliation als Methode zur Datenoptimierung ist ein sehr robustes Verfahren. Unter den Detektionsverfahren ist der Hypothesentest sehr robust, während der Globaltest und Messwerttest für die Detektion von Mehrfachfehlern eine ausreichende

<sup>3</sup>Unter den dyamischen Ansätzen der Data Reconciliation nimmt die Variante [8] so starke Anleihen beim Kalmanfilter, dass sie diese Bedingung nicht erfüllt und für die Anwendung gegen Cyber-Angriffe eher als Kalmanfilter zu betrachten ist. Der umfassende Vergleich ist in Abschnitt 2.5 dargestellt.

Redundanz in den Messungen voraussetzen. Allerdings wird für Mehrfachfehler eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit angenommen, die für unkorrelierte Sensorausfälle passend ist, während bei Cyber-Angriffen eher das Gegenteil gilt. Sind Geräte verbaut, die Ähnlichkeiten aufweisen, beeinflusst ein Angriff der ein Gerät manipuliert, mit hoher Wahrscheinlichkeit auch weitere, ähnliche Geräte.

**Basierend auf Kalman-Filter** erfolgt eine Anomaliedetektion durch die Einführung einer eigenen Variable, die durch den Filter-Prozess geschätzt wird. Der Kalman-Filter trifft eine Vorhersage der zukünftigen Werte aus den aktuellen Werten über ein mathematisches Modell und einen Korrekturterm der die tatsächlich erwarteten Werte schätzt. Diese vorhergesagten, korrigierten Werte werden im nächsten Zeitschritt mit den neuen Werten verglichen. Mit dem verbleibenden Schätzfehler wird der Korrekturterm angepasst und damit auch das abweichende Verhalten für zukünftige Vorhersagen in das Modell übernommen. Ziel des Kalman-Filters ist vorwiegend die Verbesserung sehr ungenauer Messwerte [45]. Für den Kalman-Filter werden verschiedene Formen der Beschreibung und Behandlung dynamischer Systeme genutzt, die alle seit geraumer Zeit für dynamische Systeme im Einsatz sind. Die Einführung möglicher Großfehler als Variable greift auf bekannte Fehler zurück und würde damit die detektierbaren Manipulationen stark einschränken. Vorgesehen ist beim Kalman-Filter also nur die Prüfung auf konkrete, vorhergesagte Fehler und deren Quantifizierung. Würde man, wie beim Hypothesentest, sehr grundlegende Hypothesen aufstellen, wäre eine allgemeingültige Detektion theoretisch denkbar. Für jede einzelne Hypothese müsste aber ein eigener Kalman-Filter mitgeführt werden, was zu einem hohen (Rechen-)Aufwand führt. Insbesondere für die große Zahl möglicher Fehler bei Manipulationen durch Cyber-Angriffe ergeben sich daraus Probleme. Durch den Optimierungsprozess werden Großfehler in einer Größe außerdem auf alle damit zusammenhängenden Größen verteilt, was die Bestimmung, welche der Größen fehlerbehaftet ist, deutlich erschwert und die eindeutige Detektion von Mehrfachfehlern unmöglich macht. Außerdem werden langsame Veränderungen durch den Korrekturterm der Optimierung korrigiert und dadurch der Anomaliedetektion entzogen. Eine langsam ansteigende Manipulation kann also nicht detektiert werden. Diese Korrektur führt, zusätzlich zum hohen Rechenaufwand, auch zu einer strukturell langsamen Detektion. Die Transparenz der Detektion ist aufgrund der beschriebenen Effekte der Optimierung gering. Während der Kalman-Filter zur Vorhersage und Optimierung der Messwerte selbst sehr robust ist, ist dies für die Anomaliedetektion aus den genannten Gründen nicht der Fall. Vorhandene Sensoren zur Bestimmung des Systemzustandes können durch den Kalman-Filter genutzt werden. Bezuglich der erwarteten Anomalien wirkt der Kalman-Filter kurativ.

**Basierend auf Petri-Netzen** lassen sich Fehlerzustände bzw. fehlerhaftes Verhalten erkennen. Petri-Netze stellen eine spezielle Form der Modellierung dar, die ursprünglich zur

Beschreibung informationstechnischer Systeme genutzt wird. Sie werden aber auch eingesetzt, um physikalische Systeme mit zeitdiskreten Zuständen und Übergänge zwischen diesen zu modellieren. Klassische Beispiele sind Produktionsanlagen und Warenautomaten. Dabei werden zeitdiskrete Systemzustände definiert und die Dynamik durch Übergänge zwischen den Zuständen abgebildet, die unter bestimmten Bedingungen erfolgen. Durch die Definition der möglichen und erlaubten Übergänge mit erlaubter Richtung und dem Abgleich mit dem Systemzustand zur Laufzeit, können Abweichungen vom erlaubten Systemverhalten und damit Fehler oder Manipulationen erkannt werden [1]. Es wird also ein Normalverhalten abgebildet. Fehlverhalten kann detektiert werden, wenn es zu verbotenen Zustandsübergängen oder zur Einnahme von Fehlerzuständen kommt. Für das dynamische Verhalten vieler Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien, ist die Modellierung über Petri-Netze aber leider zu ungenau. Petri-Netze modellieren Dynamik in Form zeitdiskreter Zustandsänderungen. Abhängig von der Art des Systems kann das eine adäquate Beschreibung der Dynamik erlauben oder nicht. Petri-Netze benötigen für die Fehlerdetektion Vorannahmen, weil die Fehlerzustände und verbotenen Übergänge im Modell vorhanden sein müssen. Mehrfachfehler können im Modell integriert und damit detektiert werden. Der Detektionsmechanismus ist transparent. Die Geschwindigkeit der Änderung hat in der Regel keinen Einfluss auf die Detektion. Der Rechenaufwand für die vereinfachte Modellierung durch Petri-Netze ist sehr gering, die Detektion von Fehlern kann schnell erfolgen. In wie weit diese Detektion, die in der Identifikation des Fehlerzustandes besteht, Rückschlüsse auf die Ursachen, also die manipulierten Werte, zulässt, hängt vom Modell ab. Die große Anzahl möglicher Großfehler steht auch hier eventuell einem Einsatz gegen Cyber-Angriffe entgegen. Die Robustheit von Petri-Netzen hängt davon ab, wie gut das System beschrieben wird. Die Vereinfachung zu zeitdiskreten Zuständen mit Übergängen führt zu einer höheren Stabilität verglichen mit detaillierteren Modellformen. Es können vorhandene Sensoren genutzt werden, die den Systemzustand erfassen. Eine kurative Wirkung ist möglich, wenn Übergänge aus einem Fehlerzustand heraus vorgesehen sind.

## Expertenwissensbasiert

**Basierend auf Fuzzy-Regeln** kann komplexes Expertenwissen zur Detektion von Fehlern in eine formal auswertbare Form gebracht werden. Fuzzy-Regeln stellen eine spezielle Form der Modellierung dar, wobei nicht das System in seiner Funktion, sondern das beobachtete Verhalten abgebildet wird. Zustände und Zustandseigenschaften werden als Mengen betrachtet, Mess- und Stellwerte oder ausgewählte Kombinationen als Datenpunkte, für die ein Grad der Zugehörigkeit zu den Mengen definiert wird. Die so fuzzifizierten Daten werden mit Abbildungsregeln verarbeitet, dabei sind insbesondere logische Operationen und Folgerungen üblich [41] [47]. Die Definition von Grundmengen und Abbildungsregeln erfolgt durch Expertenwissen oder durch neuronale Netze. Fuzzy-Logik kommt häufig in nichtli-

nearen oder schwer zu modellierenden Systemen zum Einsatz, die im Betrieb eine Regelung durch menschliche Experten erfordern. Für die Fehlerdetektion wird das Verhalten in erwarteten Fehlerfällen modelliert [41]. Sie nutzt also Vorannahmen. Über die Zugehörigkeitsgrade können auch Unschärfe und Wahrscheinlichkeiten repräsentiert werden. Detektierbar sind nur Fehler, die bekannt sind und modelliert wurden. Aufgrund der nicht-analytischen Modellbildung ist die Detektion und vor allem die Identifikation der betroffenen Komponente für unbekannter Fehler, wie sie bei Cyber-Angriffen auftreten, nicht möglich. Sofern das verwendete Expertenwissen das dynamische Verhalten umfasst, können Fehlermodelle für dynamisches Systemverhalten erstellt werden. Die Anwendung der Großfehlerdetektion ist zwar nachvollziehbar, da die Fehlerbeschreibung aber nicht auf analytischen Zusammenhängen basiert, ist die Detektion insgesamt wenig transparent. Die Detektion hängt nicht von der Änderungsgeschwindigkeit einer Manipulation ab. Der geringe Rechenaufwand und die schnelle Detektion von Fehlern ist ein großer Vorteil der Fuzzy-Regeln. Abhängig von der Differenziertheit der Beschreibung von Fehlern weist die Fehlerdetektion eine große Tiefe auf. Mehrfachfehler lassen sich nur detektieren, wenn sie entweder unabhängig voneinander sind oder direkt modelliert wurden. Die Frage nach der Robustheit lässt sich nicht allgemein beantworten. Fuzzy-Regeln wirken kurativ, weil von der identifizierten Zugehörigkeit zu Zuständen häufig Handlungs- oder Regelungsanweisungen abgeleitet werden.

**Fehlermodelle** beschreiben die Auswirkungen konkreter, bekannter Fehler, die teilweise mit zusätzlichen Sensoren erfasst werden. Solche Auswirkungen sind z.B. Schwingungen oder Geräusche der Anlage, Artefakte der Signale oder bestimmte Wertkombinationen der Signale [33]. Die Fehlermodelle werden meist aus Expertenwissen, gelegentlich auch aus Modellinformationen oder durch Neuronale Netze generiert. Diese Methode kann also nur bekannte Fehler detektieren, zu denen insbesondere erfolgreiche Cyber-Angriffe häufig nicht gehören. Fehlermodelle können sich auch auf dynamische Systemzusammenhänge beziehen. Aufgrund der in der Regel wenig transparenten Gewinnung der Fehlermodelle, ist die Detektion als intransparent zu betrachten. Da die Modelle konkrete Fehler beschreiben, weist die Detektion eine große Tiefe auf. Eine Abhängigkeit von der Änderungsgeschwindigkeit einer Anomalie besteht nicht. Der Rechenaufwand ist gering, weil nur Werte verglichen werden, ohne eine Simulation. Einer schnellen Detektion stehen auch keine weiteren grundlegenden Eigenschaften entgegen. Fehlermodelle können Werte vorhandener Sensoren nutzen, es werden aber auch zusätzliche Sensoren zur Überwachung erwarteter Artefakte installiert. Am häufigsten werden über Fehlermodelle Schwingungen überwacht [33] [61] [3]. Durch die Entkopplung einzelner Fehler durch die zusätzlichen Sensoren, wäre eine Detektion von Mehrfachfehlern einfach realisierbar, in der Regel werden Mehrfachfehler aber als unwahrscheinlich betrachtet und es wird nicht nach ihnen gesucht. Fehlermodelle werden sehr robust ausgelegt, sehen im Fehlerfall aber keine Gegenmaßnahmen vor, wirken also nur informativ.

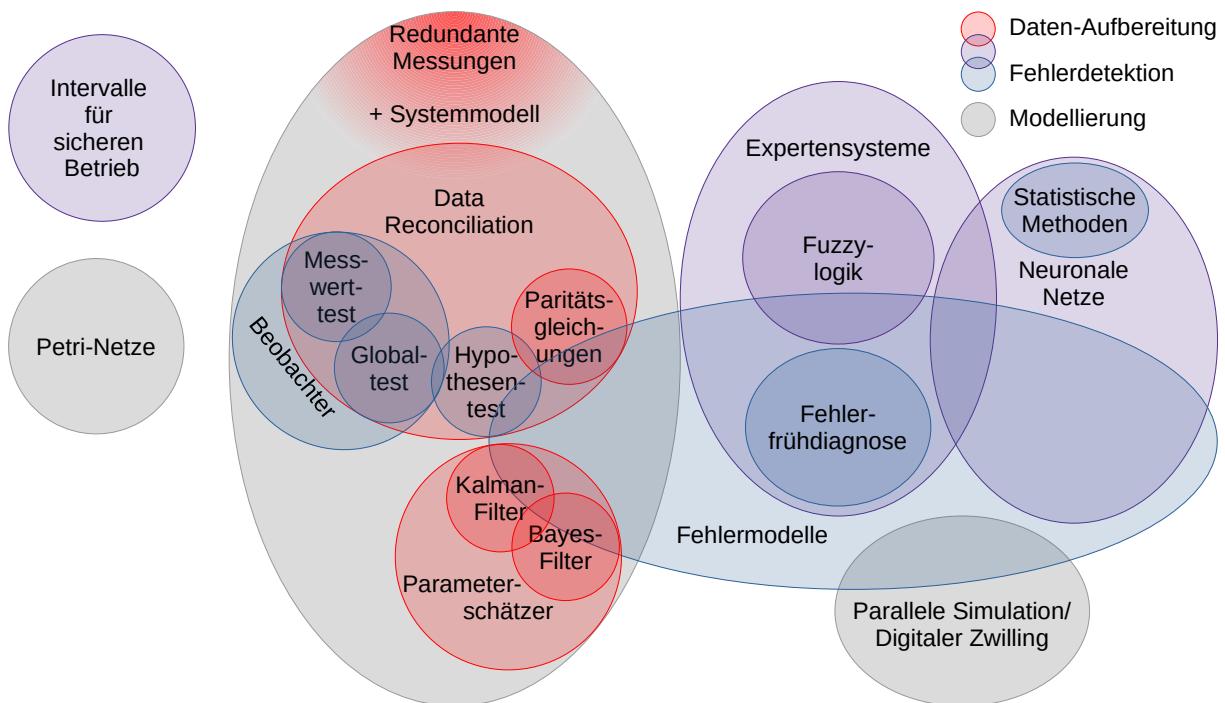
**Fehlerfrühdiagnose** gehört zu den Fehlermodellen. Im Unterschied zu diesen, werden für die Fehlerfrühdiagnose Artefakte beschrieben, die das baldige Auftreten eines erwarteten Defekts, beispielsweise eines Lagerschadens oder Werkzeugverschleiß, vorhersagen. Ziel ist, ungeplante Anlagenstillstände und Schäden durch Materialversagen zu vermeiden [21]. Die Ausrichtung ist klar präventiv. Auch hier müssen die detektierbaren Fehler vorher bekannt sein, was bei den gesuchten Cyber-Angriffen nicht gegeben ist. Analog zu den Fehlermodellen ist die Fehlerfrühdiagnose für dynamische Systeme und für unterschiedliche Fehlerdynamiken nutzbar, die Anomaliedetektion ist intransparent, aber tief und schnell mit geringem Rechenaufwand. Zusätzliche Sensoren werden für die Prognose von Fehlern häufig und zahlreich verwendet, was aufgrund der weitreichenden Entkopplung voneinander die Detektion von Mehrfachfehlern als zeitgleiche Einzelfehler erlaubt. Die robuste Auslegung ist wichtig, um das Ziel der Reduktion von Stillstandszeiten nicht zu konterkarieren.

## Datenbasiert

**Blackbox-Modelle/Klassifikatoren** können zur Fehlerdetektion eingesetzt werden, indem entweder bekannte Fehler gelabelt und trainiert werden, um im Anschluss entsprechende Systemzustände klassifizieren zu können, oder indem ein Normalzustand trainiert und Abweichungen davon als unbekannt klassifiziert werden. Blackbox-Modelle/Klassifikatoren wie z.B. Neuronale Netze sind lernende Klassifikationssysteme, die mit Hilfe von möglichst großen Beispieldatensätzen trainiert werden und damit theoretisch keine analytischen Erkenntnisse über das System oder Expertenwissen erfordern. Tatsächlich ist das Labeln der häufig sehr großen Datensätze mit sehr viel Aufwand verbunden und erfordert durchaus Vorkenntnisse. Die Anwendung auf dynamische Systeme ist möglich, wobei die vollständige Dynamik im Trainingsdatensatz enthalten sein muss. Zur Detektion von Fehlern müssen Trainingsdaten vorliegen, die entweder die gelabelten Fehler umfassen, oder vollständig frei sind von Fehlern. Beides ist nur für bekannte Fehler möglich, was für den Einsatz zur Detektion von Cyber-Angriffen mit möglicherweise unbekannten Auswirkungen, ein Problem darstellt. Für eine tiefe Fehlerdetektion ist das Training mit gelabelten Fehlern erforderlich, anderenfalls kann nur die Abweichung vom Normalbetrieb festgestellt werden, ohne Eingrenzung der Ursache. Auch Mehrfachfehler müssen explizit gelernt werden. Der Detektionsmechanismus ist in jeder Hinsicht intransparent. Eine systematische Abhängigkeit der Detektierbarkeit von der Änderungsgeschwindigkeit des Fehlers besteht nicht. Ein großer Vorteil neuronaler Netze ist der geringe Rechenaufwand in der Anwendungsphase gegenüber analytischen Lösungen und die schnelle Klassifikation und damit Detektion. Die Klassifikation kann anhand vorhandener Sensoren erfolgen und erfordert keine spezielle Instrumentierung. In Zuständen, die im Trainingsdatensatz enthalten sind, funktioniert die Klassifikation robust, außerhalb des trainierten Bereiches ist sie in hohem Maße unzuverlässig, weil durch das Blackbox-Modell keine analytischen Zusam-

menhänge modelliert werden. Für die Anwendung auf potentiell unbekannte Bedrohungen durch Cyber-Angriffe ist die Robustheit als gering zu bewerten. Da neuronale Netze im Fall unerwünschter Zustände auch zur Entscheidung über Gegenmaßnahmen genutzt werden, ist ihre Wirkung kurativ. [40] [71]

**Grundlegende statistische Methoden** werten die statischen Eigenschaften von Messwerten aus. Aus einer Änderung der statischen Eigenschaften wird auf einen Fehler in der betreffenden Größe geschlossen [76]. Dieses Verfahren wird auf vorhandene Sensoren angewandt und ist für statische Systemzustände vorgesehen. Es stellt keine Vorannahmen zu möglichen Fehlern auf, eine Detektion erfordert aber eine Änderung des statistischen Verhaltens einer Größe. Da dieses Verhalten mit dem vorangegangenen Zeitraum verglichen wird, benötigt die Detektion mehrere Zeitpunkte zur Bewertung und ist trotz des geringen Rechenaufwandes eher langsam. Auch können Fehler, die zu einer langsamen Veränderung der statistischen Eigenschaften führen, übersehen werden. Abgesehen davon sind statistische Methoden sehr robust und ermöglichen eine tiefe Fehlerdetektion, auch bei Mehrfachfehlern. Trotz der Abhängigkeit von vorangegangenen Werten ist der Detektionsmechanismus sehr transparent. Änderungen der statistischen Eigenschaften können schon vor Eintreten eines Schadens auftreten, die zeitverzögerte Bewertung steht der Nutzung zur Frühdiagnose aber eher entgegen.



**Abbildung 1.1:** Darstellung der Zugehörigkeiten und Verwandtschaften der physikalischen Modellierungs-, Datenaufbereitungs- und Fehlerdetektionsmethoden.

Anomaliedetektion auf Basis von...	Intervallen f. sicheren Betr.	Redundanten Messungen	Paralleler Simulation	Data Reconciliation	Kalman-Filtern	Petri-Netzen	Fuzzy-Regeln	Fehlernmodellen	Fehlerfrühdagnostik	Blackbox-Modelle/Klassifikatoren	statistische Methoden
Dynamische Prozesse	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Keine Fehlervorannahmen	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+
Transparenter Detektionsmechanismus	+	+	+	±	+	-	-	-	-	-	+
Keine Abh. von Manipulationsgeschwindigkeit	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	-
Angemessener Rechenaufwand	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+
Schnelle Detektion	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	-
Nutzung vorhandener Sensoren	+	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Tiefe der Fehlerdetektion	-	+	-	+	-	±	+	+	+	+	+
Robustheit	-	+	-	+	-	+	±	+	+	-	+
Mehrfachfehler	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+
Kurativ oder Präventiv	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-

**Tabelle 1.3:** Zusammenfassung der prinzipiellen Eignung der Detektionsmethoden für die Detektion von Cyber-Angriffen

+: Erfüllt Anforderung   -: Erfüllt Anforderung nicht

±: hängt von der konkreten Umsetzung oder dem Einsatzgebiet ab

## 1.4 Ziele und Gliederung der Arbeit

Informationstechnische Schutzmaßnahmen sind nicht auf einen hohen Schutz ausgelegt, wie er für cyber-physikalische Anlagen erforderlich ist. Das ist bedingt durch die Abwägung zwischen Höhe und (gefühlter) Wahrscheinlichkeit möglicher Schäden durch Cyber-Angriffe und Nachteile stärkerer Sicherheitsmaßnahmen wie hohe Entwicklungskosten oder eingeschränkte, weniger komfortable Nutzbarkeit des Systems.

Schutzmaßnahmen, die in aktuellen physikalischen Systemen die Sicherheit gewährleisten, berücksichtigen die zusätzliche, spezifische Gefährdung durch Cyber-Angriffe nicht. Durch die Vernetzung der cyber-physikalischen Systeme werden diese aber möglich und wahrscheinlich. Existierende spezifische Angriffe sind in Abschnitt 1.2 beschrieben.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die enge Verbindung zwischen informationstechnischem und physikalischem Teil, die für die spezielle Gefährdung der cyber-physikalischen Systeme sorgt, zu nutzen, um Cyber-Angriffe zu detektieren und die betroffenen Komponenten zu identifizieren. Dazu sollen auf physikalischen Zusammenhängen basierende Schutzmaßnahmen aus den klassischen physikalischen Systemen so weiterentwickelt werden, dass sie die neuen Eigenschaften von Cyber-Angriffen explizit berücksichtigen. Durch die zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge, die nicht gebrochen werden können, soll damit eine Detektion von Cyberangriffen ermöglicht werden, die auf unbekannte Manipulationen anspricht und vor allem die physikalischen Anlagenteile schützt. In Abschnitt 1.3.3 wurden die Anomaliedetectionsverfahren auf Basis der Data Reconciliation als am besten geeignet identifiziert, um auf Basis der physikalischen Bedingungen an die Mess- und Stellwerte eine Überwachung zur Detektion von Cyber-Angriffen und Bestimmung korrumpter Komponenten umzusetzen. Um auf Basis der Data Reconciliation eine Detektion von Cyber-Angriffen zu ermöglichen, sollen durch das hier neu entwickelte Verfahren zusätzlich Vorkenntnisse zu informationstechnischen Eigenschaften integriert werden. Die Identifikation der korrumptierten Komponenten ermöglicht damit in Verbindung mit den informationstechnischen Eigenschaften außerdem die Eingrenzung des Angriffsvektors und dadurch gezielte Gegenmaßnahmen.

In Kapitel 2 wird die klassische Data Reconciliation sowie Erweiterungen auf dynamische und nichtlineare Systeme vorgestellt und eine eigene, allgemeinere Lösung für dynamische Systeme entwickelt. Drei auf der Data Reconciliation aufbauende Großfehlerdetektionsverfahren werden als Grundlage für die neue Manipulationsdetektion vorgestellt und ihre Anwendbarkeit für nichtlineare Systeme diskutiert. Grenzen der Detektierbarkeit von Anomalien werden diskutiert und eine Möglichkeit zur Verbesserung aufgezeigt. Schließlich erfolgt ein Vergleich der verschiedenen Varianten der Data Reconciliation für dynamische Systemgleichungen hinsichtlich ihrer Eignung zur Detektion von Cyber-Angriffen. In Kapitel 3 wird das neue Detektionsverfahren für Cyber-Angriffe entwickelt. Nach Formulierung der Idee

erfolgt die formale Beschreibung und die Demonstration an zwei Standardbeispielen. In Kapitel 4 erfolgt die Evaluierung anhand des Realbeispiels eines regelbaren Ortsnetztransformators. Zusammenfassung und Ausblick folgen in Kapitel 5.

## 2 Grundlagen

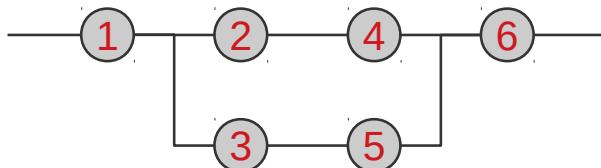
### 2.1 Data Reconciliation

Die Data Reconciliation ist ursprünglich ein Verfahren zur Verbesserung von Messwerten mit großen statistischen Fehlern über Redundanzen im System. Es kommt bereits seit den 70er Jahren in Anlagen der chemischen Industrie erfolgreich zum Einsatz und ermöglicht dort vorwiegend die Korrektur sehr ungenauer Sensoren, wie die Messung von Konzentrationen, sowie die Beobachtung von Größen, die einer direkten Messung nicht zugänglich sind. Aufbauend auf dieses Verfahren wurden Methoden entwickelt, die es erlauben, auf Basis der Messungen Sensorausfälle zu detektieren.

Der physikalische Anlagenteil erlaubt die Formulierung von Zusammenhängen und Regeln, die auf Erhaltungssätze und Naturgesetze zurückgehen und daher nicht gebrochen werden können. Der Anlagenzustand wird mit zahlreichen Sensoren erfasst und durch Stellgrößen charakterisiert, die über ein Anlagenmodell Redundanzen aufweisen. Sensormesswerte und Stellwerte werden bei diesem Verfahren analog behandelt. Für die Anwendung zur Abwehr von Cyber-Angriffen sind insbesondere die Detektionsmethoden für Sensorausfälle interessant.

Im Folgenden wird zunächst das Verfahren der Data Reconciliation eingeführt und erklärt. Anschließend werden die zweckbedingten Anforderungen an Anomaliedetectionsverfahren aufgestellt und auf die ausgewählten Methoden eingegangen.

#### 2.1.1 Lineare Statische Systeme



**Abbildung 2.1:** Standardbeispiel für lineare, statische Data Reconciliation: Kühlkreislauf mit sechs angeschlossenen Geräten

Zur Einführung der Data Reconciliation wird sie zunächst auf ein einfaches, lineares, statisches System angewendet. An einem Kühlwasserkreislauf sind sechs Geräte angeschlossen. In Abbildung 2.1 sind sie in Rot durchnummertiert. Gemessen wird die Durchflussmenge an jedem Gerät. Wird die Wassermenge als Erhaltungsgröße angenommen, lassen sich für die Messwerte Gleichungen aufstellen. An der linken Gabelung gilt, dass die Durchflussmenge durch Gerät 1 der Summe der Durchflussmengen durch die Geräte 2 und 3 entspricht. In den Zweigen gilt, dass die Durchflussmengen in Gerät 2 und 4 sowie die Durchflussmengen in Gerät 3 und 5 gleich sein müssen. An der rechten Gabel muss durch Gerät 6 die Summe der Mengen in den Geräten 4 und 5 fließen. Fasst man die Messwerte in einem Spaltenvektor  $y$  zusammen, erhält man für die Systemgleichung

$$\mathcal{A} \cdot y = 0 \quad (2.1)$$

mit der Systemmatrix

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

[60].

Um aus den Messwerten die Werte zu berechnen, die am Wahrscheinlichsten dem wahren Wert entsprechen, wird der Abstand zwischen gemessenen und reconcilierten Werten minimiert, mit der Nebenbedingung, dass die Systemgleichungen durch die reconcilierten Werte erfüllt sein muss. Die Abweichungen zwischen gemessenen und reconcilierten Werten werden dabei mit der sensorspezifischen Standardabweichung  $\sigma_i$  gewichtet, um die unterschiedlichen Genauigkeiten der Sensoren zu berücksichtigen. Bei Sensoren mit geringer Standardabweichung liefern Abweichungen einen deutlich größeren Beitrag als bei solchen mit großer Standardabweichung. Minimiert wird also die Funktion

$$\mathbf{J}(\hat{y}, \lambda) = (y - \hat{y})^T \cdot \mathbf{V}_y^{-1} \cdot (y - \hat{y}) - 2 \cdot \lambda^T \cdot \mathcal{A} \cdot \hat{y} \quad (2.3)$$

Wobei  $\mathbf{V}_y$  die Kovarianzmatrix der Messwerte  $y$  ist:  $\mathbf{V}_y = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \cdots \\ 0 & \sigma_2^2 & \cdots \\ \vdots & \ddots & \ddots \end{bmatrix}$

Variiert werden die reconcilierten Werte  $\hat{y}$  und der Lagrangemultiplikator  $\lambda$ .

$$\frac{\delta \mathbf{J}}{\delta \lambda} = \mathcal{A} \cdot \hat{y} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\delta J}{\delta \hat{y}} = -2 \cdot V_y^{-1} \cdot (y - \hat{y}) - 2 \cdot A^T \cdot \lambda = 0 \quad (2.5)$$

Diese Gleichung wird von links mit  $-1/2 \cdot V_y$  erweitert

$$y - \hat{y} + V_y \cdot A^T \cdot \lambda = 0 \quad (2.6)$$

Anschließend wird von links mit  $A$  erweitert und im zweiten Schritt die Nebenbedingung  $A \cdot \hat{y} = 0$  eingesetzt:

$$A \cdot y - A \cdot \hat{y} + A \cdot V_y \cdot A^T \cdot \lambda = A \cdot y + A \cdot V_y \cdot A^T \cdot \lambda = 0 \quad (2.7)$$

Damit ist

$$\lambda = - (A \cdot V_y \cdot A^T)^{-1} \cdot A \cdot y \quad (2.8)$$

Setzt man das in Gleichung 2.6 ein, erhält man

$$\hat{y} = y - V_y \cdot A^T \cdot (A \cdot V_y \cdot A^T)^{-1} \cdot A \cdot y \quad (2.9)$$

Die optimierten Werte können also über Multiplikation mit einer vorher berechneten Matrix  $W$  berechnet werden:

$$\hat{y} = (\mathbb{I} - V_y \cdot A^T \cdot (A \cdot V_y \cdot A^T)^{-1} \cdot A) \cdot y = W \cdot y \quad (2.10)$$

Tritt in den Systemgleichungen ein konstanter Anteil auf, lautet die Nebenbedingung:

$$A \cdot \hat{y} = c \quad (2.11)$$

Die oben beschriebene Herleitung unterscheidet sich ab dem Punkt an dem die Nebenbedingung eingesetzt wird:

$$A \cdot y - A \cdot \hat{y} + A \cdot V_y \cdot A^T \cdot \lambda = A \cdot y - c + A \cdot V_y \cdot A^T \cdot \lambda = 0 \quad (2.12)$$

Dadurch erhält man

$$\lambda = - (A \cdot V_y \cdot A^T)^{-1} \cdot (A \cdot y - c) \quad (2.13)$$

Einsetzen ergibt [60]

$$\hat{y} = y - \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}^T \cdot (\mathcal{A} \cdot \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}^T)^{-1} \cdot \mathcal{A} \cdot (\mathcal{A} \cdot y - c) \quad (2.14)$$

### Virtuelle Sensoren

Die Data Reconciliation kann auch mit Systemgrößen umgehen, die nicht direkt gemessen werden. Diese sogenannten virtuellen Sensoren können bei ausreichender Redundanz aus den anderen Größen berechnet werden. Dazu werden zunächst in der Systemgleichung gemessene Größen  $y$  und ungemessene Größen  $z$  getrennt [60].

$$\mathcal{A}_y \cdot \hat{y} + \mathcal{A}_z \cdot \hat{z} = 0 \quad (2.15)$$

Um daraus eine Nebenbedingung der Optimierung formen zu können, wird die Gleichung mit einer Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  multipliziert für die gilt:

$$\mathbf{P} \cdot \mathcal{A}_z = 0 \quad (2.16)$$

dadurch nimmt die Nebenbedingung die Form an

$$\mathbf{P} \cdot \mathcal{A}_y \cdot \hat{y} = 0 \quad (2.17)$$

Die Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  lässt sich mit Hilfe der Q-R-Zerlegung aus der Matrix  $\mathcal{A}_z$  bestimmen [60].

Die Q-R-Zerlegung besagt, dass jede  $m \times n$ -Matrix  $\mathcal{A}$  mit  $m > n$  und Rang  $n$  als Produkt zweier Matrizen dargestellt werden kann  $\mathcal{A} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{R}$ , von denen  $\mathbf{Q}$  eine orthogonale, unitäre Matrix ist und  $\mathbf{R}$  eine obere Dreiecksmatrix. Wird die Q-R-Zerlegung in Matlab durchgeführt, ist die ursprüngliche  $\mathbf{Q}$ -Matrix ( $\mathbf{Q}_1$ ) bereits mit zusätzlichen orthogonalen Spaltenvektoren ( $\mathbf{Q}_2$ ) auf quadratische Form ergänzt. Genau diese ergänzten Spaltenvektoren bilden, in transponierter Form, die gesuchte Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$ , da sie orthogonal zu allen in  $\mathcal{A}_z$  enthaltenen Vektoren sind. Die ursprüngliche R-Matrix ( $\mathbf{R}_1$ ) wird durch 0-Zeilen ( $\mathbf{R}_2$ ) ergänzt, um auf die passende Dimension zu kommen [60].

Das Optimierungsproblem lautet also

$$\mathbf{J}(\hat{y}, \hat{z}, \lambda) = (y - \hat{y})^T \cdot \mathbf{V}_y^{-1} \cdot (y - \hat{y}) - 2 \cdot \lambda^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathcal{A}_y \cdot \hat{y} \quad (2.18)$$

mit der Lösung, analog zur zuvor berechneten:

$$\hat{y} = \left( \mathbb{I} - \mathbf{V}_y \cdot (\mathbf{P} \cdot \mathcal{A}_y)^T \cdot \left( (\mathbf{P} \cdot \mathcal{A}_y) \cdot \mathbf{V}_y \cdot (\mathbf{P} \cdot \mathcal{A}_y)^T \right)^{-1} \cdot (\mathbf{P} \cdot \mathcal{A}_y) \right) \cdot y \quad (2.19)$$

Ist der Rang der Matrix  $\mathcal{A}_z$  kleiner als die Anzahl der ungemessenen Größen, kann ein Teil der Größen nicht beobachtet werden. Um zu ermitteln, welche der anderen ungemessenen Größen beobachtet werden können, wird die Systemgleichung von links mit  $\mathbf{Q}^T$  multipliziert [60].

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}^T \cdot \mathcal{A}_y & \mathbf{Q}^T \cdot \mathcal{A}_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.20)$$

Da sich  $\mathcal{A}_z$  durch  $\mathbf{Q} \cdot \mathbf{R}$  ausdrücken lässt, wird aus dem zweiten Element

$$\mathbf{Q}^T \cdot \mathcal{A}_z = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^T \\ \mathbf{Q}_2^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 & \mathbf{Q}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^T \cdot \mathbf{Q}_1 & \mathbf{Q}_1^T \cdot \mathbf{Q}_2 \\ \mathbf{Q}_2^T \cdot \mathbf{Q}_1 & \mathbf{Q}_2^T \cdot \mathbf{Q}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Da die Matrix  $\mathbf{Q}$  orthonormal ist gilt

$$\mathbf{Q}_1^T \cdot \mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q}_2^T \cdot \mathbf{Q}_2 = \mathbb{I} \quad (2.22)$$

und

$$\mathbf{Q}_1^T \cdot \mathbf{Q}_2 = \mathbf{Q}_2^T \cdot \mathbf{Q}_1 = 0 \quad (2.23)$$

$$\mathbf{Q}^T \cdot \mathcal{A}_z = \begin{bmatrix} \mathbb{I} & 0 \\ 0 & \mathbb{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Man erhält also

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^T \cdot \mathcal{A}_y & \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 \\ \mathbf{Q}_2^T \cdot \mathcal{A}_y & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{y} \\ \hat{z}_r \\ \hat{z}_{N-r} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.25)$$

Wobei  $z$  aufgeteilt wird in beobachtbare Größen  $\hat{z}_r$  und nicht rekonstruierbare und damit nicht beobachtbare Größen  $\hat{z}_{N-r}$ . Neben der modifizierten Systemgleichung

$$\mathbf{Q}_2^T \cdot \mathcal{A}_y \cdot \hat{y} = \mathbf{P} \cdot \mathcal{A}_y \cdot \hat{y} = 0 \quad (2.26)$$

erhält man daraus die Gleichung

$$\mathbf{Q}_1^T \cdot \mathcal{A}_y \cdot \hat{y} + \mathbf{R}_1 \cdot \hat{z}_r + \mathbf{R}_2 \cdot \hat{z}_{N-r} = 0 \quad (2.27)$$

Aufgelöst nach  $\hat{z}_r$  erhält man

$$\hat{z}_r = -\mathbf{R}_1^{-1} \cdot \mathbf{Q}_1^T \cdot \mathcal{A}_y \cdot \hat{y} - \mathbf{R}_1^{-1} \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \hat{z}_{N-r} \quad (2.28)$$

Da die Größen  $\hat{z}_{N-r}$  in keinem Fall beobachtet werden können, sind nur solche  $\hat{z}_r$  beobachtbar, für die  $\mathbf{R}_1^{-1} \cdot \mathbf{R}_2$  Nullzeilen aufweisen [60].

Matlab liefert bei der Q-R-Zerlegung direkt eine zusätzliche Matrix  $E$  mit, die die Vertauschungen liefert, die für die Umformung der Matrix  $R$  zur oberen Dreiecksmatrix vorgenommen wurden. Wird der Vektor  $z$  mit dieser Matrix multipliziert, werden die nicht messbaren Größen im Vektor nach unten sortiert. Ihre Anzahl entspricht der Anzahl der 0-Zeilen in der  $R$ -Matrix.

### 2.1.2 Lineare Dynamische Systeme

Lineare Dynamische Systeme mit dem Zustand  $x$  und den Eingangsgrößen  $u$  werden klassisch durch Systemgleichungen beschrieben, die statischen Gleichungen ähnlich sehen, aber zusätzlich für einen Teil der Größen Ableitungen enthalten [14]

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = \mathbf{A} \cdot \hat{x} + \mathbf{B} \cdot \hat{u} \quad (2.29)$$

Diese Gleichung kann so umgeformt werden, dass sie der oben gezeigten Systemgleichung mit konstanten Residuen 2.11 ähnlich sieht:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{B}] \cdot \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

In der Systemgleichung der dynamischen Systeme treten Ableitungen der Größen  $x$  auf, die in einem realen System nicht immer direkt zugänglich sind. Um die Reconciliation und die Manipulationsdetektion durchzuführen, müssen diese Ableitungen direkt oder indirekt bestimmt werden.

Ein Ansatz zum Umgang mit dynamischen Systemen in denen die Ableitungen  $\dot{x}$  direkt zugänglich sind, wird in Abschnitt 2.1.2 beschrieben.

Über die zeitdiskrete Darstellung werden in den folgenden Unterabschnitten ein neuer Ansatz entwickelt und die vorhandenen Methoden zusammengefasst. Als völlig anderer Ansatz wird außerdem die Polynomentwicklung der Zeitreihen vorgestellt. Ein Vergleich der Methoden erfolgt erst nach der Vorstellung und Diskussion von Anomaliedektionsmethoden

(Abschnitte 2.2 und 2.4) in Abschnitt 2.5, da die Leistungsfähigkeit, für die angestrebte Anwendung zur Detektion von Cyber-Angriffen, stark von ihren Auswirkungen auf die Anomaliedetektion abhängt.

### Lösung mit direkt zugänglichen Ableitungen $\dot{x}$

Ist die Ableitung der in  $x$  enthaltenen Größen direkt messbar, kann der Vektor mit den Messwerten  $y$  um die Ableitungen der Ausgangswerte erweitert werden [45]. Ausgehend von den Ausgangsvektoren  $x$  und den Eingangsvektoren  $u$ , deren wahre Werte weiterhin der Gleichung

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = \mathbf{A} \cdot \hat{x} + \mathbf{B} \cdot \hat{u} \quad (2.31)$$

gehören, wird ein Vektor  $y$  aufgebaut:

$$y = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ u \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Die zeitliche Ableitung des Vektors  $x$ , die auf der linken Seite der Systemgleichung steht, wird ausgedrückt durch

$$\dot{x} = [\mathbf{0} \quad \mathbb{I} \quad \mathbf{0}] \cdot y = \mathbf{Q} \cdot y \quad (2.33)$$

Die rechte Seite wird umgeformt zu

$$\mathbf{A} \cdot x + \mathbf{B} \cdot u = [\mathbf{A} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{B}] \cdot y \quad (2.34)$$

Damit vereinfacht sich die Systemgleichung, weil die Blockmatrizen verwendet werden können:

$$([\mathbf{A} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{B}] - \mathbf{Q}) \cdot \hat{y} = \underbrace{[\mathbf{A} \quad -\mathbb{I} \quad \mathbf{B}]}_{\mathcal{A}_{dyn}} \cdot \hat{y} = 0 \quad (2.35)$$

Das ermöglicht eine Optimierung nach dem Schema des statischen Systems.

$$\hat{y} = (\mathbb{I} - \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}_{dyn}^T \cdot (\mathcal{A}_{dyn} \cdot \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}_{dyn}^T)^{-1} \cdot \mathcal{A}_{dyn}) \cdot y \quad (2.36)$$

[45]

Dieses Vorgehen löst allerdings nicht die Frage nach den Ableitungen der Messgrößen sowie deren Varianz. In einigen Fällen, wie beispielsweise bei mechanischen Bewegungen, kann die Ableitung direkt gemessen werden. In vielen Fällen muss sie aus den Werten der Messgröße selbst bestimmt werden. Die Bestimmung der Ableitung kann in einigen Fällen über die Anpassung einer Funktion an die Messdaten erfolgen. Für eine allgemeinere Behandlung der Dynamik, direkt in Systemgleichung und Optimierung, kann die zeitdiskrete Darstellung der Gleichung verwendet werden.

### Zeitdiskrete Darstellung

Messwerte liegen in der Regel als Zeitreihen und damit zeitdiskret vor. Die dynamische Systemgleichung lässt sich ebenfalls zeitdiskret darstellen. Das heißt anstelle der Ableitung, treten in der Gleichung, für die betreffenden Größen, Werte zweier Zeitpunkte auf.

$$\hat{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \cdot \hat{x}(k) + \mathbf{B}_d \cdot \hat{u}(k) \quad (2.37)$$

[45]

Die Matrizen  $\mathbf{A}_d$  und  $\mathbf{B}_d$  lassen sich mit der Abtastrate  $T_s$  und Wahl eines Haltglieds aus der zeit-kontinuierlichen Darstellung berechnen.

### Direkte (Zeit-)Diskrete Dynamische Data Reconciliation (D4R)

Bei der direkten zeitdiskreten dynamischen Data Reconciliation wird der Mess- und Stellwertvektor so gewählt, dass die Werte zweier Zeitpunkte enthalten sind

$$y_t = \begin{bmatrix} x(k) & u(k) & x(k+1) & u(k+1) \end{bmatrix}^T \quad (2.38)$$

wobei  $x(k)$  und  $u(k)$  aus mehreren Elementen bestehen. Die explizite Einbindung von Ableitungen ist nicht mehr erforderlich. Der zeitlich folgende Punkt kann dann, anders als die Ableitung, durch eine Matrixmultiplikation mit dem Mess- und Stellwertvektor ausgewählt werden in der Form  $x(k+1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbb{I} & 0 \end{bmatrix} \cdot y_t$ .

Daraus erhält man die Systemgleichung in der Form

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d & -\mathbb{I} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{u}(k) \\ \hat{x}(k+1) \\ \hat{u}(k+1) \end{bmatrix} = \mathcal{A}_{dyn} \cdot \hat{y}_t = 0 \quad (2.39)$$

Dafür ist die Lösung der Reconciliation bereits bekannt:

$$\hat{y}_t = \left( \mathbb{I} - \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}_{dyn}^T (\mathcal{A}_{dyn} \cdot \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}_{dyn}^T)^{-1} \cdot \mathcal{A}_{dyn} \right) \cdot y_t \quad (2.40)$$

Auch die Bestimmung der Kovarianzmatrix stellt hier keine besondere Herausforderung dar, weil die Werte nur direkt auftreten und nicht in Form von Ableitungen. Für die Reconciliation können die Werte mehrerer Zeitpunkte berücksichtigt werden, was die statistischen Fehler stärker reduziert als die ausschließliche Nutzung von System-Redundanzen. Das liegt daran, dass die Regression auf mehr Messwerte gestützt wird und die Varianz, abhängig von den Zusammenhängen zwischen den Größen, stark sinkt. Im Fall direkter Redundanz sinkt die Varianz für die einzelnen Messwerte bei Berücksichtigung von  $n$  Werten beispielsweise um den Faktor  $n^{-2}$ .

Wird der Mess- und Stellwertvektor um weitere Zeitpunkte erweitert, können die statistischen Fehler durch Nutzung der dynamischen Systemgleichungen weiter reduziert werden. Die Systemgleichung wird dann zu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d & -\mathbb{I} & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d & -\mathbb{I} & \ddots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{u}(k) \\ \hat{x}(k+1) \\ \hat{u}(k+1) \\ \vdots \end{bmatrix} = 0 \quad (2.41)$$

Zusätzlich können statische Systemzusammenhänge der Form

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{u}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{C} \cdot \hat{x}(k) + \mathbf{D} \cdot \hat{u}(k)$$

berücksichtigt werden. Matrizen  $\mathbf{C}$  und  $\mathbf{D}$  sind dabei in der kontinuierlichen und der zeitdiskreten Darstellung identisch. Zur Berücksichtigung der statischen Systemgleichungen erweitert sich die Gleichung zu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d & -\mathbb{I} & 0 & 0 & \cdots \\ \mathbf{C} - \begin{bmatrix} \mathbb{I}_x \\ 0_u \end{bmatrix} & \mathbf{D} - \begin{bmatrix} 0_x \\ \mathbb{I}_u \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d & -\mathbb{I} & \ddots \\ 0 & 0 & \mathbf{C} - \begin{bmatrix} \mathbb{I}_x \\ 0_u \end{bmatrix} & \mathbf{D} - \begin{bmatrix} 0_x \\ \mathbb{I}_u \end{bmatrix} & 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{u}(k) \\ \hat{x}(k+1) \\ \hat{u}(k+1) \\ \vdots \end{bmatrix} = 0 \quad (2.42)$$

Das Problem ist, dass die gleichzeitige Berücksichtigung vieler Zeitpunkte zu sehr großen Matrizen führt, so dass die Abschnitte nicht zu groß gewählt werden dürfen. Zur Großfehlerdetektion stehen die Residuen der Systemgleichungen und die Messwertabweichungen, also die Differenz zwischen den gemessenen und den reconcilierten Daten, zur Verfügung.

### Zwei-Schritt-Reconciliation mit Mittelwertbildung (ZSM)

Für Systeme deren Gleichungen dem Schema  $x(k) = x(k - 1) + \mathbf{B}_d \cdot u(k)$  folgen, wurde die Idee, Werte zweier Zeitpunkte in den Variablen-Vektoren  $x_t$  und  $u_t$  zu berücksichtigen, bereits gezeigt [72]. Dabei werden jeweils die benachbarten Werte reconciliert und für den betrachteten Wert dann der Mittelwert gebildet aus der Reconciliation mit dem vorhergehenden und der Reconciliation mit dem nachfolgenden Wert. Durch diese Mittelwertbildung erfüllen die optimierten Werte die Systemgleichungen in der Regel nicht vollständig.

Die direkte Berücksichtigung mehrerer Zeitschritte wurde bereits in [20] publiziert. Die Systemgleichung ist jedoch auf das Schema, das auch ZSM verwendet, beschränkt, das heißt Systemmatrix  $\mathbf{A}_d$  ist die Einheitsmatrix. Im Folgenden wird dieser Ansatz gemeinsam betrachtet mit dem allgemeineren, neu entwickelten, der in Abschnitt „Direkte (Zeit-)Diskrete Dynamische Data Reconciliation (D4R)“ beschrieben ist.

### Differenzen als Variablen (DV)

In einem weiteren Ansatz werden in [91] die Differenzen benachbarter Werte als zusätzliche Variablen in die Variablenvektoren aufgenommen. Die Systemmatrizen werden entsprechend angepasst. Dies führt zu einer statischen Systembeschreibung, für die die Lösung bekannt ist. Der Ansatz wird nur für ein spezielles Modell gezeigt und ist nicht allgemein gültig. Obwohl der erweiterte Variablensatz die angepasste Systemgleichung erfüllt, muss bedacht werden, dass für die Größen, die nur als Differenzen enthalten sind, auch nur die Differenzen reconciliert werden. Werden wie in [91] jeweils nur zwei Zeitpunkte berücksichtigt, ist das nicht problematisch. Bei einer Reconciliation größerer Zeitabschnitte würden die reconcilierten Werte langsam drifteten und sich von den wahren Werten entfernen.

### Polynomentwicklung (PEW)

In [14] wird ein Ansatz zur Berücksichtigung dynamischer Systemzusammenhänge verfolgt, bei dem die Eingangsgrößen  $u_t$  und die Zustandsgrößen  $x_t$  in Polynome entwickelt werden:

$$x_t = \sum_{k=0}^s \alpha_k \cdot t^k \quad (2.43)$$

$$u_t = \sum_{k=0}^s \beta_k \cdot t^k \quad (2.44)$$

Die Ableitung der Ausgangsgrößen lässt sich dann einfach berechnen, wobei das erste Element der Summe verschwindet.

$$\dot{x}_t = \sum_{k=0}^s \alpha_k \cdot k \cdot t^{k-1} = \sum_{k=0}^{s-1} \alpha_{k+1} \cdot (k+1) \cdot t^k \quad (2.45)$$

Die Systemgleichung wird dann zu

$$\sum_{k=0}^{s-1} \alpha_{k+1} \cdot (k+1) \cdot t^k = \mathbf{A} \cdot \left( \sum_{k=0}^s \alpha_k \cdot t^k \right) + \mathbf{B} \cdot \left( \sum_{k=0}^s \beta_k \cdot t^k \right) \quad (2.46)$$

Da die Gleichung für alle Zeitpunkte  $t$  und alle Ordnungen der Polynomentwicklung gilt, muss sie für jeden Summanden  $k$  einzeln gelten.

$$(k+1) \cdot \alpha_{k+1} = \mathbf{A} \cdot \alpha_k + \mathbf{B} \cdot \beta_k \quad (2.47)$$

für

$$k = 0, \dots, s-1 \quad (2.48)$$

Beim letzten Element ( $k = s$ ) verschwinden beide Seiten der Gleichung.

Minimiert wird auch hier die Differenz zwischen gemessenem und reconciliertem Wert, gewichtet mit der Standardabweichung. Nebenbedingung ist auch weiterhin die Systemgleichung, die zu diesem Zweck etwas umgeformt wird.

Da die Vektoren  $\alpha_k$  und  $\beta_k$  mit der Zeit  $t$  kommutieren, können sie nach links gezogen werden. Die Matrizen, die als Faktoren vor den Summen stehen, können unter die Summe gezogen werden. Schließlich werden die Summen über  $s$  durch eine Vektor- und Matrixmultiplikation ersetzt. Die Einheitsmatrix ist mit dem Index  $M$  gekennzeichnet, um darzustellen, dass ihre Dimension der Anzahl der Messpunkte pro Zeitpunkt entspricht und um sie von der Einheitsmatrix  $\mathbb{I}_O$  zu unterscheiden, deren Dimension der Ordnung der Reihenentwicklung, also  $s+1$ , entspricht, sowie von der Einheitsmatrix  $\mathbb{I}_t$ , deren Dimension der Anzahl der berücksichtigten Messzeitpunkte entspricht [14]. Das verwendete Tensorprodukt  $\otimes^1$  wird in der Fußzeile beschrieben.

$$\mathbf{A} \cdot \left( \sum_{k=0}^s \alpha_k \cdot t^k \right) = \left( \sum_{k=0}^s \mathbf{A} \cdot \alpha_k \cdot t^k \right) = \left( \begin{bmatrix} 1 & t^1 & \dots & t^s \end{bmatrix} \otimes \mathbb{I}_M \right) \cdot (\mathbb{I}_O \otimes \mathbf{A}) \cdot \alpha \quad (2.49)$$

---

<sup>1</sup>Das Symbol des Tensorprodukts steht für die Multiplikation jedes einzelnen Elements der einen Matrix mit der jeweils anderen:  $[a \ b] \otimes \begin{bmatrix} c & d \\ e & f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot c & a \cdot d & b \cdot c & b \cdot d \\ a \cdot e & a \cdot f & b \cdot g & b \cdot f \end{bmatrix}$

$$\mathbf{B} \cdot \left( \sum_{k=0}^s \beta_k \cdot t^k \right) = \left( [1 \quad t^1 \quad \dots \quad t^s] \otimes \mathbb{I}_M \right) \cdot (\mathbb{I}_O \otimes \mathbf{B}) \cdot \beta \quad (2.50)$$

Auch die linke Seite der Systemgleichung, die Ableitung der Ausgangswerte wird in die Form

$$\sum_{k=0}^{s-1} \alpha_{k+1} \cdot (k+1) \cdot t^k = \left( [1 \quad t^1 \quad \dots \quad t^s] \otimes \mathbb{I}_M \right) \cdot \mathbf{D} \cdot \alpha \quad (2.51)$$

gebracht. Die Matrix D nimmt die folgende Form an

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & 3 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & \ddots & s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \otimes \mathbb{I}_M \quad (2.52)$$

Die Systemgleichung lässt sich damit umformen zu

$$\left( [1 \quad t^1 \quad \dots \quad t^s] \otimes \mathbb{I}_M \right) \cdot ((\mathbb{I}_O \otimes \mathbf{A} - \mathbf{D}) \cdot \alpha + (\mathbb{I}_O \otimes \mathbf{B}) \cdot \beta) = 0 \quad (2.53)$$

Der Zeitvektor kann gekürzt werden, ohne die Bedingungen der Systemgleichung zu verändern.

$$((\mathbb{I}_O \otimes \mathbf{A}) - \mathbf{D}) \cdot \alpha + (\mathbb{I}_O \otimes \mathbf{B}) \cdot \beta \quad (2.54)$$

Schließlich lassen sich die Vektoren  $\alpha$  und  $\beta$  noch zu einem Vektor zusammenfassen.

$$\left[ ((\mathbb{I}_O \otimes \mathbf{A}) - \mathbf{D}) \quad (\mathbb{I}_O \otimes \mathbf{B}) \right] \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Für die Taylorentwicklung der Messwerte, also die Bestimmung der Koeffizienten  $\alpha_k$  und  $\beta_k$ , müssen die Messwerte zu mehreren Zeitpunkten  $t = 0 \dots t_n$  berücksichtigt werden. Zunächst wird dazu wieder die Summe über  $s$  als Vektor- bzw. Matrixmultiplikation dargestellt

$$x_t = \sum_{k=0}^s \alpha_k \cdot t^k = \begin{bmatrix} \mathbb{I}_M & \mathbb{I}_M \cdot t^1 & \mathbb{I}_M \cdot t^2 & \cdots & \mathbb{I}_M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_s \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} 1 & t^1 & \cdots & t^s \end{bmatrix} \otimes \mathbb{I}_M \right) \cdot \alpha \quad (2.56)$$

Dann wird der Zeitvektor zu einer Matrix erweitert, indem für jeden Zeitpunkt eine neue Zeile angelegt wird:

$$\mathbf{T} = \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & t_1 & t_1^2 & \cdots & t_1^s \\ 1 & t_2 & t_2^2 & \cdots & t_2^s \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & t_n & t_n^2 & \cdots & t_n^s \end{bmatrix} \otimes \mathbb{I}_M \right) = \begin{bmatrix} \mathbb{I}_M & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbb{I}_M & \mathbb{I}_M \cdot t_1 & \mathbb{I}_M \cdot t_1^2 & \cdots & \mathbb{I}_M \cdot t_1^s \\ \mathbb{I}_M & \mathbb{I}_M \cdot t_2 & \mathbb{I}_M \cdot t_2^2 & \cdots & \mathbb{I}_M \cdot t_2^s \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbb{I}_M & \mathbb{I}_M \cdot t_n & \mathbb{I}_M \cdot t_n^2 & \cdots & \mathbb{I}_M \cdot t_n^s \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Nun gilt für

$$x_t(t_1 \dots t_n) = \mathbf{T} \cdot \alpha \quad (2.58)$$

Die Messwerte  $x_t$  werden also durch die Summen der mit den Entwicklungsfaktoren  $\alpha$  gewichteten Potenzen der Zeit  $t$  ausgedrückt. Die Entwicklung in die Taylorreihe erfolgt nun sehr einfach, indem die verrauschten Messwerte mit der Pseudoinversen der Zeitmatrix  $\mathbf{T}$  multipliziert werden.

$$\mathbf{T}^{-1} \cdot x_t(t_1 \dots t_n) = \alpha \quad (2.59)$$

Aus dem Optimierungsproblem unter Berücksichtigung der Varianzmatrizen  $\mathbf{V}$

$$\min \left( (\hat{x}_t - x_t)^T \cdot \mathbf{V}_x^{-1} \cdot (\hat{x}_t - x_t) + (\hat{u}_t - u_t)^T \cdot \mathbf{V}_u^{-1} \cdot (\hat{u}_t - u_t) \right) \quad (2.60)$$

mit der Nebenbedingung

$$\mathbf{A} \cdot \hat{x}_t - \frac{d\hat{x}_t}{dt} + \mathbf{B} \cdot \hat{u}_t = 0 \quad (2.61)$$

wird

$$\begin{aligned}
\min(\mathbf{J}) &= \min\left((\mathbf{T} \cdot \hat{\alpha} - \mathbf{T} \cdot \alpha)^T \cdot \mathbf{V}_x^{-1} \cdot (\mathbf{T} \cdot \hat{\alpha} - \mathbf{T} \cdot \alpha) + (\mathbf{T} \cdot \hat{\beta} - \mathbf{T} \cdot \beta)^T \cdot \mathbf{V}_u^{-1} \cdot (\mathbf{T} \cdot \hat{\beta} - \mathbf{T} \cdot \beta)\right) \\
&= \min\left((\hat{\alpha} - \alpha)^T \cdot \mathbf{V}_x^{-1} \cdot (\hat{\alpha} - \alpha) + (\hat{\beta} - \beta)^T \cdot \mathbf{V}_u^{-1} \cdot (\hat{\beta} - \beta)\right) \\
&= \min\left(\left(\begin{bmatrix}\hat{\alpha}^T & \hat{\beta}^T\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\alpha^T & \beta^T\end{bmatrix}\right) \cdot \begin{bmatrix}\mathbf{V}_x^{-1} & 0 \\ 0 & \mathbf{V}_u^{-1}\end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix}\hat{\alpha}^T \\ \hat{\beta}^T\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\alpha^T \\ \beta^T\end{bmatrix}\right)\right) \tag{2.62} \\
&= \min\left(\left(\begin{bmatrix}\hat{\alpha}^T & \hat{\beta}^T\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\alpha^T & \beta^T\end{bmatrix}\right) \cdot \mathbf{V}_y^{-1} \cdot \left(\begin{bmatrix}\hat{\alpha}^T \\ \hat{\beta}^T\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\alpha^T \\ \beta^T\end{bmatrix}\right)\right)
\end{aligned}$$

mit der Nebenbedingung

$$\left[\begin{pmatrix} (\mathbb{I}_O \otimes \mathbf{A}) - \mathbf{D} & (\mathbb{I}_O \otimes \mathbf{B}) \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{bmatrix}\right] = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{bmatrix} = 0 \tag{2.63}$$

Die Berechnung wurde vorher dargestellt. In dieser Form werden die Analogien zu den linearen statischen Systemen deutlich. Gemäß der Herleitung dort ist die Lösung der Optimierung:

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\left(\mathbb{I}_{M \cdot O} - \mathbf{V}_y \cdot \mathbf{M}^T \cdot (\mathbf{M} \cdot \mathbf{V}_y \cdot \mathbf{M}^T)^{-1} \cdot \mathbf{M}\right)}_{W_{Taylor-Faktoren}} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \tag{2.64}$$

Um zurück in die Basis der Ein- und Ausgangswerte  $\hat{u}(t)$  und  $\hat{x}(t)$  zu kommen, müssen die Vektoren  $\hat{\alpha}$  und  $\hat{\beta}$  mit den Zeitmatrizen  $\mathbf{T}$  multipliziert werden. Für die nicht reconcilierten Vektoren von  $\alpha$  und  $\beta$  wird die Taylorentwicklung eingesetzt. Die Lösung der Optimierung lautet also

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{u} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{T} & 0 \\ 0 & \mathbf{T} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{bmatrix}}_W = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & 0 \\ 0 & \mathbf{T} \end{bmatrix} \cdot \left(\mathbb{I}_{M \cdot O} - \mathbf{V}_y \cdot \mathbf{M}^T \cdot (\mathbf{M} \cdot \mathbf{V}_y \cdot \mathbf{M}^T)^{-1} \cdot \mathbf{M}\right) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{T}^+ & 0 \\ 0 & \mathbf{T}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_t \\ u_t \end{bmatrix} \tag{2.65}$$

[14]

Die beschriebene Methode löst direkt auch die Frage nach der Ableitung.

Für die später, in Kapitel 2.2, vorgestellten Detektionsmethoden zur Erkennung von Angriffen durch False-Data-Injektion, werden je nach Methode die Messwertabweichungen, also

die Differenz zwischen gemessenem und reconciliertem Wert, oder die Residuen der Systemgleichung  $r = \mathbf{A} \cdot y \left( \stackrel{!}{=} 0 \right)$ . Bezogen auf die hier vorgestellte Darstellung erhält man für die Messwertabweichung:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ u_t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{x}_t \\ \hat{u}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & 0 \\ 0 & \mathbf{T} \end{bmatrix} \cdot \left( \mathbf{V}_y \cdot \mathbf{M}^T \cdot (\mathbf{M} \cdot \mathbf{V}_y \cdot \mathbf{M}^T)^{-1} \cdot \mathbf{M} \right) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{T}^+ & 0 \\ 0 & \mathbf{T}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_t \\ u_t \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

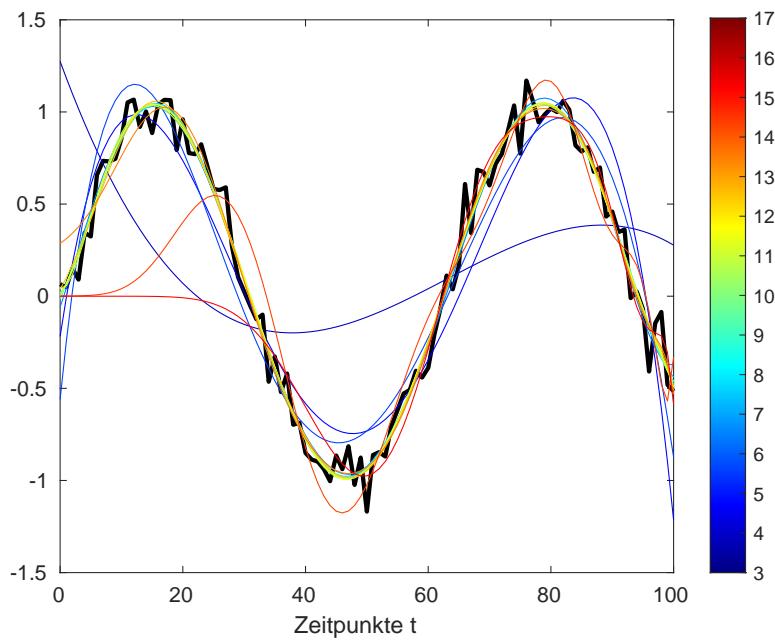
Die Berechnung der Residuen wird von Gleichung 2.63 abgeleitet:

$$\underbrace{\mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{bmatrix}}_{\mathcal{A}_{Taylor-Faktoren}} = 0 \quad \Rightarrow \quad r = \underbrace{\mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{T}^+ & 0 \\ 0 & \mathbf{T}^+ \end{bmatrix}}_{\mathcal{A}} \cdot \begin{bmatrix} x_t \\ u_t \end{bmatrix} \quad \left( \stackrel{!}{=} 0 \right) \quad (2.67)$$

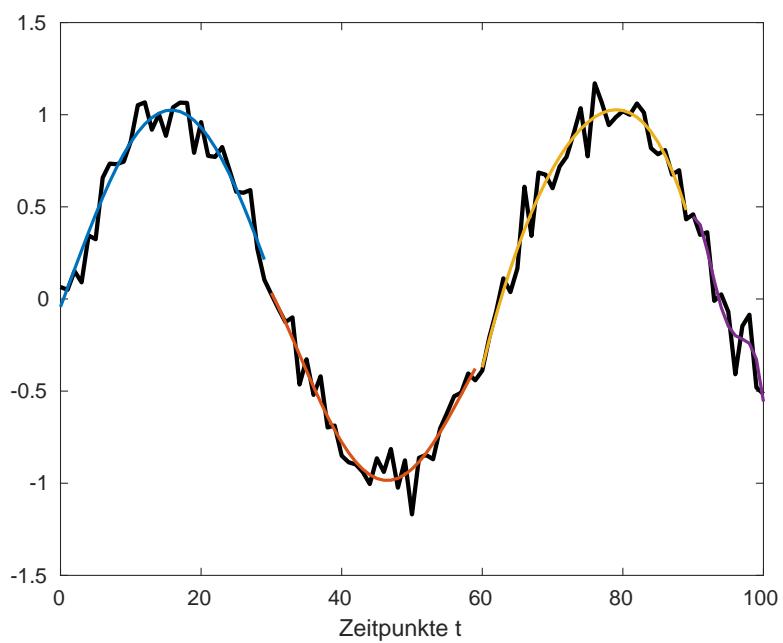
Die Leistungsfähigkeit dieser Methode hängt allerdings sehr stark von der Wahl der Ordnung der Taylorentwicklung in Relation zur Länge des berücksichtigten Zeitabschnitts ab. Ist die Ordnung des Polynoms klein, verglichen mit der Anzahl der Zeitpunkte, ist die Kurve des Polynoms deutlich glatter, als die der Messwerte. Ist sie groß, wird der vordere Zeitbereich zunehmend schlechter und der hintere Zeitbereich besser abgebildet, weil die höheren auftretenden Potenzen in der Zeit das Gewicht der späteren Zeitwerte bei der Entwicklung erhöhen (Abb. 2.2). Die Wahl der Ordnung ist also ein zusätzliches Problem. In beiden Fällen kann die Kurve in den Randbereichen deutliche Abweichungen vom Verlauf der Messungen aufweisen. Da jeder zusätzlich berücksichtigte Zeitpunkt zu einer Vergrößerung der Matrizen führt, können immer nur Abschnitte des Zustandsverlaufs betrachtet werden. Die stetige Verbindung der Abschnitte ist dabei explizit nicht möglich. Auch das erschwert den Einsatz in der Praxis.

In Abb. 2.3 sind in schwarz 101 verdeckte Messpunkte zu sehen. In den Regenbogenfarben Blau bis Rot sind die Taylorentwicklungen zu den Messpunkten von der 3. bis zur 17. Ordnung aufgetragen. Bei der 3. Ordnung ist deutlich zu erkennen, dass die Daten nicht beschrieben werden. Auch bei der Entwicklung 4. und 5. Ordnung sind noch deutliche Abweichungen zu erkennen. Geeignet zu sein scheinen die Entwicklungen 6. bis 15. Ordnung. Ab der 16. Ordnung werden vor allem die vorderen Werte sehr unzureichend beschrieben.

Die Messwerte werden abschnittsweise in ein Polynom entwickelt, wie in Abbildung 2.3 angedeutet. An den Übergängen zwischen den einzelnen Abschnitten können dabei Sprünge auftreten.



**Abbildung 2.2:** Reihenentwicklung in unterschiedliche Ordnungen



**Abbildung 2.3:** Reihenentwicklung in Abschnitten

### 2.1.3 Nichtlineare Systeme

Treten in den Gleichungen beispielsweise Produkte der Messgrößen, Potenzen oder trigonometrische Funktionen auf, werden die Systeme als nichtlinear bezeichnet. Sie lassen sich dann im Allgemeinen nicht in die Form  $\mathcal{A} \cdot x = 0$  bringen. Für die Reconciliation kann weiterhin das Verfahren der Lagrange-Multiplikatoren eingesetzt werden. Anders als bisher lassen sich aber nicht alle Systemgleichungen zu einer einzigen Bedingung zusammenfassen, sondern jede der Gleichungen stellt eine eigene Bedingung dar, die mit einem eigenen Lagrange-Multiplikator zu dem Funktional addiert wird, das minimiert werden soll. Die Differenzen zwischen gemessenen und reconcilierten Werten werden in Summe minimiert. Falls die Ableitungen geschlossen berechnet werden können, spielt der erhöhte Rechenaufwand keine Rolle, da die Matrizen für die Optimierung vorberechnet werden können.

Die Nebenbedingungen liegen als Gleichungen vor in der Form

$$\begin{aligned} f(x_{1\dots n}, \dot{x}_{1\dots n}, u_{1\dots m}) &= c \\ g(x_{1\dots n}, \dot{x}_{1\dots n}, u_{1\dots m}) &= d \\ h(x_{1\dots n}, \dot{x}_{1\dots n}, u_{1\dots m}) &= e \end{aligned} \tag{2.68}$$

Minimiert wird die Summe

$$\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sigma_{x_i}^{-2} \cdot x_i + \sum_{i=1}^m u_i \cdot \sigma_{u_i}^{-2} \cdot u_i \tag{2.69}$$

Daraus ergibt sich das Funktional

$$\begin{aligned} J(x_{1\dots n}, \dot{x}_{1\dots n}, u_{1\dots m}, \lambda_{1\dots l}) &= \\ \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sigma_{x_i}^{-2} \cdot x_i + \sum_{i=1}^m u_i \cdot \sigma_{u_i}^{-2} \cdot u_i - \lambda_1 \cdot (f(x_{1\dots n}, \dot{x}_{1\dots n}, u_{1\dots m}) - c) - \\ \lambda_2 \cdot (g(x_{1\dots n}, \dot{x}_{1\dots n}, u_{1\dots m}) - c) - \lambda_3 \cdot (h(x_{1\dots n}, \dot{x}_{1\dots n}, u_{1\dots m}) - c) - \dots \end{aligned} \tag{2.70}$$

das minimiert wird, indem die Ableitungen nach jedem  $x_i$ ,  $u_i$  und  $\lambda_i$  gleich Null gesetzt werden und geprüft wird, ob es sich um ein Minimum handelt.

Abhängig von der Beschaffenheit der Funktionen kann auch die Nutzung anderer Optimierungsverfahren notwendig oder sinnvoll sein. Ist die Berechnung einer Ableitung sehr aufwändig, kann beispielsweise ein iteratives Verfahren wie das Downhill-Simplex-Verfahren genutzt werden.

## 2.2 Detektionsmethoden

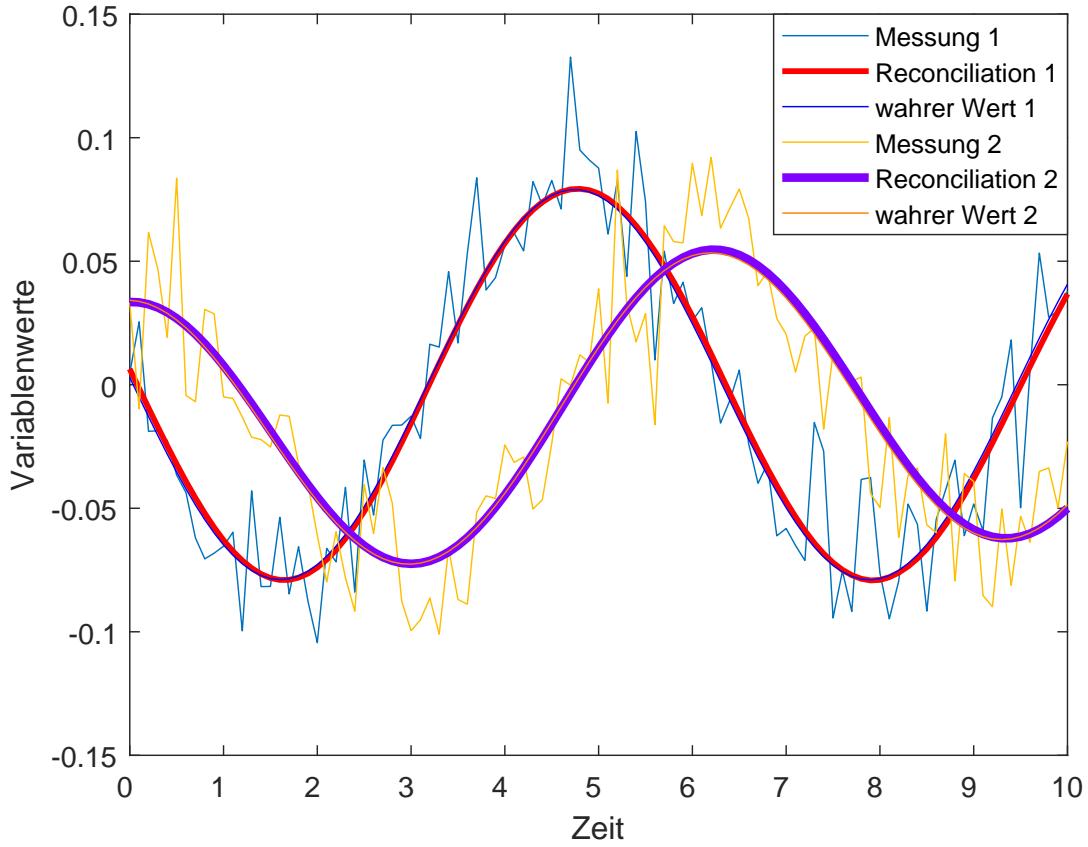
Basierend auf der Data Reconciliation gibt es verschiedene Methoden zur Detektion von Fehlern, die nicht auf statistische Schwankungen zurückzuführen sind. Ihr Ziel ist bisher, Sensorausfälle schnell und zuverlässig zu erkennen. Wie in Abschnitt 1.3.3 dargestellt, sind sie aufgrund ihrer Eigenschaften, vielversprechend als Ausgangsbasis für die Anwendung zur Detektion von Cyber-Angriffen. Von großer Bedeutung ist insbesondere die Identifikation des betroffenen Sensors oder Aktors. Diese Bestimmung oder zumindest Eingrenzung der betroffenen Komponente wird in dieser Arbeit kurz als Lokalisierung des Fehlers oder der Manipulation bezeichnet. Im Folgenden werden die drei vielversprechenden Methoden Messwerttest, Globaltest und Hypothesentest in ihrer Grundform vorgestellt.

Um die Bedeutung der Data Reconciliation für die Detektion zu verstehen, muss zunächst untersucht werden, was passiert, wenn in einer Größe ein Offset auftritt. Die Werte der fehlerbehafteten Größe werden durch die Reconciliation in Richtung der wahren Werte verschoben. Gleichzeitig werden aber die Werte von Größen, die mit der fehlerbehafteten Größe zusammenhängen, ebenfalls verschoben, was in der Regel dazu führt, dass sie sich von ihren wahren Werten entfernen.

Die Abbildung 2.4 zeigt die Auswirkungen der Data Reconciliation bei fehlendem Offset. Die dünnen, glatten Linien zeigen die wahren Werte, die in diesem Fall bekannt sind, weil es sich um ein Simulationsbeispiel handelt. Die mit Rauschen behafteten zugehörigen Messwerte sind ebenfalls mit dünnen Linien dargestellt. Die reconcilierten Werte (dicke Linien) folgen den wahren Werten sehr gut. In Abbildung 2.5 wurde auf Messgröße 2 ein Offset von 0,05 aufmodelliert. Die reconcilierten Werte für Größe 2 sind gegenüber den Messwerten in Richtung der wahren Werte verschoben. Die reconcilierten Werte der ersten Größe werden dagegen von ihren wahren Werten, ebenso wie von der Messung, geringfügig entfernt. Da das System neben den abgebildeten noch vier weitere Größen ohne Offset enthält, ist die Verschiebung der fehlerbehafteten Größe 2 deutlich ausgeprägter.

### 2.2.1 Messwerttest

Beim Messwerttest wird ausgewertet, wie stark die einzelnen Messwerte durch die Reconciliation verschoben werden. Die Messwertanpassung ist die Differenz aus gemessenem und



**Abbildung 2.4:** Auswirkung der Data Reconciliation ohne Offset

reconciliertem Wert

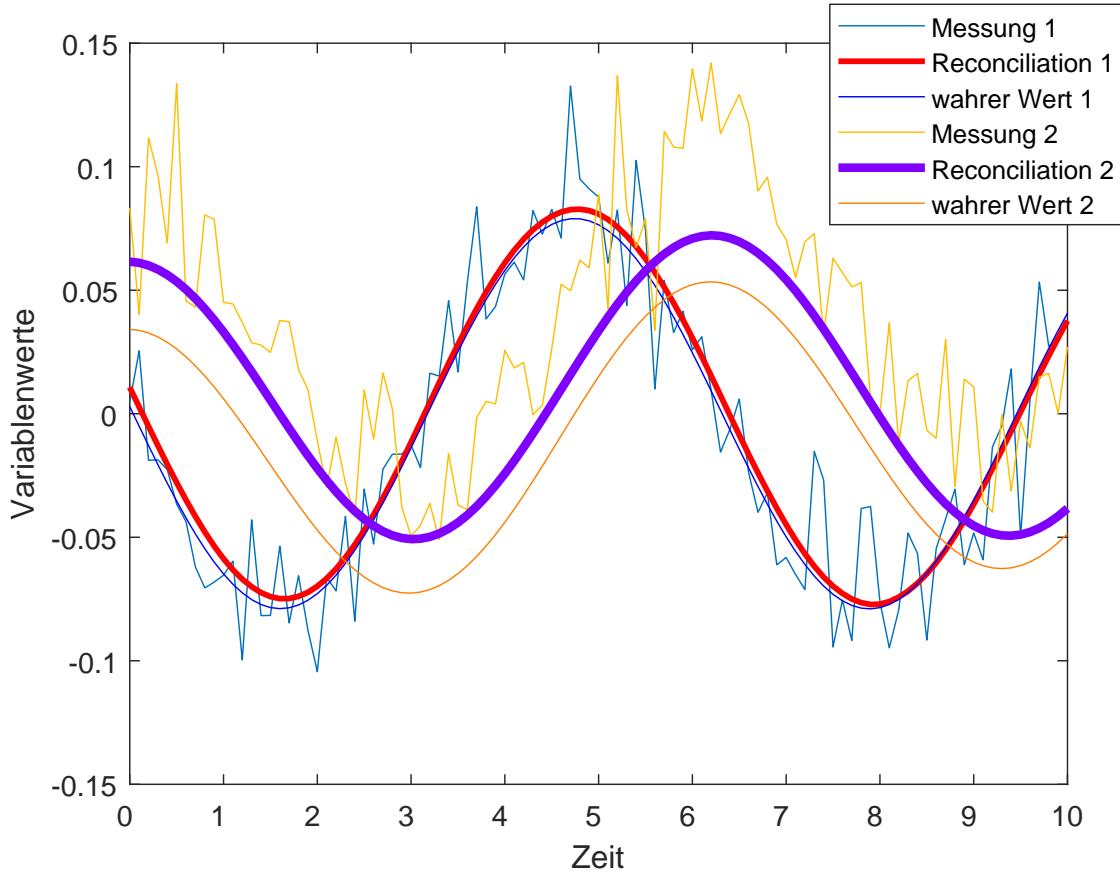
$$a = y - \hat{y} \quad (2.71)$$

Bei einer Normalverteilung der statistischen Messwertfehler, lässt sich für die Höhe der Messwertanpassung ebenfalls eine Verteilung bestimmen. Damit lässt sich berechnen, wie wahrscheinlich das Auftreten der beobachteten Messwertanpassung unter den gegebenen Bedingungen ist [86].

Wird in Gleichung 2.71 die Berechnung des reconcilierten Wertes (Gleichung 2.9) eingesetzt, hängt die Gleichung nur noch von den Messwerten  $y$  ab:

$$a = y - \left( y - V_y \cdot A^T \cdot (A \cdot V_y \cdot A^T)^{-1} \cdot A \cdot y \right) = \underbrace{V_y \cdot A^T \cdot (A \cdot V_y \cdot A^T)^{-1} \cdot A \cdot y}_{\text{Projektionsmatrix } P_m} \quad (2.72)$$

Dies lässt sich als Projektion des Messwertvektors  $y$  auf die Messwertabweichung  $a$  betrachten. Damit lässt sich auch die Kovarianzmatrix  $V_y$  auf die Messwertabweichung projizieren, um die Auswirkung der statistischen Fehler der Messwerte  $y$  auf die Messwertabweichung  $a$  zu ermitteln.



**Abbildung 2.5:** Auswirkung der Data Reconciliation mit Offset in Messgröße 2

$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_a &= \underbrace{\mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}^T \cdot (\mathcal{A} \cdot \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}^T)^{-1} \cdot \mathcal{A} \cdot \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}^T}_{P_m} \cdot \underbrace{(\mathcal{A}^T \cdot \mathbf{V}_y^T \cdot \mathcal{A})^{-1} \cdot \mathcal{A} \cdot \mathbf{V}_y^T}_{P_m^T} \\
 &= \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}^T \cdot (\mathcal{A}^T \cdot \mathbf{V}_y^T \cdot \mathcal{A})^{-1} \cdot \mathcal{A} \cdot \mathbf{V}_y^T
 \end{aligned} \tag{2.73}$$

Alternativ lässt sich die Kovarianz-Matrix  $\mathbf{V}_a$  der Messwertabweichungen aus der Kovarianz-Matrix der Residuen  $r$ ,  $\mathbf{V}_r$  berechnen, wie in [86] dargestellt. Die Residuen  $r$  ergeben sich aus der Systemgleichung  $\mathbf{y} \cdot \mathcal{A} = r$ , wenn die Variablenwerte  $y$ , mit statistischen Fehlern und möglicherweise mit Großfehlern behaftet sind. Die Matrix  $\mathbf{V}_r$  lässt sich direkt aus der modifizierten Systemgleichung berechnen. Dazu wird Matrix  $\mathcal{A}$  als Projektionsmatrix interpretiert, die den Vektor  $y$  in eine andere Basis überführt, in der  $y$  die Form  $r$  annimmt. Die Überführung der Matrix  $\mathbf{V}_y$  ist dann definiert als  $\mathcal{A} \cdot \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}^T = \mathbf{V}_r$ . Einsetzen ergibt

$$\mathbf{a} = \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot r \tag{2.74}$$

Die Kovarianzmatrix der Differenz zwischen gemessenen und reconcilierten Werten lässt sich analog berechnen. Man erhält

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_a &= \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot \mathbf{V}_r \cdot \mathbf{V}_r^{T-1} \cdot \mathcal{A} \cdot \mathbf{V}_y^T \\ &= \mathbf{V}_y \cdot \mathcal{A}^T \cdot \mathbf{V}_r^{T-1} \cdot \mathcal{A} \cdot \mathbf{V}_y^T \end{aligned} \quad (2.75)$$

[86]

Falls in den Messwerten nur statistische Fehler vorhanden sind, sind im linearen System diese, und damit die Abweichung von der Systemgleichung  $r$ , um Null herum normalverteilt, weil die Linearkombination mehrerer Normalverteilungen wieder zu einer Normalverteilung führt (Faltungsinvarianz). Da sich die Differenz zwischen gemessenem und reconciliertem Wert  $a$  auf ein Produkt aus  $r$  und konstanten Matrizen zurückführen lässt, muss sie auch um Null herum normalverteilt sein, wobei die Diagonalelemente von  $\mathbf{V}_a$  die Breite der Verteilung angeben. Bei nichtlinearen Systemen liefert jede Gleichung ein Residuum.  $r_i = f_i(y) - c_i$ . Die Standardabweichung dieser Residuen kann über gaußsche Fehlerfortpflanzung berechnet werden gemäß  $\Delta r_i = \sum_{y_j} \frac{\partial f_i}{\partial y_j} \cdot \Delta y_j$ . Der neue Fehler wird also auch hier zurückgeführt auf eine Summe von normalverteilten Ausgangsfehlern, womit er aufgrund der Faltungsinvarianz ebenfalls normalverteilt ist.

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Genauigkeit verschiedener Sensoren und Messwerte, kann eine normierte Version von  $a$  verwendet werden. Die Prüfgröße des Messwerttests ist im Fall einer diagonalen Varianzmatrix  $\mathbf{V}_a$ :

$$z_{a,j} = \frac{a_j}{\sqrt{V_{a;jj}}} \quad (2.76)$$

Diese Größe folgt einer Normalverteilung der Breite 1. Die Wahrscheinlichkeit, dass die beobachtete Abweichung noch mit der Hypothese rein statistischer Fehler kompatibel ist, lässt sich nun aus der Gaußkurve berechnen. Die Wahrscheinlichkeit, dass  $z_{a,j}$  in einem bestimmten Intervall liegt, ist das Integral der Gaußkurve über das Intervall. Der Schwellwert legt auch die Wahrscheinlichkeit für einen Fehlalarm (Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit) fest. Sie entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass der Abstand vom Mittelwert der Verteilung (hier der Abstand von 0) ohne Großfehler größer wird als der Schwellwert. Um die Messwerte zu vergleichen, wird bestimmt, wie hoch die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit wäre, wenn dieser Wert als Schwellwert eingesetzt werden würde. Berechnet wird dazu die Summe der Integrale von  $-\infty$  bis  $-z_{a,j}$  und von  $z_{a,j}$  bis  $+\infty$ . Aufgrund der Symmetrie der Gaußkurve kann auch eines der Integrale berechnet und verdoppelt werden. In Matlab ist die Verteilungsfunktion der Gaußkurve und damit das Integral direkt verfügbar. In diesem Fall wird

entweder die Differenz des Funktionswerts  $z_{a,j}$  von 1 oder der Funktionswert von  $-z_{a,j}$  verdoppelt [86].

Tatsächlich wird bei der Auswertung des Zustandes aber nicht nur ein Messwerttest durchgeführt, sondern so viele Tests wie Messgrößen und damit auswertbare Abweichungen vorhanden sind. Die Wahrscheinlichkeit eines Fehlalarms ist damit deutlich höher als für den einzelnen Test. Anstelle der Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit für den Einzeltest, dem Signifikanzlevel der Normalverteilung  $\alpha$ , erhält man die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit für m Tests  $\beta = 1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{m}}$ .

Die Matrix  $V_y$  ist meist eine diagonale Varianzmatrix der Messungen, weil die statistischen Fehler der einzelnen Messungen unabhängig voneinander sind. Bestehen Abhängigkeiten zwischen den Größen, ist die Matrix  $V_y$  also eine Kovarianzmatrix mit nicht diagonalen Elementen, kann es aussagekräftiger sein anstelle der Messwertanpassung  $a$  die Größe

$$d = V_y^{-1} \cdot a \quad (2.77)$$

zu verwenden. Größen, deren statistische Fehler andere Größen beeinflussen, erhalten dadurch ein höheres Gewicht. Die Varianzmatrix dieser Größe lässt sich aus Gleichung 2.75 berechnen:

$$V_d = V_y^{-1T} \cdot V_a^{-1} \cdot V_y^{-1} = A^T \cdot (A^T \cdot V_y^T \cdot A)^{-1} \cdot A \quad (2.78)$$

[86].

Für die Detektion von Cyber-Angriffen ist es wahrscheinlich, dass von einem Angriff mehrere Messwerte gleichzeitig betroffen sind. Beim Messwerttest kann die Detektion von Mehrfachfehlern sequentiell erfolgen. Für jeden Messwert entsteht eine Messwertabweichung, die zu einer Prüfgröße  $z_{a,j}$  oder  $z_{d,j}$  führt. Damit kann hier die am wahrscheinlichsten fehlerbehaftete Messgröße ausgemacht werden. Um mit dem Messwerttest Mehrfachfehler detektieren zu können, wird die als fehlerbehaftet identifizierte Größe entfernt und stattdessen als virtueller Sensor behandelt wie in 2.1.1 beschrieben. Mit diesem neuen Satz an Messungen wird der Messwerttest erneut durchgeführt, bis keine weiteren Großfehler mehr detektiert werden. Ein virtueller Sensor weist dabei keine Messwertanpassung auf, da er ähnlich berechnet wird wie der reconcilierte Wert, nur ohne die Berücksichtigung des zugehörigen Messwerts [86].

## 2.2.2 Globaltest

Beim Globaltest werden die quadrierten Residuen, gewichtet mit ihrer Varianzmatrix, ausgewertet [44] [5]. Die Residuen sind die Abweichungen von den Systemgleichungen:  $A \cdot y = r$

$$\gamma = r^T \cdot V_r^{-1} \cdot r \quad (2.79)$$

Die Größe  $\gamma$  folgt, bei Abwesenheit eines nicht statistischen Fehlers, näherungsweise einer  $\chi^2$ -Verteilung, deren Freiheitsgrad dem Rang der Systemmatrix  $\mathcal{A}$  entspricht. Bei vollem Rang von  $\mathcal{A}$  entspricht das also der Länge des Residuenvektors  $r$  [44] [5].

Der  $\chi^2$ -Test prüft, ob die gemessenen Datenpunkte  $n$  einer vermuteten Verteilung folgen. Für die Hypothese, dass lediglich statistische Fehler vorhanden sind, sollten die Beträge der Residuen im Mittel den Wurzeln der Varianzen entsprechen, im Durchschnitt aber den Wert 0 annehmen. Die  $\chi^2$ -Verteilung ist allgemein definiert als

$$\chi^2 = \sum_n \frac{(\text{beobachtete Verteilung} - \text{erwartete Verteilung})^2}{\text{erwartete Verteilung}} \quad (2.80)$$

Da in diesem Fall ein Unterschied besteht zwischen dem Betrag des zu erwartenden Wertes und seinem Durchschnitt, wird hier die folgende Definition verwendet, für eine  $\chi^2$ -Verteilte Größe  $h$ :

$$h = \sum_n \frac{(r - \mu_r)^2}{\sigma_r} \quad (2.81)$$

Mit dem Mittelwert  $\mu_r = 0$  und der Varianz  $\sigma_r$ . Da die Residuen  $r$  nicht unabhängig sind voneinander, wird anstelle der einzelnen Varianzwerte  $\sigma_r$  die Matrix  $V_r$  genutzt, die nicht diagonal ist. Man erhält also

$$h = (r - 0)^T \cdot V_r^{-1} \cdot (r - 0) = r^T \cdot V_r^{-1} \cdot r = \gamma \quad (2.82)$$

[44] [5]

Über die Dichtefunktion der  $\chi^2$ -Verteilung kann die Wahrscheinlichkeit dafür berechnet werden, dass die beobachtete Verteilung von  $r$  mit der Hypothese nicht übereinstimmt. Die Wahrscheinlichkeit, dass sie mit der Hypothese übereinstimmt, berechnet sich dann aus der Differenz zu 1 [44] [5].

Der Globaltest liefert nicht direkt eine mögliche Ursache für Abweichungen. Um hier Größen mit Offsets zu identifizieren, müssen die Größen einzeln entfernt werden und damit die Prüfgröße  $\gamma$  des Globaltests berechnet werden. Sinkt die Prüfgröße durch das Entfernen einer Größe, bringt diese mutmaßlich den Fehler in das System. Sofern ausreichend Redundanzen im System vorhanden sind, lassen sich auch Mehrfachfehler detektieren, indem die Prüfgröße verglichen wird, wenn mehrere Größen entfernt wurden. Das System muss dazu auch in der reduzierten Form beobachtbar sein. Die Varianzmatrix muss jeweils für das reduzierte System bestimmt werden:  $V_{r\_red} = \mathcal{A}_{red} \cdot V_{y\_red} \cdot \mathcal{A}_{red}^T$

### 2.2.3 Hypothesentest

Beim Hypothesentest werden ebenfalls die Residuen der Gleichungen ausgewertet. Das Vorgehen unterscheidet sich aber deutlich vom Globaltest. Zunächst werden Hypothesen über die Residuen  $r$  für den Fall aufgestellt, dass nur statistische Fehler vorhanden sind oder dass in einer der Größen ein Offset auftritt [55]. Für die Hypothese rein statistischer Fehler lautet der Erwartungswert:

$$H_0 : \langle r \rangle = 0 \quad (2.83)$$

Für die Hypothese  $H_1$ , ein Fehler vorhanden, wird die Hypothese ermittelt, indem in ein Testarray  $e_i$ , das anstelle des Arrays der Mess- und Stellwerte  $y$  eingesetzt wird, für alle Messgrößen 0 eingesetzt wird, bis auf die, auf die sich die Hypothese bezieht. Bei linearen Systemen wird also anstelle von  $\mathcal{A} \cdot y = r$  angesetzt:

$$\mathcal{A} \cdot e_j = f_j \quad (2.84)$$

$$\text{also } f_1 = \mathcal{A} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad f_2 = \mathcal{A} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \text{usw.}$$

Der Vektor  $f_j$  enthält dann ein Muster, das im Fall eines linearen Systems dem Erwartungswert der Residuen entspricht [55].

Geht man von einem normalverteilten statistischen Fehler aus, kann die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Residuen  $r$  unter der Hypothese  $H_0$ , kein zusätzlicher Fehler vorhanden, oder  $H_1$ , Offset vorhanden, über die Dichtefunktion der Gaußverteilung berechnet werden.

$$f(x|\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.85)$$

Für die beiden Hypothesen erhält man also

$$Pr\{r|H_0\} = \sqrt{\frac{\mathbf{V}_r^{-1}}{2\pi}} \cdot e^{-0.5 \cdot r^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot r} \quad (2.86)$$

$$Pr\{r|H_1\} = \sqrt{\frac{\mathbf{V}_r^{-1}}{2\pi}} \cdot e^{-0.5 \cdot (r - b \cdot f_k)^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot (r - b \cdot f_k)} \quad (2.87)$$

Als Variable  $x$  werden die Residuen  $r$  betrachtet, die Varianzen  $\sigma^2$  sind in beiden Fällen in der Varianzmatrix  $V_r$  enthalten. Der Erwartungswert  $\mu_{(r)}$  ist für die Hypothese  $H_0$  gleich 0, während er für die Hypothese  $H_1$  den Wert  $b \cdot f_j$  annimmt. Der Faktor  $b$  ist dabei ein Skalar der unbekannt ist und den Betrag enthält. Dieser gleicht aus, dass die Hypothesen mit normierten Fehlern erstellt werden und zur Detektion von Fehlern mit beliebigem Betrag eingesetzt werden. Mit dieser Unbekannten kann die Wahrscheinlichkeit allerdings beliebige Werte annehmen [55].

Zur Normierung wird mit den beiden Wahrscheinlichkeiten der Likelihood-Quotienten-Test durchgeführt. Dabei wird der Quotient der Suprema zweier Dichtefunktionen gebildet.

$$\Lambda(x) := \frac{\sup_{\theta \in \Theta_1} f(x_1, \dots, x_n; \theta)}{\sup_{\theta \in \Theta_0} f(x_1, \dots, x_n; \theta)} \quad (2.88)$$

Lässt sich die Nullhypothese, über eine lineare Transformation der Parameter, als Spezialfall der Alternativhypothese darstellen, ist die Prüfgröße  $T_n := -2 \cdot \log(\Lambda(X))$  näherungsweise  $\mathcal{X}^2$ -verteilt. Der Freiheitsgrad ist die Differenz zwischen dem Parameterraum der Alternativhypothese und dem Parameterraum der Nullhypothese.

Bezogen auf den Hypothesentest ist

$$\Lambda(r) = \frac{\sup_{b, f_k} \left( e^{-0,5 \cdot (r - b \cdot f_k)^T \cdot V_r^{-1} \cdot (r - b \cdot f_k)} \right)}{\sup_{\theta \in \Theta_0} \left( e^{-0,5 \cdot r^T \cdot V_r^{-1} \cdot r} \right)} = \sup_{b, f_k} \left( e^{0,5 \cdot (r^T \cdot V_r^{-1} \cdot r - (r - b \cdot f_k)^T \cdot V_r^{-1} \cdot (r - b \cdot f_k))} \right) \quad (2.89)$$

[55]

Die Nullhypothese ist der Spezialfall der Alternativhypothese mit dem Parameter  $b = 0$ . Man kann also die Prüfgröße für die  $\mathcal{X}^2$ -Verteilung aufstellen

$$T = -2 \cdot \log(\Lambda(r)) = \sup_{b, f_k} \left( r^T \cdot V_r^{-1} \cdot r - (r - b \cdot f_k)^T \cdot V_r^{-1} \cdot (r - b \cdot f_k) \right) \quad (2.90)$$

Um das Minimum zu finden, wird die Ableitung nach  $b$  gleich 0 gesetzt:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{db} &= f_k^T \cdot V_r^{-1} \cdot (r - b \cdot f_k) + (r - b \cdot f_k)^T \cdot V_r^{-1} \cdot f_k \\ &= f_k^T \cdot V_r^{-1} \cdot r - f_k^T \cdot V_r^{-1} \cdot b \cdot f_k + r^T \cdot V_r^{-1} \cdot f_k - b \cdot f_k^T \cdot V_r^{-1} \cdot f_k \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.91)$$

[55]

$$\Rightarrow 2 \cdot f_k^T \cdot V_r^{-1} \cdot r = 2 \cdot b \cdot f_k^T \cdot V_r^{-1} \cdot f_k \quad (2.92)$$

$T$  wird also minimal für

$$\hat{b} = \frac{f_k^T \cdot V_r^{-1} \cdot r}{f_k^T \cdot V_r^{-1} \cdot f_k} \quad (2.93)$$

[55]

Einsetzen ergibt

$$T = \sup_{f_k} \frac{(f_k \cdot V_r^{-1} \cdot r)^2}{f_k \cdot V_r^{-1} \cdot f_k} \quad (2.94)$$

[55]

Die verbleibende Minimierung erfolgt über die Vektoren  $f_k$ . Diese kann also nur für das konkrete Problem erfolgen [55].

Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten, wird die  $\chi^2$ -Verteilung mit einem Freiheitsgrad gewählt. Aus dem Quantil wird das Niveau  $1 - \alpha$  bestimmt. Ziel ist hier, die Wahrscheinlichkeit für ein Falsch-Positives Ergebnis zu berechnen. Da die Untersuchung mehrerer Hypothesen, mehrere Test darstellt, steigt die Wahrscheinlichkeit ein Falsch-Positives Ergebnis zu erhalten, weshalb das Wahrscheinlichkeitsniveau mit der Anzahl der Tests, hier also der Anzahl der Hypothesen  $n$ , korrigiert werden muss.

$$Pr_{Falsch-Positiv} = 1 - (1 - \alpha)^n \quad (2.95)$$

[55] [81]

Beim Hypothesentest können für Mehrfachfehler direkt Hypothesen aufgestellt werden. Da nicht alle Fehler die gleiche Amplitude aufweisen, werden die Erwartungswerte für die Residuen als Summe aufgestellt. Die Summe lässt sich auch als Matrixmultiplikation darstellen [74].

$$\langle r \rangle = \sum_{i=1 \dots k} b_i \cdot f_i = F_k \cdot b \quad (2.96)$$

Die Vektoren  $f_i$  werden im Fall eines linearen Systems ermittelt wie bei den Einzefehlern beschrieben. Analog dazu erhält man für die Werte von  $b$ , die den Quotienten der beiden Dichtefunktionen minimieren

$$\hat{b} = \frac{\mathbf{F}_k^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot r}{\mathbf{F}_k^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot \mathbf{F}_k} \quad (2.97)$$

[74]

Für die  $\mathcal{X}^2$ -verteilte Prüfgröße erhält man

$$T = \frac{(\mathbf{F}_k^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot r)^2}{\mathbf{F}_k^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot \mathbf{F}_k} \quad (2.98)$$

[74]

Freiheitsgrad der  $\mathcal{X}^2$ -Verteilung ist die Anzahl der an der Hypothese beteiligten Größen  $n$ . An dieser Stelle wird auch deutlich, warum es sinnvoll ist, die Falsch-Positiv-Raten zu vergleichen anstelle der direkten Wahrscheinlichkeit. Die Verteilung der Wahrscheinlichkeit ist bei verschiedener Anzahl an beteiligten Größen sehr unterschiedlich, so dass ein direkter Vergleich von Hypothesen mit Fehlern unterschiedlicher Vielfachheit darüber nicht sinnvoll möglich ist [74].

## 2.3 Übertragung der Detektion auf nichtlineare Systeme

Für die Detektion von Großfehlern in nichtlinearen Systemen, wird in zahlreichen Veröffentlichungen, z.B. in [50], mit Hilfe alternativer Optimierungsverfahren eine Reconciliation und mit den resultierenden Werten ein Messwerttest durchgeführt. In den bestehenden Publikationen stehen dabei die optimierten Werte im Vordergrund, nicht die Detektion von Großfehlern.

Geht es ausschließlich um die Fehlerdetektion, wie es für den Einsatz gegen Cyber-Angriffe der Fall ist, lassen sich auch Globaltest und Hypothesentest einsetzen. Beim Globaltest muss das System, wie bei linearen Systemen, ausreichende Redundanzen unter den Mess- und Stellgrößen aufweisen. Beim Hypothesentest müssen die Hypothesen, abhängig von der Nichtlinearität, so umformuliert werden, dass die Prüfgröße wieder eine quadratische Abhängigkeit von der Auslenkung des Fehlers aufweist. Es wird also die Umkehrfunktion der Abhängigkeit der nichtlinear abhängigen Größe auf den betroffenen Residuenwert angewendet. Sind mehrere Größen beteiligt, ergeben sich mehrere Residuenmuster, die untersucht werden können und unter denen das am Besten über die Superposition der Erwartungswerte annäherbare gesucht wird.

Methoden zur Detektion von Cyber-Angriffen auf Basis der Data Reconciliation und ihrer Großfehlerdetektionsmethoden sind also auch für nichtlineare Systeme einsetzbar.

## 2.4 Grenzen der Detektionsmethoden

### 2.4.1 Grenzen der Detektierbarkeit

Für Detektionsmethoden, die auf mathematischen Modellen beruhen, ergibt sich eine grundsätzliche Einschränkung der detektierbaren Angriffe. Es können prinzipiell nur Angriffe detektiert werden, die zu einer Verletzung der Systemgleichung führen. Zur Beschreibung des Systems muss für das mathematische Modell ein Raum aller gültigen Zuständen existieren, die das System einnehmen kann und die damit auch die Systemgleichungen  $\mathcal{A} \cdot y = 0$  erfüllen müssen. Sobald mehr als ein gültiger Systemzustand existiert, muss das Modell einen Raum zulässiger Zustände, nämlich den Nullraum der Matrix  $\mathcal{A}$ , aufweisen, in dem diese gültigen Zustände liegen. Mit Hilfe dieses Nullraums können jedoch Angriffe konstruiert werden, die mit den vorgestellten, modellbasierten Detektionsmethoden nicht detektierbar sind, weil die Manipulationen, und damit auch die veränderten Werte selbst, die Systemgleichungen erfüllen. Zwar stellt die Manipulation selbst keine Gefährdung dar, sofern sicherheitskritische Beschränkungen im Modell berücksichtigt wurden, sie kann aber gezielt Aktionen durch Regelungen und Steuerungen auslösen, die das System in kritische Bereiche führen können.

Ohne statistische Fehler erfüllen die Werte der Größen eines Systems die Systemgleichung  $\mathcal{A} \cdot y = 0$ . Für reale Systeme mit statistischen Fehlern ergeben sich Residuen  $\mathcal{A} \cdot y = r$ .

Eine nicht detektierbare Manipulation  $\Delta y$  muss für den Hypothesentest oder den Globaltest die Bedingung erfüllen, dass sich durch sie keine Änderungen der Residuen der Systemgleichung ergeben.

$$r = \mathcal{A} \cdot y \quad (2.99)$$

$$r = \mathcal{A} \cdot (y + \Delta y) \quad (2.100)$$

$$\Rightarrow \mathcal{A} \cdot \Delta y = 0 \quad (2.101)$$

Beim Messwerttest wird die Messwertabweichung, also die Differenz zwischen gemessenen und optimierten Werten, ausgewertet. Die Bedingung dafür, dass eine Manipulation in diesem Fall nicht detektiert wird ist, dass diese Messwertabweichung für Werte ohne Manipulation ( $y$ ) und mit Manipulation ( $y + \Delta y$ ) identisch sein muss.

$$a = y - \hat{y} \stackrel{!}{=} (y + \Delta y) - (\hat{y} + \Delta \hat{y}) \quad (2.102)$$

$$\Rightarrow \Delta y - \Delta \hat{y} \stackrel{!}{=} 0 \quad (2.103)$$

Aus der Berechnung der optimierten Werte (Gleichung 2.10 ) ergibt sich:

$$\Rightarrow \Delta y - \left( \Delta y - V_y \cdot \mathcal{A}^T \cdot (\mathcal{A} \cdot V_y \cdot \mathcal{A}^T)^{-1} \cdot \mathcal{A} \cdot \Delta y \right) = 0 \quad (2.104)$$

$$\Rightarrow V_y \cdot \mathcal{A}^T \cdot (\mathcal{A} \cdot V_y \cdot \mathcal{A}^T)^{-1} \cdot \mathcal{A} \cdot \Delta y = 0 \quad (2.105)$$

Diese Bedingung ist ebenfalls für alle  $\Delta y$  erfüllt für die gilt  $\mathcal{A} \cdot \Delta y = 0$ .

Die nicht detektierbaren Manipulationen  $\Delta y$  müssen also für alle Detektionsmethoden im Nullraum der Systemmatrix  $\mathcal{A}$  liegen [48]. Wurde für den Nullraum der Systemmatrix  $\mathcal{A}$  eine n-dimensionale Basis mit den Basisvektoren  $b_1, \dots, b_n$  ermittelt, können die nicht detektierbaren Manipulationen im Nullraum mit beliebigen Skalaren  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  ermittelt werden aus

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot b_i \quad (2.106)$$

Für die Konstruktion einer Manipulation sind vor allem solche nicht detektierbaren Manipulationen interessant, für die möglichst wenige Komponenten oder Größen manipuliert werden müssen. Dazu muss der Vektor  $\Delta y$  möglichst viele Nulleinträge aufweisen. Die Basisvektoren werden so kombiniert, es werden also die  $\alpha_i$  so gewählt, dass die Stellen nacheinander den Wert 0 annehmen. Kann dies durch verschiedene Kombinationen der Vorfaktoren  $\alpha_i$  erreicht werden, werden alle Kombinationen ermittelt, die eine bestimmte Stelle Null setzen. Die so ermittelten Vektoren können wieder als reduzierte Basis innerhalb des Nullraums genutzt werden, um Einträge an weiteren Stellen zu eliminieren. Welche Größen für eine nicht detektierbare Manipulation gleichzeitig manipuliert werden müssen, lässt sich an den Vektoren  $\Delta y$ , die im Nullraum liegen, ablesen. Für diese Größen weist der Vektor Einträge auf. Die Einträge selbst geben die Relationen der Höhe der Manipulation in den einzelnen Größen an. Soll eine Größe  $i$  also um einen Betrag  $e_i$  manipuliert werden, müssen die anderen Größen um den Betrag ihres Eintrags in  $\Delta y_e = \frac{e_i}{\Delta y_i} \cdot \Delta y$  manipuliert werden.

Die Schwachstelle nicht detektierbarer Manipulationen lässt sich nicht vollständig beheben, auch wenn es naheliegend ist, den Nullraum der Systemmatrix  $\mathcal{A}$  durch Einsatz zusätzlicher Sensoren einzuschränken. Das Risiko durch den jeweiligen Nullraum lässt sich über die Anzahl der Größen quantifizieren, die minimal gemeinsam manipuliert werden müssen, um mit der Änderung im Nullraum zu bleiben. Zur Bewertung der Gefahr einer nicht detektierbaren Manipulation durch einen Cyber-Angriff muss ausgewertet werden, ob eine der Kombinationen informationstechnische Gemeinsamkeiten aufweist und damit über den gleichen Angriffsvektor manipuliert werden könnte.

Das in Kapitel 2.1.1 vorgestellte Beispiel eines Kühlkreislaufs erfüllt die Systemgleichung  $\mathcal{A} \cdot y = 0$  mit der Systemmatrix

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.107)$$

[60]

Für dieses Beispiel existiert ein zweidimensionaler Nullraum der Systemmatrix  $\mathcal{A}$  mit der Basis

$$b_1 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}^T, \quad b_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T$$

Da alle nicht detektierbaren Manipulationen in diesem Raum liegen müssen, müssen sie also die Gleichung

$$\Delta y = \alpha_1 \cdot b_1 + \alpha_2 \cdot b_2 \quad (2.108)$$

erfüllen, wobei  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  Skalare sind und beliebige Werte annehmen können.

Weil der Nullraum im Beispiel nur zwei Dimensionen hat, gibt es abgesehen von der Triviallösung  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  nur eine Kombination für jede Stelle. Ein Vektor mit 0 an Position 1 ist bereits vorhanden, bei zwei Basisvektoren kann auch kein weiterer, linear unabhängiger Vektor gebildet werden. In diesem Basisvektor ist auch eine 0 an Position 6. Eine nicht detektierbare Manipulation lässt sich also bei einer Manipulation der vier Größen, 2, 3, 4 und 5 konstruieren. Aus der Summe der Basisvektoren ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ) kann eine 0 in den Positionen 2 und 4 erzeugt werden:

$$b_1 + b_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}^T$$

Für Größen 1, 3, 5 und 6 lässt sich also ebenfalls eine nicht detektierbare Manipulation konstruieren. Aus Basisvektor  $b_2$  ist schließlich erkennbar, dass auch mit der Kombination 1, 2, 4 und 6 eine nicht detektierbare Manipulation konstruierbar ist. Die Anzahl der minimal zu manipulierenden Größen für einen undetektierbaren Angriff ist im Kühlkreisbeispiel also 4. Die Bedingungen dafür, dass die Manipulationen jeweils nicht detektierbar sind, ergeben sich aus den entsprechenden Vektoren im Nullraum und werden in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Manipulierte Größen	Bedingung
[1,2,4,6]	$\Delta y_1 = \Delta y_2 = \Delta y_4 = \Delta y_6$
[1,3,5,6]	$\Delta y_1 = \Delta y_3 = \Delta y_5 = \Delta y_6$
[2,3,4,5]	$\Delta y_2 = \Delta y_4 = -\Delta y_3 = -\Delta y_5$

**Tabelle 2.1:** Nicht detektierbare Manipulationen für das Kühlkreislaufbeispiel

Im Beispielsystem müssen jeweils vier der sechs Größen synchron manipuliert werden, womit von einem erheblichen Aufwand ausgegangen werden kann. Außerdem werden die zeitgleich zu manipulierenden Größen auf Gemeinsamkeiten untersucht. Sind alle Größen über dem selben Weg manipulierbar, ist der Aufwand einer Manipulation geringer und damit das Risiko für einen Angriff erheblich größer, als wenn die Größen über verschiedene Wege angegangen werden müssen.

Eine graphische Konstruktion solcher nicht detektierbarer Angriffe auf ein mit Synchrophasern instrumentiertes Verteilnetz wird ausführlich beschrieben in [79] bzw. [10]. Die Manipulation erfolgt dabei über die Zeitbasis und wirkt sich damit auf die Phase von Strom bzw. Spannung aus. Mit Hilfe der in [79] und [10] beschriebenen graphischen Methode können undetektierbare Manipulationen in dem komplexen Werteraum effizient konstruiert werden.

## 2.4.2 Grenzen der Lokalisierbarkeit

Eine weitere Grenze der modellbasierten Manipulationsdetektion ergibt sich für die Lokalisierung der Manipulationen. Unabhängig von der Systemgröße und dem konkreten Aufbau, kann eine beliebige Manipulation einer einzelnen Größe (Manipulation der Vielfachheit 1) nicht sicher von einer bestimmten Manipulation aller anderen Größen (Manipulation der Vielfachheit n-1) unterschieden werden. Abhängig vom Systemaufbau kann es weitere Manipulationen mit geringerer Vielfachheit geben, die von der tatsächlichen Manipulation nicht unterschieden werden können. Ebenso kann es für beliebige Manipulationen höherer Vielfachheit bestimmte andere Manipulationen geben, die systematisch nicht unterscheidbar sind.

Zusätzlich können Manipulationen auftreten, die bestimmte Eigenschaften erfüllen, die von bestimmten anderen Manipulationen nicht unterschieden werden können. Was hier zunächst etwas konstruiert klingt, kann in einem System durchaus naheliegend sein. Wenn durch den Angriff beispielsweise ein veränderter Wert für eine redundant gemessene Systemgröße vorgegeben werden soll, können die zueinander redundanten Größen gleichartig manipuliert werden. Handelt es sich zusätzlich um gleichartige Größen, wie mehrere Durchflussmessungen an verschiedenen Punkten des gleichen Zweigs, ist diese Art der Manipulationen sogar vergleichsweise wahrscheinlich.

Die fehlende Unterscheidbarkeit ergibt sich dadurch, dass die betreffenden Manipulationen zum gleichen Residuenmuster führen. Zur Identifikation der entsprechenden Kombinationen wird also untersucht, ob zu einer gegebenen, zufälligen Manipulation eine andere Manipulation mit dem gleichen Residuenmuster gefunden werden kann.

Zur Identifikation solcher Kombinationen wird eine Testmanipulation  $e$  mit zufälligem Betrag simuliert, die nur an der Position der zu testenden Größe  $i$  oder Kombination, z.B  $i, j, k$  bei Vielfachheit 3, einen Eintrag hat, wobei die Einträge bei Kombinationen unterschiedliche Beträge aufweisen. Für diese Manipulation wird für den messfehlerfreien Fall der Residuenvektor berechnet:

$$r = \mathcal{A} \cdot (y + e) = \mathcal{A} \cdot y + \mathcal{A} \cdot e = \mathcal{A} \cdot e \quad (2.109)$$

[48]

Da keine statistischen Messfehler berücksichtigt werden, gilt  $\mathcal{A} \cdot y = 0$ . Zur Berechnung der Residuen kann die Matrix  $\mathcal{A}$  und die Testmanipulation  $e$  reduziert werden, weil von Matrix  $\mathcal{A}$  nur die Spalten einen Beitrag liefern, für die die Einträge in  $e$  ungleich 0 sind.  $\mathcal{A}_{red\_e}$  enthält also nur die Spalten, die einen Beitrag liefern und  $e_{red\_e}$  enthält nur Einträge  $\neq 0$ .

$$r_e = \mathcal{A}_{red\_e} \cdot e_{red\_e} = [\mathcal{A}_{:,i}, \mathcal{A}_{:,j}, \mathcal{A}_{:,k}] \cdot \begin{pmatrix} e_i \\ e_j \\ e_k \end{pmatrix} \quad (2.110)$$

[48]

Gesucht werden nun Alternativmanipulationen  $\Delta y$ , die die gleichen Residuen liefern. Dafür werden alle möglichen Kombinationen von  $i, j, k$  untersucht. Die Matrix  $\mathcal{A}_{red\_\Delta y}$  enthält diejenigen Spalten von  $\mathcal{A}$ , die der zu testenden Kombination entsprechen,  $\Delta y_{red\_\Delta y}$  entsprechend die Einträge  $\Delta y$ . Das Produkt aus beiden muss die gleichen Residuen  $r_e$  liefern wie die ursprüngliche Manipulation  $e$ .

$$\mathcal{A}_{red\_\Delta y} \cdot \Delta y_{red\_\Delta y} \stackrel{!}{=} r_e \quad (2.111)$$

[48]

Die passende Skalierung der möglicherweise verwechselbaren Manipulation kann bestimmt werden, indem die Gleichung von links mit  $\mathcal{A}_{red\_\Delta y}^{-1}$  multipliziert wird.

$$\mathcal{A}_{red\_\Delta y}^{-1} \cdot \mathcal{A}_{red\_\Delta y} \cdot \Delta y_{red\_\Delta y} = \Delta y_{red\_\Delta y} \stackrel{!}{=} \mathcal{A}_{red\_\Delta y}^{-1} \cdot r_e \quad (2.112)$$

[48]

Handelt es sich bei der untersuchten Kombination um eine von  $i, j, k$  nicht unterscheidbare Manipulation, dann gilt für die expandierte Systemmatrix  $\mathcal{A}$  und den expandierten Manipulationsvektor  $\Delta y$ :

$$\mathcal{A} \cdot \Delta y = r_{\Delta y} \quad (2.113)$$

Liefert das so ermittelte  $\Delta y$  auch in expandierter Form die Residuen  $r_{\Delta y} = r_e$ , ist eine beliebige Manipulation der Größen in  $e$  nicht von der Manipulation  $\Delta y$  zu unterscheiden.

Für Einzelgrößen des Beispielsystems erhält man, abgesehen von den Triviallösungen, die in Tabelle 2.2 aufgeführten Kombinationen.

<b>Beliebige Manipulation</b>	<b>Bestimmte Manipulation</b>	<b>Bedingung</b>
1	[2,4,6]	$\Delta y_1 = -\Delta y_2 = -\Delta y_4 = -\Delta y_6$
1	[3,5,6]	$\Delta y_1 = -\Delta y_3 = -\Delta y_4 = -\Delta y_6$
2	[1,4,6]	$\Delta y_2 = -\Delta y_1 = -\Delta y_4 = -\Delta y_6$
2	[3,4,5]	$\Delta y_2 = \Delta y_3 = -\Delta y_4 = \Delta y_5$
3	[1,5,6]	$\Delta y_3 = -\Delta y_1 = -\Delta y_5 = -\Delta y_6$
3	[2,4,5]	$\Delta y_3 = \Delta y_2 = \Delta y_4 = -\Delta y_5$
4	[2,3,5]	$\Delta y_4 = -\Delta y_2 = \Delta y_3 = \Delta y_5$
4	[1,2,6]	$\Delta y_4 = -\Delta y_1 = -\Delta y_2 = -\Delta y_6$
5	[1,3,6]	$\Delta y_5 = -\Delta y_1 = -\Delta y_3 = -\Delta y_6$
5	[2,3,4]	$\Delta y_5 = \Delta y_2 = -\Delta y_3 = \Delta y_4$
6	[1,3,5]	$\Delta y_6 = -\Delta y_1 = -\Delta y_3 = -\Delta y_5$
6	[1,2,4]	$\Delta y_6 = -\Delta y_1 = -\Delta y_2 = -\Delta y_4$

**Tabelle 2.2:** Verwechselbare Manipulationen für beliebige Manipulationen von Größen mit bestimmten anderen Manipulationen

Auch für einige beliebige Manipulationen der Vielfachheit 2 gibt es verwechselbare Manipulationen (Tabelle 2.3).

Beliebige Manipulation	Bestimmte Manipulation	Bedingung
[1,2]	[3,4,5,6]	$\Delta y_1 = -\Delta y_6; \Delta y_2 = -\Delta y_4;$ $\Delta y_1 - \Delta y_2 = -\Delta y_3 = -\Delta y_5$
[1,3]	[2,4,5,6]	$\Delta y_1 = -\Delta y_6; \Delta y_3 = -\Delta y_5;$ $\Delta y_1 - \Delta y_3 = -\Delta y_2 = -\Delta y_4$
[1,4]	[2,3,5,6]	$\Delta y_1 = -\Delta y_6; \Delta y_4 = -\Delta y_2;$ $\Delta y_1 - \Delta y_4 = -\Delta y_3 = -\Delta y_5$
[1,5]	[2,3,4,6]	$\Delta y_1 = -\Delta y_6; \Delta y_5 = -\Delta y_3;$ $\Delta y_1 - \Delta y_5 = -\Delta y_2 = -\Delta y_4$
[2,3]	[1,4,5,6]	$\Delta y_2 = -\Delta y_4; \Delta y_3 = -\Delta y_5;$ $\Delta y_2 + \Delta y_3 = -\Delta y_1 = -\Delta y_6$
[2,5]	[1,3,4,6]	$\Delta y_2 = -\Delta y_4; \Delta y_5 = -\Delta y_3;$ $\Delta y_2 + \Delta y_5 = -\Delta y_1 = -\Delta y_6$
[2,6]	[1,3,4,5]	$\Delta y_2 = -\Delta y_4; \Delta y_6 = -\Delta y_1;$ $\Delta y_2 - \Delta y_6 = \Delta y_3 = \Delta y_5$
[3,4]	[1,2,5,6]	$\Delta y_3 = -\Delta y_5; \Delta y_4 = -\Delta y_2;$ $\Delta y_3 + \Delta y_4 = -\Delta y_1 = -\Delta y_6$
[3,6]	[1,2,4,5]	$\Delta y_3 = -\Delta y_5; \Delta y_6 = -\Delta y_1;$ $\Delta y_3 - \Delta y_6 = \Delta y_2 = \Delta y_4$
[4,5]	[1,2,3,6]	$\Delta y_4 = -\Delta y_2; \Delta y_5 = -\Delta y_3;$ $\Delta y_4 + \Delta y_5 = -\Delta y_1 = -\Delta y_6$
[4,6]	[1,2,3,5]	$\Delta y_4 = -\Delta y_2; \Delta y_6 = -\Delta y_1;$ $\Delta y_4 - \Delta y_6 = \Delta y_3 = \Delta y_5$
[5,6]	[1,2,4,5]	$\Delta y_5 = -\Delta y_3; \Delta y_6 = -\Delta y_1;$ $\Delta y_5 - \Delta y_6 = \Delta y_2 = \Delta y_4$

**Tabelle 2.3:** Verwechselbare Manipulationen für beliebige Manipulationen von Kombinationen mit bestimmten anderen Manipulationen

Weitere nicht-unterscheidbare Kombinationen lassen sich konstruieren, indem zunächst die Residuen für eine normierte Manipulation in jeder Einzelgröße berechnet wird. Aus den Residuenvektoren der Größen, die in der Testmanipulation enthalten sind, und den Residuenvektoren der Größen einer Alternativmanipulation, wird eine Matrix geformt. Lässt sich im Nullraum dieser Matrix ein Vektor konstruieren, der keinen Nulleintrag enthält, können an diesem Vektor die für die verwechselbare Manipulation notwendigen Relationen abgelesen werden.

Die Residuen  $r$  für eine Testmanipulation  $e$  setzen sich zusammen aus den Residuen  $r_i$ , die von den einzelnen Einträgen beigetragen werden.

$$r_e = \mathcal{A} \cdot e = \mathcal{A} \cdot \sum_i \mathbb{1}_i \cdot e_i = \sum_i \mathcal{A} \cdot \mathbb{1}_i \cdot e_i = \sum_i r_{\mathbb{1}_i} \cdot e_i = r_{\mathbb{1}} \cdot e \quad (2.114)$$

Wobei  $\mathbb{1}_i$  Einheitsvektoren mit dem Eintrag 1 an Position  $i$  sind. Manipulationen  $\Delta y$ , die von dieser Testmanipulation nicht zu unterscheiden sind, müssen ebenfalls den Residuenvektor  $r_e$  liefern. Das heißt  $r_{\Delta y} - r_e \stackrel{!}{=} 0$ .

$$r_{\Delta y} - r_e = \sum_j \mathcal{A} \cdot \mathbb{1}_j \cdot \Delta y_j - \sum_i \mathcal{A} \cdot \mathbb{1}_i \cdot e_i = r_{\mathbb{1}_{\Delta y}} \cdot \Delta y - r_{\mathbb{1}_e} \cdot e = \begin{bmatrix} r_{\mathbb{1}_{\Delta y}} & r_{\mathbb{1}_e} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta y \\ -e \end{bmatrix} = 0 \quad (2.115)$$

Da hier die genauen Einträge von  $e$  und  $\Delta y$  noch nicht festgelegt sind, während die Matrix  $\begin{bmatrix} r_{\mathbb{1}_{\Delta y}} & r_{\mathbb{1}_e} \end{bmatrix}$  bekannt ist, werden zu dieser Matrix orthogonale Vektoren gesucht. Diese Bedingung wird von den Vektoren des Nullraums von  $\begin{bmatrix} r_{\mathbb{1}_{\Delta y}} & r_{\mathbb{1}_e} \end{bmatrix}$  erfüllt. Um genau die Manipulation der Kombinationen in  $e$  und  $\Delta y$  als nicht unterscheidbar zu erhalten, muss dabei in Vektor  $\begin{bmatrix} \Delta y \\ -e \end{bmatrix}$  jedes Element  $\neq 0$  sein. Dies wird, sofern es möglich ist, durch passende Kombination der Basisvektoren des Nullraums erreicht. Aus den Einträgen des Vektors, können dann die erforderlichen Relationen der Manipulationen in den einzelnen Größen zueinander abgelesen werden.

Die Kombinationen, die sich für das Kühlkreisbeispiel, abgesehen von den Triviallösungen, ergeben, sind in Tabelle 2.4 aufgeführt.

Bestimmte Manipulation	Bestimmte Manipulation	Bedingung
[1,2]	[4,6]	$\Delta y_1 = \Delta y_2 = -\Delta y_4 = -\Delta y_6$
[1,3]	[5,6]	$\Delta y_1 = \Delta y_3 = -\Delta y_5 = -\Delta y_6$
[1,4]	[2,6]	$\Delta y_1 = \Delta y_4 = -\Delta y_2 = -\Delta y_6$
[1,5]	[3,6]	$\Delta y_1 = \Delta y_5 = -\Delta y_3 = -\Delta y_6$
[1,6]	[2,4]	$\Delta y_1 = \Delta y_6 = -\Delta y_2 = -\Delta y_4$
[1,6]	[3,5]	$\Delta y_1 = \Delta y_6 = -\Delta y_3 = -\Delta y_5$
[2,3]	[4,5]	$\Delta y_2 = -\Delta y_3 = -\Delta y_4 = \Delta y_5$
[2,4]	[3,5]	$\Delta y_2 = \Delta y_4 = \Delta y_3 = \Delta y_5$
[2,5]	[3,4]	$\Delta y_2 = -\Delta y_5 = \Delta y_3 = -\Delta y_4$
[1,2,4]	6	$\Delta y_1 = \Delta y_2 = \Delta y_4 = -\Delta y_6$
[1,2,6]	4	$\Delta y_1 = \Delta y_2 = \Delta y_6 = -\Delta y_4$
[1,3,5]	6	$\Delta y_1 = \Delta y_3 = \Delta y_5 = -\Delta y_6$
[1,3,6]	5	$\Delta y_1 = \Delta y_3 = \Delta y_6 = -\Delta y_5$
[1,4,6]	2	$\Delta y_1 = \Delta y_4 = \Delta y_6 = \Delta y_2$
[1,5,6]	3	$\Delta y_1 = \Delta y_5 = \Delta y_6 = -\Delta y_3$
[2,3,4]	5	$\Delta y_2 = -\Delta y_3 = \Delta y_4 = \Delta y_5$
[2,3,5]	4	$\Delta y_2 = -\Delta y_3 = -\Delta y_5 = -\Delta y_4$
[2,4,5]	3	$\Delta y_2 = \Delta y_4 = -\Delta y_5 = \Delta y_3$
[2,4,6]	1	$\Delta y_2 = \Delta y_4 = \Delta y_6 = -\Delta y_1$
[3,4,5]	2	$\Delta y_3 = -\Delta y_4 = \Delta y_5 = \Delta y_2$
[3,5,6]	1	$\Delta y_3 = \Delta y_4 = \Delta y_6 = -\Delta y_1$

**Tabelle 2.4:** Verwechselbare Manipulationen für bestimmte Manipulationen von Kombinationen mit bestimmten anderen Manipulationen

Unter diesen Kombinationen sind vor allem die ähnlichen relevant, z.B. die Messungen in einem Zweig, wie [2,4] und [3,5].

Die große Anzahl verwechselbarer Manipulationen ist hier der geringen Größe des Beispieldsystems geschuldet.

## 2.5 Vergleich mit bestehenden Methoden zur Datenoptimierung

Für dynamische lineare Systeme gibt es verschiedene Methoden zur Verbesserung verrauschter Messdaten. Im folgenden Abschnitt werden diese Methoden hinsichtlich verschiedener Eigenschaften verglichen. Im Kontext des bearbeiteten Themas, der Detektion von Cyber-Angriffen, liegt der Schwerpunkt auf der Diskussion ihrer Eignung zur Detektion von Großfehlern.

### 2.5.1 Methoden

Die in Abschnitt 2.1.2 bereits vorgestellten Methoden zur Data Reconciliation in dynamischen Systemen werden mit dem Kalman-Filter und der klassischen „Dynamic Data Reconciliation“ verglichen, die beide zunächst kurz vorgestellt werden. Die Informationen zu den zugehörigen Großfehlerdetektionen werden wegen ihrer herausragenden Bedeutung für die vorliegende Arbeit in diesem Abschnitt für alle Methoden ergänzt, um den Vergleich hinsichtlich der Eignung als Basis für die Detektion von Cyber-Angriffen zu ermöglichen.

#### **Direkte (Zeit-)Diskrete Dynamische Data Reconciliation (D4R)**

Zur Großfehlerdetektion werden drei Methoden, der Messwerttest, der Globaltest und der Hypothesentest verwendet, die in 2.2 beschrieben sind. Ausgewertet werden dabei die Messwertabweichungen und die Residuen der Gleichungen.

#### **Zwei-Schritt-Reconciliation mit Mittelwertbildung (ZSM)**

Eine Großfehlerdetektion ist in [72] nicht beschrieben. Betrachtet wird im Folgenden, inwie weit die Messwertabweichung Informationen zu Großfehlern enthält.

#### **Differenzen als Variablen (DV)**

Zur Großfehlerdetektion wird in [91] ein Knotentest angewendet, bei dem die Variablen ermittelt werden, die in Gleichungen enthalten sind, die erhöhte Residuen aufweisen. Unter diesen Variablen werden solche ausgewählt, die nur in den betroffenen Gleichungen enthalten sind. Zur Bestimmung der fehlerbehafteten Variable wird ein Messwerttest angewendet, bei dem die gemessenen Werte mit den reconcilierten verglichen werden. Der im Vergleich zu seiner Varianz am stärksten korrigierte Wert wird als fehlerbehaftet betrachtet.

#### **Polynomentwicklung (PEW)**

Die Großfehlerdetektion erfolgt in [14] über einen Messwerttest, es werden also die gemessenen mit den reconcilierten Werten verglichen.

#### **Kalman Filter (KF)**

Bei Kalman-Filtern [45] wird zwischen Messgrößen  $y$  und Stellgrößen  $u$  unterschieden und

beobachtbaren Variablen bzw. Messgrößen  $x$ . Modellungenauigkeiten und das Rauschen im Modell werden in einer weiteren Variablen  $z$  modelliert. Das Messrauschen wird mit Variable  $v$  berücksichtigt. Das System wird in zeitdiskreter Form in zwei Gleichungen beschrieben.

$$\vec{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \cdot \vec{x}(k) + \mathbf{B}_d \cdot \vec{u}(k) + \mathbf{G}_d \cdot \vec{z}(k) \quad (2.116)$$

$$\vec{y}(k) = \mathbf{C} \cdot \hat{\vec{x}}(k) + \mathbf{D} \cdot \vec{u}(k) + \vec{v}(k) \quad (2.117)$$

Die Optimierung der Daten erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird der Systemzustand des nächsten Zeitschritts  $\hat{x}(k+1)$  auf Basis der aktuellen Stellwerte  $u(k)$  und des aktuellen optimierten Systemzustands  $\tilde{x}(k)$  vorhergesagt.

$$\hat{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \cdot \tilde{x}(k) + \mathbf{B}_d \cdot \tilde{u}(k) \quad (2.118)$$

Der zweite Schritt erfolgt im nächsten Zeitschritt. Der vorhergesagte Systemzustand wird in Richtung der tatsächlich gemessenen Werte korrigiert. Der Korrektur-Summand besteht aus der Differenz zwischen dem vorhergesagten und dem korrigierten Wert, gewichtet mit der Kalman-Verstärkung  $\mathbf{K}(k)$ :

$$\tilde{x}(k) = \hat{x}(k) + \mathbf{K}(k) \cdot (y(k) - \hat{x}(k) - \mathbf{D} \cdot u(k)) \quad (2.119)$$

Dies führt zu optimierten Werten, die die Modellgleichungen allerdings, im Unterschied zur Data Reconciliation, nicht vollständig erfüllen. Parallel dazu wird im ersten Schritt die Kovarianzmatrix  $\hat{\mathbf{P}}(k)$  des Schätzfehlers  $\hat{\epsilon}(k) = x(k) - \hat{x}(k)$  vorhergesagt:

$$\hat{\mathbf{P}}(k+1) = \mathbf{A}_d \cdot \tilde{\mathbf{P}}(k) \cdot \mathbf{A}_d^T + \mathbf{G}_d \cdot \mathbf{Q}(k) \cdot \mathbf{G}_d^T \quad (2.120)$$

und im zweiten Schritt optimiert:

$$\tilde{\mathbf{P}}(k) = (\mathbb{I} - \mathbf{K}(k) \cdot \mathbf{C}) \cdot \hat{\mathbf{P}}(k) \quad (2.121)$$

wobei  $\mathbf{Q}(k)$  die Varianzmatrix des Modellfehlers und -rauschens  $z(k)$  ist. Wie der Index  $k$  nahelegt, wird auch die Kalman-Verstärkung  $\mathbf{K}(k)$  in jedem Zeitschritt angepasst:

$$\mathbf{K}(k) = \hat{\mathbf{P}}(k) \cdot \mathbf{C}^T \cdot (\mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{P}}(k) \cdot \mathbf{C}^T + \mathbf{R}(k))^{-1} \quad (2.122)$$

mit der vorhergesagten Kovarianzmatrix des Schätzfehlers  $\hat{\mathbf{P}}(k)$  und der Varianzmatrix  $\mathbf{R}(k)$  des Messrauschens  $v(k)$ .

Bei Nutzung des Kalman-Filters für die Großfehlerdetektion, werden postulierte Fehler als zusätzliche interne Systemzustandsvariable im Vektor  $x(k)$  modelliert und ihre Amplitude in jedem Zeitschritt geschätzt. [45]

### **Dynamic Data Reconciliation (DDR)**

Die dynamische Data Reconciliation, wie sie in [7] und [8] veröffentlicht wurde, geht, wie der Kalman-Filter, von einem Modellfehler  $\delta(t)$  ( $\hat{y}(t) = x(t) + \delta(t)$ ) zusätzlich zum Messrauschen  $\epsilon(t)$  ( $y(t) = x(t) + \epsilon(t)$ ) aus. Die Optimierung beginnt auch hier mit einer modellbasierten Vorhersage der Messwerte  $\hat{y}(t)$ . Diese vorhergesagten Werte werden in Richtung der gemessenen Werte korrigiert. Die Differenz zwischen gemessenem und prognostiziertem Wert wird mit einem Verstärkungsfaktor gewichtet zum prognostizierten Wert addiert:

$$\hat{x}(t) = \hat{y}(t) + \mathbf{K} \cdot (y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.123)$$

Dieses zweistufige Vorgehen mit Vorhersage und Korrektur entspricht dem im Kalman-Filter. Anders als beim Kalman-Filter wird die Verstärkung bei der Dynamic Data Reconciliation nicht in jedem Zeitschritt angepasst, sondern anhand der Varianzmatrizen von Messrauschen  $\mathbf{V}$  und Modellunsicherheit  $\mathbf{R}$  einmalig bestimmt:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{V}^{-1} + \mathbf{R}^{-1})^{-1} \cdot \mathbf{V}^{-1} = (\mathbb{I} + \mathbf{V} \cdot \mathbf{R}^{-1})^{-1} \quad (2.124)$$

[7] [8]. Die optimierten Werte  $\hat{x}(t)$  erfüllen die Systemgleichungen nicht vollständig. Daher ist die Dynamic Data Reconciliation keine echte Data Reconciliation sonder eher eine spezielle Form des Kalman-Filters. Da die Abweichung der Messung von der modellkompatiblen Vorhersage über einen festen Faktor reduziert wird, bleibt etwas mehr Information zu Großfehlern erhalten.

Zur Großfehlerdetektion wird in [9] zunächst ein Knotentest durchgeführt. Unter den Residuen, die nicht nur durch statistische Fehler erklärbar sind, werden die Größen gesucht, die nur in den betroffenen Gleichungen enthalten sind. Unter den Größen, die nur in den Gleichungen enthalten sind, die erhöhte Residuen aufweisen, wird schließlich ein Messwerttest durchgeführt, um die fehlerbehaftete Größe zu identifizieren [9].

## **2.5.2 Vergleich der Methoden**

Die genannten Methoden werden hinsichtlich der Optimierung und deren Auswirkung verglichen. Insbesondere werden die Auswirkungen der Optimierung auf die Großfehlerdetektion untersucht. Eine übersichtliche Zusammenfassung ist in Tabelle 2.5 dargestellt. Um die im Vergleich beschriebenen Wirkungen der Methoden zu illustrieren, werden zwei einfache

Beispielsysteme verwendet. Abgesehen von DV verwenden alle Methoden (also D4R, ZSM, PEW, KF und DDR) dynamische Systemzusammenhänge.

Für die nachfolgenden Erläuterungen wird als Beispiel ein dynamisches System betrachtet, dessen Zustandsraumbeschreibung in Gleichungen 2.125 und 2.126 zu sehen ist.

$$\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}}_A = \underbrace{\begin{bmatrix} -1/1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,25/2 & -1/2 & 0 & 0 \\ 0,75/3 & 0 & -1/3 & 0 \\ 0 & 1/4 & 1/4 & -1/4 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}}_B + \underbrace{\begin{bmatrix} 1/1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \cdot u_1 \quad (2.125)$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix}}_C = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_D \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}}_D + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_D \cdot u_1 \quad (2.126)$$

Im Beispiel wird als Eingangssignal  $u_1$  ein Sinus verwendet, alle Initialwerte sind 0. Die Diskretisierung erfolgte mit Hilfe der c2d-Matlab-Funktion in der default-Einstellung mit einem Halteglied nullter Ordnung und einer Abtastzeit von 0,1 s.

Bei DV kommen tatsächlich statische Systemgleichungen zum Einsatz, um die Differenzen der Größen zwischen zwei Zeitpunkten zu reconcilieren. Die folgende Systemgleichung, wird für den Demonstrationsplot für DV verwendet:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \\ \Delta x_5 \\ \Delta x_6 \end{pmatrix} = 0 \quad (2.127)$$

Um Unterschiede zwischen DV und den anderen Methoden demonstrieren zu können, wurde die  $x_2$ -Zeitreihe aus dem dynamischen System übernommen. Der Wert in Größe  $x_1$ , der beispielsweise einen Massenstrom darstellen könnte, wird aufgeteilt in einen Zweig in dem Messungen  $x_2$  und  $x_4$  liegen und einen Zweig in dem Messungen  $x_3$  und  $x_5$  liegen. Die Aufteilung erfolgt zu 25% im einen und 75% im zweiten Zweig. Vor Messung  $x_6$  werden die Zeige wieder zusammengeführt.

Für alle Systeme und Größen werden normalverteilte statistische Fehler addiert. Für die Demonstration wurde in allen Fällen Größe  $x_2$  verwendet.

## Verwendung

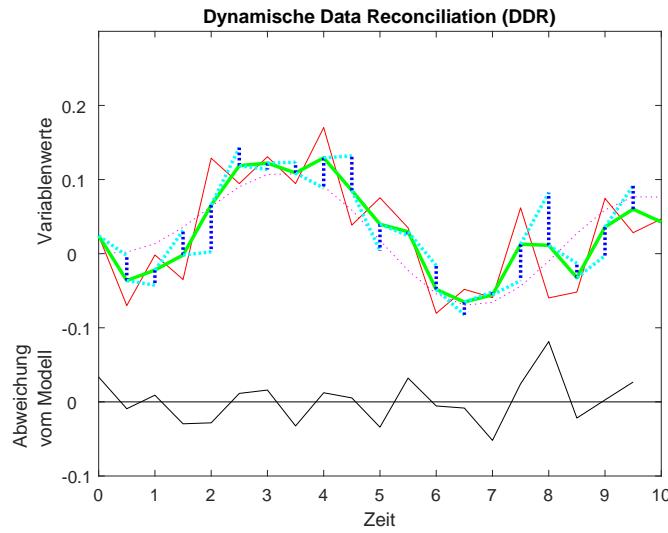
Die Data Reconciliation - Methoden im engeren Sinn, also PEW, D4R, DV und ZSM werden für die Überwachung von Systemen mit hohem Messrauschen eingesetzt. Ihr Zweck besteht in der Identifikation der wahrscheinlichsten wahren Werte der Messungen und Stellwerte. Für PEW, D4R und DV werden außerdem Methoden zur Großfehlerdetektion genutzt, um Fehler wie Leckagen, Sensorsausfälle und Eichfehler zu identifizieren. KF und DDR kommen eher für die Aufbereitung der Datengrundlage robuster, stabiler Regelungen zum Einsatz. Dazu müssen Sprünge in den Daten vermieden werden, es ist also eine gewisse Glättung der Daten erforderlich. Die Großfehlerdetektion dient beim KF und DDR eher der Korrektur des Systemzustands, nicht der Identifikation der fehlerbehafteten Größe zur Behebung des Fehlers. Beim KF ist die Großfehlerdetektion auf wenige, ausgewählte Messgrößen beschränkt, bei denen beispielsweise eine Sensordrift zu erwarten ist.

## Datenglättung

Bei KF und DDR erfolgt die Datenglättung durch die Korrektur nach der modellbasierten Vorhersage. In beiden Fällen hängt die Korrektur von der Differenz zwischen gemessenem und vorhergesagtem Wert ab, gewichtet mit dem Korrekturfaktor (Abb. 2.6 und 2.7). Bei DDR hängt der Korrekturfaktor nur von den Varianzmatrizen des Messrauschens und der Modelfehler ab und ist daher zeitinvariant. Beim KF wird die Kalman-Verstärkung dagegen in jedem Zeitschritt, über die Minimierung die Kovarianz des Schätzfehlers, angepasst. In ZSM erfolgt die Glättung durch die Mittelwertbildung nach der Reconciliation mit den benachbarten Zeitschritten (Abb. 2.8). In PEW erfolgt die Glättung durch die Reihenentwicklung vor der eigentlichen Reconciliation. Das Ausmaß der Glättung hängt dabei von der Ordnung der Reihenentwicklung ab. Die Ordnung muss so gewählt werden, dass die Daten ausreichend gut beschrieben werden, um akzeptable Ergebnisse zu erzielen, wie im Abbildung 2.9 demonstriert. Eine Glättung im eigentlichen Sinn erfolgt in D4R nicht. Die Reconciliation über einen Zeitabschnitt liefert aber einen Signalverlauf, der auch hinsichtlich der Änderungen zwischen den Zeitpunkten die Systemgleichung erfüllen muss, was eine Glättung entlang der modellierten Systemdynamik erzeugt (Abb. 2.10). DV glättet die Daten nicht (Abb. 2.11).

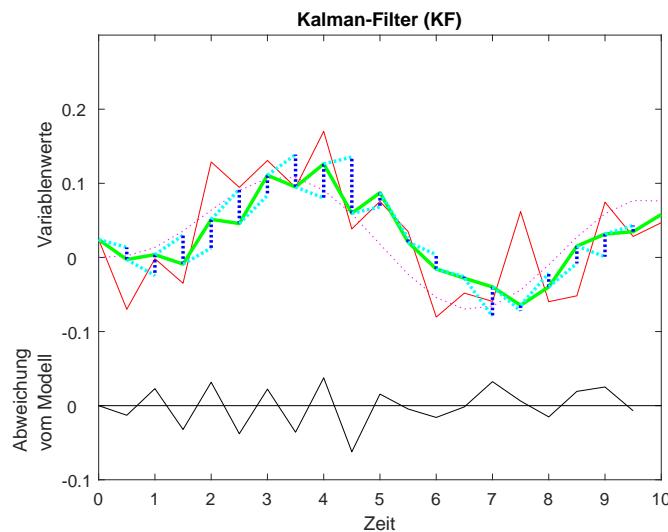
## Datenoptimierung

Die Optimierung ist bei PEW, D4R, DV und ZSM die Minimierung der quadrierten Differenz zwischen Mess- und Stellwerten und ihren reconcilierten Werten mit dem Systemmodell als Nebenbedingung. Die reconcilierten Werte erfüllen also die Systemgleichungen. In ZSM werden im zweiten Schritt die Mittelwerte gebildet, dadurch erfüllen die optimierten Werte bei ZSM die Systemgleichungen schließlich nicht mehr, anders als bei PEW, D4R und DV. Die Anpassung der Kalman-Verstärkung im KF, die in jedem Zeitschritt durchgeführt wird, ist eine Optimierung, bei der der Schätzfehler minimiert wird. Eine tatsächliche Optimierung der Messwerte erfolgt beim KF und der DDR nicht. Den Schätzwerten aus dem vorangegangenen Zeitschritt wird vertraut und daraus Vorhersagewerte für den aktuellen Zeit-



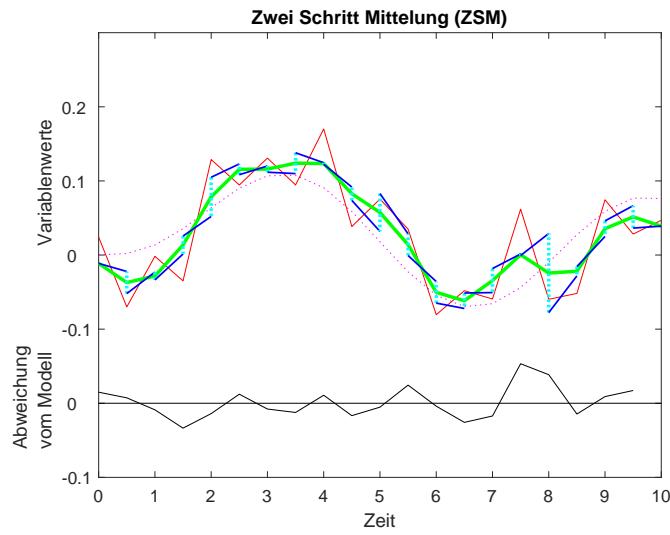
**Abbildung 2.6:** - - - wahre Werte — Messwerte — optimierte Werte ... Vorhersage ... Korrektur — Abweichung vom Modell

Bei der Dynamischen Data Reconciliation (DDR) wird der jeweils nächste Wert vorhergesagt und dann mit Hilfe des Messwerts korrigiert, wie beim KF. Die Korrektur verursacht eine Glättung. Die Modellgleichungen sind nicht erfüllt, wie im unteren Plot zu sehen.

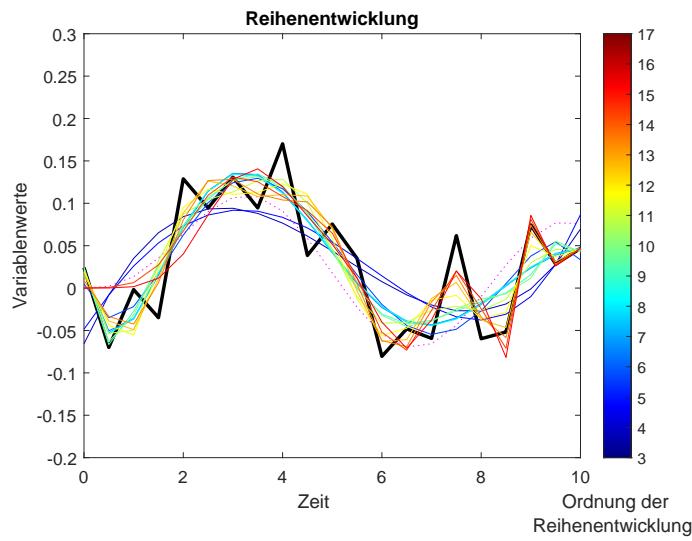


**Abbildung 2.7:** - - - wahre Werte — Messwerte — optimierte Werte ... Vorhersage ... Korrektur — Abweichung vom Modell

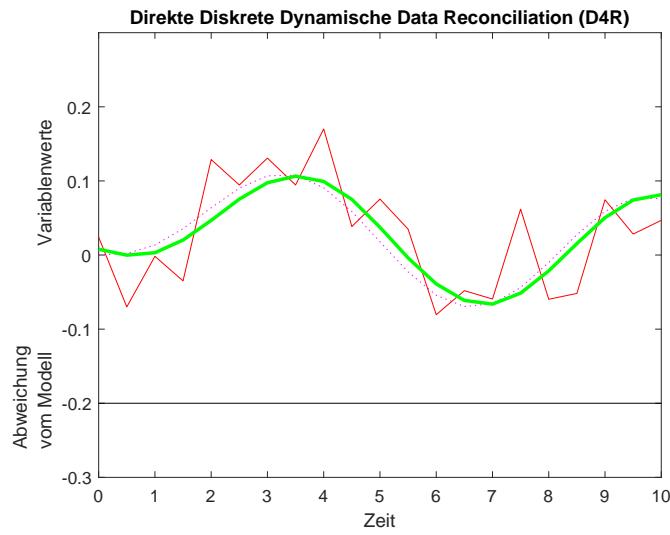
Beim Kalman-Filter (KF) wird der jeweils nächste Wert vorhergesagt und dann mit Hilfe des Messwerts korrigiert. Die Korrektur verursacht eine Glättung. Die Modellgleichungen sind nicht erfüllt, die Messwertabweichung ist im unteren Plot dargestellt.



**Abbildung 2.8:** – - - wahre Werte — Messwerte — optimierte Werte — Data Reconciliation zweier Werte ... Mittelung — Abweichung vom Modell  
 Bei der Zwei Schritt Mittelung (ZSM) werden alle direkt benachbarte Werte reconciliert. Damit ergeben sich für jeden Messwert zwei reconcilierte Werte. Der optimierte Wert wird durch Mittelung dieser beiden Werte erzeugt, was eine Glättung erzeugt. Die optimierten Werte erfüllen die Modellgleichungen nicht.

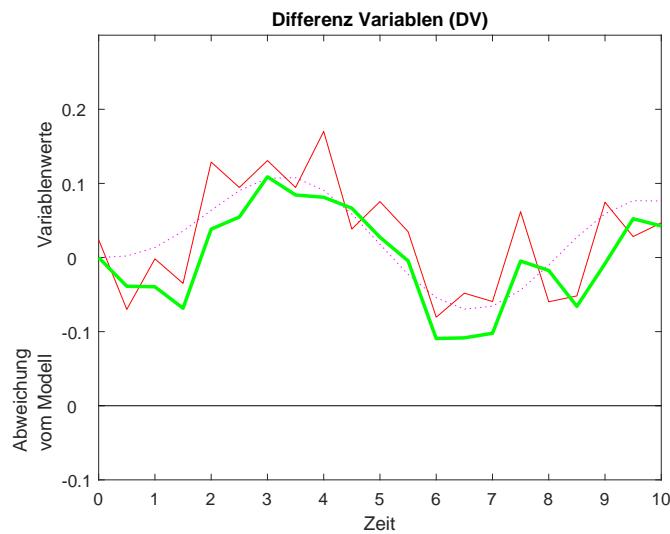


**Abbildung 2.9:** – - - wahre Werte — Messwerte — in Polynom entwickelte Werte  
 Dieser Plot illustriert die Problematik einer Polynomentwicklung vor der Data Reconciliation. Die adäquate Beschreibung der Daten hängt maßgeblich von der Ordnung der Entwicklung ab. Die Glättung hängt ebenfalls nur von der Polynomordnung ab, nicht von der Systemdynamik.



**Abbildung 2.10:** — - - wahre Werte — — Messwerte — — optimierte Werte — Abweichung vom Modell

Direkte (Zeit-)Diskrete Dynamische Reconciliation (D4R) erzwingt die Erfüllung der Systemgleichungen, wie auch im unteren Plot zu sehen ist. Das führt zu einer Glättung und einer starken Reduktion der statistischen Fehler.



**Abbildung 2.11:** — - - wahre Werte — — Messwerte — — optimierte Werte — Abweichung vom Modell

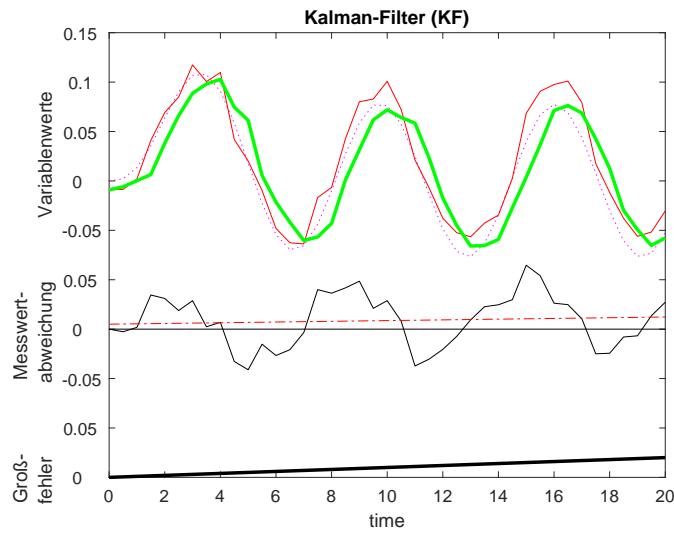
Differenz Variablen (DV) erzwingt die Erfüllung der Systemgleichungen, wie auch im unteren Plot zu sehen ist. Weil aber nur die Differenzen zwischen zeitlich benachbarten Werten reconciliert werden, erfolgt keine Glättung und die Spuren können über die Zeit ein Offset entwickeln.

schritt berechnet. Die aktuellen Messwerte werden nur zur Korrektur der Vorhersagewerte verwendet, begrenzt durch den Korrekturfaktor. Zur besseren Verständlichkeit wird im Folgenden die Bezeichnung „optimierte Werte“ auch für das Ergebnis von Vorhersage und Optimierung verwendet. KF und DDR sind kausal, weil die optimierten Werte jeweils nur von den vorhergehenden Werten beeinflusst werden, während nachfolgende Werte nicht für die Optimierung vorhergehender Werte genutzt werden. Zusammen mit der Dämpfung durch den Korrekturfaktor, führt dies zu einer leichten Zeitverzögerung der optimierten Werte bei schnellen Zustandsänderungen (Abb. 2.12). DV berücksichtigt neben den aktuellen Werten ebenfalls nur den vorangegangenen Zeitpunkt zur Reconciliation der aktuellen Werte. Damit ist auch DV kausal. PEW, D4R und ZSM sind dagegen akausal, weil bei der Optimierung keine feste Einflussrichtung besteht. Es werden also auch vorangegangene Werte verändert.

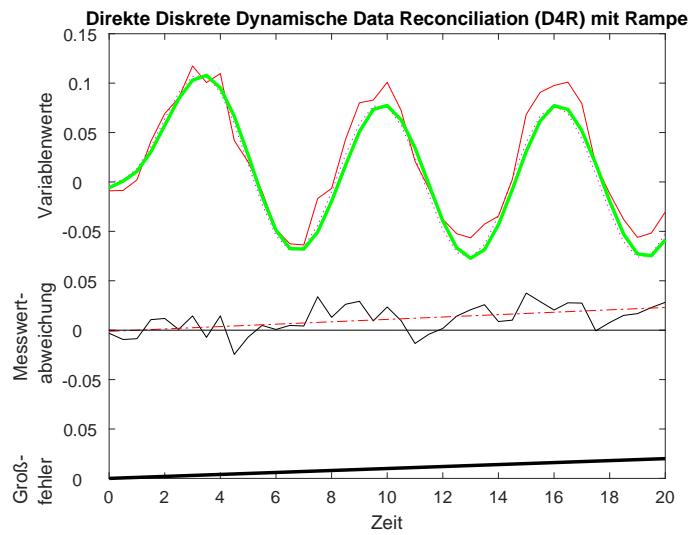
### Großfehlerdetektion

PEW, D4R, DV und ZSM vertrauen dem Modell und betrachten die Systemzustände, bestehend aus Mess- und Stellwerten, als mit statistischen Fehlern und möglicherweise mit Großfehlern behaftet. KF und DDR vertrauen dagegen den Stellwerten und betrachten das Modell als fehlerbehaftet und nur die Messwerte als verrauscht. Mögliche Großfehler werden beim KF nur in ausgewählten Variablen erwartet und postuliert und sind damit auch nur in diesen detektierbar. Bei der DDR können Großfehler in allen Messgrößen detektiert werden, während den Stellgrößen vertraut wird. Für die Großfehlerdetektion werden in [9] zwei Methoden vorgeschlagen. In der ersten Methode wird die Messwertabweichung ausgewertet, was letztlich der mit dem Korrekturfaktor gewichteten Abweichung vom Modell entspricht. Als zweite Methode wird der Großfehler als zeitkonstantes Offset des Messwerts modelliert und im Rahmen der Reconciliation mit berechnet. Das bedeutet, der detektierte Großfehler ist der Mittelwert der Messwertfehler im betrachteten Zeitintervall. Beim KF werden Großfehler als zusätzliche Variablen modelliert und in jedem Zeitschritt geschätzt. Dieses Vorgehen beschränkt die detektierbaren Großfehler auf wenige ausgewählte Messgrößen, bei denen Großfehler erwartet werden, in der Regel in Form einer Sensordrift. In allen anderen Messgrößen können Großfehler nicht detektiert werden. Treten sie dennoch auf, können sie durch Schmiereffekte als scheinbare Großfehler in anderen Größen detektiert werden, die mit den fehlerbehafteten Größen zusammenhängen. Langsam und stetig ansteigende Großfehler werden durch den veränderlichen Korrekturfaktor, die Kalman-Verstärkung, kompensiert und können daher nicht detektiert werden. In den Abbildungen 2.12 und 2.13 wird dieser Effekt demonstriert, indem auf Messgröße 2, die auch abgebildet ist, ein langsam ansteigender Großfehler aufmodelliert wird. Dieser Großfehler spiegelt sich bei D4R in einer langsam ansteigenden Messwertabweichung, während er beim KF kompensiert wird und damit einer Großfehlerdetektion nicht mehr zugänglich ist.

Bei der PEW basiert die Großfehlerdetektion auf der Messwertabweichung. Die Aussagekraft der Detektion hängt stark davon ab, wie gut die Daten durch die Reihenentwicklung be-



**Abbildung 2.12:** - - - wahre Werte — Messwerte — optimierte Werte — Abweichung vom Modell · · · Regressionsgerade der Messwertabweichung — Großfehler  
 Beim Kalman-Filter (KF) kann die adaptive Korrektur einem langsam ansteigenden Großfehler folgen und ihn dadurch teilweise verschleiern. Dadurch ist der Großfehler einer Detektion nicht mehr oder nur verzögert zugänglich. Zu sehen ist außerdem, dass der KF bei dynamischem Systemverhalten eine Zeitverzögerung aufweist.



**Abbildung 2.13:** - - - wahre Werte — Messwerte — optimierte Werte — Abweichung vom Modell · · · Regressionsgerade der Messwertabweichung — Großfehler  
 Direkte (Zeit-)Diskrete Dynamische Reconciliation (D4R) erzwingt die Erfüllung der Systemgleichungen. Der langsam ansteigende Großfehler spiegelt sich in langsam ansteigenden Messwertabweichung wieder und ist damit detektierbar.

schrieben werden, da Messwertabweichungen auch durch eine unsaubere Datenbeschreibung entstehen können. Bei DV werden zunächst die Residuen mit einem Knotentest ausgewertet. Bei verdächtigen Residuenwerten werden Größen, die in allen zugehörigen Gleichungen auftreten, mit Hilfe des Messwerttests überprüft. Die Leistungsfähigkeit der Großfehlerdetektion ist ähnlich zu der auf Basis der statischen Data Reconciliation. Für ZSM wird in [72] keine Großfehlerdetektion vorgeschlagen. Da der Ausgleich der statistischen Fehler nur auf zwei Zeitpunkten basiert, ist nur eine begrenzte Verbesserung der Daten, ähnlich der statischen Data Reconciliation, erreichbar. Zusätzlich wird durch die Mittelwertbildung eine Abweichung von den Modellgleichungen erzeugt (Abb. 2.8). Die Abweichung zwischen Mess- und Stellwerten und den durch ZSM optimierten Werten sind verfälscht und daher schwer auszuwerten.

### 2.5.3 Diskussion der Vergleichsergebnisse

Der **Kalman-Filter (KF)** ist für seinen üblichen Einsatz zur Verbesserung stark verrauschter Messwerte sehr gut geeignet. Er ist durch den kontinuierlich angepassten Korrekturterm sehr tolerant gegenüber Modellgenauigkeiten. Durch diese Korrektur werden implizit auch Fehler in den Stellwerten ausgeglichen. Aufgrund der Abhängigkeit der Korrektur von vorherigen Werten, sind die Ergebnisse der Optimierung im Detail weder nachvollziehbar noch erklärbar. Zur Großfehlerdetektion ist der Kalman-Filter nur geeignet, wenn für die meisten Messwerte und alle Stellwerte eine Freiheit von Großfehlern garantiert werden kann. Davon ist bei Cyber-Angriffen nicht auszugehen.

Für die **Dynamic Data Reconciliation (DDR)** muss zur Bestimmung des Korrekturfaktors die Varianzmatrix der Modellfehler relativ genau bekannt sein und die Fehler müssen näherungsweise normalverteilt sein. Die Korrektur kann Modellfehler und in gewissem Ausmaß Fehler in Stellwerten ausgleichen. Obwohl die Abhängigkeit von früheren Werten aufgrund des konstanten Korrekturfaktors geringer ist als beim KF, besteht sie weiterhin in der Vorhersage der Werte. Daher sind auch die optimierten Werte nicht vollständig erklärbar. Großfehlerdetektion ist nur in den Messgrößen möglich, daher müssen Stellwerte sehr zuverlässig sein. Dies ist nicht für alle Akteure gegeben und für die Manipulationsdetektion muss eine mögliche Manipulation von Stellwerten zwingend berücksichtigt werden.

Für die **Polynomentwicklung (PEW)** müssen die Zeitreihen der Mess- und Stellgrößen durch die Reihenentwicklung der gewählten, festen Ordnung sehr gut beschrieben werden. Treten in der Systemgleichung höhere Ableitungen auf, ist der PEW-Ansatz sehr hilfreich. Die Zeitreihen werden durch die Reihenentwicklung bereits vor der Data Reconciliation geglättet und damit auch verfälscht. Dadurch stammen die Messwertabweichungen, die Differenz zwischen den gemessenen und den in eine Reihe entwickelten und reconcilierten Daten, die zur Großfehlerdetektion genutzt werden, nicht nur aus Großfehlern.

Bei **Zwei-Schritt-Reconciliation mit Mittelwertbildung (ZSM)** wird die Reconciliation je-

weils nur über zwei Zeitpunkte durchgeführt, was zu einer begrenzten Reduktionsfähigkeit für statistische Fehler führt. Die Mittelung der Werte aus den beiden benachbarten Zeitschritten glättet die Spur, führt aber zu einer Abweichung vom Systemmodell. Die verbleibenden statistischen Fehler führen, zusammen mit der Verfälschung durch die Mittelung, zu einer begrenzten Aussagekraft von ZSM für die Großfehlerdetektion.

Auch bei **Differenzen als Variablen (DV)** werden nur zwei Zeitpunkte berücksichtigt, die optimierten Werte erfüllen die Systemgleichungen. Eine Glättung der Spuren findet nicht statt. Die statistischen Fehler werden nur aufgrund von Redundanzen im System in einem Zeitpunkt reduziert, wie bei der statischen Data Reconciliation. Werte eines zweiten Zeitschritts werden nur zur Ermittlung der Wert-Differenzen berücksichtigt. Die Messwertabweichung, also die Differenz zwischen Mess-/Stellwerten und ihren reconcilierten Werten enthalten Informationen zu Großfehlern und sind für die Detektion geeignet.

Die ähnliche Methode **Direkte (Zeit-)Diskrete Dynamische Data Reconciliation (D4R)** reduziert, aufgrund der Berücksichtigung mehrerer Zeitpunkte, die statistischen Fehler deutlich stärker und ist daher für die Großfehlerdetektion deutlich besser geeignet als DV. D4R führt durch die Anforderung, das dynamische Systemmodell für mehrere Zeitschritte vollständig zu erfüllen, zu einer starken impliziten Glättung. Die Glättung hängt von der erlaubten Systemdynamik und der Anzahl der berücksichtigten Zeitpunkte ab. Die statistischen Fehler werden nicht nur über Redundanzen im System reduziert, sondern zusätzlich durch Berücksichtigung mehrerer Zeitschritte und deren Zusammenhang. Da die reconcilierten Werte die Systemgleichung erfüllen, enthalten die Mess- (und Stell-)wertabweichungen ebenso wie die Residuen der Gleichungen Informationen über Großfehler. Die starke Reduktion der statistischen Fehler verbessert die Großfehlerdetektion weiter.

Unter den verglichenen Methoden ist D4R am besten für die Großfehlerdetektion geeignet.

**Tabelle 2.5:** Vergleich der Datenoptimierungsmethoden hinsichtlich verschiedener Kriterien.

	Data Reconciliation				
	D4R/DV	Zeitdiskret ZSM	PEW	DDR	KF
Anwendung	keine / Materialbilanzen Monitoring und Großfehlerdetektion	Monitoring	Windkraftanlage Monitoring und Großfehlerdetektion	chemische Prozesse Destillation Prozessregel.	diverse dynamische Systeme Prozessregel.
Betrachtete Elemente	Systemzustände: Messungen und Stellwerte			nur Messungen	
als fehlerfrei betr. Elemente	Modell			Stellwerte	
Glättung abhängig von	stetig diff.bar innerhalb betrachtetem Zeitintervall / keine	Mittelwert aus rec. Ergebnissen benachbarter Zeitschritte	Ordnung der Reihenentw. ohne Berücksichtigung der Systemdynamik	mit Varianzen gewichtete Messwert-abweichung	Messwert-abweichung und Streuung früherer Werte
Optimierung/ Schätzung/ Vorhersage	Optimierung	Optimierung und Mittlung	Optimierung	Vorhersage und Korrektur zwecks Schätzung	
Optimierungsbedingungen	Minimierung der durch die Varianz dividierten, quadrierten Messwertabweichung Nebenbedingung: Systemgleichung nicht beschrieben			keine echte Optimierung	Minimierung d. Kovarianz des Schätzfehlers
Dynamik	akausal (außer DV), keine Zeitverzögerung			kausal, Zeitverzögerung	
Schlussfolgerung	starke / schwache Reduktion der statistischen Fehler, Werte erfüllen Modell	schwache Reduktion der statistischen Fehler, Glättung durch Mittlung, Werte erfüllen Modell nicht	starke Glättung vor Reconciliation, Werte erfüllen Modell	Reduktion stat. Fehler, Glättung nach Anwendung des Modells, Werte erfüllen Modell nicht	starke Redukt. statist. Fehler, Glättung nach Anwendung des Modells, Werte erfüllen Modell nicht
Großfehlerdetektion	anhand Residuen oder Differenz der Mess- und Stellwerte von reconcilierten Werten	nicht definiert, ungeeignet für Großfehlerdetektion	Differenz der Mess- und Stellwerte von in Reihe entw. und reconcil. Werten (allgemeingült. Offset modelliert in Reihenentw.)	Messwert-abweichung oder modelliert als zeitkonst. Offset mitberechnet bei Reconcil.	erwartete Großfehler als eigene Systemvariable die in jedem Zeitschritt geschätzt wird
Schlussfolgerung	gut geeignet für Großfehlerdetektion	begrenzt nutzb., weil Modelltreue durch Mittlung zerstört wird	begrenzt nutzb., weil Daten vor Reconciliation verfälscht werden	gut geeignet, wenn Stellgr. verlässl. sind	nur geeignet, wenn Großf. nur in wenigen Größen vork. können

---

# 3 Neues Konzept zur Detektion von Cyber-Angriffen auf cyber-physikalische Systeme

## 3.1 Idee des neuen Verfahrens

Die in Kapitel 2.2 vorgestellten statistischen Methoden zur Anomaliedetektion wurden zur Identifikation von Sensorausfällen entwickelt. Allerdings ist der zeitgleiche Ausfall mehrerer Sensoren, sogenannte Mehrfachfehler, ungewöhnlich und daher unwahrscheinlich, was in den Detektionsverfahren berücksichtigt ist. Im Fall von Cyber-Angriffen können dagegen regelmäßig mehrere Komponenten zeitgleich betroffen sein. Der häufig ähnliche Aufbau der Sensoren oder Aktoren und gemeinsame Eigenschaften führen dazu, dass sich ein Angriff auf mehrere Komponenten gleichzeitig auswirkt. Umgekehrt betrachtet werden für Cyber-Angriffe Eigenschaften von Komponenten genutzt, die auch bei weiteren Komponenten vorhanden sein können. Dieser Umstand führt dazu, dass bei Manipulationen durch Cyber-Angriffe diejenigen Mehrfachfehler wahrscheinlich sind, bei denen die betroffenen Komponenten Gemeinsamkeiten aufweisen. Die zeitgleiche Manipulation sehr unterschiedlicher Komponenten ist dagegen unwahrscheinlicher, wenn auch nicht ausgeschlossen. Beispiele für solche gemeinsamen Eigenschaften sind

- die verwendeten Kommunikationsprotokolle,
- die Einbindung in bestimmte oder Verbindung zu bestimmten Netzwerkebenen,
- Hardwareaufbau,
- Nutzung der identischen Hardware,
- das Messprinzip, sofern es Anfälligkeiten für eine simultane Auswirkung einzelner Manipulationen gibt (z.B. manipulierte Zeitbasis bei Phasor-Messungen)
- bei smarten Sensoren das Betriebssystem,
- Software zum Auslesen, Auswertung und Regelung,

- der Hersteller der Software, weil häufig auf eine gemeinsame Softwarebasis aufgebaut wird,
- Exposition der angebundenen Netzwerkebene nach Außen
- Verfügbarkeit für Remotezugriff
- Konfigurierbarkeit von Remote
- usw.

Einige der Eigenschaften führen bereits auch für die einzelnen Komponenten zu einer erhöhten Vulnerabilität gegenüber Cyber-Angriffen. Diese Eigenschaften werden dann zusätzlich zur Bildung von Mengen mit dieser Gemeinsamkeit, auch für die Einzelkomponenten, berücksichtigt.

Diese Zusatzinformation zu gemeinsamen Eigenschaften von Komponenten hinsichtlich Cyber-Angriffen kann genutzt werden, um bei nicht eindeutigen Ergebnissen der statistischen Detektionsverfahren zu einer Entscheidung zu kommen. Dazu werden Gruppen von Komponenten aufgestellt, die gleiche Eigenschaften aufweisen sowie Einzelkomponenten identifiziert, die Eigenschaften aufweisen, die die Vulnerabilität der einzelnen Komponenten beeinflussen. Jeder Eigenschaft wird anhand von Vorwissen eine Vulnerabilität bzgl. Cyber-Angriffen als Wert zwischen 0 und 1 zugewiesen. Bei der Detektion eines Angriffs wird anschließend das geforderte Signifikanzniveau in dem Maße abgesenkt (Schwellwertanpassung), in dem die betreffende Eigenschaft Vulnerabilität einbringt. Das heißt, für die Detektion von Angriffen, die eine bekannte Vulnerabilität nutzen, also von *erwarteten* Angriffen, wird das geforderte Signifikanzniveau abgesenkt. Da dieser zusätzliche Faktor eine Einschränkung der möglichen Angriffe darstellt, müssen die Gemeinsamkeiten sehr sorgfältig aufgestellt werden, um keine Eigenschaften auszuschließen, die für einen Angriff genutzt werden könnten. Zusätzlich wird sichergestellt, dass die Schwellwertanpassung so gewählt wird, dass auch eine *unerwartete* Manipulation, für die keine Gemeinsamkeit definiert wurde, bei einem kritischen Betrag erfolgreich detektiert wird.

Insbesondere die Detektion einer Manipulation in Komponenten, die eine Gemeinsamkeit aufweisen, liefert über die Gemeinsamkeit einen Hinweis auf den Angriffsvektor. Diese Information kann helfen, gezielte Gegenmaßnahmen zu ergreifen, die in einigen Fällen in Echtzeit das Abschalten der Anlage vermeiden kann, die auf einer längeren Zeitskala aber auch in Investitionsentscheidungen für Schutzmaßnahmen bestehen können.

## 3.2 Formale Beschreibung

Zur Nutzung im Detektionsprozess, wird in Abschnitt 3.2.1 das Vorwissen zu informationstechnischen Eigenschaften, die Vulnerabilitäten bedingen oder Gemeinsamkeiten unter den

Komponenten des Systems darstellen, formal erfasst und mit sinnvollen Gegenmaßnahmen assoziiert. Aufgrund dieser Eigenschaften erfolgt eine Anpassung der Schwellwerte, die in Abschnitt 3.2.2 beschrieben ist. Receiver Operating Characteristic Curves (ROC-Kurven), die als Werkzeug zur Schwellwertbestimmung und zur Messung der Aussagekraft der Tests genutzt werden, werden in Abschnitt 3.2.3 kurz vorgestellt. In Abschnitt 3.2.4 wird die maximale Schwellwertanpassung bestimmt, wobei mit Anforderungen an die Sensitivität und an eine Detektierbarkeit unerwarteter Manipulationen, zwei alternative Bedingungen zur Bestimmung vorgestellt werden. Die Bestimmung des allgemeinen Schwellwerts, über die ROC-Kurve, wird in Abschnitt 3.2.5 beschrieben. Zur Beschleunigung der Detektion kann außerdem eine Vorauswahl der zu untersuchenden Kombinationen aufgrund der statistischen Eigenschaften sinnvoll sein. Die Bestimmung von Schwellwerten für die Vorauswahl und die Auswertung ihrer Aussagekraft erfolgt in Abschnitt 3.2.6.

### 3.2.1 Definition des Vorwissens

#### Gemeinsamkeiten

Allen im System auftretenden informationstechnischen Eigenschaften  $P_i$  wird ein Vorwissen-Skalierungsfaktor  $I_i$  zugeordnet, der in einem Wert zwischen 0 und 1 die Vulnerabilität der betreffenden Eigenschaft bzgl. eines Cyberangriffs ausdrückt und einer Berücksichtigung zugänglich macht. Dabei entspricht ein Wert von 0 einer sicheren Eigenschaft, also beispielsweise einer völlig abgeschotteten Größe oder einer analogen Messung ohne Verarbeitung und 1 einer sehr vulnerablen Eigenschaft, wie z.B. einer frei über das Internet konfigurierbaren Größe.

Für die Eigenschaften werden Untermengen

$$X_i = \{Y|P_i\} \quad (3.1)$$

der Größen  $Y$

mit Gemeinsamkeiten  $P_i$ ,

gebildet, beispielsweise das gleiche Kommunikationsprotokoll, Verbindung zur gleichen Netzwerkebene, gleiches Messprinzip, gleiches Betriebssystem, gleicher Softwarehersteller oder ähnliches.

Für diejenigen Eigenschaften, die die Vulnerabilität von Einzelkomponenten beeinflussen, ergeben sich Untermengen, die genau eine Komponente enthalten.

Aus gemeinsamen Eigenschaften lässt sich außerdem ein Angriffsvektor und damit eine Menge möglicher Gegenmaßnahmen  $C_i$  ableiten. Die Eigenschaft  $P_i$ , der Vorwissen-Skalierungsfaktor  $I_i$  und die Menge passender Gegenmaßnahmen  $C_i$  sind mit der Unter-

menge assoziiert:

$$X_i \rightarrow (P_i, I_i, C_i) \quad (3.2)$$

### Definition der Gegenmaßnahmen

Als Gegenmaßnahmen  $C_i$  assoziiert werden alle sinnvollen Maßnahmen, von sehr gezielten Maßnahmen, die sich aus der Gemeinsamkeit ergeben, die aber sehr genaue Kenntnis des Systemzustandes voraussetzen können, bis hin zu grundlegenden Maßnahmen, die bei sehr kritischen und unklaren Systemzuständen Anwendung finden. Um die Wahl der passenden Maßnahme zu ermöglichen, werden sie zunächst nach den Kosten bei Anwendung sortiert. Die konkrete Maßnahme  $M_m$  der Notabschaltung ist dabei teurer als beispielsweise die konkrete Maßnahme der Unterbrechung von Kommunikationsverbindungen. Um zu vermeiden, dass für keine der Gegenmaßnahmen die Bedingungen erfüllt sind, weil logische Lücken vorhanden sind, werden nur 'positive' Bedingungen formuliert. Beispielsweise wird formuliert, dass der Zustand des Systems in einem bestimmten Bereich liegen und der Systemzustand zu einem bestimmten Grad bekannt sein muss, anstatt, dass für die Notabschaltung ein sehr kritischer oder unklarer Systemzustand gegeben sein muss. Dadurch sind häufig die Bedingungen mehrerer Maßnahmen erfüllt. An dieser Stelle kommen die zugeordnete Kosteneigenschaft zum tragen, es wird also die kostengünstigste Maßnahme ausgewählt. Die Voraussetzungen  $V_m$  und die Reihenfolge  $O_m$  gehören zu den konkreten Maßnahmen  $M_m$ , so dass die Gegenmaßnahmen  $C_i$  die Substruktur

$$C_m \rightarrow (M_{m,1 \dots n}, V_{m,1 \dots n}, O_{m,1 \dots n}) \quad (3.3)$$

aufweisen. Wurde eine der vordefinierten Untermengen  $X_o$  als manipuliert detektiert, wird also geprüft, welche der Bedingungen  $V_{o,1 \dots n}$  vollständig erfüllt sind. Von diesen wird dann die Maßnahme  $C_x$  mit der niedrigsten Positions- bzw. Kostenzahl  $O_m$  gewählt.

$$C_x = \{C_i | \{\{V_i | \text{Systemzustand}\} | \min(O_i)\}\} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Detektion

Für die Detektion wird für jede mögliche Kombination  $T_l \in Y$  von manipulierten Größen eine Prüfgröße  $z$  gemäß Messwerttest, Globaltest oder Hypothesentest ermittelt. Weil die verschiedenen Größen eine unterschiedlich starke Kopplung an das System aufweisen können, werden die Prüfgrößen für Messwerttest und Hypothesentest normiert. Dazu werden alle Größen und Kombinationen jeweils um den Betrag von  $1\sigma$  manipuliert. Die Prüfgröße dieser einheitlich manipulierten Größe bzw. Kombination dient dann zur Normierung der

Prüfgrößen ebendieser Größe oder Kombination vor der tatsächlichen Detektion. Für die normierte Prüfgröße wird geprüft, ob sie einen definierten Schwellwert überschreitet.

Klassisch werden die Schwellwerte bei der Großfehlerdetektion der Data Reconciliation über ein Signifikanzniveau bestimmt, dessen Berechnung genaue Kenntnisse der statistischen Eigenschaften der Systemkomponenten voraussetzt und das für jede Vielfachheit von Manipulationen (Manipulationen der Vielfachheit 1 = nur eine Größe manipuliert, Manipulationen der Vielfachheit 2 = zwei Größen manipuliert usw.) bestimmt wird [54]. Auch in der vorliegenden Arbeit wird für jeden Test, für jede Vielfachheit von Manipulationen zunächst ein allgemeiner Schwellwert bestimmt. Anders als in der Literatur, erfolgt die Bestimmung der allgemeinen Schwellwerte hier aber über Großzahlsimulationen und ROC-Kurven, was in Abschnitt 3.2.5 näher beschrieben wird und jeweils am Anfang der Auswertungen der Beispiele konkret für die drei Tests erfolgt (Abschnitte 3.3.3 bis 3.3.5 sowie 3.4.3 bis 3.4.5).

Direkt aus der ROC-Kurve ohne Schwellwertanpassung bestimmt wird ein allgemeiner Schwellwert ohne Schwellwertanpassung, im Folgenden mit  $SW_{\text{ohne } k_x}$  bezeichnet, wobei  $k$  die Vielfachheit der mit diesem Schwellwert untersuchten Manipulationen und  $x$  die Art des Tests (*MT* Messwerttest, *GT* Globaltest und *Hypo* Hypothesentest) kennzeichnet. Ein Schwellwert bei der Falsch-Positiv-Rate von 97% bzw. 99,7% wird als  $SW_{97\%k_x}$  bzw.  $SW_{99,7\%k_x}$  bezeichnet. Auf der ROC-Kurve mit (zuvor zu bestimmender) Schwellwertanpassung kann direkt der allgemeine Schwellwert mit Schwellwertanpassung bestimmt werden, der mit  $SW_{0,k_x}$  bezeichnet wird oder mit  $SW_0$ , wenn alle Tests und Vielfachheiten gemeint sind oder die Testart und Vielfachheit aus dem Zusammenhang klar ist. Aus diesem lässt sich mit der Schwellwertanpassung der angepasste Schwellwert  $SW_{1,k_x}$  berechnen. Für die Anwendung in einem realen System ist diese Festlegung der Schwellwerte einfacher, da weniger sichere Kenntnisse zum statistischen Verhalten der Komponenten erforderlich ist, sondern auf reale, ursprünglich nicht mit Großfehlern behaftete Werte, Großfehler aufmodelliert werden können, um damit ROC-Kurven zu erstellen.

Um die Detektion von Manipulationen zu verbessern, wird in dieser Arbeit die Detektion von exponierten Größen und von Kombinationen von Größen mit gemeinsamen Eigenschaften  $X_i$  erleichtert. Dazu wird für jede Kombination  $T_l \in Y$ , die gleichzeitig eine Untermenge  $X_i$  darstellt, der allgemeine Schwellwert mit einem Faktor multipliziert, der ihn so anpasst, dass er von den Prüfgrößen leichter erfüllt wird. Dazu wird eine Schwellwertanpassung  $SA_x$  (für die Testart  $x$ ) bzw.  $SA$  (für alle Testarten) bestimmt. Der allgemeine Schwellwert wird bei Messwerttest und Hypothesentest mit dem Faktor  $(1 - SA_{\text{MT/Hypo}})$  multipliziert und verringert damit den Schwellwert, weil gilt  $0 \leq SA_x < 1$ . Für den Globaltest wird durch den Faktor  $(1 - SA_{\text{GT}})$  geteilt, was zu einer Erhöhung des Schwellwerts führt. Die Bestimmung der Schwellwertanpassung erfolgt in Abschnitt 3.2.4.

Zusätzlich wird der Schwellwert über die Einstufung der Vulnerabilität  $I_i$  der gemeinsamen

Eigenschaft  $P_i$ , also für jede Kombination individuell, angepasst. Damit ergibt sich für den Schwellwert:

$$SW_{1\_i\_MT/Hypo}(T_l) = SW_{0\_k\_MT/Hypo} \cdot (1 - SA_{MT/Hypo} \cdot I_i) \quad (3.5)$$

$$SW_{1\_i\_GT}(T_l) = \frac{SW_{0\_k\_GT}}{(1 - SA_{GT} \cdot I_i)} \quad (3.6)$$

Für den Fall der größtmöglichen Vulnerabilität der Eigenschaft  $P_i$ , also  $I_i = 1$ , stellt die Schwellwertanpassung  $SA_x$  damit die maximale mögliche Anpassung dar. Der angepasste Schwellwert  $SW_{1\_i\_x}$  wird also individuell für jede Kombination  $i$  festgelegt.

Für die folgenden Demonstrationsbeispiele wird die Vulnerabilität für alle Mengen  $T_l$  mit  $I_i = 1$  gewählt, um die Auswirkung der Schwellwertanpassung klar demonstrieren zu können, ohne Verfälschung durch einen zusätzlichen Faktor. Der angepasste Schwellwert ist dann nur noch von der Vielfachheit  $k$  abhängig. Um diese Abhängigkeit zum Ausdruck zu bringen wird der angepasste Schwellwert im Folgenden auch nach dem Schema  $SW_{1\_k\_x}$  benannt, mit der Vielfachheit  $k$  und der Testart  $x$ .

Im konkreten Detektionsprozess kann die Untersuchung aller Kombinationen häufig vermieden werden, wenn die Vielfachheit  $k$  von klein nach groß durchlaufen wird. Es wird also zunächst nach Manipulationen der Vielfachheit 1 gesucht, dann nach Manipulationen der Vielfachheit 2 usw. Beim Globaltest kann der Prozess nach der ersten erfolgreichen Detektion abgebrochen werden, weil danach konstruktionsbedingt Detektionen mit höherer Vielfachheit  $k$  nicht auf weitere Manipulationen hinweisen. Bei Messwerttest und Hypothesentest kann über einen zusätzlichen Schwellwert für die Prüfgröße eine Vorauswahl getroffen werden, welche Kombinationen der nächst höheren Vielfachheit eine Detektion liefern können. Die Bestimmung dieses zusätzlichen Schwellwerts ist in Abschnitt 3.2.6 beschrieben.

Es müssen also folgende Schwellwerte unterschieden werden:

- Der **klassische Schwellwert** aus der Literatur, der über ein Signifikanzniveau bestimmt aber hier nicht verwendet wird. Anforderungen an das Signifikanzniveau wären für die Beispielsysteme immer willkürlich, was bei einem Vergleich damit zu willkürlich beeinflussbaren Ergebnissen führen würde.
- Der **allgemeine Schwellwert ohne Einsatz der Schwellwertanpassung**  $SW_{\text{ohne } k\_x}$ , (d.h. es gilt für alle Größen bzw. Kombinationen der gleichen Vielfachheit der gleiche Schwellwert) ist für die Berechnung der Schwellwertanpassungen über die Falsch-Positiv-Rate notwendig. Außerdem wird er anstelle des klassischen Schwellwerts für die klassische Großfehlerdetektion verwendet, um die Verbesserungen durch die neue Methode aufzuzeigen. Er ist auf den ROC-Kurven jeweils auf der hellsten Kurve abzulesen, für die die Schwellwertanpassung von  $SA = 0$ , also keine Schwellwertanpassung

gilt. Die Erstellung und Verwendung von ROC-Kurven ist in Abschnitt 3.2.3 kurz dargestellt. Für Manipulationen der Vielfachheit 1 könnte er dem klassischen Schwellwert entsprechen, sofern dieser so gewählt wurde, dass gleichzeitig möglichst hohe Sensitivität und Spezifität erzielt wird. Für höhere Vielfachheiten liefert er bessere Ergebnisse als der klassische Schwellwert, weil Mehrfachfehler klassischerweise als unwahrscheinlicher betrachtet werden, als sie bei Cyber-Angriffen sind.

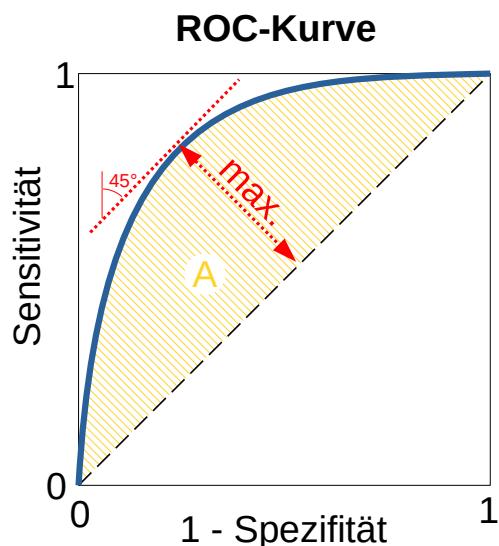
- Der **allgemeine Schwellwert mit Einsatz der Schwellwertanpassung  $SW_{0\_k\_x}$**  wird auf einer ROC-Kurve mit Schwellwertanpassung bestimmt. Für Größen und Kombinationen, die durch Vulnerabilitäten oder Gemeinsamkeiten anfälliger sind für Cyberangriffe, werden gemäß Gleichung 3.5 oder 3.6 angepasste Schwellwerte verwendet und für alle anderen direkt die allgemeinen Schwellwerte  $SW_{0\_k\_x}$ . Das heißt es gibt für jede Vielfachheit genau einen allgemeinen Schwellwert  $SW_{0\_k\_x}$ , der auf der Kurve mit der maximalen Schwellwertanpassung,  $SA$  bestimmt wird. Er ist nicht abhängig von einzelnen Größen oder Kombinationen, da die individuellen Faktoren  $I_i$  erst für die Bestimmung der angepassten Schwellwerte zum Einsatz kommen. Der allgemeine Schwellwert mit Schwellwertanpassung ist jeweils in den beiden ROC-Kurven mit den zuvor bestimmten maximalen Schwellwertanpassungen markiert und beschriftet. Eine ausführlichere Beschreibung, wie der allgemeine Schwellwert  $SW_{0\_k\_x}$  bestimmt wird, erfolgt in Abschnitt 3.2.5.
- Der **angepasste Schwellwert  $SW_{1\_i\_x}$**  wird aus dem allgemeinen Schwellwert  $SW_{0\_k\_x}$  mit Hilfe der Gleichungen 3.5 und 3.6 berechnet. Dazu ist die Kenntnis der maximalen Schwellwertanpassung  $SA_x$  erforderlich, für deren Bestimmung in Abschnitt 3.2.4 zwei alternative Wege vorgestellt werden. Die Vulnerabilität  $I_i$  wird in den Beispielen 3.3 und 3.4 mit ihrem maximalen Wert  $I_i = 1$  gewählt, um die Auswirkungen der Schwellwertanpassung ohne möglicherweise verwirrende zusätzliche Einflussfaktoren aufzeigen zu können.
- Der **Schwellwert bei einer Richtig-Positiv-Rate von 97% bzw. 99,7%:  $SW_{97\%\_k\_x}$  bzw.  $SW_{99,7\%\_k\_x}$**  wird für eine der beiden Wege zur Bestimmung der Schwellwertanpassung in Abschnitt 3.2.4 benötigt. Dazu wird auf der ROC-Kurve für Fehler der Vielfachheit  $k$  ohne Schwellwertanpassung der Punkt bestimmt, der die Richtig-Positiv-Rate von 97% bzw. 99,7% aufweist und der Schwellwert  $SW_{97\%\_k\_x}$  bzw.  $SW_{99,7\%\_k\_x}$  nachgeschlagen, mit dem dieser Punkt erzeugt wurde.
- Der **Schwellwert für die Vorauswahl möglicherweise manipulierter Kombinationen** wird zur Vorauswahl genutzt, welche Größen und Kombinationen in einer Manipulation der nächst höheren Vielfalt enthalten sein könnten. Dazu werden eigene ROC-Kurven erstellt, in denen nicht nur die vollständigen manipulierten Kombinationen als manipuliert (also richtig Positive oder falsch Negative) betrachtet werden, sondern auch alle Untermengen der Kombinationen. Auch die Schwellwertanpassung er-

folgt für die Größen und Kombinationen, die Untermenge einer erwarteten Manipulation einer höheren Vielfachheit sind. Auf diesen ROC-Kurven werden die optimalen Schwellwerte bestimmt. Die Beschreibung erfolgt in Abschnitt 3.2.6.

### 3.2.3 ROC-Kurven

Zur Bestimmung der Schwellwerte für die Prüfgrößen werden Receiver-Operating-Characteristic-Curves (ROC-Kurven) verwendet, deren grundsätzliche Verwendung in diesem Abschnitt kurz vorgestellt wird. Die ROC-Kurven erlauben allgemein die Bewertung und Optimierung von dualen Entscheidungen.

Für die Erstellung der ROC-Kurven werden für Testschwellwerte, die sich über den gesamten Wertebereich der Prüfgröße verteilen, die Sensitivität, also die Richtig-Positiv-Rate, und 1-Spezifität, also die Falsch-Positiv-Rate berechnet. Die ROC-Kurve erhält man durch die Auftragung von Sensitivität gegen 1-Spezifität (Abbildung 3.1).



**Abbildung 3.1:** Muster einer ROC-Kurve (Blau) mit Demonstration der Bestimmung des optimalen Schwellwerts (Rot) und der Fläche (gelb Schraffiert) als Qualitätsmaß für den Test

Bei einigen Tests, wie dem Messwerttest und dem Hypothesentest, führt ein geringer Schwellwert zu vielen Detektionen und damit zu einer sehr hohen Richtig-Positiv-Rate, aber auch zu einer sehr hohen Falsch-Positiv-Rate. Dies entspricht dem Punkt (1, 1) auf der ROC-Kurve. Bei anderen Tests, wie hier dem Globaltest, ist dies bei einem hohen Schwellwert der Fall, weil hier die Prüfgröße für die Detektion unter dem Schwellwert liegen muss. Bei einem hohen Schwellwert für Messwert und Hypothesentest bzw. einem niedrigen für den

Globaltest, treten dagegen fast keine Detektionen auf. Sowohl Richtig-Positiv-Rate als auch Falsch-Positiv-Rate sind damit sehr niedrig, es ergibt sich also ein Kurvenpunkt im Koordinatenursprung. Bei einem Test der absolut aussagekräftig wäre, müssten (mit dem richtigen Schwellwert) alle Manipulationen erkannt werden, die Richtig-Positiv-Rate also bei 1 liegen, während keine Fehldetektionen auftreten dürften, die Falsch-Positiv-Rate also bei 0 liegen würde. Die Tests liefern in der Realität leider keine so eindeutige Unterscheidung zwischen manipulierten und nicht manipulierten Daten. Je näher ihre ROC-Kurve diesem Idealpunkt jedoch kommt, desto aussagekräftiger sind sie. Im Rahmen dieser Arbeit wurden optimale Schwellwerte an der Stelle der ROC-Kurve bestimmt, an der sie den größten Abstand zur Diagonale aufweist. Damit wird die Summe aus Richtig-Positiv-Rate und Richtig-Negativ-Rate (also 1-Falsch-Positiv-Rate) maximiert. Der Punkt lässt sich graphisch auch über eine Tangente an die Kurve mit der Steigung von 1 ermitteln. Bei realen Systemen treten oft Randbedingungen, wie eine Begrenzung der zulässigen Fehlalarme auf. Auch in diesem Fall kann über die ROC-Kurve der passende Schwellwert bestimmt werden.

Zufallsprozesse, die als Test keine Aussagekraft aufweisen, führen bei der ROC-Kurve zu einem Kurvenverlauf entlang der Diagonale. Die Falsch-Positiv-Rate steigt also bei sinkendem Schwellwert mit der Richtig-Positiv-Rate gleichermaßen an. Als objektives Maß für die Aussagekraft eines Tests wird daher die Fläche zwischen der Kurve und der Diagonale (AUC) genutzt.

### 3.2.4 Bestimmung der Schwellwertanpassung $SA_x$

Im hier vorgestellten Verfahren erfolgt die Bestimmung der allgemeinen Schwellwerte  $SW_0$  (Abschnitt 3.2.5) über Großzahlsimulationen und ROC-Kurven, die in Abschnitt 3.2.3 vorgestellt werden. Da der allgemeine Schwellwert für das neue Verfahren auf ROC-Kurven bestimmt wird, die die Schwellwertanpassung bereits berücksichtigen, ist für seine Bestimmung die Kenntnis der Schwellwertanpassung  $SA_x$  notwendig, die in diesem Abschnitt berechnet wird. Für die Bestimmung der Schwellwertanpassung werden zwei alternative Möglichkeiten vorgestellt. Die erste beruht auf der Anforderung, dass besonders vulnerable Manipulationen (also bei  $I_i = 1$  mit einer bestimmten Sensitivität, im Beispiel 97%, detektiert werden. Die zweite nutzt die Forderung, dass unerwartete Manipulationen gegenüber den erwarteten nicht zu stark unterdrückt werden sollen. Im Beispiel soll eine unerwartete Manipulation detektierbar sein, wenn sie die doppelte normierte Auslenkung aufweist, wie eine detektierbare erwartete Manipulation.

## Bestimmung über Richtig-Positiv-Rate

Die Bestimmung über die Richtig-Positiv-Rate führt zu vielfachheitabhängigen Schwellwertanpassungen. Diese Schwellwertanpassungen werden zusätzlich mit der Vielfachheit im Index markiert, also als  $SA_{k\_x}$  bezeichnet.

Einige der erwarteten Manipulationen können im überwachten System absehbar zu Schäden führen. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, für die erwarteten Manipulationen eine Schwellwertanpassung zu wählen, um eine bestimmte, höhere Richtig-Positiv-Rate gegenüber den normalen Detektionen zu ermöglichen. Die Schwellwertanpassung kann also über die Forderung festgelegt werden, für erwartete Manipulationen mit Vulnerabilität  $I_i = 1$ , eine bestimmte Richtig-Positiv-Rate zu gewährleisten.

In den ROC-Kurven ist jeweils die Kurve, die ohne Schwellwertanpassung erstellt wurde, in den Diagrammen 3.2, 3.4 und 3.5 bzw. 3.14, 3.16 und 3.17 im hellsten Farbton dargestellt. Auf dieser ROC-Kurve wird der optimale Schwellwert bestimmt und der Schwellwert, der auf der Kurve zu einer bestimmten Richtig-Positiv-Rate gehört. Im Beispiel wird eine Richtig-Positiv-Rate von 97% für die einzelnen Messwertsätze, also die Messwerte eines Zeitpunkts gefordert. Die Punkte auf den Kurven, die zur Richtig-Positiv-Rate von 97% gehören, weisen, ohne Schwellwertanpassung, gleichzeitig eine sehr hohe Falsch-Positiv-Rate auf. Die Schwellwertanpassung wird aus diesen beiden Schwellwerten so berechnet, dass der optimale Schwellwert ohne Schwellwertanpassung, der dem allgemeinen Schwellwert  $SW_{\text{ohne } k\_x}$  entspricht, zu dem Schwellwert bei einer Richtig-Positiv-Rate von 97%,  $SW_{97\% \_k\_x}$  auf der Kurve ohne Schwellwertanpassung, das gleiche Verhältnis zu einander aufweisen, wie der allgemeine Schwellwert mit Schwellwertanpassung  $SW_{0\_k\_x}$  und dem angepassten Schwellwert  $SW_{1\_i\_x}$ . Durch umformen der Gleichungen 3.5 und 3.6 lässt sich damit  $SA$  über Gleichungen 3.7 und 3.8 berechnen, wobei der maximale Einflussfaktor  $I_i = 1$  eingesetzt wird.

$$SA_{k\_MT/Hypo} = 1 - \frac{SW_{97\% \_k\_MT/Hypo}}{SW_{\text{ohne } k\_MT/Hypo}} \quad (3.7)$$

$$SA_{k\_GT} = 1 - \frac{SW_{\text{ohne } k\_GT}}{SW_{97\% \_k\_GT}} \quad (3.8)$$

Mit der daraus ermittelten Schwellwertanpassung wird eine neue ROC-Kurve berechnet und ein neuer Schwellwert  $SW_{0\_k\_x}$  bestimmt. Aus diesem wird über 3.5 und 3.6 der angepasste Schwellwert  $SW_{1\_i\_x}$  berechnet.

Wird über mehrere Zeitpunkte gemittelt, erhöht sich dann die Richtig-Positiv-Rate. Zur Demonstration wird im statischen Beispiel eine Richtig-Positiv-Rate von 97% gefordert. In der ROC-Kurve ohne Schwellwertanpassung für das statische Beispiel wird also der Schwellwert

für die Richtig-Positiv-Rate von 97% abgelesen. Beim dynamischen Beispiel muss berücksichtigt werden, dass im Verfahren der Mittelwert über mehrere Zeitpunkte betrachtet wird, was zu einem Ausgleich und damit zu einer Reduktion statistischer Fehler führt. Die Richtig-Positiv-Rate für das dynamische Beispiel liegt demnach bei 99,7%, was sich aus der Unsicherheit eines arithmetischen Mittelwerts (Gleichung 3.9) aus  $N = 100$  Punkten mit einer Unsicherheit der Einzelereignisse von  $u_{einzel} = 3\%$  ergibt.

$$u_N = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N u_{einzel}^2} \quad (3.9)$$

Wird stattdessen die Bedingung gestellt, dass in  $N$  (Zeit-)Punkten mindestens  $M$  Detektionen beobachtet werden sollen, um eine Manipulation anzunehmen, lässt sich die neue Wahrscheinlichkeit oder Richtig-Positiv-Rate und über die kumulierten Wahrscheinlichkeiten aus der Wahrscheinlichkeit oder Richtig-Positiv-Rate für das Einzelereignis  $p_{einzel} = 97\%$  berechnen (Gleichung 3.10) berechnen:

$$p_{N,X \geq M} = \binom{N}{M} \cdot p_{einzel}^k \cdot (1 - p_{einzel})^{N-M} \quad (3.10)$$

Bei dieser Bestimmung der Schwellwertanpassung ergeben sich verschiedene Schwellwertanpassungen für die unterschiedlichen Vielfachheiten.

### Bestimmung über Störverhältnis

Die Bestimmung über das Störverhältnis führt zu einer vielfachheitunabhängigen Schwellwertanpassung.

Für Messwerttest und Hypothesentest kann ein alternativer Ansatz zur Bestimmung der Schwellwertanpassung  $SA$  verfolgt werden. Auch bei sorgfältiger Aufstellung der Gemeinsamkeiten kann es vorkommen, dass Manipulationen zeitgleich in Größen auftreten, die nicht als Untermenge  $X_i$  definiert wurden. Neben übersehenen oder unbekannten Gemeinsamkeiten oder Sensorsausfällen, die nicht mit einem Cyberangriff in Zusammenhang stehen, können aufwändige Angriffe auch die Manipulation unerwarteter Kombinationen realisieren. Stuxnet war beispielsweise mit umfassenden Bibliotheken für vielfältige gezielte Manipulationen ausgestattet, mit denen beinahe beliebige Kombinationen, auch solche ohne Gemeinsamkeiten zeitgleich manipuliert werden konnten. Durch Seiteneffekte des Angriffs kann das vorgestellte Verfahren aber auch bei aufwändigen Angriffen Hinweise auf die Angriffsvektoren liefern.

Aufgrund des möglichen Auftretens unerwarteter Kombinationen, kann an die Schwellwertanpassung die Forderung gestellt werden, dass die Bevorzugung der erwarteten Mani-

pulationen durch die Schwellwertanpassung, die Detektion unerwarteter Manipulationen nicht vollständig unterdrückt. Das heißt, die Schwellwertanpassung für Kombinationen mit vorab identifizierten Gemeinsamkeiten  $X_i$  darf nicht zu stark sein. Die Schwellwertanpassung  $SA$  soll die Anpassung des Schwellwerts so begrenzen, dass bei höherer Auslenkung auch unerwartete Cyber-Angriffe erkannt werden. Wenn die Prüfgröße bei einer unerwarteten Manipulation einer bestimmten Auslenkung genau den allgemeinen Schwellwert erfüllt, darf der angepasste Schwellwert nur so weit skaliert sein, dass er eine erwartete Manipulation mit der halben Auslenkung detektiert. Um dieses Verhältnis für alle Fälle sicher zu stellen, wird unter den unerwarteten Manipulationen die geringste auftretende Prüfgröße betrachtet, während für die erwarteten Manipulationen die höchste auftretende Prüfgröße genutzt wird.

Für die Bestimmung der Schwellwertanpassung  $SA$  werden die Prüfgrößen ohne statistische Fehler bestimmt. Für unerwartete Manipulationen wird dabei eine Auslenkung von  $2\sigma$  simuliert, für erwartete Manipulationen eine Auslenkung von  $1\sigma$ . Im Grenzfall erfüllt die kleinste Prüfgröße der unerwarteten Manipulation  $z_{2\sigma\_un}$  genau den Schwellwert  $SW_0$ . Dann muss für den Messwerttest  $SA_{MT}$  so bestimmt werden, dass die höchste Prüfgröße unter den erwarteten Manipulationen  $z_{1\sigma\_er}$  den angepassten Schwellwert  $SW_{0\_k\_MT} \cdot (1 - SA_{MT})$  erfüllt. Daraus lässt sich  $SA_{MT}$  berechnen:

$$\begin{aligned} \min(z_{2\sigma\_un}) &= SW_{0\_k\_MT} \\ \max(z_{1\sigma\_un}) &= SW_{0\_k\_MT} \cdot (1 - SA_{MT}) \\ \max(z_{1\sigma\_un}) &= \min(z_{2\sigma\_un}) \cdot (1 - SA_{MT}) \\ \implies SA_{MT} &= 1 - \frac{\max(z_{1\sigma\_er})}{\min(z_{2\sigma\_un})} \end{aligned} \tag{3.11}$$

Beim Hypothesentest wird die Schwellwertanpassung wie beim Messwerttest (Gleichung 3.11) bestimmt, als Bezeichnung für die Prüfgröße ist beim Hypothesentest jedoch  $T$  üblich, wie in Gleichung 3.12 dargestellt.

$$\implies SA_{Hypo} = 1 - \frac{\max(T_{1\sigma\_er})}{\min(T_{2\sigma\_un})} \tag{3.12}$$

Für lineare Systeme, wie sie hier betrachtet werden, führt die Normierung der Prüfgrößen, die in Abschnitt 3.2.2 beschrieben wird, zu einer Vereinfachung. Mit der Normierung führt beim Messwerttest eine Verdoppelung der Auslenkung einer Manipulation zur Verdopplung der Prüfgröße. Beim Hypothesentest ist das Verhältnis quadratisch. Eine Verdopplung der Manipulationshöhe führt also zu einer Vervierfachung der Prüfgröße. Im linearen System können die Schwellwertanpassungen also für den Messwerttest mit  $SA_{MT} = 0,50$  und für den

Hypothesentest mit  $SA_{Hypo} = 0,75$  gewählt werden. Dieser Zusammenhang besteht über alle Vielfachheiten hinweg. Beim Globaltest ist die Prüfgröße bei der Detektion, also der Identifikation der Manipulation, dagegen nicht mehr von der Höhe der untersuchten Manipulation abhängig. Da der Zusammenhang zwischen Prüfgröße und Manipulationshöhe ansonsten quadratisch ist, wie beim Hypothesentest, kann auch hier  $SA_{GT} = 0,75$  gewählt werden. Der in diesem Verfahren über alle Vielfachheiten gleiche Wert der Schwellwertanpassung  $SA$  hat den Vorteil, dass die Differenz zum individuellen Schwellwert auch zwischen verschiedenen Vielfachheiten getester Größen und Kombinationen direkt verglichen werden kann.

Für einige unerwartete Manipulationen, kann eine Manipulation bereits gefährliche Folgen für das System haben, wenn ihre Auslenkung geringer ist als die doppelte Auslenkung der für die erwarteten Manipulationen akzeptierte, die hier als Vergleich genutzt wird. In diesem Fall muss für die Gleichung 3.11 anstelle der Prüfgröße für die Manipulation um  $2\sigma$ , die Prüfgröße für die entsprechend geringere Manipulation verwendet werden.

Im Beispiel wird der Globaltest mit der vielfachheitsabhängigen Schwellwertanpassung aus der Herleitung in Abschnitt „Bestimmung über Richtig-Positiv-Rate“ demonstriert, während bei Messwerttest und Hypothesentest die in der Nutzung etwas weniger aufwändige, für alle Vielfachheiten gemeinsame Schwellwertanpassung die in Abschnitt „Bestimmung über Störverhältnis“ bestimmt wird, eingesetzt wird.

### 3.2.5 Bestimmung der allgemeinen Schwellwerte $SW_0$

Die allgemeinen Schwellwerte lassen sich über Großzahlsimulationen auf Basis des bereits vorliegenden Modells des betrachteten Systems mit Kenntnis der Schwellwertanpassung  $SA$  bestimmen. Dazu werden für jede Testmethode (Messwerttest, Globaltest, Hypothesentest) und alle betrachteten Vielfachheiten von Manipulationen  $k$ , ROC-Kurven generiert, aus denen die optimalen Schwellwerte abgelesen werden können. Dabei werden zufällige Kombinationen von Messwerten mit statistischen Fehlern und Manipulationen mit fester Größe und zufälligem Vorzeichen für die erwarteten Größen und Kombinationen  $X_i$  simuliert. Für die Erstellung der ROC-Kurven werden die unerwarteten Größen und Kombinationen direkt mit den Testschwellwerten und die erwarteten Größen und Kombinationen mit den über die zuvor bestimmte Schwellwertanpassung  $SA$  angepassten Testschwellwerten ausgewertet. Für die neue Detektionsmethode wird jeweils in dieser ROC-Kurve mit Schwellwertanpassung der optimale Schwellwert im Punkt mit dem maximalen Abstand zur Diagonale bestimmt, der als allgemeiner Schwellwert mit Schwellwertanpassung  $SW_0$  verwendet wird. Um Verwechslungen zu vermeiden, sind Datenpunkte der ROC-Kurven grundsätzlich nur mit den dazu gehörenden allgemeinen Schwellwerten beschriftet. Die angepassten Schwellwerte  $SW_1$  werden für die Detektion aus diesem optimalen Schwellwert  $SW_0$  mit der Schwell-

wertanpassung  $SA$  und der Vulnerabilität  $I_i$  der jeweiligen Eigenschaft  $P_i$  nach Gleichungen 3.5 bzw. 3.6 bestimmt.

Außerdem wird auf der ROC-Kurve ohne Schwellwertanpassung  $SA = 0$  der optimale Schwellwert bestimmt. Dieser wird für die klassische Fehlerdetektion verwendet, um einen Vergleich mit der neuen Methode zu zeigen.

### **3.2.6 Schwellwert für die Vorauswahl möglicherweise manipulierter Kombinationen**

Messwerttest und Globaltest sind iterative Tests, bei denen zunächst auf Manipulationen der Vielfachheit 1, dann auf Manipulationen der Vielfachheit 2, auf Manipulationen der Vielfachheit 3 usw. getestet wird. Beim Hypothesentest ist dies nicht direkt in der Form des Tests angelegt. Da die Prüfgröße für jede Fehlerhypothese einzeln und unabhängig voneinander berechnet wird, können auch hier die Vielfachheiten der Fehler von klein nach groß durchlaufen werden.

Beim Globaltest endet das iterative Vorgehen nach einer erfolgreichen Detektion. Der Globaltest prüft nur, ob die Modellabweichung für die verbleibenden, nicht als möglicherweise manipuliert entfernten Größen, alleine mit ihren statistischen Fehlern erklärbar ist. Daher muss jede Kombination mit höherer Vielfachheit, die die detektierte Kombination enthält, ebenfalls detektiert werden. Bei mehrdeutigen Detektionen kann darüber auch geprüft werden, welche Kombination tatsächlich manipuliert ist.

Eine solche Einschränkung der zu untersuchenden Kombinationen besteht bei Messwerttest und Hypothesentest nicht. Da die Anzahl aller Kombinationen sehr groß werden kann, ist der Rechenaufwand für die Untersuchung aller Kombinationen sehr hoch. Aus diesem Grund wird im Folgenden geprüft, ob für Messwerttest und Hypothesentest ein Teil der Kombinationen auch ohne Berechnung ihrer Prüfgröße ausgeschlossen werden kann.

Untersucht wurde, ob aus der Prüfgröße geschlossen werden kann, ob die untersuchte Größe oder Kombination Bestandteil einer Manipulation mit höherer Vielfachheit sein könnte. In diesem Fall wäre es möglich, nur Kombinationen mit Größen zu untersuchen, deren Prüfgröße auf eine Manipulation mit höherer Vielfachheit hinweist. Dazu wurden ROC-Kurven erstellt, bei denen jede Untermenge der tatsächlich manipulierten Menge als manipuliert, also als Richtig-Positiv oder Falsch-Negativ, betrachtet wurde. Der Test soll für jede Untermenge der Manipulation eine Detektion liefern. Die ROC-Kurven zeigen, ob die Prüfgröße für eine solche Vorauswahl der untersuchten Kombinationen geeignet ist und erlaubt die Bestimmung eines Schwellwerts. Diese modifizierten ROC-Kurven des Messwerttests (Abb. 3.3) und des Hypothesentests (Abb. 3.6) zeigen tatsächlich eine Aussagekraft des Tests an. Im Beispiel werden die Schwellwerte bestimmt und für die Vorauswahl eingesetzt. Beim Globaltest

liefert die Prüfgröße wie erwartet keine Information für eine Vorauswahl. Die ROC-Kurven liegen sehr nahe an der Diagonale (Abb. A.1).

## 3.3 Statisches Beispiel

Als statisches Beispielsystem wird auch hier der einfach verzweigte Kühlkreislauf betrachtet, der im Abschnitt 2.1.1 vorgestellt wurde.

Zur Anwendung der beschriebenen Methoden werden für die Durchflussmengen zunächst Werte berechnet, die die Gleichungen erfüllen. Anschließend werden normalverteilte statistische Fehler aufmodelliert (Tabelle 3.3). Durch dieses Vorgehen ist die Breite der statistischen Fehler bekannt und kann für die Varianzmatrix verwendet werden. Zur Simulation eines Angriffs wird auf einen oder mehrere Messwerte zusätzlich ein Offset aufaddiert.

### 3.3.1 Aufstellung des Vorwissens

Für die Nutzung von Vorwissen werden die Eigenschaften  $P_i$  der Komponenten aufgestellt. Jeder dieser Eigenschaften wird ein Vorwissen-Skalierungsfaktor  $I_i$  zugeordnet, der die Vulnerabilität der betreffenden Eigenschaft einstuft. Der Vorwissen-Skalierungsfaktor  $I_i$  liegt für jede Eigenschaft  $P_i$  zwischen 0, für nicht vulnerable Eigenschaften und 1 für sehr vulnerable, also leicht für Angriffe nutzbare Eigenschaften.

Aufgrund der geringen Systemgröße des Beispielsystems wurden für das Beispiel alle Vorwissen-Skalierungsfaktoren  $I_i$  auf 1 gesetzt. Wie eine solche Aufstellung aussehen könnte ist exemplarisch in Tabelle 3.1 gezeigt.

Eigenschaft $P_i$	Vorwissen-Skalierungsfaktor $I_i$	Größen $X_i$ mit Eigenschaft $P_i$
z.B. über das Internet konfigurierbar	1	1
z.B. online kommunizierter Parameter	1	3
z.B. unverschl. Kommunikation per Wlan	1	6
z.B. gemeinsames Betriebssystem	1	1, 5
z.B. gemeinsam genutzte Hardware	1	4, 6
z.B. gemeinsamer Firmwarehersteller	1	2, 3
z.B. gleiches Kommunikationsprotokoll	1	1, 2, 3
z.B. gemeinsame, exponierte Netzwerkebene	1	3, 4, 5
z.B. gemeinsamer Softwarehersteller	1	2, 4, 6
...	1	3, 5, 6

**Tabelle 3.1:** Beispiel: Aufstellung informationstechnischer Eigenschaften von Größen, zur Verbesserung der Manipulationsdetektion

Zu den Eigenschaften werden mögliche Gegenmaßnahmen  $M_m$  aufgestellt und der Eigenschaft  $P_i$  zugeordnet. Für die Gegenmaßnahmen werden Vorbedingungen  $V_m$  formuliert

und eine Kosten-Position  $O_m$  innerhalb der Gegenmaßnahmen zugeordnet. Ein Beispiel ist in Tabelle 3.2 dargestellt.

Eigenschaft $P_i$	Gegenmaßnahme $M_m$	Vorbedingungen $V_m$	Kostenpos. $O_m$
über das Internet konfigurierbar	Verbindung trennen Wert Rekonstruieren	Bekannter, stabiler Zustand Zustand geringe Abh. vom Wert	1
...		Bekannter, stabiler Zustand	2
gleiches Kommunikations-protokoll	Adressänderung ...	Bekannter, stabiler Zustand Identifikation bei Verbindungsauftbau	3
...	Sicherer Modus Notabschaltung	...	...
		Bedingt stabiler Zustand	9
		-	10

**Tabelle 3.2:** Beispiel: Aufstellung der Gegenmaßnahmen für die Eigenschaften

Einige der Gegenmaßnahmen sind auf mehrere mögliche Manipulationen anwendbar. Darauf werden die Gegenmaßnahmen aufgestellt und von den Eigenschaften aus referenziert. Bei der Detektion einer erwarteten Kombination  $X_i$  wird über die gemeinsamen Eigenschaften  $P_i$  die Menge der möglichen Gegenmaßnahmen  $C_i$  bestimmt. Es wird geprüft welche der Vorbedingungen  $V_m$  vom Systemzustand erfüllt werden, beginnend mit der geringsten Ordnungszahl  $O_m$ . Für den ersten Fall, in dem die Bedingungen erfüllt sind, wird die zugehörige Maßnahme  $M_i$  durchgeführt.

### 3.3.2 Data Reconciliation

Zur Demonstration der beschriebenen Manipulationsdetektion, werden für das statische System, das in Kapitel 2.1.1 vorgestellt wurde, Messwerte mit einem normalverteilten statistischen Fehler mit einer Streuung von  $\sigma = 1$  simuliert. Zur Anpassung der Detektionsschwelle, werden für die in Tabelle 3.1 aufgeführten Einzelgrößen Eigenschaften mit erhöhter Vulnerabilität und für die Größenkombinationen Gemeinsamkeiten mit erhöhter Vulnerabilität angenommen.

Anhand dieser Werte werden die drei Detektionsmethoden anhand von fünf Fällen demonstriert:

- Beispiel Unmanipuliert: System mit statistischen Fehlern, ohne Manipulation

- Manipulationsbeispiel 1: Größe 1 um  $+3\sigma$
- Manipulationsbeispiel 2: Größen 1 und 5 jeweils um  $+3\sigma$
- Manipulationsbeispiel 3: Größe 1 um  $+3\sigma$ , Größe 5 um  $-3\sigma$
- Manipulationsbeispiel 4: unerwartete Manipulation: Größe 2 um  $+6\sigma$

### **Beispiel Unmanipuliert**

In Tabelle 3.3 ist dargestellt, wie sich das aufmodellieren der statistischen Fehler und die anschließende Data Reconciliation verhalten.

Größe Nr.	Wahrer Wert	Messwert	Reconciliierter Wert
1	100	98,95	99,13
2	36	35,01	34,82
3	64	64,52	64,30
4	36	35,06	34,82
5	64	64,51	64,30
6	100	98,88	99,13

**Tabelle 3.3:** Simulationswerte für das lineare statische Beispielsystem aus Abschnitt 2.1.1.

In der zweiten Spalte stehen die ungestörten wahren Werte, in der dritten Spalte werden statistische Fehler mit der Standardabweichung von 1 auf alle Größen addiert und in der letzten Spalte sind die reconcilierten Werte der mit statistischen Fehlern behafteten Messwerte zu sehen.

Die reconcilierten Werte sind relativ nahe an den wahren Werten.

### **Manipulationsbeispiel 1**

Anders verhält es sich, wenn zusätzlich eine Manipulation in Form eines Offsets aufmodelliert wird. Im ersten Manipulationsbeispiel, Tabelle 3.4 wurde der Wert 1 um dem Betrag 3 ( $= 3\sigma$ ) erhöht.

Durch die Reconciliation wird, gegenüber den gemessenen Werten, tatsächlich der Wert in Größe 1 reduziert, die Werte aller anderen Größen werden erhöht.

Größe Nr.	Wahrer Wert	Messwert	Reconciliierter Wert
1	100	101,95	100,13
2	36	35,01	35,32
3	64	64,52	64,80
4	36	35,06	35,32
5	64	64,51	64,80
6	100	98,88	100,13

**Tabelle 3.4:** Simulationswerte für das lineare statische Beispielsystem aus Abschnitt 2.1.1. In der zweiten Spalte stehen die ungestörten wahren Werte, in der dritten Spalte werden statistische Fehler mit der Standardabweichung von  $\sigma = 1$  auf alle Größen, sowie ein zusätzliches Offset von  $3\sigma$  auf Größe 1 addiert und in der letzten Spalte sind die reconcilierten Werte der teilweise manipulierten Messwerte zu sehen.

### Manipulationsbeispiel 2

Im Beispiel in Tabelle 3.5 sind die Werte 1 und 5 um den Betrag 3 ( $= 3\sigma$ ) erhöht.

Größe Nr.	Wahrer Wert	Messwert	Reconciliierter Wert
1	100	101,95	100,63
2	36	35,01	34,82
3	64	64,52	65,80
4	36	35,06	34,82
5	64	67,51	65,80
6	100	98,88	100,63

**Tabelle 3.5:** Simulationswerte für das lineare statische Beispielsystem aus Abschnitt 2.1.1. In der zweiten Spalte stehen die ungestörten wahren Werte, in der dritten Spalte werden statistische Fehler mit der Standardabweichung von  $\sigma = 1$  auf alle Größen, sowie ein zusätzliches Offset von  $3\sigma$  auf Größen 1 und 5 addiert. In der letzten Spalte sind die reconcilierten Werte der teilweise manipulierten Messwerte zu sehen.

Aufgrund der einseitigen Auslenkung durch die Manipulation, sind die Werte hier insgesamt größer. Gegenüber den Messungen deutlich reduziert werden die Werte der Größen 1 und 5.

### Manipulationsbeispiel 3

Als drittes Manipulationsbeispiel wird daher eine Manipulation simuliert, bei der der Wert von Messung 1 um  $3\sigma$  erhöht und der Wert von Messung 5 um  $3\sigma$  reduziert wird (Tabelle 3.6).

Auch hier treten deutliche Abweichungen zwischen wahren und reconcilierten Werten auf. Im Unterschied zum zweiten Manipulationsbeispiel sind in diesem Fall beide Vorzeichen vertreten.

Größe Nr.	Wahrer Wert	Messwert	Reconciliierter Wert
1	100	101,95	99,63
2	36	35,01	35,82
3	64	64,52	63,80
4	36	35,06	35,82
5	64	61,51	63,80
6	100	98,88	99,63

**Tabelle 3.6:** Simulationswerte für das lineare statische Beispielsystem aus Abschnitt 2.1.1. In der zweiten Spalte stehen die ungestörten wahren Werte, in der dritten Spalte werden statistische Fehler mit der Standardabweichung von  $\sigma = 1$  auf alle Größen, sowie zusätzliche Offsets von  $+3\sigma$  auf Größe 1 und  $-3\sigma$  auf Größe 5 addiert. In der letzten Spalte sind die reconcilierten Werte der teilweise manipulierten Messwerte zu sehen.

#### Manipulationsbeispiel 4

Zur Demonstration der Detektierbarkeit von unwahrscheinlichen Manipulationen, wird als zusätzliches Beispiel eine Manipulation von  $+6\sigma$  in Größe 2 untersucht (Tabelle 3.7).

Größe Nr.	Wahrer Wert	Messwert	Reconciliierter Wert
1	100	98,95	100,13
2	36	41,01	36,82
3	64	64,52	63,30
4	36	35,06	36,82
5	64	64,51	63,30
6	100	98,88	100,13

**Tabelle 3.7:** Simulationswerte für das lineare statische Beispielsystem aus Abschnitt 2.1.1. In der zweiten Spalte stehen die ungestörten wahren Werte, in der dritten Spalte werden statistische Fehler mit der Standardabweichung von 1 auf alle Größen, sowie ein Offset von  $6\sigma$  auf Größe 2 addiert und in der letzten Spalte sind die reconcilierten Werte der teilweise manipulierten Messwerte zu sehen.

#### 3.3.3 Messwerttest

Beim Messwerttest wird die Differenz zwischen den gemessenen und den reconcilierten Werten betrachtet und untersucht, ob sie mit einer Gaußverteilung der statistischen Fehler mit der angenommenen Breite erklärbar ist. Zur Detektion von Mehrfachmanipulationen wird eine Größe, in der zuvor eine Manipulation detektiert wurde, entfernt und als virtueller Sensor berechnet. Mit den verbleibenden Größen wird die Detektion wiederholt.

#### Schwellwertanpassung

Zur Bestimmung der Schwellwertanpassung über die Richtig-Positiv-Rate wird die ROC-Kurve erstellt. In der ROC-Kurve Abbildung 3.2 ist auf der Kurve ohne Schwellwertanpas-

sung (hellste Kurve) der Schnittpunkt mit einer waagerechten Geraden bei einer Richtig-Positiv-Rate von 0,97 markiert und beschriftet. Dort lässt sich der Schwellwert  $SW_{97\%\_k\_MT}$  ablesen. Für Vielfachheit 1 liegt dieser Schwellwert bei  $SW_{97\%\_1\_MT} = 0,73$ , für Vielfachheit 2 bei  $SW_{97\%\_2\_MT} = 1,79$  und für Vielfachheit 3 bei  $SW_{97\%\_3\_MT} = 2,17$ . Mit den optimalen Schwellwerten ohne Schwellwertanpassung von  $SW_{\text{ohne\_1\_MT}} = 2,19$ ,  $SW_{\text{ohne\_2\_MT}} = 2,75$  und  $SW_{\text{ohne\_3\_MT}} = 3,12$  erhält man über Gleichung 3.7 Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_MT} = 0,67$  für Vielfachheit 1,  $SA_{2\_MT} = 0,35$  für Vielfachheit 2 und  $SA_{3\_MT} = 0,30$  für Vielfachheit 3.

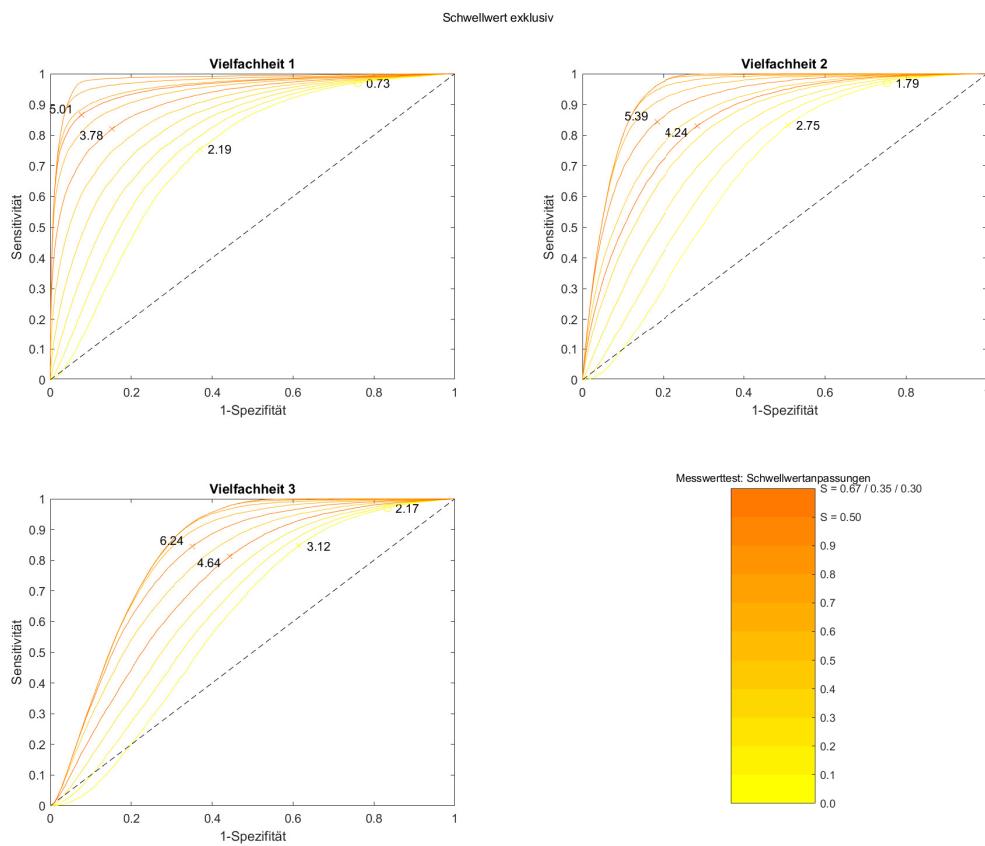
Für die Berechnung der Schwellwertanpassung über das Störverhältnis, werden die Prüfgrößen für den Fall berechnet, dass nur die jeweilige Größe oder Kombination mit einer normierten Manipulation beaufschlagt wird und im System keine statistischen Fehler vorhanden sind. Durch die Normierung vereinfacht sich die Berechnung für lineare Systeme, wie das Beispielsystem. Beim Messwerttest verdoppelt sich die Prüfgröße bei einer Verdopplung der Manipulationshöhe. Durch die Normierung erhält man also für alle Prüfgrößen mit einfacher Manipulationshöhe den Wert 1 und für alle Prüfgrößen mit doppelter Manipulationshöhe den Wert 2. Die daraus bestimmte Schwellwertanpassung ist  $SA_{MT} = 0,50$ .

## Schwellwerte

Zur Bestimmung der Schwellwerte werden ROC-Kurven verwendet, die die oben bestimmten Schwellwertanpassungen berücksichtigen. Auch hier wird die Richtig-Positiv-Rate (Sensitivität) für verschiedene Schwellwerte über der Falsch-Positiv-Rate (1-Spezifität) aufgetragen. Für die erwarteten Manipulationen wird dabei zur Auswertung der jeweilige Schwellwert mit den im vorhergehenden Abschnitt bestimmten Schwellwertanpassungen  $SA_{1\_MT} = 0,67$ ,  $SA_{2\_MT} = 0,35$  bzw.  $SA_{3\_MT} = 0,30$  auf den dunkelorangeen Kurven, sowie  $SA_{MT} = 0,50$  für alle Vielfachheiten, angepasst. Um Verwechslungen zu vermeiden, werden ROC-Kurven ausschließlich mit den allgemeinen Schwellwerten  $SW_0$  beschriftet. Um die Verbesserungen durch die Verwendung der Zusatzinformationen zu untersuchen, werden die ROC-Kurven außerdem für unterschiedliche Schwellwertanpassungen ( $SA = 10\% - 90\%$  mit  $I_i = 1$ ) gezeigt.

Über den Punkt mit dem maximalen Abstand zur Diagonalen, wird ein optimaler Schwellwert für den Test bestimmt. Alternativ wäre für den Fall von Randbedingungen, wie z.B. einer maximal akzeptablen Falsch-Positiv-Rate, der Schwellwert ebenfalls direkt in den ROC-Kurven ablesbar.

Die ROC-Kurven in Abbildung 3.2 zeigen, dass die Nutzung der Zusatzinformationen und die darauf basierende Anpassung der Schwellwerte, zu einer Verbesserung der Aussagekraft des Tests führen. Auf den Kurven mit den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen, werden die optimalen Schwellwerte bestimmt, um die allgemeinen Schwellwerte  $SW_{0\_k\_MT}$  zu



**Abbildung 3.2:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Messwerttest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert werden jeweils nur die Kombinationen betrachtet, die alle manipulierten Größen und ausschließlich diese enthalten. Die optimalen Schwellwerte bei den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_MT} = 0,67$ ,  $SA_{2\_MT} = 0,35$  bzw.  $SA_{3\_MT} = 0,30$  und der Schwellwertanpassung  $SA_{MT} = 0,50$  für alle Vielfachheiten sowie auf den Kurven ohne Anpassung sind markiert und beschriftet.

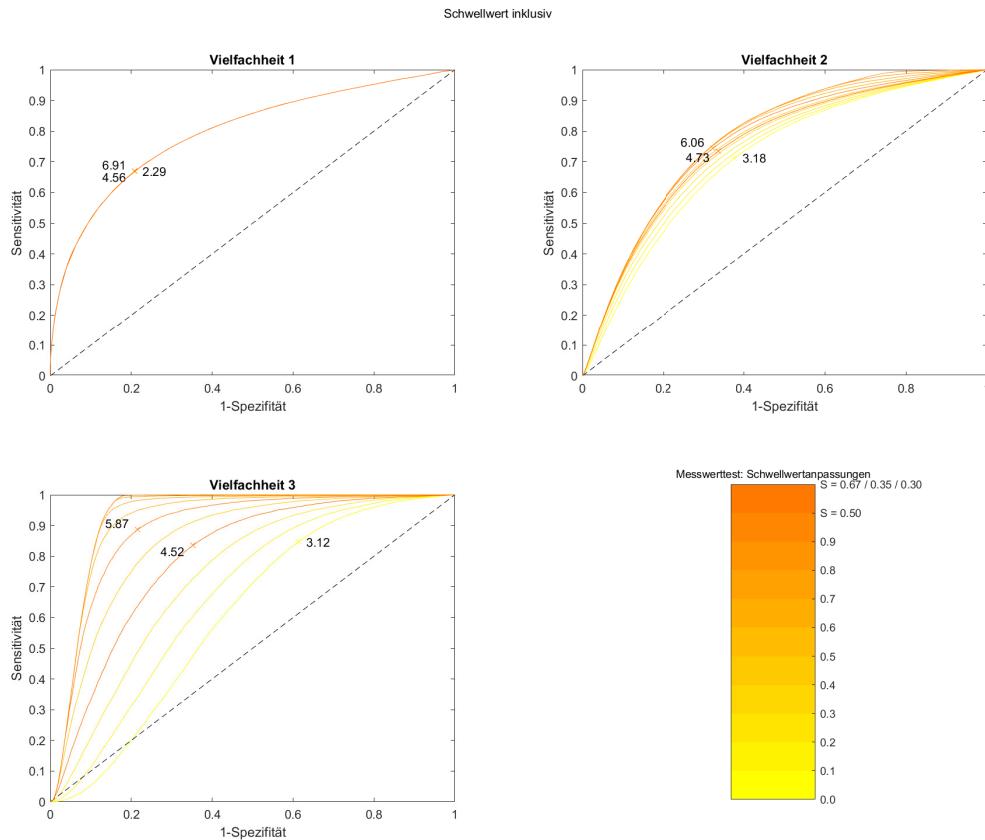
erhalten. Sie sind in den Kurven markiert und beschriftet. In Tabelle 3.8 werden die Schwellwerte für die Vielfachheiten 1-3 jeweils ohne Schwellwertanpassung (zweite Spalte), mit der Schwellwertanpassung von  $SA_{MT} = 0,50$  (dritte Spalte) und mit den vielfachheitsspezifischen Schwellwertanpassungen (vierte Spalte) angegeben. Für beide Varianten der Schwellwertanpassung wird der allgemeine Schwellwert  $SW_{0\_k\_MT}$  und der angepasste Schwellwert, der für die erwarteten Manipulationen gültig ist, aufgeführt. Als tatsächlich manipuliert, also richtig-positiv oder falsch-negativ, betrachtet werden hier nur die vollständigen manipulierten Kombinationen, nicht jedoch Untermengen davon.

Für die Vorauswahl möglicherweise manipulierter Kombinationen der nächst höheren Vielfachheit, muss der Schwellwert für den Fall bestimmt werden, dass die betreffende Kombination eine Untermenge der tatsächlich manipulierten Kombination darstellt. Für die Berechnung der ROC-Kurven Abb. 3.3 werden also alle Größen und Kombinationen, die eine

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{MT} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{MT} = 0,5$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_MT}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_MT}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	2,19	3,78	1,89	0,67
2	2,75	5,39	2,70	0,35
3	3,12	6,24	3,12	0,30

**Tabelle 3.8:** Schwellwerte für Detektion über den Messwerttest.

Untermenge der tatsächlich manipulierten Kombinationen darstellen, als manipuliert betrachtet.



**Abbildung 3.3:** ROC-Kurve für die Identifikation von Kandidaten für Manipulationen mit höherer Vielfachheit mit dem Messwerttest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als 'manipuliert' werden alle Untermengen der tatsächlich manipulierten Kombinationen betrachtet. Der optimale Schwellwert ist ohne Schwellwertanpassung und mit den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen markiert und beschriftet.

Die Reduktion der Schwellwerte für die aufgrund von Exposition und Gemeinsamkeiten wahrscheinlicheren Kombinationen, wird hier auch für alle Untermengen der Kombinationen durchgeführt, nicht nur für die vollständigen erwarteten Kombinationen. Unter den Einzelgrößen gilt daher für alle der reduzierte Grenzwert, wodurch die Kurven mit den Verschiebungen übereinander liegen. Für Kombinationen der Vielfachheit 2 sind lediglich die

Kombinationen [1,4] und [1,6] kein Bestandteil einer Kombination mit höherer Vielfachheit. Dennoch ergeben sich durch die Schwellwertanpassung Verbesserungen des Tests. Im Falle der Manipulationen der Vielfachheit 3 unterscheiden sich die Kurven nicht von denen zur Bestimmung der Detektions-Schwellwerte (Abb. 3.2), da wegen der geringen Systemgröße lediglich bis zu drei Manipulationen simuliert wurden. Die ermittelten Schwellwerte für die Vorauswahl sind in Tabelle 3.9 zusammengefasst.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{MT} = 0$ )	<b>Schwellwert bei <math>SA_{MT} = 0,5</math> allgemein (<math>SW_0</math>) angepasst</b>	$SA_{k\_MT}$	<b>Schwellwert bei spez. <math>SA_{k\_MT}</math> allgemein (<math>SW_0</math>) angepasst</b>
1	2,29	4,62	0,67	6,91
2	3,18	6,06	0,35	4,73
3	3,12	5,87	0,30	4,52

**Tabelle 3.9:** Schwellwerte für Vorauswahl von Kombinationen zur Detektion von Kombinationen höherer Vielfachheit mit Hilfe des Messwerttests.

Im folgenden Beispiel wird die Schwellwertanpassung von  $SA_{MT} = 0,50$  genutzt. Die Detektion mit vielfachheitsabhängigen Schwellwertanpassungen wird im Anhang in Abschnitt A.2 dargestellt.

### Beispiel Unmanipuliert

Beim Messwerttest wird jeweils eine Größe auf Manipulation geprüft. Für die Untersuchung auf Mehrfachmanipulationen werden bereits als mutmaßlich oder tatsächlich manipuliert identifizierte Werte entfernt und die verbleibenden Größen untersucht. Das bedeutet, dass beim Messwerttest unterschieden werden muss, ob die betreffende Größe entfernt wurde oder ob sie getestet wird. Man erhält also beispielsweise unterschiedliche Werte der Prüfgröße für die Kombinationen [1,2] und [2,1].

In Tabelle 3.10 ist der Test der Einzelgrößen dargestellt. In der ersten Spalte ist die Nummer der Größe eingetragen, in der zweiten Spalte die Wahrscheinlichkeit für Zutreffen der geprüften Fehlerhypothese, in der dritten Spalte die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Detektion der betreffenden Größe falsch-positiv wäre, in der vierten Spalte steht die Prüfgröße selbst. In der fünften Spalte ist die Differenz zur allgemeinen Schwelle ( $SW_{0\_1\_MT}$ ) und in der sechsten Spalte steht die Differenz zur individuell angepassten Schwelle. Das heißt für die exponierten Größen, für die Manipulationen erwartet werden, wird die Differenz zum angepassten Schwellwert  $SW_{1\_1\_MT}$  berechnet und für die Größen, für die keine Manipulation erwartet wird, wird die Differenz zum allgemeinen Schwellwert  $SW_{0\_1\_MT}$  angegeben.

Unter den Einzelgrößen (Tabelle 3.10) wird im unmanipulierten Fall keine als manipuliert detektiert. Auch der (angepasste) Schwellwert von 2,31, ab dem eine Untersuchung auf Manipulationen mit höherer Vielfachheit angezeigt ist, wird nicht überschritten. Die Detektion ist hier beendet. Die Untersuchung der Kombinationen liefert ebenfalls keine Detektion. Die Tabellen mit den höheren Vielfachheiten A.1 A.2 und A.3 sind im Anhang dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,4774	1,0000	0,2642	-3,5158	-1,6258
2	0,4757	1,0000	0,2838	-3,4962	-3,4962
3	0,4713	0,9999	0,3285	-3,4515	-1,5615
4	0,4682	0,9999	0,3577	-3,4223	-3,4223
5	0,4729	0,9999	0,3130	-3,4670	-3,4670
6	0,4660	0,9998	0,3773	-3,4027	-1,5127

**Tabelle 3.10:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 3,78 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,89 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

### Manipulationsbeispiel 1

Beim ersten Manipulationsbeispiel wird Größe 1 mit einem Offset von  $+3\sigma$  manipuliert. In Tabelle 3.11 wird die Detektion für die Einzelgrößen dargestellt.

Die Manipulation in Größe 1 wird eindeutig detektiert. Die Detektion würde allerdings auch mit dem klassischen Schwellwert von  $SW_{\text{ohne\_1\_MT}} = 2,19$  funktionieren. Die Schwelle für Untersuchung auf Mehrfachmanipulationen wird ebenfalls nur von Größe 1 überschritten. Im Anhang wird in Tabelle A.4 die Detektion mit der entfernten Größen 1 gezeigt. Dort findet sich keine weitere Detektion. Auch der angepasste Schwellwert für die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 3 von 3,03 wird nicht überschritten. Der Messwerttest liefert für die Beispielmanipulation in Größe 1 also die richtige Detektion.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0403	0,1436	2,7358	-1,0442	0,8458
2	0,4545	0,9993	0,4662	-3,3138	-3,3138
3	0,4605	0,9996	0,4215	-3,3585	-1,4685
4	0,4642	0,9997	0,3923	-3,3877	-3,3877
5	0,4585	0,9995	0,4370	-3,3430	-3,3430
6	0,1509	0,5522	1,8773	-1,9027	-0,0127

**Tabelle 3.11:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 3,78 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,89 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1.

Da eine Manipulation in Größe 1 zu den erwarteten Manipulationen gehört und die Detektion in diesem Fall eindeutig ist, kann über das in Abschnitt 3.3.1 vorgestellte System eine Gegenmaßnahme gesucht werden. Größe 1 hat im Beispiel die Eigenschaft über das Internet konfigurierbar zu sein. Als mögliche Gegenmaßnahmen wurde aufgestellt:

Maßnahme	Vorbedingungen	Kostenposition
Verbindung trennen	Bekannter, stabiler Zustand Zustand geringe Abh. vom Wert	1
Wert Rekonstruieren	Bekannter, stabiler Zustand	2
Notabschaltung	keine	10

**Tabelle 3.12:** Gegenmaßnahmen für Manipulationen in Größe 1

Die Bedingungen der Gegenmaßnahme mit der geringsten Kostenposition wird zuerst ausgewertet. Der Systemzustand ist bekannt, weil Größe 1 eindeutig als die manipulierte identifiziert wurde und weil ohne Größe 1 noch ausreichend Redundanz vorhanden ist. Konkret kann Größe 1 aus drei unabhängigen Kombinationen rekonstruiert werden, Größen 2,3,4,5 und 6 jeweils aus zwei unabhängigen Kombinationen. Stabil ist der Zustand, wenn alle Messwerte in ihren Schranken für sicheren Betrieb liegen, wovon in diesem Beispiel ausgegangen wird. Ob der Zustand eine hohe Abhängigkeit von Größe 1 aufweist oder nicht, hängt davon ab, ob aufgrund des Werts von Größe 1 eine Regelung der Durchflussmengen stattfindet, oder ob lediglich der Zustand gemessen wird. Im ersten Fall würde die Maßnahme, den Wert aus den anderen Werten zu rekonstruieren, ergriffen werden, im zweiten Fall könnte einfach die Verbindung getrennt werden.

## Manipulationsbeispiel 2

Im zweiten Manipulationsbeispiel wird zusätzlich zur Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 5 eingebracht. In Tabelle 3.13 wird die Detektion wieder mit der Betrachtung der Einzelgrößen begonnen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1313	0,4858	1,9858	-1,7942	0,0958
2	0,4757	1,0000	0,2838	-3,4962	-3,4962
3	0,1427	0,5250	1,9215	-1,8585	0,0315
4	0,4682	0,9999	0,3577	-3,4223	-3,4223
5	0,0547	0,1993	2,5630	-1,2170	-1,2170
6	0,0489	0,1770	2,6273	-1,1527	0,7373

**Tabelle 3.13:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 3,78 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,89 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Unter den Einzelgrößen werden Größen 1, 3 und 6 als möglicherweise manipuliert detektiert. Ohne Schwellwertanpassung würden lediglich die Größen 5 und 6 detektiert werden. Den Schwellwert für Untersuchung auf Mehrfachmanipulationen überschreiten die Größen 1, 3, 5 und 6. In Tabelle 3.14 werden also Kombinationen mit Größen 1, 3, 5 und 6 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,4064	0,9719	0,8323	-4,5577	-4,5577
1 3	0,2451	0,7284	1,5200	-3,8700	-3,8700
1 4	0,3893	0,9587	0,9111	-4,4789	-4,4789
1 5	0,0181	0,0484	3,2634	-2,1266	0,5684
1 6	0,1721	0,4822	2,1792	-3,2108	-3,2108
3 1	0,2254	0,6810	1,6058	-3,7842	-3,7842
3 2	0,4100	0,9743	0,8151	-4,5749	-1,8799
3 4	0,3931	0,9619	0,8940	-4,4960	-4,4960
3 5	0,1803	0,5041	2,1364	-3,2536	-3,2536
3 6	0,0163	0,0431	3,3149	-2,0751	-2,0751
5 1	0,0434	0,1269	2,8016	-2,5884	0,1066
5 2	0,4823	0,9993	0,3807	-5,0093	-5,0093
5 3	0,4703	0,9808	0,8533	-4,5367	-4,5367
5 4	0,4905	0,9998	0,3019	-5,0881	-5,0881
5 6	0,1240	0,3892	2,1190	-3,2710	-3,2710
6 1	0,4616	0,9761	0,8962	-4,4938	-4,4938
6 2	0,4803	0,9991	0,3979	-4,9921	-4,9921
6 3	0,0475	0,1399	2,7502	-2,6398	-2,6398
6 4	0,4888	0,9997	0,3190	-5,0710	-2,3760
6 5	0,1386	0,4352	2,0333	-3,3567	-3,3567

**Tabelle 3.14:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,39 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,70 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Unter den Kombinationen mit Vielfachheit 2 (Tabelle 3.14) wird die tatsächlich manipulierte Kombination [1,5] in beiden Orientierungen detektiert. Die höchste Prüfgröße weist allerdings Kombination [3,6] auf. Ohne Schwellwertanpassung würde also die falsche Kombination [3,6] detektiert werden. Der Schwellwert für die Untersuchung auf Kombinationen mit Vielfachheit 3 von 3,03 wird von den Kombinationen [1,5] und [3,6] überschritten. Diese Kombinationen der Vielfachheit 3 werden im Angang in Tabelle A.5 dargestellt. Es finden sich dort keine weiteren Detektionen oder Kombinationen die auf Manipulationen höherer Vielfachheit zu untersuchen wären.

Für das Beispiel einer Manipulation in den Größen 1 und 5 mit der gleichen Manipulationsrichtung liefert der Messwerttest also Detektionen in Einzelgrößen 1, 3 und 6 sowie in der Kombination [1,5] bzw. [5,1], die in Tabelle 3.15 zusammengefasst werden.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1313	0,4858	1,9858	-1,7942	0,0958
3	0,1427	0,5250	1,9215	-1,8585	0,0315
6	0,0489	0,1770	2,6273	-1,1527	0,7373
1 5	0,0181	0,0484	3,2634	-2,1266	0,5684
5 1	0,0434	0,1269	2,8016	-2,5884	0,1066

**Tabelle 3.15:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Die höchsten Differenzen zum individuellen Schwellwert weist Größe 6 auf. Da die Kombination [1,5] eine ähnlich hohe Differenz zum individuellen Schwellwert aufweist, wird zusätzlich die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit  $Pr\{f_p\}$  betrachtet, die die Vielfachheit der Fehlerhypothese berücksichtigt. Daraus ergibt sich die eindeutige Entscheidung zugunsten der tatsächlich manipulierten Kombination [1,5], wie in der Aufstellung der Detektionen 3.15 markiert. Der Messwerttest liefert also mit der Schwellwertanpassung auch hier das richtige Ergebnis.

### Manipulationsbeispiel 3

Im dritten Manipulationsbeispiel wird das Vorzeichen der Manipulation in Größe 5 umgedreht, während die Manipulation für Größe 1 beibehalten wird. Größe 1 wird also um  $+3\sigma$  manipuliert, Größe 5 um  $-3\sigma$ . In Tabelle 3.16 wird die Detektion wieder mit den Einzelgrößen begonnen.

Die Detektion unter den Einzelgrößen in Tabelle 3.16 liefert eine Detektion in Größe 1. Größen 1 und 5 erfüllen die Bedingung zur Untersuchung auf Manipulationen mit höherer Vielfachheit. In Tabelle 3.17 wird also die Detektion mit Kombinationen der Größen 1 und 5 durchgeführt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0085	0,0263	3,4858	-0,2942	1,5958
2	0,2984	0,9017	1,2162	-2,5638	-2,5638
3	0,3316	0,9424	1,0785	-2,7015	-0,8115
4	0,3163	0,9253	1,1423	-2,6377	-2,6377
5	0,0095	0,0297	3,4370	-0,3430	-0,3430
6	0,3199	0,9295	1,1273	-2,6527	-0,7627

**Tabelle 3.16:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 3,78 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,89 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,4837	0,9994	0,3677	-5,0223	-5,0223
1 3	0,1306	0,4098	2,0800	-3,3100	-3,3100
1 4	0,4916	0,9998	0,2889	-5,1011	-5,1011
1 5	0,0486	0,1435	2,7366	-2,6534	0,0416
1 6	0,4767	0,9838	0,8208	-4,5692	-4,5692
5 1	0,0434	0,1269	2,8016	-2,5884	0,1066
5 2	0,4823	0,9993	0,3807	-5,0093	-5,0093
5 3	0,4703	0,9808	0,8533	-4,5367	-4,5367
5 4	0,4905	0,9998	0,3019	-5,0881	-5,0881
5 6	0,1240	0,3892	2,1190	-3,2710	-3,2710

**Tabelle 3.17:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,39 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,70 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 werden nur die Kombinationen [1,5] und [5,1] detektiert. Der angepasste Schwellwert für eine Untersuchung auf Kombinationen höherer Vielfachheiten wird von keiner Kombination erfüllt. Die tatsächlich manipulierte Kombination [1,5] wird also detektiert. Aufgrund der geringeren Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit für die Manipulation der Einzelgröße 1 würde diese Hypothese jedoch bevorzugt werden.

Die vorgestellte Kategorisierung der Gegenmaßnahmen kann für solche unsicheren Detektionen eine Lösung bereit halten, wenn Gegenmaßnahmen für verschiedene Manipulationen anwendbar sind. Für die Auswahl der Gegenmaßnahmen müsste also sichergestellt werden, dass sie sowohl gegen eine Manipulation in Größe 1 als auch gegen eine Manipulation der Kombination [1,5] wirksam sind. Trotz der nicht eindeutigen Detektion kann hier von einem bekannten Systemzustand ausgegangen werden, weil alle Größen noch mit mindestens zwei unabhängigen Kombinationen anderer Größen rekonstruierbar sind. Anwendung finden würde also die Gegenmaßnahme mit der geringsten Kostenposition, die sowohl für

Angriffsvektoren zu Größe 1 als auch für Angriffsvektoren zu Kombination [1,5] passend wäre und einen bekannten Systemzustand voraussetzen darf.

### Manipulationsbeispiel 4

Die Detektion der Manipulation unerwarteter Größen muss erst bei der doppelten Abweichung, hier  $6\sigma$  erfolgen. Im folgenden Beispiel ist, die laut Vorwissen für eine Manipulation unerwartete, Größe 2 mit dem doppelten Wert der erwarteten Manipulationen, also  $+6\sigma$  manipuliert. Tabelle 3.18 zeigt die Einzelgrößen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1731	0,6221	1,7642	-2,0158	-0,1258
2	9,39 e-7	1,73 e-6	6,2838	2,5038	2,5038
3	0,1603	0,5824	1,8285	-1,9515	-0,0615
4	0,0477	0,1720	2,6423	-1,1377	-1,1377
5	0,1633	0,5920	1,8130	-1,9670	-1,9670
6	0,1509	0,5522	1,8773	-1,9027	-0,0127

**Tabelle 3.18:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 3,78 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,89 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Einzelgrößen wird in Tabelle 3.18 die Größe 2 als manipuliert detektiert. Für die Größen 2 und 4 wird auch der Schwellwert für die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 2 überschritten. In Tabelle 3.19 sind daher alle Kombinationen mit den Größen 2 und 4 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
2 1	0,4980	1,0000	0,2062	-5,1838	-5,1838
2 3	0,4929	0,9998	0,2747	-5,1153	-2,4203
2 4	0,5049	0,9937	0,6662	-4,7238	-4,7238
2 5	0,4942	0,9999	0,2582	-5,1318	-5,1318
2 6	0,4881	0,9996	0,3268	-5,0632	-5,0632
4 1	0,0624	0,1883	2,5864	-2,8036	-2,8036
4 2	9,95 e-6	1,44 e-5	6,6169	1,2269	1,2269
4 3	0,0558	0,1667	2,6550	-2,7350	-2,7350
4 5	0,0573	0,1718	2,6385	-2,7515	-2,7515
4 6	0,0511	0,1516	2,7071	-2,6829	0,0121

**Tabelle 3.19:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,39 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,695 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle 3.19 finden sich weitere Detektionen bei [4,2] und [4,6]. Tatsächlich ist eine Manipulation in Größe 2 und eine Manipulation in Größe 4 aufgrund des Systemaufbaus leicht verwechselbar. Außerdem liefert die Prüfgröße beim Messwerttest eine Bewertung der getesteten Größe. Bei Kombination [4,2] erlaubt die Detektion also vor allem die Aussage, dass Größe 2 manipuliert ist. Die Kombination [2,4] erlaubt dagegen eher Aussagen zu Größe 4. Die Kombination [4,6] weist eine deutlich geringere Differenz zum individuellen Schwellwert auf als Größe 2 und Kombination [2,4] und kann daher als Detektion verworfen werden. Kombination [4,2] muss noch auf Manipulationen der Vielfachheit 3 untersucht werden. Die Aufstellung ist in Tabelle 3.20 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
2 4 1	0,5634	1,0000	0,0754	-6,1646	-6,1646
2 4 3	0,5642	1,0000	0,0103	-6,2297	-6,2297
2 4 5	0,5642	1,0000	0,0103	-6,2297	-6,2297
2 4 6	0,5634	1,0000	0,0754	-6,1646	-3,0446

**Tabelle 3.20:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 6,24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 6,24 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die angepasste Schwellwert von 3,12 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Kombinationen mit Vielfachheit 3 in Tabelle 3.20 finden sich keine weiteren Detektionen. Auch der Schwellwert für die Untersuchung auf Kombinationen der Vielfachheit 4 wird nicht überschritten. Unter den beiden Detektionen 2 und [4,2] fällt die Entscheidung eindeutig zugunsten einer Manipulation in Größe 2 aus. Die Differenz zum individuellen Schwellwert ist für Größe 2 deutlich höher und die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit ist deutlich geringer.

Aufgrund der höchsten Differenz zum Schwellwert und der geringsten Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit würde der tatsächlich manipulierte Fall, Größe 2, ausgewählt und damit die Manipulation richtig lokalisiert werden. Die unwahrscheinliche Manipulation in Größe 2 wird also trotz der Schwellwertanpassung erfolgreich detektiert.

### Systematische Bewertung

Beispiele lassen nur sehr eingeschränkt Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit des Detektionsverfahrens zu. Hier werden unter den 5 Beispielfällen alle richtig detektiert, davon 1 nur aufgrund der Schwellwertanpassung. Als eindeutig betrachtet werden kann die Detektion dabei in 4 Fällen (Tabelle 3.21).

Um eine objektive Bewertung und später auch einen Vergleich zu ermöglichen, wird wieder

<b>Manipulation</b>		<b>ohne SW-Anpassung</b>	<b>Eindeutig</b>	<b>mit SW-Anpassung</b>	<b>Eindeutig</b>
unmanip.	keine	keine	✓	keine	✓
Bsp. 1	1	1	✓	1	✓
Bsp. 2	[1,5]	[3,6]([1,5])		[1,5]	✓
Bsp. 3	[1,5]	1	✓	1/[1,5]	
Bsp. 4	2	2	✓	2	✓

**Tabelle 3.21:** Leistung des Messwerttests in den Beispielen

die ROC-Kurve genutzt. Da eine möglichst hohe Richtig-Positiv-Rate bei einer möglichst geringen Falsch-Positiv-Rate angestrebt ist, ist die Fläche zwischen Kurve und Diagonale ein Maß für die Aussagekraft des Tests. Entspricht die Kurve der Diagonale (AUC), verschwindet die Fläche und der Test liefert zufällige Entscheidungen ohne Aussagekraft. Die Anteile der Flächen zwischen Kurve und Diagonale in Abb. 3.2 für Manipulationen des Betrags  $3\sigma$  sind in Tabelle 3.22 dargestellt.

<b>Vielfachheit</b>	<b>Flächenanteil ohne Anpassung (<math>SA_{MT} = 0</math>)</b>	<b>Flächenanteil bei <math>SA_{MT} = 0,5</math></b>	<b>Vielfachheits-spezifisches <math>SA_{MT}</math></b>	<b>Flächenanteil bei spezifischem <math>SA_{MT}</math></b>
1	0,7323	0,9109	0,67	0,9522
2	0,6757	0,9003	0,35	0,8445
3	0,6090	0,7994	0,30	0,7287

**Tabelle 3.22:** Anteil der Fläche, die von ROC-Kurve und Diagonale eingeschlossen wird.

Die Flächenanteile zeigen, dass der Messwerttest eine gute Aussagekraft aufweist, die durch beide Varianten der Schwellwertanpassung deutlich verbessert wird.

Bei Berechnung der Prüfgrößen stellen die Multiplikationen, mit den meist sehr großen Matrizen, den größten Beitrag zum Rechenaufwand dar. Für eine Abschätzung des Rechenaufwandes wird daher die Anzahl der notwendigen Matrixmultiplikationen abgeschätzt. Dazu wird angenommen, dass alle von den Mess- bzw Stellwerten unabhängigen Operationen vorberechnet werden und bei der Onlinedetektion nicht zum Rechenaufwand beitragen. Beim Messwerttest sind pro untersuchter Kombination zwei Matrixmultiplikationen notwendig. Die Detektion von Manipulationen der Vielfachheit 1 kostet nur zwei Multiplikationen, die Detektion von Manipulationen der Vielfachheit 2, zwei pro ausgewähltem Erstfehler. Durch das iterative Vorgehen müssen hier aber nicht alle möglichen Kombinationen getestet werden.

Der Messwerttest liefert auch bei geringen Redundanzen noch Werte. Lediglich in Fällen, in denen tatsächlich keine ausreichende Information mehr vorhanden ist, wie bei der Manipulation beider in Reihe geschalteter Anlagen 1 und 6 kombiniert mit den beiden Anlagen aus einem Zweig, also 2 und 4 oder 3 und 5, können keine Prüfgrößen und Wahrscheinlichkeiten mehr angegeben werden. Bei fehlender Redundanz können mehrere, verwechselbare Varianten Detektionen liefern.

### 3.3.4 Globaltest

Beim Globaltest werden die Residuen der Systemgleichungen untersucht. Zur Lokalisierung werden verdächtige Größen entfernt und die Residuen erneut betrachtet. Über einen Chi-Quadrat-Test wird jeweils untersucht, ob die gemessenen Residuen mit der Nullhypothese, also der Annahme, dass in dem verbleibenden Datensatz keine Anomalie vorliegt, vereinbar sind. Der Chi-Quadrat-Test liefert die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und damit die Spezifität. Anders als beim Messwerttest bezieht sich die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit hier aber nicht auf die aus dem Datensatz entfernten Messungen, sondern auf den verbleibenden Datensatz. Außerdem wird auch hier die Wahrscheinlichkeit angegeben, dass die Hypothese zutreffend ist, dass nur die entfernten Messwerte manipuliert sind. Hinsichtlich der Prüfgröße wird beim Globaltest nach möglichst kleinen Werten gesucht, die insbesondere unterhalb des Schwellwerts liegen sollten. Für die Größen mit höherer Exposition und Kombinationen mit Gemeinsamkeiten wird der Schwellwert daher auch erhöht und nicht gesenkt.

#### Schwellwertanpassung

Zur Bestimmung der Schwellwertanpassung wird wieder die ROC-Kurve erstellt, also die Auftragung der Richtig-Positiv-Rate (Sensitivität) über der Falsch-Positiv-Rate (1-Spezifität) für verschiedene Schwellwerte. In Abbildung 3.4 ist der Punkt für die Sensitivität von 0,97 auf der Kurve ohne Schwellwertanpassung (hellste Kurve) markiert. Dort lässt sich der Schwellwert mit der größten Anpassung ablesen.

Für Vielfachheit 1 liegt der maximale Schwellwert, der als angepasster Schwellwert genutzt wird, bei  $SW_{97\%\_1\_GT} = 8,83$ , für Vielfachheit 2 bei  $SW_{97\%\_2\_GT} = 7,02$  und für Vielfachheit 3 bei  $SW_{97\%\_3\_GT} = 4,71$ . Mit den optimalen Schwellwerten ohne Schwellwertanpassung, von  $SW_{\text{ohne\_1\_GT}} = 5,48$ ,  $SW_{\text{ohne\_2\_GT}} = 3,79$  und  $SW_{\text{ohne\_3\_GT}} = 1,98$  erhält man mit Gleichung 3.8 Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_GT} = 0,38$ ,  $SA_{2\_GT} = 0,46$  und  $SA_{3\_GT} = 0,58$ .

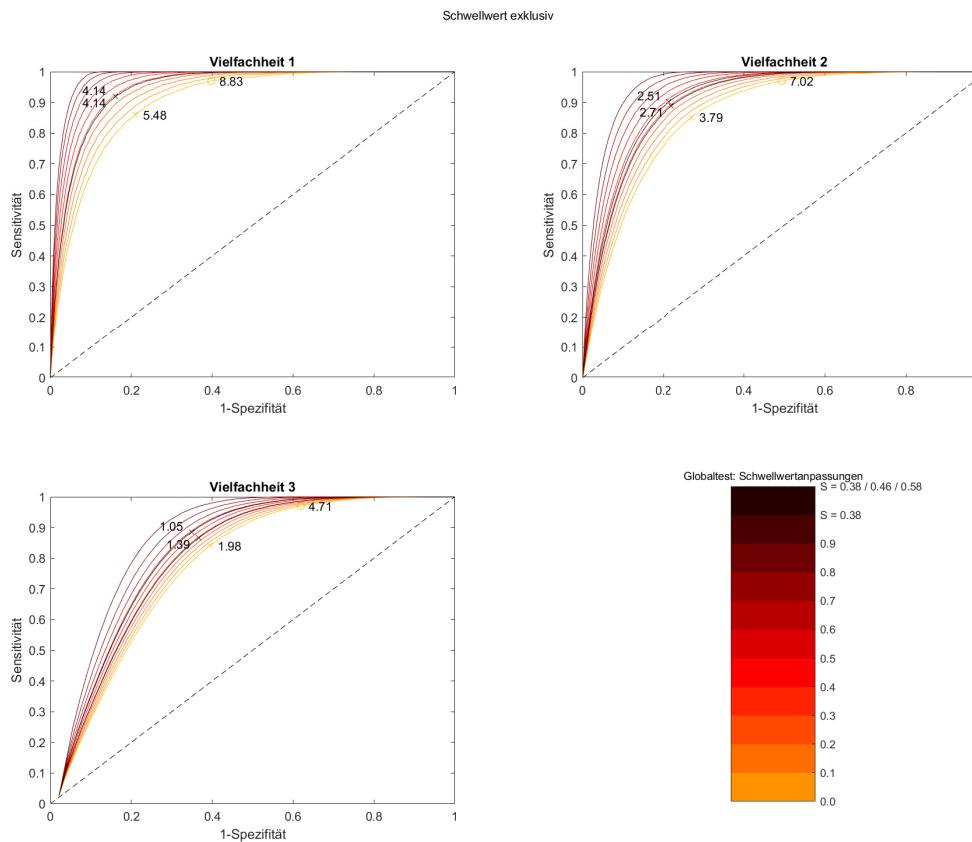
Die alternative Berechnung der Schwellwertanpassung ist für den Globaltest eingeschränkt sinnvoll, weil für die Testung die verdächtigen Größen entfernt werden. Die Prüfgrößen bei erfolgter Detektion sind daher nicht von der Höhe der Manipulation abhängig. Als vielfachheitsunabhängige Schwellwertanpassung wird der geringste Wert von  $SA_{GT} = 0,38$ , zusätzlich zu den vielfachheitsabhängigen Anpassungen, in allen ROC-Kurven gezeigt.

#### Schwellwerte

Zur Bestimmung der Schwellwerte wird auch hier die ROC-Kurve verwendet. Um die Verbesserungen durch die Verwendung der Zusatzinformationen zu untersuchen, werden die ROC-Kurven außerdem für unterschiedliche Schwellwertanpassungen gezeigt. Zur Bestimmung

des Schwellwerts wird der maximale Abstand zur Diagonalen auf der Kurve mit der zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_GT} = 0,38$ ,  $SA_{2\_GT} = 0,46$  und  $SA_{3\_GT} = 0,58$  genutzt. Als mögliche vielfachheits-übergreifende Schwellwertanpassung wird der geringste Wert von  $SA_{GT} = 0,38$  genutzt.

Für den Globaltest werden die ROC-Kurven zunächst wieder so berechnet, dass nur die vollständigen manipulierten Kombinationen als manipuliert betrachtet werden, nicht aber ihre Untermengen. Da sich die Prüfgrößen und damit die Detektionen darauf beziehen, dass die verbleibenden Größen frei von Manipulationen sind, müssen alle Kombinationen, die die manipulierten Kombinationen enthalten, eine Detektion liefern. Die Fehler der verbleibenden Größen sind auch in diesem Fall mit einem unmanipulierten System kompatibel.



**Abbildung 3.4:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Globaltest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert wird jeweils nur die Kombination betrachtet, die alle manipulierten Größen und ausschließlich diese enthält. Die optimalen Schwellwerte bei den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_GT} = 0,38$ ,  $SA_{2\_GT} = 0,46$  und  $SA_{3\_GT} = 0,58$ , bei einer gemeinsamen Schwellwertanpassung von  $SA_{GT} = 0,38$  sowie ohne Anpassung sind markiert und beschriftet.

Die Manipulationsdetektion mit dem Globaltest liefert tatsächlich aussagekräftige Ergebnisse, wie in Abbildung 3.4 erkennbar ist. Besonders für Einzelmanipulationen ist eine sehr gute

Trennschärfe zu erreichen. Mit steigender Anzahl beteiligter Größen wird die Detektion etwas schlechter. Die Schwellwerte sind in Tabelle 3.23 aufgelistet.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anpassung ( $SA_{k,GT} = 0$ )	Vielfachheits-spezifisches $SA_{k,GT}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k,GT}$ allgemein ( $SW_0$ )	Schwellwert bei spez. $SA_{k,GT}$ angepasst
1	5,48	0,38	4,14	6,68
2	3,79	0,46	2,51	4,65
3	1,98	0,58	1,05	2,50

**Tabelle 3.23:** Schwellwerte für Detektion über den Messwerttest.

Das iterative Vorgehen beim Globaltest erlaubt einen Abbruch nach erfolgreicher Detektion bzw. bei der nächst höheren Vielfachheiten im Fall einer uneindeutigen Detektion. Die ROC-Kurven, wie sie beim Messwerttest zur Bestimmung eines Schwellwerts für die Vorauswahl von Kombinationen mit höherer Vielfachheit genutzt werden, sind daher nicht notwendig. Sie sind dennoch im Anhang, Abbildung A.1 zu finden. Dabei werden alle Untermengen der tatsächlich manipulierten Kombination als manipuliert gewertet. Auch die Kurven zeigen, dass ein solcher Schwellwert für den Globaltest nicht sinnvoll ist. Die ROC-Kurven liegen in Abbildung A.1 sehr nahe an der Diagonale.

### Beispiel Unmanipuliert

Zur Detektion mit Hilfe des Globaltests werden in den Tabellen wieder links die Größen gegeben, die auf Manipulation untersucht werden, in der zweiten Spalte die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die verbleibenden Größen nicht manipuliert sind, in der dritten Spalte die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit für den verbleibenden Datensatz, in die vierten Spalte wird die Differenz zum allgemeinen Schwellwert und in der fünften Spalte die zum individuellen Schwellwert angegeben.

Beim Globaltest drückt die Prüfgröße aus, ob die beobachtete Summe der Residuen mit den Standardabweichungen der beteiligten Größen kompatibel ist oder anders formuliert, dass in den verbliebenen Größen keine (weiteren) Manipulationen vorliegen. Ist dies der Fall, liegt die Prüfgröße unter dem Schwellwert. Sind die Residuen nicht mit den Standardabweichungen erkläbar, liegt sie über dem Schwellwert. Im unmanipulierten Fall müssen die Prüfgrößen also für alle Fälle unter dem Schwellwert liegen, die Differenzen müssen daher negativ sein. In den manipulierten Fällen muss die Prüfgröße genau dann unter dem Schwellwert liegen, wenn alle manipulierten Größen entfernt wurden, auch dann wenn mehr als die manipulierten Größen entfernt wurden. In allen anderen Fällen muss die Prüfgröße über dem Schwellwert liegen, die Differenz muss also negativ sein. Die kleinste Kombination, bei der eine negative Differenz auftritt, stellt also die detektierte Kombination dar. Bei mehrdeutigen Detektionen erlaubt die nächst höhere Vielfachheit eine Überprüfung, da alle Kombinationen mit den tatsächlich manipulierten Größen eine Detektion liefern müssen. Die Einzelgrößen des unmanipulierten Falls sind in Tabelle 3.24 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
	0,2454	0,9912	0,2785	-3,8615	-3,8615
1	0,2051	0,9723	0,2319	-3,9081	-6,4455
2	0,2758	0,9735	0,2248	-3,9152	-3,9152
3	0,2783	0,9765	0,2065	-3,9335	-6,4709
4	0,2091	0,9787	0,1932	-3,9468	-3,9468
5	0,2070	0,9754	0,2132	-3,9268	-3,9268
6	0,2101	0,9802	0,1836	-3,9564	-6,4938

**Tabelle 3.24:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 4,14 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 6,68 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

In Tabelle 3.24 zeigt sich bereits in der ersten Zeile, dass der Globaltest das vollständige System als unmanipuliert diagnostiziert. Da dies die niedrigste „Fehlerkombination“ ist, die mit den statistischen Fehlern der enthaltenen Größen vereinbar ist. Bei den Einzelgrößen zeigt sich ebenfalls in Form der negativen Differenzen, dass keine (weiteren) Manipulationen vorliegen. Die höheren Vielfachheiten sind im Anhang in den Tabellen A.6 A.7 und A.8 dargestellt. Es gibt auch dort keine Überschreitungen des Schwellwerts.

### Manipulationsbeispiel 1

Beim ersten Manipulationsbeispiel wird wieder Größe 1 um  $3\sigma$  erhöht. In Tabelle 3.25 werden die Nullhypothese und die Einzelgrößen dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
	0,0207	0,2653	5,2216	1,0816	1,0816
1	0,2051	0,9723	0,2319	-3,9081	-6,4455
2	0,0244	0,1663	5,0767	0,9367	0,9367
3	0,0241	0,1644	5,1032	0,9632	-1,5743
4	0,0178	0,1633	5,1190	0,9790	0,9790
5	0,0180	0,1650	5,0943	0,9543	0,9543
6	0,0548	0,4118	2,8721	-1,2679	-3,8054

**Tabelle 3.25:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 4,14 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 6,68 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1.

Nachdem die erste Zeile das System als manipuliert qualifiziert, sind Werte unterhalb des Schwellwerts bzw. negative Differenzen zum Schwellwert als Detektion zu interpretieren. Tabelle 3.25 zeigt eine Detektion in den Größen 1, 3 und 6. Zur Entscheidung, welche der

beiden Größen manipuliert ist, werden in Tabelle 3.26 die Kombinationen der Vielfachheit 2 mit Größen 1, 3 und 6 dargestellt. Anders als bei Messwerttest spielt die Reihenfolge hier keine Rolle, weil alle untersuchten Größen entfernt werden, jede Kombination ist also nur einmal aufgeführt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,2086	0,9056	0,1982	-2,3118	-2,3118
1 3	0,1376	0,9126	0,1830	-2,3270	-2,3270
1 4	0,2535	0,9178	0,1715	-2,3385	-2,3385
1 5	0,2096	0,9100	0,1886	-2,3214	-4,4596
1 6	0,1993	0,9994	0,0013	-2,5087	-2,5087
2 3	0,0251	0,0817	5,0106	2,5006	0,3624
2 6	0,0897	0,3247	2,2497	-0,2603	-0,2603
3 4	0,0320	0,0803	5,0446	2,5346	2,5346
3 5	0,0201	0,0939	4,7302	2,2202	2,2202
3 6	0,0871	0,3154	2,3078	-0,2022	-0,2022
4 6	0,0467	0,3097	2,3442	-0,1658	-2,3040
5 6	0,0635	0,3186	2,2879	-0,2221	-0,2221

**Tabelle 3.26:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,51 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 4,65 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1.

Die Kombinationen der Vielfachheit 2 liefern wie erwartet Detektionen für alle Kombinationen mit Größe 1, da die Prüfgrößen auch mit einer weiteren entfernten Größe mit einem unmanipulierten System kompatibel sind. Die Kombinationen mit Größe 6 liefern allerdings ebenfalls alle Detektionen, wenn auch einige nur sehr knapp. Unter den Kombinationen mit Größe 3 finden sich dagegen auch Fälle, die keine negative Differenz zum Schwellwert aufweisen. Aufgrund der größeren Differenz würde Größe 1 als die manipulierte gewählt werden und damit die Manipulation richtig detektiert. Eine Manipulation in Größe 6 wäre jedoch nicht sicher ausgeschlossen.

Beim Beispiel einer Manipulation in Größe 1, liefert der Globaltest also die richtige Detektion.

Wie bereits beim Messwerttest ausgeführt, kann damit von einem bekannten Systemzustand ausgegangen werden und eine Gegenmaßnahme mit dieser Bedingung ausgewählt werden. Abhängig von den Sicherheitsanforderungen müsste die Maßnahme jedoch auch für eine Manipulation in Größe 6 geeignet sein.

## Manipulationsbeispiel 2

Das zweite Manipulationsbeispiel enthält zusätzlich zur Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1, eine Manipulation von  $+3\sigma$ , in Größe 5. Der Test des unreduzierten Systems und die Tests der Einzelgrößen ist in Tabelle 3.27 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0025	0,0503	9,4736	5,3336	5,3336
2	0,0075	0,0770	6,8448	2,7048	0,1674
3	0,0028	0,0242	9,4199	5,2799	5,2799
4	0,0093	0,0715	7,0123	2,8723	0,3348
5	0,0021	0,0245	9,3883	5,2483	5,2483
6	0,0180	0,1650	5,0943	0,9543	0,9543
6	0,0202	0,1814	4,8718	0,7318	-1,8056

**Tabelle 3.27:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 4,14 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 6,68 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Das System wird richtig als manipuliert identifiziert. In Größe 6 findet sich eine Detektion, die mit Hilfe der Kombinationen mit zwei Größen geprüft wird. Da nur zwei der fünf Kombinationen mit Größe 6 Detektionen zeigen, werden in Tabelle 3.28 alle Kombinationen der Vielfachheit 2 untersucht.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,0093	0,0405	6,4118	3,9018	3,9018
1 3	0,0101	0,0672	5,4007	2,8907	2,8907
1 4	0,0117	0,0423	6,3259	3,8159	3,8159
1 5	0,2096	0,9100	0,1886	-2,3214	-4,4596
1 6	0,0213	0,1070	4,4702	1,9602	1,9602
2 3	0,0113	0,0369	6,5970	4,0870	1,9488
2 4	0,0040	0,0101	9,1980	6,6880	6,6880
2 5	0,0189	0,0819	5,0037	2,4937	2,4937
2 6	0,0254	0,0920	4,7729	2,2629	2,2629
3 4	0,0154	0,0385	6,5128	4,0028	4,0028
3 5	0,0201	0,0939	4,7302	2,2202	2,2202
3 6	0,2570	0,9303	0,1446	-2,3654	-2,3654
4 5	0,0160	0,0806	5,0373	2,5273	2,5273
4 6	0,0136	0,0903	4,8082	2,2982	0,1600
5 6	0,0635	0,3186	2,2879	-0,2221	-0,2221

**Tabelle 3.28:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,51 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 4,65 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

In Tabelle 3.28 finden sich Detektionen in Kombinationen [1,5], [3,6] und [5,6]. Die größte Differenz zum individuellen Grenzwert tritt für Kombination [1,5] auf. Die Differenz zum individuellen Schwellwert für Kombination [3,6] liegt in der gleichen Größenordnung, auch wenn sie geringer ist. Manipulationen in Kombinationen [1,5] und [3,6] sind schwer unterscheidbar. Ohne Schwellwertanpassung würde die Entscheidung zugunsten der Kombination [3,6] ausfallen, erst die Schwellwertanpassung liefert die Entscheidung zugunsten der tatsächlich manipulierten Kombination [1,5]. Die Detektion [1,5] wird bei der Betrachtung der Kombinationen der Vielfachheit 3 in Tabelle A.9 im Anhang bestätigt, dies gilt jedoch auch für Kombination [3,6].

Der Globaltest liefert hier also aufgrund der Schwellwertanpassung die richtige Detektion von [1,5].

### Manipulationsbeispiel 3

Beim dritten Manipulationsbeispiel ist lediglich das Vorzeichen der Manipulation in Messung 5 geändert. Größe 1 ist also mit einer Manipulation von  $+3\sigma$  manipuliert, Größe 5 mit  $-3\sigma$ . Die Detektion beginnt wieder mit dem Test, ob das System grundsätzlich mit Anomalien behaftet ist und mit den Einzelgrößen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
	4,31 e-4	0,0114	12,9695	8,8295	8,8295
1	2,02 e-2	0,1816	4,8691	0,7291	-1,8083
2	7,71 e-4	0,0074	11,9835	7,8435	7,8435
3	6,94 e-4	0,0067	12,1941	8,0541	5,5166
4	5,43 e-4	0,0070	12,0997	7,9597	7,9597
5	1,80 e-2	0,1650	5,0943	0,9543	0,9543
6	5,37 e-4	0,0070	12,1223	7,9823	5,4449

**Tabelle 3.29:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 4,14 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 6,68 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Das System wird als manipuliert identifiziert und unter den Manipulationen der Vielfachheit 1 in Tabelle 3.29 wird eine Manipulation in Größe 1 detektiert. Die zugehörigen Kombinationen mit Vielfachheit 2 in Tabelle 3.30 zeigen jedoch, dass nicht alle Kombinationen mit Größe 1 eine Detektion liefern. Die Manipulation kann also nicht nur in Größe 1 liegen.

Detektiert werden in Tabelle 3.30 die Kombinationen [1,3] und [1,5]. Die weitere Suche unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 mit der detektierten Kombinationen [1,3] und [1,5], bestätigt eine Detektion in [1,5], während sich für [1,3] mit [1,3,4] auch eine Kombination

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,0211	0,0914	4,7846	2,2746	2,2746
1 3	0,0511	0,3387	2,1652	-0,3448	-0,3448
1 4	0,0248	0,0900	4,8170	2,3070	2,3070
1 5	0,2096	0,9100	0,1886	-2,3214	-4,4596
1 6	0,0207	0,1037	4,5323	2,0223	2,0223

**Tabelle 3.30:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,51 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 4,65 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

findet, deren Wert der Prüfgröße über dem Schwellwert liegt. Die untersuchten Kombinationen der Vielfachheit 3 sind in Tabelle A.10 im Anhang dargestellt.

Der Globaltest liefert also auch hier die tatsächlich manipulierte Kombination [1,5]. Diese Detektion würde sich auch beim klassischen Vorgehen mit dem chwellwert  $SW_{\text{ohne\_}2\_GT} = 3,79$  ergeben.

#### Manipulationsbeispiel 4

Auch mit dem Globaltest soll eine unerwartete Manipulation in Größe 2 mit doppelter Auslenkung, also  $6\sigma$ , detektiert werden. Dazu werden wieder alle Einzelgrößen untersucht (Tabelle 3.31), nachdem das System als fehlerbehaftet identifiziert wurde.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	4,85 e-7	2,45 e-5	26,5490	22,4090	22,4090
2	1,12 e-6	1,99 e-5	24,4740	20,3340	17,7966
2	2,76 e-1	9,73 e-1	0,2248	-3,9152	-3,9152
3	1,62 e-6	2,14 e-5	24,3200	20,1800	17,6426
4	4,06 e-6	6,86 e-5	21,8946	17,7546	17,7546
5	1,18 e-6	2,10 e-5	24,3576	20,2176	20,2176
6	1,28 e-6	2,27 e-5	24,1995	20,0595	17,5220

**Tabelle 3.31:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 4,14 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 6,68 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Der Globaltest liefert in Tabelle 3.31 die tatsächlich manipulierte Größe 2. Die Kontrolle über die Untersuchung der Kombinationen mit Größe 2 bestätigt die Detektion. Sie ist im Anhang in Tabelle A.11 dargestellt.

Der Globaltest liefert also die zutreffende Detektion der Größe 2.

## Systematische Bewertung

Die Beispiele werden vom Globaltest mit der Schwellwertanpassung alle richtig detektiert. Ohne Schwellwertanpassung wird in Manipulationsbeispiel 2 die falsche Kombination detektiert (Tabelle 3.32).

Manipulation		ohne SW-Anpassung	Eindeutig	mit SW-Anpassung	Eindeutig
unmanip.	keine	keine	✓	keine	✓
Bsp. 1	1	1	✓	1	✓
Bsp. 2	[1,5]	[3,6] / [1,5]		[1,5]	✓
Bsp. 3	[1,5]	[1,5]	✓	[1,5]	✓
Bsp. 4	2	2	✓	2	✓

**Tabelle 3.32:** Leistung des Globaltests in den Beispielen

Das objektive Maß für die Aussagekraft des Globaltests, der eingeschlossene Flächenanteil zwischen Kurve und Diagonale in Abb. 3.4 ist in Tabelle 3.33 dargestellt.

Vielfachheit	Flächenanteil ohne Anpassung ( $SA_{GT} = 0$ )	Flächenanteil bei $SA_{GT} = 0,38$	Vielfachheits-spezifisches $SA_{GT}$	Flächenanteil bei spezifischem $SA_{GT}$
1	0,9009	0,9430	0,38	0,9430
2	0,8605	0,9015	0,46	0,9103
3	0,7750	0,8034	0,58	0,8222

**Tabelle 3.33:** Anteil der Fläche, die von ROC-Kurve und Diagonale eingeschlossen wird.

Der Test liefert also eine sehr hohe Aussagekraft, die durch die Schwellwertanpassung spürbar verbessert wird.

Für die Berechnung der Prüfgröße sind beim Globaltest drei Matrixmultiplikationen pro untersuchter Kombination notwendig. Durch das iterative Vorgehen könnte theoretisch auch hier die Anzahl der berechneten Kombinationen reduziert werden, allerdings zeigen die ROC-Kurven mit inklusiver Definition, dass anhand der Prüfgröße kaum entschieden werden kann, für welche Größen weitere Kombinationen untersucht werden.

Der Globaltest liefert bei geringer Redundanz leider keine Werte zur Detektion von Manipulationen mehr. Im Beispielsystem können bei der Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 4 nur noch Werte für die Kombinationen [1,2,4,6], [1,3,5,6] sowie [2,3,4,5] berechnet werden.

Der Globaltest liefert also für große Systeme mit hoher Redundanz sehr sichere Testergebnisse. Für kleinere Systeme oder solche mit geringer Redundanz ist der Globaltest häufig nicht mehr anwendbar.

### 3.3.5 Hypothesentest

Auch beim Hypothesentest werden die Residuen untersucht, allerdings nicht ihr Betrag sondern ihre Ähnlichkeit zu vorher aufgestellten Hypothesen. Mehrfachmanipulationen werden hier direkt als Hypothesen aufgestellt. Die angegebene Wahrscheinlichkeit bezieht sich darauf, wie genau die betrachtete Hypothese die aus den Messung erhaltenen Residuen beschreibt. Die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Hypothese nicht zutrifft. Sie wird über einen Chi-Quadrat-Test bestimmt, der die Vereinbarkeit der beobachteten Residuenverteilung mit den in den Hypothesen vorhergesagten prüft. Für den Vergleich der Hypothesen, über Kombinationen mit unterschiedlicher Anzahl an beteiligten Größen hinweg, eignet sich dabei nur die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit, weil die unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilung bei unterschiedlicher Anzahl an beteiligten Größen hier theoretisch ausgeglichen wird. Die Unterschiede in der Wahrscheinlichkeitsverteilung ergeben sich daraus, dass für die Beschreibung verrauschter Daten eine höhere Anzahl an Freiheitsgraden immer das bessere Ergebnis liefert. Hypothesen mit einer größeren Anzahl an Größen, die als fehlerbehaftet angenommen werden, beschreiben die Messwerte also immer besser. Im folgenden Beispiel wird als Prüfgröße dennoch die Ähnlichkeit genutzt, für die, abhängig von der geprüften Vielfachheit der Manipulation, ein eigener Schwellwert definiert wird. Klassisch wird dieser über das angestrebte Signifikanzniveau bestimmt, hier wird aber, wie bei den anderen beiden Detektionsmethoden, eine experimentelle Bestimmung über die ROC-Kurve durchgeführt. Für die Detektion wird ein möglichst hoher Wert der Prüfgröße gesucht, insbesondere wird nach Werten gesucht, die die Schwellwerte überschreiten.

#### Schwellwertanpassung

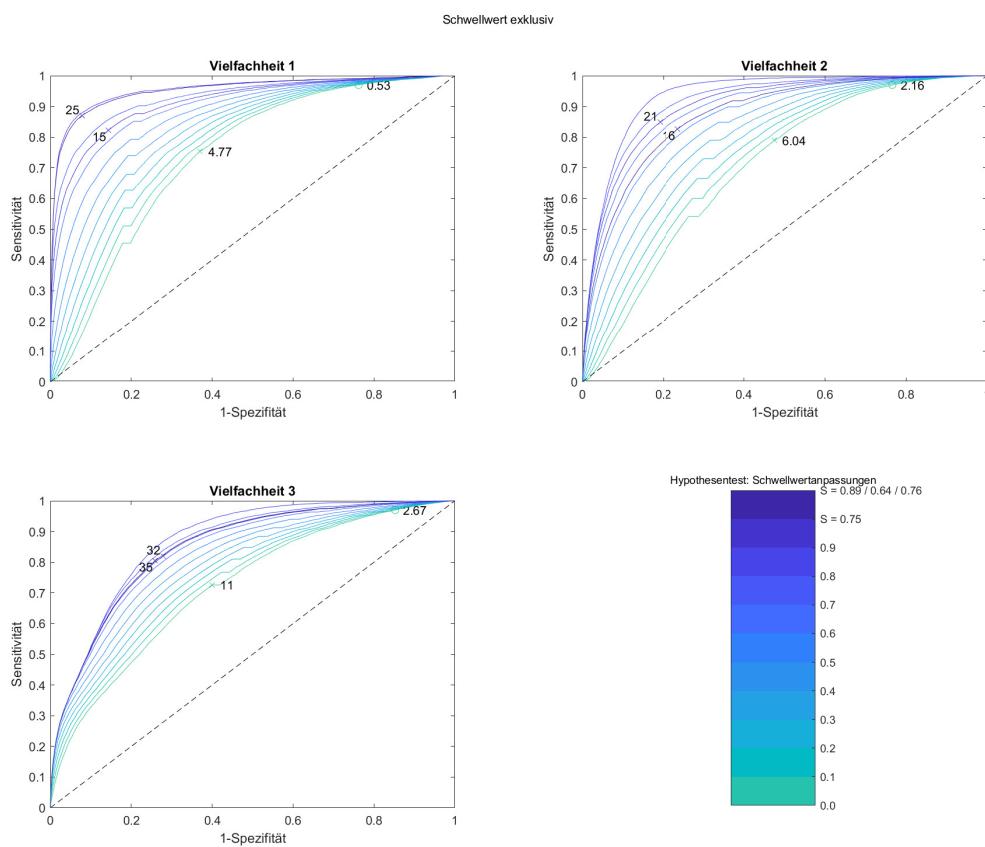
Die Schwellwertanpassung aus der Richtig-Positiv-Rate wird über die ROC-Kurve bestimmt, wobei für erwartete Manipulationen eine Sensitivität von 0,97 ohne Schwellwertanpassung gefordert wird. Für Vielfachheit 1 liegt dieser Schwellwert bei  $SW_{97\%\_1\_Hypo} = 0,53$ , für Vielfachheit 2 bei  $SW_{97\%\_2\_Hypo} = 2,16$  und für Vielfachheit 3 bei  $SW_{97\%\_3\_Hypo} = 2,67$ . Mit den optimalen Schwellwerten ohne Schwellwertanpassung von  $SW_{\text{ohne\_1\_Hypo}} = 4,77$ ,  $SW_{\text{ohne\_2\_Hypo}} = 6,04$  und  $SW_{\text{ohne\_3\_Hypo}} = 11,00$  erhält man über Gleichung 3.8 Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_Hypo} = 0,89$ ,  $SA_{2\_Hypo} = 0,64$  und  $SA_{3\_Hypo} = 0,76$ .

Auch hier kann die maximale Schwellwertanpassung  $SA_{Hypo}$  über das Störverhältnis mit Gleichung 3.12 bestimmt werden. Benötigt wird dafür die höchste Prüfgröße der erwarteten Manipulationen um  $1\sigma$  und der geringste Wert der unerwarteten Manipulationen um  $2\sigma$ . Weil das Beispielsystem linear ist, führt durch die Normierung beim Hypothesentest eine Verdopplung der Manipulationshöhe dazu, dass die Prüfgröße sich vervierfacht. Der

Schwellwert darf sich durch die Anpassung also maximal auf ein Viertel verringern. Daraus ergibt sich eine Schwellwertanpassung  $SA_{Hypo} = 0,75$ .

## Schwellwerte

Mit den ROC-Kurven werden Leistungsfähigkeit und Einfluss der angepassten Grenzwerte beurteilt und die oben bereits verwendeten Grenzwerte ermittelt. Zunächst werden für die Berechnung der ROC-Kurven nur die vollständigen tatsächlich manipulierten Kombinationen als manipuliert betrachtet, nicht die Untermengen.



**Abbildung 3.5:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Hypothesentest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert werden nur die vollständigen tatsächlich manipulierten Kombinationen betrachtet. Die optimalen Schwellwerte bei der zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen  $SA_{1\_Hypo} = 0,89$  für Vielfachheit 1,  $SA_{2\_Hypo} = 0,64$  für Vielfachheit 2 und  $SA_{3\_Hypo} = 0,76$  für Vielfachheit 3, für die gemeinsame Schwellwertanpassung von  $SA_{Hypo} = 0,75$  sowie bei den Kurven ohne Schwellwertanpassung  $SA_{Hypo} = 0$  sind markiert und beschriftet.

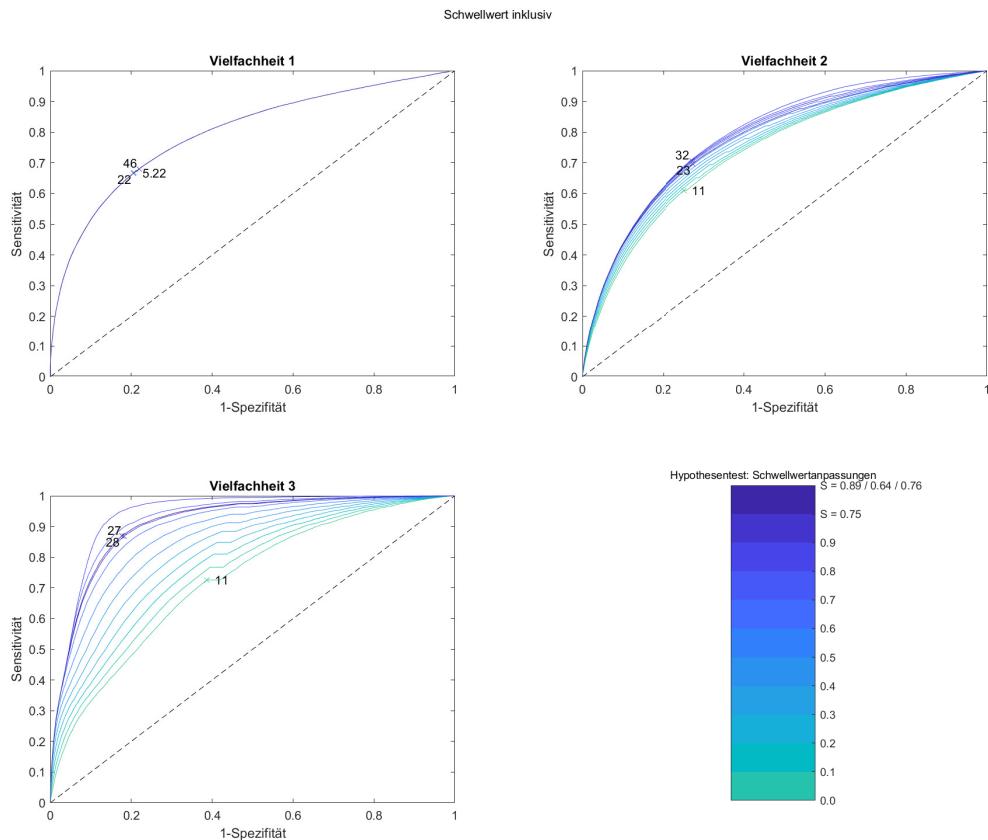
Die Eignung des Hypothesentests zur Detektion der Manipulationen ist eindeutig erkennbar. Die Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Exposition bzw. Gemeinsamkeiten führt

zu einer Verbesserung der Detektion. Die optimalen Schwellwerte bei den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen sind in Tabelle 3.34 zusammengestellt.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{Hypo} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{Hypo} = 0,75$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_Hypo}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_Hypo}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	4,77	15	0,89	25
2	6,04	21	0,64	16
3	11	32	0,76	35

**Tabelle 3.34:** Schwellwerte für Detektion über den Messwerttest.

Zur Bestimmung der Schwellwerte für die Vorauswahl von Kombinationen höherer Vielfachheit, werden die ROC-Kurven in der Form berechnet, dass alle Größen und Kombinationen, die eine Untermenge der tatsächlich manipulierten Kombination darstellen, als manipuliert gewertet werden.



**Abbildung 3.6:** ROC-Kurve für die Identifikation von Kandidaten für Manipulationen mit höherer Vielfachheit mit dem Hypothesentest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als 'manipuliert' werden alle Untermengen der tatsächlich manipulierten Kombinationen betrachtet. Der optimale Schwellwert ist ohne Schwellwertanpassung und mit der zuvor bestimmten Schwellwertanpassung markiert und beschriftet.

Aus diesen ROC-Kurven erhält man die Grenzwerte für eine Vorauswahl von Größen und Kombinationen für die Untersuchung höherer Kombinationen auf Manipulation. Die so ermittelten Schwellwerte sind in Tabelle 3.35 zusammengefasst. Die Abweichung dieser Kurven von der Diagonale zeigt deutlich, dass die Vorauswahl für den Hypothesentest sinnvoll ist.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{Hypo} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{Hypo} = 0,75$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_Hypo}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_Hypo}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	5,22	22	5,50	0,89
2	11	32	8,00	0,64
3	11	27	6,75	0,76

**Tabelle 3.35:** Schwellwerte für Vorauswahl von Kombinationen zur Detektion von Kombinationen höherer Vielfachheit mit Hilfe des Hypothesentests.

Für das folgende Beispiel wird die gemeinsame Schwellwertanpassung von  $SA_{Hypo} = 0,75$  verwendet. Die Detektion mit vielfachheitsabhängigen Schwellwertanpassungen wird im Anhang gezeigt unter A.2.2.

### Beispiel Unmanipuliert

Zunächst wird der unmanipulierte Fall dargestellt. In Tabelle 3.36 ist die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 1 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8905	0,8292	0,0698	-14,9302	-3,6802
2	0,8937	0,8167	0,0805	-14,9195	-14,9195
3	0,9019	0,7885	0,1079	-14,8921	-3,6421
4	0,9079	0,7702	0,1280	-14,8720	-14,8720
5	0,8989	0,7983	0,0980	-14,9020	-14,9020
6	0,9123	0,7580	0,1424	-14,8576	-3,6076

**Tabelle 3.36:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 15,00 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 3,75 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Unter den Einzelgrößen (Tabelle 3.36) tritt keine Detektion auf. Auch der Schwellwert von 15,00 bzw. der angepasste Schwellwert von 3,75 für die Detektion von Manipulationen höherer Vielfachheit wird nicht überschritten. Die Kombinationen sind im Anhang in Tabellen A.12 A.13 und A.14 dargestellt. Auch dort finden sich keine Detektionen.

Der Hypothesentest identifiziert dieses Beispiel richtig als nicht manipuliert.

## Manipulationsbeispiel 1

Das erste Manipulationsbeispiel ist die Erhöhung der Größe 1 um  $3\sigma$ . In Tabelle 3.37 sind die Einzelgrößen dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8905	0,0255	7,4845	-7,5155	3,7345
2	0,0790	0,7035	0,2173	-14,7827	-14,7827
3	0,0780	0,7307	0,1776	-14,8224	-3,5724
4	0,0773	0,7487	0,1539	-14,8461	-14,8461
5	0,0783	0,7212	0,1910	-14,8090	-14,8090
6	0,2379	0,1253	3,5243	-11,4757	-0,2257

**Tabelle 3.37:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 15,00 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 3,75 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1.

In Tabelle 3.37 wird Größe 1 eindeutig als manipuliert detektiert. Dies würde auch bei der klassischen Detektion mit dem Schwellwert  $SW_{\text{ohne\_1\_Hypo}} = 4,77$  funktionieren. Der angepasste Schwellwert für Untersuchung auf Manipulationen höherer Vielfachheiten von 5,50 wird nur von Größe 1 überschritten. Daher werden in Tabelle 3.38 alle Kombinationen mit Größe 1 untersucht.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,9056	0,1557	5,0234	-15,9766	-15,9766
1 3	0,9126	0,1545	5,0386	-15,9614	-15,9614
1 4	0,9178	0,1537	5,0501	-15,9499	-15,9499
1 5	0,9100	0,1550	5,0330	-15,9670	-0,2170
1 6	0,9994	0,1416	7,8305	-13,1695	-13,1695

**Tabelle 3.38:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 21,00 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 5,25 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1.

Unter den Kombinationen mit Vielfachheit 2 findet sich keine weitere Detektion. Auch der Schwellwert für die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 3 wird nicht überschritten.

Der Hypothesentest detektiert also eindeutig die tatsächlich manipulierte Größe 1.

Die sichere Detektion und die hohe verbleibende Redundanz würde hier einen bekannten Systemzustand zeigen und damit die Auswahl einer gezielten Gegenmaßnahme ermöglichen.

## Manipulationsbeispiel 2

Die zweite Beispielmanipulation ergibt sich aus der Erhöhung der beiden Größen 1 und 5 um  $+3\sigma$ . In Tabelle 3.39 wird die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 1 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0326	0,1049	3,9433	-11,0567	0,1933
2	0,0090	0,8167	0,0805	-14,9195	-14,9195
3	0,0300	0,1167	3,6921	-11,3079	-0,0579
4	0,0091	0,7702	0,1280	-14,8720	-14,8720
5	0,0783	0,0364	6,5690	-8,4310	-8,4310
6	0,0875	0,0319	6,9028	-8,0972	3,1528

**Tabelle 3.39:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 15,00 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 3,75 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Bei den Einzelgrößen in Tabelle 3.39 wird eine Manipulation in den Größen 1 und 6 detektiert. Den Schwellwert für eine Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 2 überschreiten Größen 5 und 6. In Tabelle 3.14 werden die Kombinationen der Vielfachheit 2 mit diesen Größen aufgeführt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 5	0,9100	0,0192	9,2851	-11,7149	4,0351
1 6	0,1070	0,1572	7,5051	-13,4949	-13,4949
2 5	0,0819	0,2025	2,6820	-18,3180	-18,3180
2 6	0,0920	0,1816	4,7008	-16,2992	-16,2992
3 5	0,0939	0,1779	7,1151	-13,8849	-13,8849
3 6	0,9303	0,0188	9,3291	-11,6709	-11,6709
4 5	0,0806	0,2058	2,6618	-18,3382	-18,3382
4 6	0,0903	0,1846	4,6655	-16,3345	-0,5845
5 6	0,3186	0,0543	7,1857	-13,8143	-13,8143

**Tabelle 3.40:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 21,00 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 5,25 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Hier wird tatsächlich die Kombination [1,5] detektiert. Kombination [3,6] weist einen etwas höheren Wert der Prüfgröße auf. Ohne Nutzung des Vorwissens würde hier Kombination [3,6] detektiert werden. Für die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 3 werden die Kombinationen [1,5] und [3,6] identifiziert. Im Anhang sind in Tabelle A.15 die Kombinationen dieser Vorauswahl aufgeführt, dabei findet sich eine weitere Detektion in Kombina-

tion [3,5,6]. Der Schwellwert für die Vorauswahl von Kombinationen der Vielfachheit 4 wird nicht überschritten. In Tabelle 3.41 sind zur Auswertung alle Größen und Kombinationen zusammengestellt, die Detektionen aufweisen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0326	0,1049	3,9433	-11,0567	0,1933
6	0,0875	0,0319	6,9028	-8,0972	3,1528
1 5	0,9100	0,0192	9,2851	-11,7149	4,0351
3 5 6	0,9994	0,0692	14,2086	-17,7914	6,2086

**Tabelle 3.41:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Zum Vergleich von Kombinationen unterschiedlicher Vielfachheiten ist beim Hypothesentest die Differenz zum Schwellwert nicht aussagekräftig. Aufgrund der geringsten Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit wird Kombination [1,5] detektiert und damit die tatsächlich manipulierte Kombination.

### Manipulationsbeispiel 3

Beim dritten Manipulationsbeispiel ist gegenüber dem zweiten Beispiel das Vorzeichen der Manipulation in Größe 5 umgedreht. Größe 1 ist also mit  $+3\sigma$  manipuliert, Größe 5 mit  $-3\sigma$ . Die Tests der Einzelgrößen sind in Tabelle 3.42 aufgeführt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0876	0,0044	12,1506	-2,8494	8,4006
2	0,0025	0,3207	1,4791	-13,5209	-13,5209
3	0,0022	0,3785	1,1632	-13,8368	-2,5868
4	0,0024	0,3510	1,3048	-13,6952	-13,6952
5	0,0783	0,0050	11,8129	-3,1871	-3,1871
6	0,0023	0,3573	1,2708	-13,7292	-2,4792

**Tabelle 3.42:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 15,00 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 3,75 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Eine Einzelmanipulation (Tabelle 3.42) wird in Größe 1 detektiert. Der Schwellwert für weitere Untersuchung auf Manipulationen höherer Vielfachheit wird von den Größen 1 und 5 überschritten. In Tabelle 3.43 sind alle Kombinationen der Vielfachheit 2 mit den Größen 1 und 5 aufgeführt.

Unter den Kombinationen mit Vielfachheit 2 wird nur Kombination [1,5] detektiert. Für Kombinationen [1,2], [1,3], [1,5], [3,5] und [5,6] wird der Schwellwert für die Vorauswahl für

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	2	0,0914	0,0331	8,1849	-12,8151	-12,8151
1	3	0,3387	0,0090	10,8043	-10,1957	-10,1957
1	4	0,0900	0,0337	8,1526	-12,8474	-12,8474
1	5	0,9100	0,0034	12,7810	-8,2190	7,5310
1	6	0,1037	0,0292	12,6559	-8,3441	-8,3441
2	5	0,0819	0,0369	4,7795	-16,2205	-16,2205
3	5	0,0939	0,0322	12,3590	-8,6410	-8,6410
4	5	0,0806	0,0375	4,7593	-16,2407	-16,2407
5	6	0,3186	0,0096	10,6816	-10,3184	-10,3184

**Tabelle 3.43:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 21,00 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 5,25 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Kombinationen der nächst höheren Vielfachheit überschritten. Diese Kombinationen werden im Anhang in Tabelle A.16 betrachtet. Es findet sich dort eine weitere Detektion bei Kombination [3,5,6]. Einen Hinweis auf eine Kombination der Vielfachheit 4 liefert keine der Prüfgrößen.

In Tabelle 3.44 werden die Größen und Kombinationen zusammengestellt, die Detektionen aufweisen.

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg Schwelle	Diff. individ. Schwelle
	1	0,0876	0,0044	12,1506	-2,8494	8,4006
1	5	0,9100	0,0034	12,7810	-8,2190	7,5310
3	5	0,9994	0,0141	19,4525	-12,5475	11,4525

**Tabelle 3.44:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Aufgrund der geringsten Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit würde die Wahl auf eine Manipulation in Kombination [1,5] fallen. Die Hypothese einer Manipulation in Größe 1 weist allerdings ebenfalls eine geringe Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit auf.

Der Hypothesentest liefert in diesem Fall also die tatsächlich manipulierte Kombination.

#### Manipulationsbeispiel 4

Als Beispiel einer größeren Manipulation einer unerwarteten Größe, wird die Manipulation von Größe 2 um  $+6\sigma$  dargestellt. Die Einzelgrößen werden in Tabelle 3.45 untersucht.

Unter den Einzelgrößen in Tabelle 3.45 liefert der Hypothesentest eine Detektion in Größe 2. Aufgrund der Vorauswahl werden Kombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle 3.46 untersucht für die Größen 2 und 4.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	4,85 e-6	0,1497	3,1125	-11,8875	-0,6375
2	8,94 e-1	2,89 e-7	39,4863	24,4863	24,4863
3	5,24 e-6	0,1354	3,3435	-11,6565	-0,4065
4	1,76 e-5	0,0310	6,9816	-8,0184	-8,0184
5	5,14 e-6	0,1388	3,2870	-11,7130	-11,7130
6	5,56 e-6	0,1253	3,5243	-11,4757	-0,2257

**Tabelle 3.45:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 15 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 3,75 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	9,06 e-1	3,79 e-6	26,3508	5,3508	5,3508
1 4	1,42 e-4	0,0240	8,8355	-12,1645	-12,1645
2 3	9,15 e-1	3,75 e-6	15,8228	-5,1772	10,5728
2 4	9,99 e-1	3,44 e-6	39,8191	18,8191	18,8191
2 5	9,13 e-1	3,76 e-6	15,8195	-5,1805	-5,1805
2 6	9,24 e-1	3,72 e-6	26,3909	5,3909	5,3909
3 4	1,59 e-4	0,0214	5,4361	-15,5639	-15,5639
4 5	1,55 e-4	0,0220	5,4033	-15,5967	-15,5967
4 6	1,74 e-4	0,0197	9,2346	-11,7654	3,9846

**Tabelle 3.46:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 21 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 5,25 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle 3.46 finden sich weitere Detektionen in [1,2], [2,3], [2,4], [2,6] und [4,6]. Alle Kombinationen mit Größe 2 überschreiten außerdem den Schwellwert für die Vorauswahl für Dreifachkombinationen, ebenso wie Kombination [4,6]. Für die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 3 werden im Anhang Tabelle A.17 alle Kombinationen mit Größe 2 und Kombination [4,6] aufgestellt. Detektionen finden sich in Kombinationen [1,2,3], [1,2,4], [1,2,6], [1,4,6] und [2,4,6]. Die Vorauswahl für die Detektion von Manipulationen der Vielfachheit 4 erfüllen Kombinationen [1,2,4], [1,2,6], [1,4,6] und [2,4,6]. Die Vierfachkombinationen sind im Anhang in Tabelle A.18 dargestellt. Dort finden sich keine weiteren Detektionen.

Für die Entscheidung werden wieder alle Detektionen in Tabelle 3.47 aufgestellt.

Die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit ist für Größe 2 geringer als für die Kombinationen, was für die Manipulation in Größe 2 spricht.

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg Schwelle	Diff. individ. Schwelle
2	2	8,94 e-1	2,89 e-7	39,4863	24,4863	24,4863
1	2	9,06 e-1	3,79 e-6	26,3508	5,3508	5,3508
2	3	9,15 e-1	3,75 e-6	15,8228	-5,1772	10,5728
2	4	9,99 e-1	3,44 e-6	39,8191	18,8191	18,8191
2	6	9,24 e-1	3,72 e-6	26,3909	5,3909	5,3909
4	6	1,74 e-4	0,0197	9,2346	-11,7654	3,9846
1	2	9,22 e-1	2,37 e-5	15,8318	-16,1682	7,8318
1	2	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	7,8234	7,8234
1	2	6	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	7,8234
1	4	6	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	7,8234
2	4	6	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	7,8234
						31,8234

**Tabelle 3.47:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau und der Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Der Hypothesentest liefert also auch für dieses Beispiel die richtige Detektion. Aufgrund der hohen Manipulation findet sich allerdings zusätzlich eine Vielzahl weiterer Detektionen.

### Systematische Bewertung

Der Hypothesentest liefert also mit Schwellwertanpassung für alle Beispiele die richtige Detektion, außer für die Manipulation der Kombination [1,5] mit unterschiedlichen Richtungen, wo als wahrscheinlichste Manipulation Größe 1 bestimmt wird.

<b>Manipulation</b>	<b>ohne SW-Anpassung</b>	<b>Eindeutig</b>	<b>mit SW-Anpassung</b>	<b>Eindeutig</b>
unmanip. keine	keine	✓	keine	✓
Bsp. 1 1	1	✓	1	✓
Bsp. 2 [1,5]	[3,6]([1,5])		[1,5]	✓
Bsp. 3 [1,5]	[1,5]	✓	[1,5]	✓
Bsp. 4 2	2	✓	2	✓

**Tabelle 3.48:** Leistung des Hypothesentests in den Beispielen

Das objektive Maß für die Aussagekraft des Hypothesentests, der Anteil der Fläche zwischen Kurve und Diagonale in Abb. 3.5 ist in Tabelle 3.49 zusammengefasst.

<b>Vielfachheit</b>	<b>Flächenanteil ohne Anpassung (<math>SA_{Hypo} = 0</math>)</b>	<b>Flächenanteil bei <math>SA_{Hypo} = 0,75</math></b>	<b>Vielfachheits-spezifisches <math>SA_{Hypo}</math></b>	<b>Flächenanteil bei spezifischem <math>SA_{Hypo}</math></b>
1	0,7361	0,9131	0,89	0,9528
2	0,7010	0,9029	0,64	0,8724
3	0,7208	0,8462	0,76	0,8480

**Tabelle 3.49:** Anteil der Fläche, die von ROC-Kurve und Diagonale eingeschlossen wird.

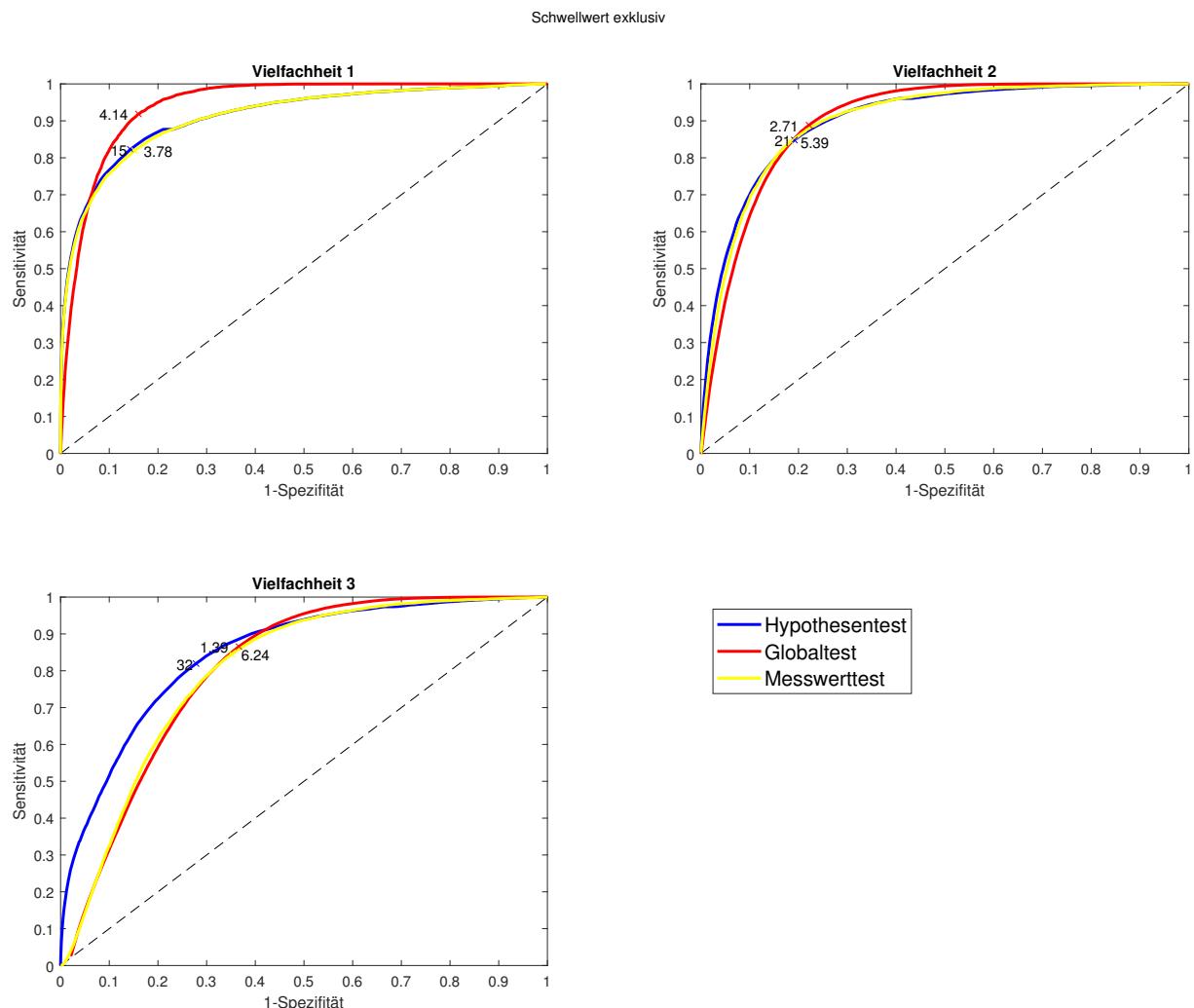
Der Test liefert also eine hohe Aussagekraft, die durch die Schwellwertanpassung deutlich verbessert wird.

Der Rechenaufwand zur Bestimmung der Prüfgröße liegt beim Hypothesentest bei drei Matrixmultiplikationen pro getesteter Hypothese und ist damit vergleichsweise hoch.

Wie der Messwerttest liefert auch der Hypothesentest bei geringen Redundanzen noch Werte. Für die bekannten Fällen, von Kombinationen der beiden in Reihe geschalteten Anlagen 1 und 6, mit je einem vollständigen Zweig, können keine Prüfgrößen und Wahrscheinlichkeiten mehr berechnet werden.

### 3.3.6 Vergleich

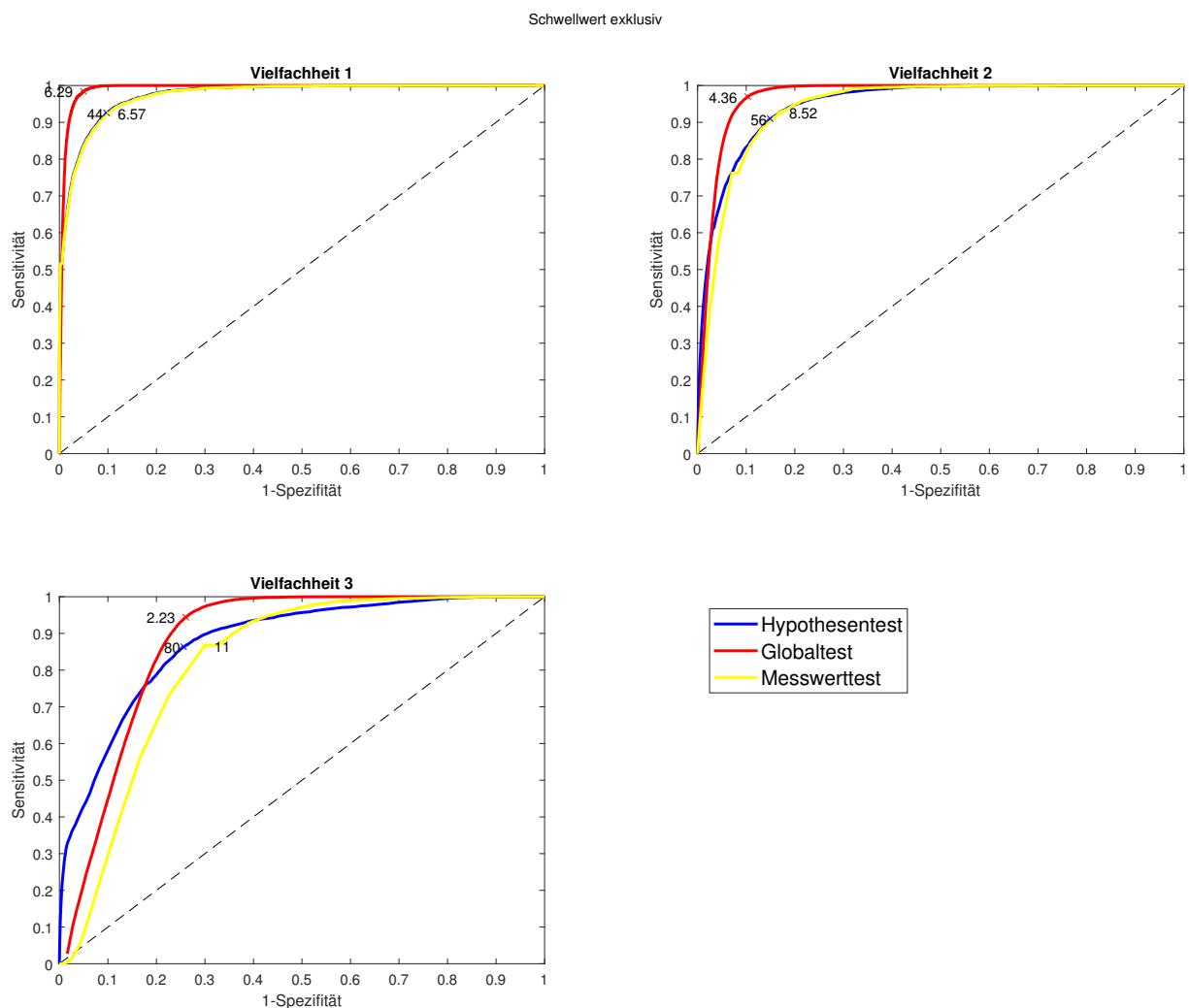
Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit werden die ROC-Kurven für alle drei Detektionsmethoden in gemeinsamen Plots (Abb. 3.7) dargestellt. Der Globaltest ist im Rahmen des vorgestellten Verfahrens den anderen Testarten leicht überlegen. An zweiter Stelle kommt der Messwerttest, der den geringsten Rechenaufwand aufweist. Der Hypothesentest ist allerdings auch bei Systemen mit geringeren Redundanzen und für mehr Manipulationskombinationen einsetzbar. Diese Bewertung ist unabhängig davon, ob geringere Manipulationen



**Abbildung 3.7:** ROC-Kurven der drei betrachtete Detektionsmethoden für Manipulationen mit  $3\sigma$  zum Vergleich der Leistungsfähigkeit.

als die  $3\sigma$  in diesem Beispiel toleriert werden können, oder ob größere Abweichungen möglich sind. Ein Beispiel mit Manipulationen mit Betrag von  $5\sigma$  ist in Abbildung 3.8 zu sehen.

Bei ausreichenden Ressourcen wäre auch ein Einsatz von zwei oder aller drei Detektionsmethoden denkbar, um uneindeutige Detektionsergebnisse abzusichern.



**Abbildung 3.8:** ROC-Kurven der drei betrachtete Detektionsmethoden für Manipulationen mit  $5\sigma$  zum Vergleich der Leistungsfähigkeit.

### 3.4 Dynamisches Beispiel

Für die Konstruktion des dynamischen Beispieldesystems wird für den verzweigten Kühlkreislauf eine Messgröße angenommen, die anders als die Durchflussmenge keine Erhaltungsgröße darstellt, sondern eine Trägheit und damit eine verzögerte Anpassung des Wertes erfährt. Eine solche Messgröße könnte beispielsweise die Wärmemenge sein. Die Eingangsgröße ist Größe 1, deren Ableitung nicht in der Systemgleichung auftritt.

Genutzt wird eine klassische dynamische Systemgleichung des Schemas

$$\frac{dx}{dt} = \mathbf{A} \cdot x + \mathbf{B} \cdot u \quad (3.13)$$

wobei  $u$  nur Größe 1 enthält, die damit nicht als Ableitung auftritt und  $x$  die Größen 2 bis 6. Die die Trägheit beschreibenden Zeitkonstanten

$$\begin{aligned}T_1 &= 1 \\T_2 &= 2 \\T_3 &= 3 \\T_4 &= 4 \\T_5 &= 5\end{aligned}$$

werden in die Systemmatrizen eingesetzt

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_2 & 0 & 0 & 0 \\ 1/T_3 & 0 & -1/T_3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/T_4 & 0 & -1/T_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1/T_5 & 1/T_5 & -1/T_5 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0,25/T_1 \\ 0,75/T_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Aus dieser kontinuierlichen Darstellung kann die zeitdiskrete Darstellung mit der Systemgleichung  $x(k+1) = A_d \cdot x(k) + B_d \cdot u(k)$  bestimmt werden, wobei ein Halteglied 0. Ordnung angenommen wird.

$$A_d = \begin{bmatrix} 0,9048 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9512 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0312 & 0 & 0,9672 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0241 & 0 & 0,9753 & 0 \\ 3,17 \text{ e-}4 & 2,42 \text{ e-}4 & 0,0195 & 0,0196 & 0,9802 \end{bmatrix} \quad B_d = \begin{bmatrix} 0,0238 \\ 0,0366 \\ 3,99 \text{ e-}4 \\ 4,57 \text{ e-}4 \\ 5,73 \text{ e-}6 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Für die Optimierung wird wieder die Darstellung  $\mathcal{A} \cdot y = 0$  ermittelt. Im einfachsten Fall, der Berücksichtigung zweier Zeitpunkte, nimmt  $\mathcal{A}$  die Form an:

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d & -\mathbb{I} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\text{mit } y = \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \\ x(k+1) \\ u(k+1) \end{bmatrix}$$

Für mehrere Zeitpunkte setzt sich die Matrix  $\mathcal{A}$  fort:

$$\text{mit } y = \begin{bmatrix} x(k) & u(k) & x(k+1) & u(k+1) & x(k+2) & u(k+2) & \dots \end{bmatrix}^T$$

### 3.4.1 Aufstellen des Vorwissens

Als Vorwissen werden im dynamischen Beispiel wieder die Eigenschaften und Gemeinsamkeiten angenommen, die in Abschnitt 3.3.1 für den statischen Fall eingeführt wurden. Erhöhte Exposition wird also für die Größen 1, 3 und 6 angenommen und Gemeinsamkeiten für die Kombinationen [1,5], [4,6], [2,3], [1,2,3], [3,4,5], [2,4,6] und [3,5,6]. Der Vorwissen-Skalierungsfaktor  $I_i$  wird für alle Eigenschaften mit 1 festgelegt, um den Effekt der Schwellwertanpassung sichtbar zu machen.

### 3.4.2 Data Reconciliation

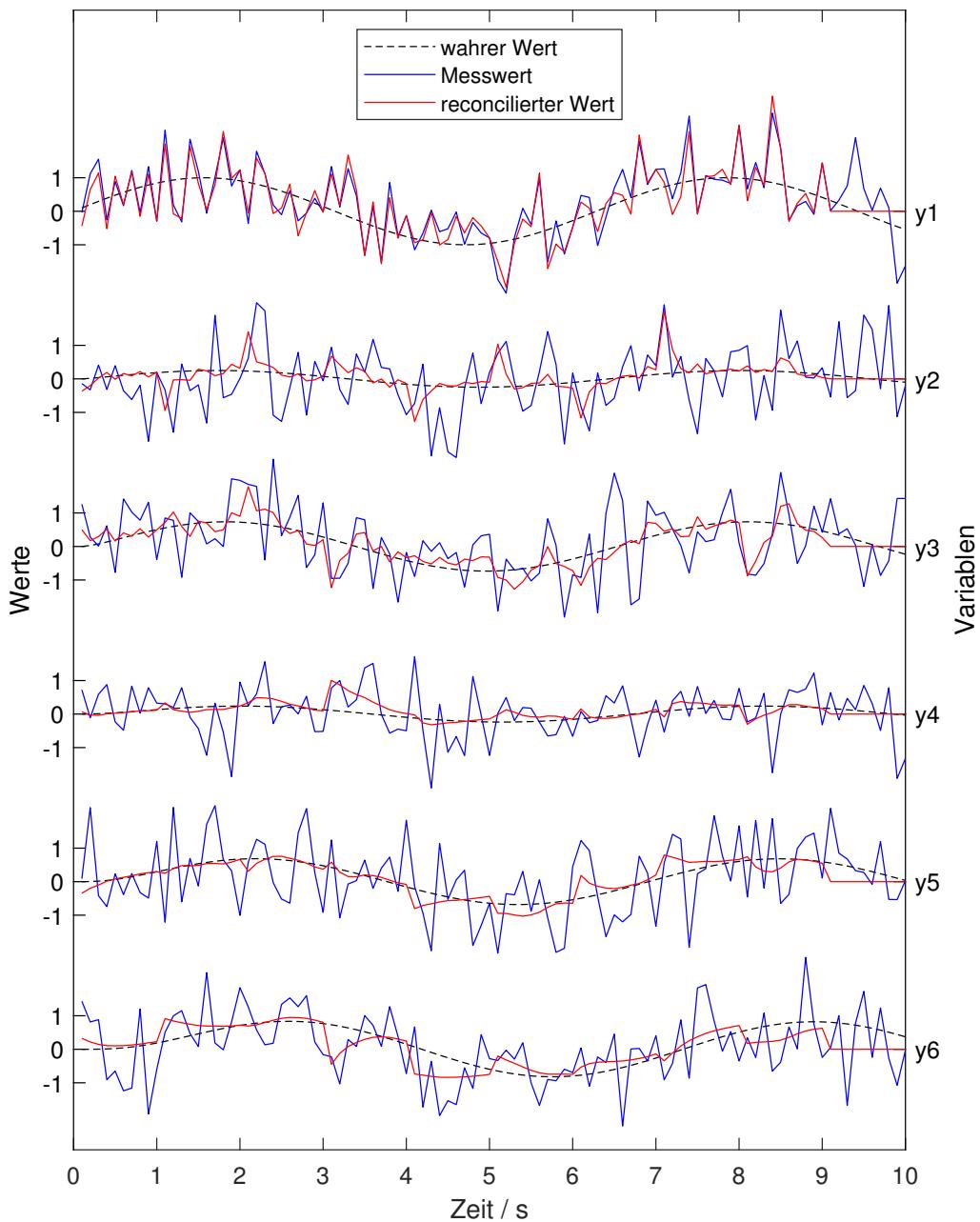
Wie im statischen Beispiel in Abschnitt 3.3.2, werden zur Demonstration der dynamischen Manipulationsdetektion fünf Beispiele dargestellt. Für eine Vergleichbarkeit mit dem statischen Fall wird der Betrag der Manipulation angepasst. Dadurch, dass anstelle einzelner Datenpunkte ein Zeitraum mit 100 Datenpunkten betrachtet wird, können bereits deutlich kleinere Manipulationen detektiert werden. Auch im statischen Fall wäre diese Verbesserung der Detektion durch eine Mittlung über 100 Zeitpunkte möglich, sofern der Zustand konstant bleibt. Einem Fehler von  $3\sigma$  im einfachen statischen Fall entspricht im dynamischen Fall bzw. im Fall der Mittlung über 100 Zeitpunkte statistisch einem Fehler von  $3\sigma/\sqrt{100} = 0,3\sigma$  für Prüfgrößen, die eine lineare Abhängigkeit von der Manipulation aufweisen und  $3\sigma/\sqrt{10} = 0,95\sigma$  bei einer quadratischen Abhängigkeit. Die Abhängigkeit ist beim Messwerttest linear und bei Globaltest und Hypothesentest quadratisch. Weil die zeitlich aufeinander folgenden Messwerte außerdem nicht unabhängig von einander sind, ist tatsächlich eine Manipulation von  $4\sigma/\sqrt{100} = 0,4\sigma$  bzw.  $4\sigma/\sqrt{10} = 1,26\sigma$  mit dem statischen Fall vergleichbar. Um für alle Detektionsmethoden die gleiche Manipulation zu zeigen, wird für die Beispiele die Manipulationshöhe von  $4\sigma/\sqrt{10} = 1,26\sigma$  gewählt. Es werden also folgende Beispiele dargestellt:

- Beispiel unmanipuliert: System mit statistischen Fehlern, ohne Manipulation
- Manipulationsbeispiel 1: Größe 1 um  $+1,26\sigma$
- Manipulationsbeispiel 2: Größen 1 und 5 jeweils um  $+1,26\sigma$
- Manipulationsbeispiel 3: Größe 1 um  $+1,26\sigma$ , Größe 5 um  $-1,26\sigma$
- Manipulationsbeispiel 4: unerwartete Manipulation: Größe 2 um  $+2,52\sigma$

Die normalverteilten statistischen Fehler werden wieder mit einer Streuung von  $\sigma = 1$  simuliert. Die Aufmodellierung der statistischen Fehler ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

### Beispiel Unmanipuliert

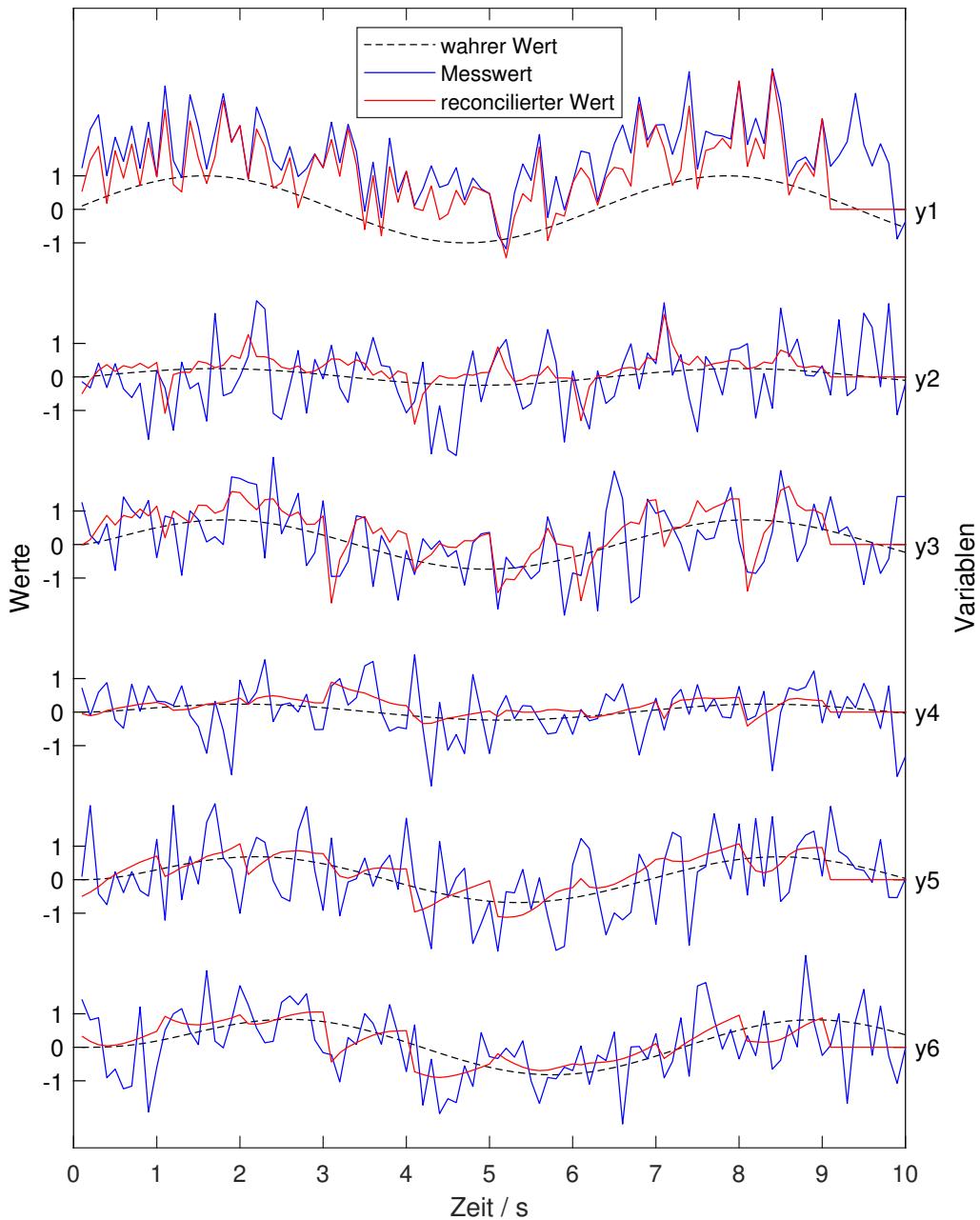
Die Messwerte und die reconcilierten Werte für das unmanipulierte Beispiel sind in Abbildung 3.9 dargestellt.



**Abbildung 3.9:** Simulationswerte für das lineare dynamische Beispielsystem aus Abschnitt 2.1.2 ohne Manipulation. Schwarz gestrichelt sind die ungestörten wahren Werte dargestellt, in blau sind statistische Fehler mit der Standardabweichung von 1 addiert und in rot sind die reconcilierten Werte der mit statistischen Fehlern behafteten Messwerte zu sehen.

### Manipulationsbeispiel 1

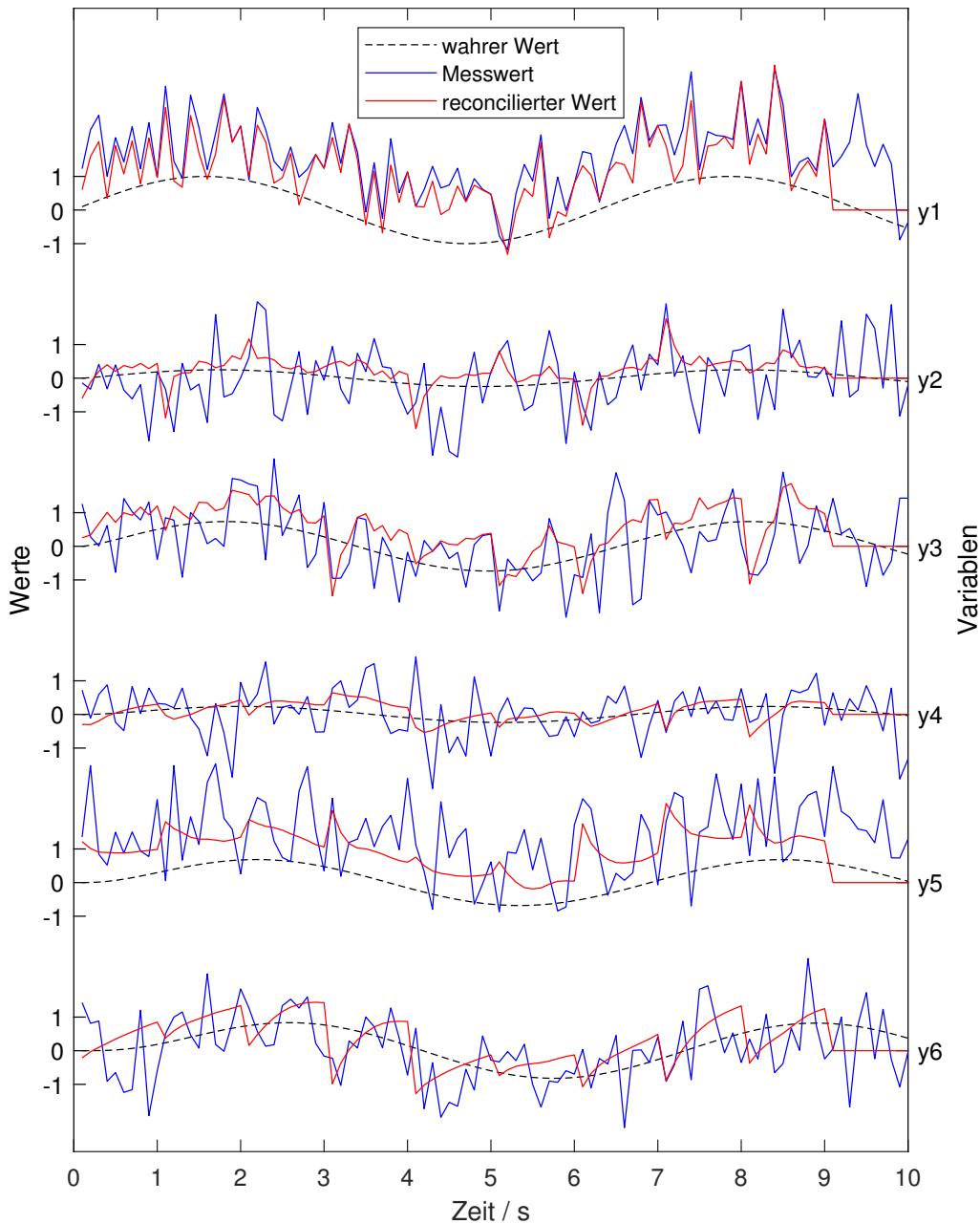
Bei Manipulationsbeispiel 1 wird Größe 1 mit einem Offset von  $+1,26\sigma$  manipuliert. Die Werte sind in Abbildung 3.10 gezeigt.



**Abbildung 3.10:** Simulationswerte für das lineare dynamische Beispielsystem aus Abschnitt 2.1.2 mit Manipulation in Größe  $y_1$ . Schwarz gestrichelt sind die ungestörten wahren Werte dargestellt, in blau sind die simulierten Messwerte mit statistischen Fehler mit Standardabweichung von 1 und der Manipulation von Größe  $y_1$  um  $+1,26\sigma$  und in rot sind die reconcilierten Werte der Messwerte zu sehen.

## Manipulationsbeispiel 2

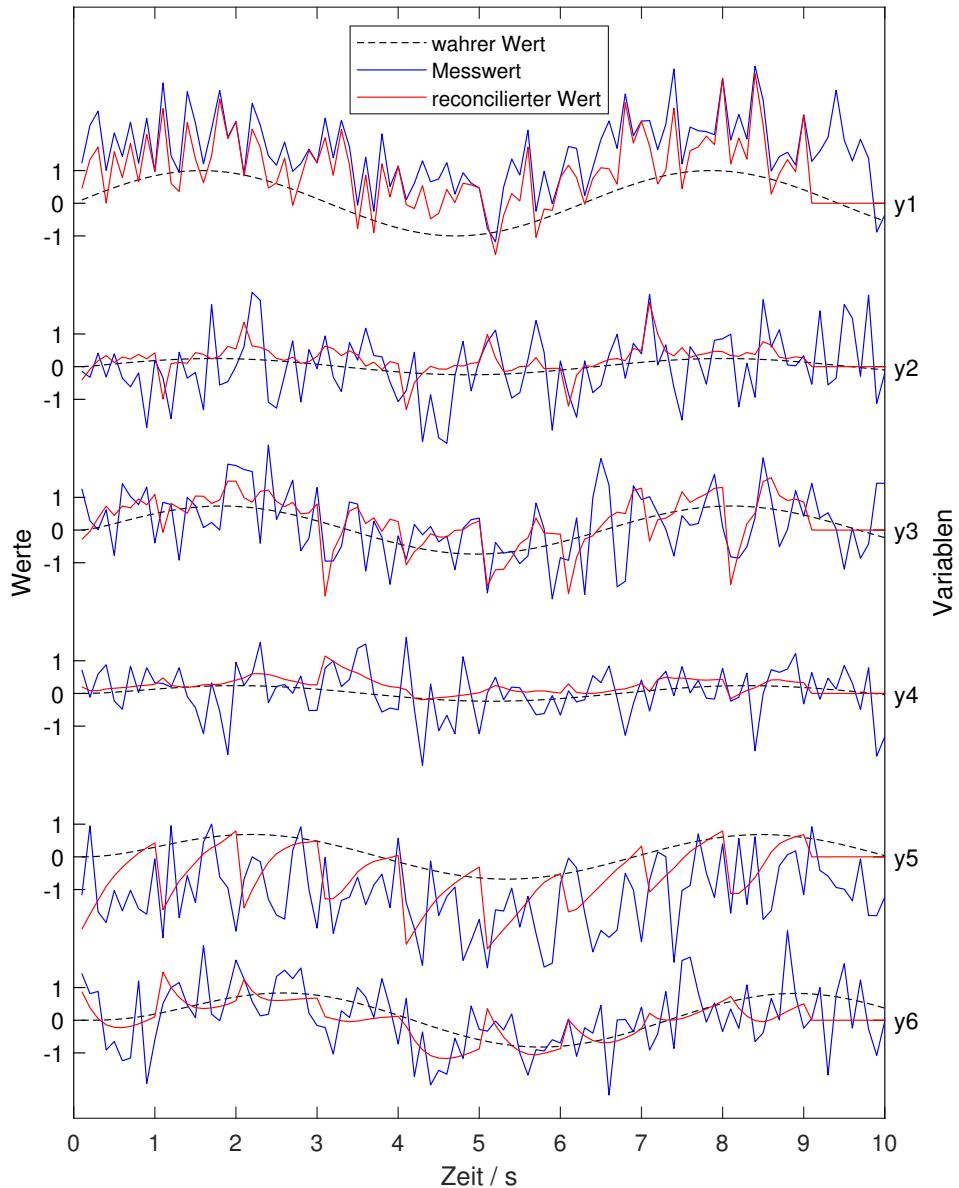
Für Manipulationsbeispiel 2 wurde zusätzlich zu Größe 1 auch Größe 5 mit  $+1,26\sigma$  manipuliert. Den Verlauf der Werte zeigt Abbildung 3.11.



**Abbildung 3.11:** Simulationswerte für das lineare dynamische Beispielsystem aus Abschnitt 2.1.2 mit Manipulationen in Größen  $y_1$  und  $y_5$ . Schwarz gestrichelt sind die ungestörten wahren Werte dargestellt, in blau sind die simulierten Messwerte mit statistischen Fehlern mit Standardabweichung von 1 und der Manipulation von Größen  $y_1$  und  $y_5$  um  $+1,26\sigma$  und in rot sind die reconcilierten Werte der Messwerte zu sehen.

### Manipulationsbeispiel 3

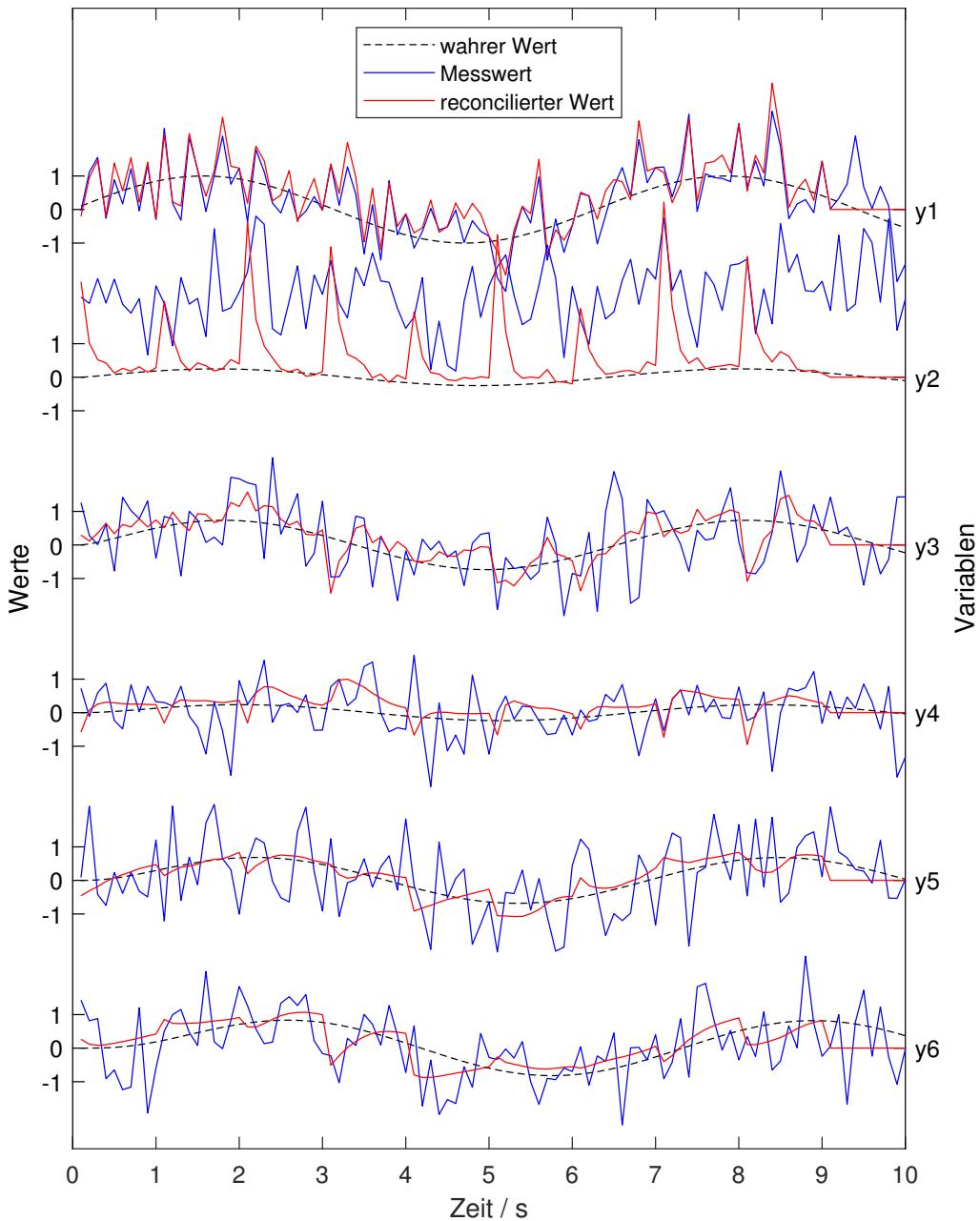
Manipulationsbeispiel 3 zeigt die Manipulation mit entgegengesetzten Vorzeichen, Größe 1 wurde wieder mit  $+1,26\sigma$  manipuliert, Größe 5 stattdessen mit  $-1,26\sigma$ . In Abbildung 3.12 sind die Werte dargestellt.



**Abbildung 3.12:** Simulationswerte für das lineare dynamische Beispielsystem aus Abschnitt 2.1.2 mit Manipulationen in Größen y1 und y5. Schwarz gestrichelt sind die ungestörten wahren Werte dargestellt, in blau sind die simulierten Messwerte mit statistischen Fehler mit Standardabweichung von 1 und der Manipulation von Größe y1 um  $+1,26\sigma$  und Größe y5 um  $-1,26\sigma$ . In rot sind die reconcilierten Werte der Messwerte zu sehen.

### Manipulationsbeispiel 4

Manipulationsbeispiel 4 ist die Manipulation von Größe 2, deren Manipulation nicht zu den erwarteten Fällen gehört, um  $+2,52\sigma$ . Abbildung 3.13 zeigt die Werte.



**Abbildung 3.13:** Simulationswerte für das lineare dynamische Beispielsystem aus Abschnitt 2.1.2 mit der unerwarteten Manipulation in Größe  $y_2$ . Schwarz gestrichelt sind die ungestörten wahren Werte dargestellt, in blau sind die simulierten Messwerte mit statistischen Fehlern mit Standardabweichung von 1 und der Manipulation von Größe  $y_2$  um  $+2,52\sigma$ . In rot sind die reconcilierten Werte der Messwerte zu sehen.

## Normierung

Aufgrund der unterschiedlich starken Kopplung der Variablen an das System, werden die Prüfgrößen bei Messwert- und Hypothesentest für jeden einzelnen Fall normiert. Dazu werden die Prüfgrößen verwendet, die für alle Größen und Kombinationen unter der Bedingung berechnet wurden, dass sie in einem System ohne statistische Fehler jeweils um  $1\sigma$  manipuliert wurden. Da sich beim Globaltest die Prüfgröße auf die Frage bezieht, ob in dem verbleibenden System noch Manipulationen enthalten sind, ist eine Normierung für diesen Test nicht sinnvoll. Die in den folgenden Beispielen bestimmten Schwellwerte wurden nach der Normierung bestimmt und die angegebenen Prüfgrößen sind bereits normiert. Für die Einzelgrößen sind die Normierungswerte in Tabelle 3.50 zusammengefasst. Die Normierungswerte für die Kombinationen sind im Anhang in Tabelle A.47 für den Messwerttest und in Tabelle A.48 für den Hypothesentest dargestellt. Für den Globaltest nehmen die Prüfgrößen für die Detektion der tatsächlich manipulierten Werte 0 an, wie hier für die Einzelgrößen dargestellt. Zur Normierung wird dieser Wert nicht verwendet.

Größe Nr.	Prüfgröße		
	Messwerttest	Globaltest	Hypothesentest
1	0,9792	0	0,0641
2	0,7228	0	0,3028
3	0,5025	0	0,1069
4	0,4145	0	0,0567
5	0,3205	0	0,0392
6	0,1265	0	0,0156

**Tabelle 3.50:** Prüfgrößen für die Simulation einer Manipulation mit  $1\sigma$  ohne statistische Fehler. Normierungswerte für Messwerttest und Hypothesentest.

### 3.4.3 Messwerttest

#### Schwellwertanpassung

Für die Bestimmung der Schwellwertanpassung über die ROC-Kurve muss berücksichtigt werden, dass im dynamischen Beispiel die Prüfgrößen aus Werten von 100 Zeitpunkten berechnet werden. Wie in Abschnitt 3.2.4 berechnet, entspricht die Forderung einer Richtig-Positiv-Rate von 97% für einen Zeitpunkt der Forderung einer Richtig-Positiv-Rate von 99,7% für die betrachteten 100 Zeitpunkte. Auch wenn die Forderung an die Richtig-Positiv-Rate abhängig vom System frei gewählt werden kann, wird hier für die Vergleichbarkeit der Wert von 99,7% genutzt. Der Schwellwert, der zu einem Schnittpunkt zwischen der ROC-Kurve ohne Schwellwertanpassung und einer waagerechten Linie bei der Sensitivität von 99,7% gehört, liegt bei  $SW_{99,7\%\_1\_MT} = 0,68$  für Vielfachheit 1, bei  $SW_{99,7\%\_2\_MT} = 1,01$  für Vielfachheit 2 und  $SW_{99,7\%\_3\_MT} = 1,12$  für Vielfachheit 3. Als optimale Schwellwerte auf der

Kurve ohne Schwellwertanpassung ergibt sich  $SW_{\text{ohne\_1\_MT}} = 0,96$ ,  $SW_{\text{ohne\_2\_MT}} = 1,19$  sowie  $SW_{\text{ohne\_3\_MT}} = 1,33$ . Über Gleichung 3.7 werden daraus die Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_MT} = 0,29$ ,  $SA_{2\_MT} = 0,15$  und  $SA_{3\_MT} = 0,16$  berechnet.

Die Schwellwertanpassung aus dem Störverhältnis  $SA_{\text{MT}}$  wird über Gleichung 3.11 berechnet. Dazu wird der maximale Wert der Prüfgrößen unter den erwarteten Manipulationen mit  $1\sigma$  und der minimale Wert der Prüfgrößen unter den unerwarteten Manipulationen mit  $2\sigma$  ermittelt. Durch die Normierung der Prüfgrößen auf die Prüfgrößen bei einer Manipulation um  $1\sigma$ , liegen die normierten Prüfgrößen für Manipulationen von  $1\sigma$  bei 1 und beim linearen System für Manipulationen von  $2\sigma$  bei 2. Für eine Verdoppelung der Auslenkung der Manipulation ergibt sich immer auch eine Verdopplung der Prüfgröße. Die maximale Schwellwertanpassung liegt daher beim Messwerttest immer bei  $SA_{\text{MT}} = 0,50$ .

### Schwellwerte

Die Schwellwerte werden in der ROC-Kurve Abb. 3.14 über den optimalen Schwellwert, mit dem größten Abstand zur Diagonale, bestimmt. Die Beschriftung zeigt die allgemeinen Schwellwerte, die für erwartete Manipulationen gemäß Gleichung 3.5 angepasst werden.

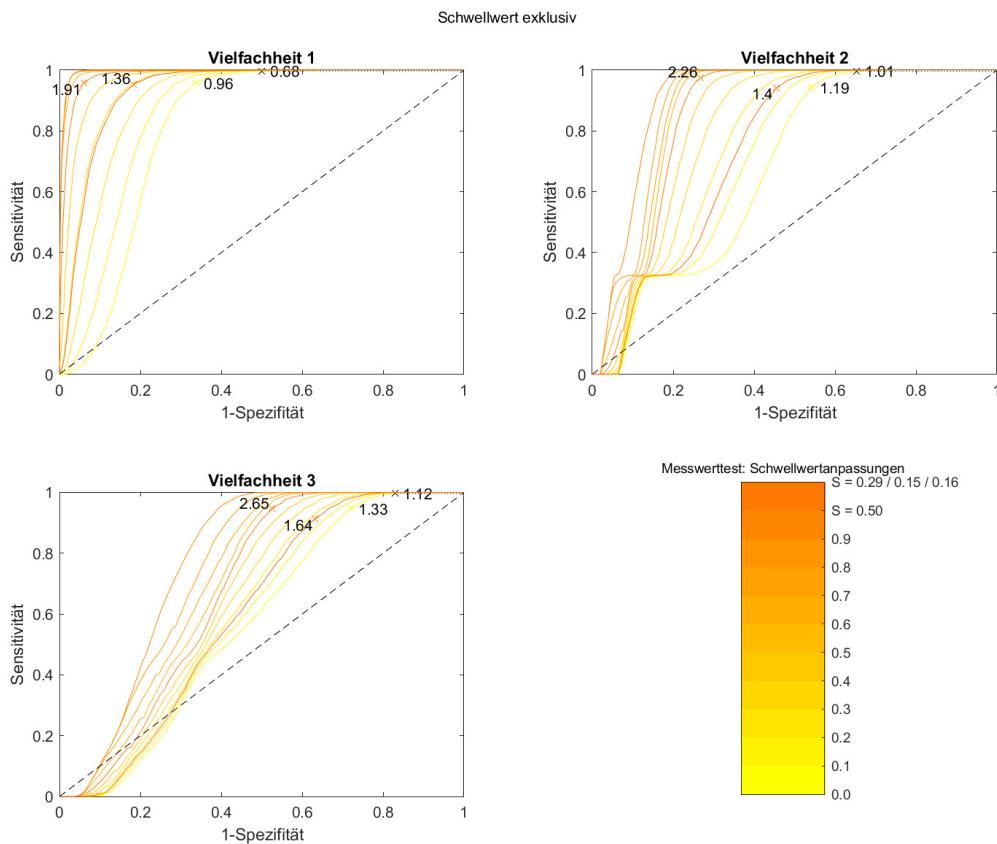
Die ROC-Kurven Abb. 3.2 dokumentieren eine deutliche Aussagekraft des Messwerttests und die Verbesserung durch die Nutzung der Zusatzinformationen.

Die bestimmten Schwellwerte sind in der ROC-Kurve beschriftet und in Tabelle 3.51 zusammengefasst. Abhängig von der Vielfachheit (erste Spalte) werden in der zweiten Spalte die Schwellwerte ohne Schwellwertanpassung angegeben, um den Vergleich mit der klassischen Detektionsmethode zu ermöglichen. In der dritten Spalte stehen die Schwellwerte für die über das Störverhältnis bestimmte Schwellwertanpassung. In der vierten Spalte sind die Schwellwerte für die Schwellwertanpassung, die über die Richtig-Positiv-Rate bestimmt wurde, dargestellt. Für beide Methoden wird der allgemeine Schwellwert  $SW_{0\_k\_MT}$  und der angepasste Schwellwert, der für die erwarteten Manipulationen gültig ist, aufgeführt. Als tatsächlich manipuliert, also richtig-positiv oder falsch-negativ, betrachtet werden hier nur die vollständigen manipulierten Kombinationen, nicht jedoch Untermengen davon.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{\text{MT}} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{\text{MT}} = 0,5$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_MT}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_MT}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	0,96	1,91	0,29	1,36
2	1,19	2,26	0,15	1,40
3	1,33	2,65	0,16	1,64

**Tabelle 3.51:** Schwellwerte für Detektion über den Messwerttest.

Zur Vorauswahl der Kombinationen, die mit weiteren Größen kombiniert auf Manipulationen der nächst höheren Vielfachheit untersucht werden sollen, werden ROC-Kurven

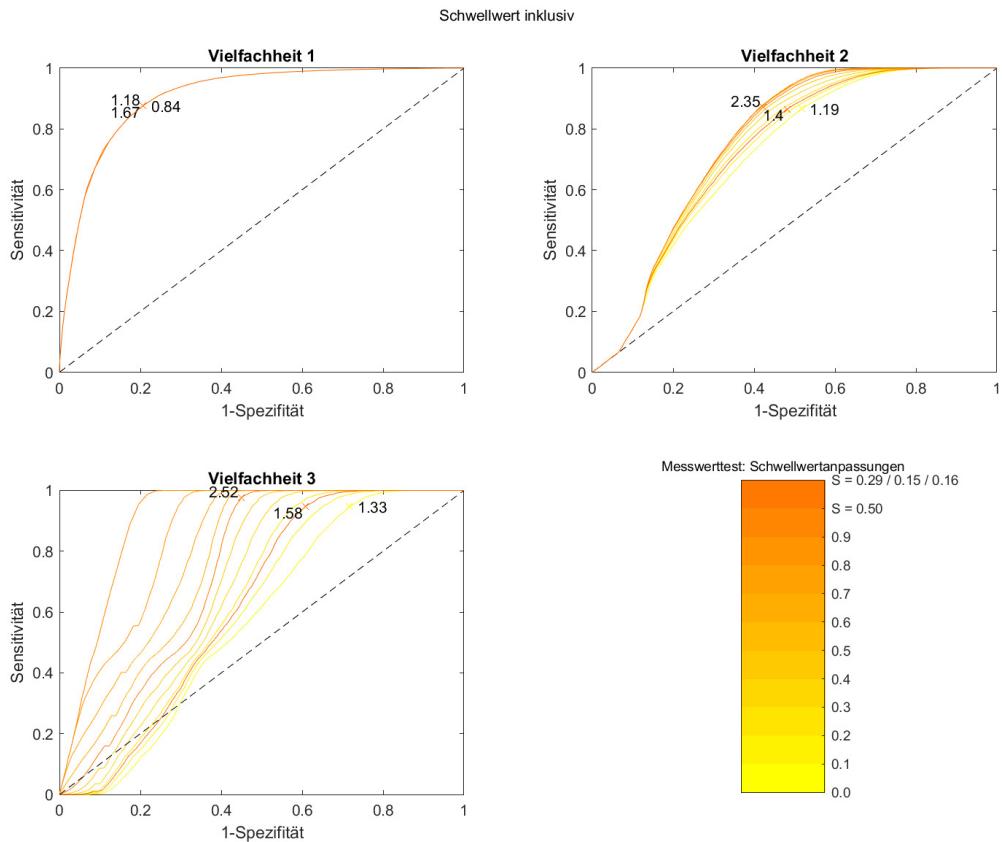


**Abbildung 3.14:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Messwerttest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert werden jeweils nur die Kombinationen betrachtet, die alle manipulierten Größen und ausschließlich diese enthalten. Die optimalen Schwellwerte bei den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{MT} = 0,29$ ,  $SA_{MT} = 0,15$  bzw.  $SA_{MT} = 0,16$  und der Schwellwertanpassung  $SA_{MT} = 0,50$  für alle Vielfachheiten sowie auf den Kurven ohne Anpassung sind markiert und beschriftet.

(Abb. 3.15) verwendet, bei denen jede Untermenge einer manipulierten Kombination als tatsächlich manipuliert, also als richtig-positiv oder falsch-negativ gewertet wird.

Die Anpassung der Schwellwerte erfolgt für alle Untermengen der erwarteten Kombinationen. Unter den Einzelgrößen gilt daher für alle der reduzierte Grenzwert, wodurch die Kurven mit den Verschiebungen übereinander liegen. Die ermittelten Schwellwerte sind in Tabelle 3.52 zusammengefasst.

Im folgenden Beispiel wird eine Schwellwertanpassung von  $SA_{MT} = 0,50$  genutzt.



**Abbildung 3.15:** ROC-Kurve für die Identifikation von Kandidaten für Manipulationen mit höherer Vielfachheit mit dem Messwerttest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als 'manipuliert' werden alle Untermengen der tatsächlich manipulierten Kombinationen betrachtet. Der optimale Schwellwert ist ohne Schwellwertanpassung und mit den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen markiert und beschriftet.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{MT} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{MT} = 0,5$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_MT}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_MT}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	0,84	1,67	0,84	0,29 1,18 0,84
2	1,19	2,35	1,18	0,15 1,40 1,19
3	1,33	2,52	1,26	0,16 1,58 1,33

**Tabelle 3.52:** Schwellwerte für Vorauswahl von Kombinationen zur Detektion von Kombinationen höherer Vielfachheit mit Hilfe des Messwerttests.

### Beispiel Unmanipuliert

Die Detektion beim Messwerttest erfolgt sequentiell. Zunächst werden Prüfgrößen für einzelne Größen berechnet und in Tabelle 3.53 über den Schwellwert ausgewertet.

In Tabelle 3.53 wird keine Größe als fehlerbehaftet detektiert. Für Größe 6 wird der Schwellwert überschritten, der auf Mehrfachfehler hinweist. In Tabelle 3.54 werden daher alle Kom-

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8422	0,9238	0,2188	-1,6912	-0,7362
2	0,3820	0,9153	0,2679	-1,6421	-1,6421
3	0,3374	0,9291	0,3323	-1,5777	-0,6227
4	0,3543	0,9779	0,3131	-1,5969	-1,5969
5	0,3304	0,8840	0,2680	-1,6420	-1,6420
6	0,2220	0,7547	0,8510	-1,0590	-0,1040

**Tabelle 3.53:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,91 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,96 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

binationen mit Größe 6 untersucht. Dort finden sich keine Detektionen und keine Hinweise auf Manipulationen mit höherer Vielfachheit.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
6 1	0,9144	0,9559	0,2156	-2,0444	-2,0444
6 2	0,3952	0,9063	0,2838	-1,9762	-1,9762
6 3	0,3496	0,9214	0,3238	-1,9362	-1,9362
6 4	0,3813	0,9850	0,3112	-1,9488	-0,8188
6 5	0,3114	0,8483	0,5643	-1,6957	-1,6957

**Tabelle 3.54:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,26 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,13 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Der Messwerttest erkennt das Beispiel damit richtig als unmanipuliert.

### Manipulationsbeispiel 1

Für das erste Beispiel mit einer Manipulation von Größe 1 um  $1,26\sigma$ , werden die Prüfgrößen für die Einzelgrößen in Tabelle 3.55 ausgewertet.

Tabelle 3.55 zeigt die Detektion einer Manipulation in Größe 1. Für Größen 1 und 6 wird außerdem der Schwellwert für die Detektion von Manipulationen mit höherer Vielfachheit überschritten. In Tabelle 3.56 sind die Kombinationen mit Größen 1 und 6 der Vielfachheit 2 dargestellt.

In Tabelle 3.56 findet sich keine weitere Detektion und kein Hinweis auf eine Manipulation höherer Vielfachheit.

Ohne die Schwellwertanpassung gelten die Schwellwerte von  $SW_{\text{ohne\_1\_MT}} = 0,96$ ,  $SW_{\text{ohne\_2\_MT}} = 1,19$  und  $SW_{\text{ohne\_3\_MT}} = 1,33$ . Für die klassische Detektion ergibt damit sich

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,2806	0,4297	1,4508	-0,4592	0,4958
2	0,3481	0,8904	0,3645	-1,5455	-1,5455
3	0,3331	0,8687	0,5060	-1,4040	-0,4490
4	0,3518	0,9745	0,3715	-1,5385	-1,5385
5	0,3055	0,8590	0,2891	-1,6209	-1,6209
6	0,2222	0,7510	0,8659	-1,0441	-0,0891

**Tabelle 3.55:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,91 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,96 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,4039	0,8601	0,2538	-2,0062	-2,0062
1 3	0,5882	0,8464	0,5477	-1,7123	-1,7123
1 4	0,3606	0,9633	0,3039	-1,9561	-1,9561
1 5	0,3423	0,8821	0,3017	-1,9583	-0,8283
1 6	0,2283	0,7225	0,8745	-1,3855	-1,3855
6 1	0,3407	0,4589	1,4423	-0,8177	-0,8177
6 2	0,3707	0,8808	0,3855	-1,8745	-1,8745
6 3	0,3349	0,8603	0,5146	-1,7454	-1,7454
6 4	0,3830	0,9866	0,4055	-1,8545	-0,7245
6 5	0,2867	0,7998	0,7736	-1,4864	-1,4864

**Tabelle 3.56:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,26 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,13 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

eine weitere Detektion bei [6,1]. Aufgrund der höheren Differenz zum Schwellwert würde die abschließende Auswahl auch hier eine Manipulation in Größe 1 ergeben.

Mit dem Messwerttest wird die Manipulation in Größe 1 also richtig detektiert.

## Manipulationsbeispiel 2

Für das zweite Manipulationsbeispiel wurden Größen 1 und 5 um  $+1,26\sigma$  manipuliert. Die Auswertung zu einer Manipulation von Einzelgrößen ist in Tabelle 3.57 dargestellt.

Unter den Einzelgrößen in Tabelle 3.57 finden sich Detektionen in Größen 1 und 6. Der Schwellwert, dessen Überschreitung auf eine Manipulation höherer Vielfachheit hinweist, wird überschritten von den Größen 1, 3, 5 und 6. Kombinationen der Vielfachheit 2 mit diesen Größen werden in Tabelle 3.58 untersucht.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 finden sich Detektionen für die Kombinationen

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,4110	0,5756	1,1339	-0,7761	0,1789
2	0,3312	0,8768	0,3595	-1,5505	-1,5505
3	0,3386	0,8855	0,8050	-1,1050	-0,1500
4	0,3333	0,9433	0,3093	-1,6007	-1,6007
5	0,3571	0,8899	1,0693	-0,8407	-0,8407
6	0,1803	0,6125	1,1623	-0,7477	0,2073

**Tabelle 3.57:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,91 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,96 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,3904	0,8490	0,2677	-1,9923	-1,9923
1 3	0,6780	0,9345	0,6237	-1,6363	-1,6363
1 4	0,3421	0,9346	0,3488	-1,9112	-1,9112
1 5	0,3454	0,8727	1,3115	-0,9485	0,1815
1 6	0,1851	0,5923	1,1255	-1,1345	-1,1345
3 1	1,1856	0,7890	1,3254	-0,9346	-0,9346
3 2	0,3194	0,8400	0,4191	-1,8409	-0,7109
3 4	0,3357	0,9291	0,2970	-1,9630	-1,9630
3 5	0,3293	0,8205	1,0841	-1,1759	-1,1759
3 6	0,1896	0,6022	1,3989	-0,8611	-0,8611
5 1	0,4478	0,5718	1,4100	-0,8500	0,2800
5 2	0,3642	0,8764	0,4039	-1,8561	-1,8561
5 3	0,3388	0,8698	0,8234	-1,4366	-1,4366
5 4	0,3829	0,9860	0,4259	-1,8341	-1,8341
5 6	0,3336	0,8261	1,2961	-0,9639	-0,9639
6 1	0,5242	0,6595	1,0479	-1,2121	-1,2121
6 2	0,3645	0,8740	0,4222	-1,8378	-1,8378
6 3	0,3415	0,8809	0,9577	-1,3023	-1,3023
6 4	0,3827	0,9860	0,4358	-1,8242	-0,6942
6 5	0,3304	0,8823	0,7758	-1,4842	-1,4842

**Tabelle 3.58:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,26 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,13 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

[1,5] und [5,1]. Zusätzlich zu diesen detektierten Kombinationen erfüllen auch die Kombinationen [3,1], [3,6] und [5,6] die Bedingung für die Suche nach Manipulationen höherer Vielfachheit. In Tabelle 3.59 werden daher die vorausgewählten Kombinationen der Vielfachheit 3 untersucht. Ohne Schwellwertanpassung finden sich Detektionen in [1,5], [3,1], [3,6], [5,1] und [5,6], wobei zusätzlich die Differenz zum Schwellwert für Kombinationen [1,5] bzw. [5,1] geringer ausfällt. Auch wenn hier die tatsächlich manipulierte Kombination ausgewählt werden würde, ist die Detektion ohne Schwellwertanpassung deutlich weniger eindeutig.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 3 2	0,7525	0,6246	0,2485	-2,4015	-1,0765
1 3 4	0,3403	0,8891	0,4287	-2,2213	-2,2213
1 3 5	0,3760	0,8305	1,2864	-1,3636	-1,3636
1 3 6	0,1865	0,5416	1,3119	-1,3381	-1,3381
1 5 2	0,4087	0,8330	0,2902	-2,3598	-2,3598
1 5 3	0,6996	0,8711	0,7065	-1,9435	-1,9435
1 5 4	0,3851	0,9698	0,3019	-2,3481	-2,3481
1 5 6	0,3475	0,8191	1,3546	-1,2954	-1,2954
3 6 1	1,4689	0,8518	1,2018	-1,4482	-1,4482
3 6 2	0,3538	0,8354	0,4862	-2,1638	-2,1638
3 6 4	0,3817	0,9689	0,4828	-2,1672	-2,1672
<b>3 6 5</b>	<b>0,3288</b>	<b>0,8074</b>	<b>1,4975</b>	<b>-1,1525</b>	<b>0,1725</b>
4 6 1	0,5256	0,5958	0,9995	-1,6505	-1,6505
4 6 2	0,3808	0,8496	0,4885	-2,1615	-0,8365
4 6 3	0,3411	0,8528	0,9848	-1,6652	-1,6652
4 6 5	0,3304	0,8599	0,7607	-1,8893	-1,8893
5 6 1	0,4794	0,5370	1,4175	-1,2325	-1,2325
5 6 2	0,3652	0,8513	0,4064	-2,2436	-2,2436
5 6 3	0,3392	0,8435	0,8649	-1,7851	-0,4601
5 6 4	0,3827	0,9711	0,4225	-2,2275	-2,2275

**Tabelle 3.59:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,65 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 2,65 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,33 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Unter den Dreifachkombinationen findet sich eine weitere Detektion in Kombination [3,6,5]. In Tabelle 3.60 werden die Größen und Kombinationen zusammengefasst, die eine Detektion liefern.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,4110	0,5756	1,1339	-0,7761	0,1789
6	0,1803	0,6125	1,1623	-0,7477	0,2073
1 5	0,3454	0,8727	1,3115	-0,9485	0,1815
5 1	0,4478	0,5718	1,4100	-0,8500	0,2800
3 6 5	0,3288	0,8074	1,4975	-1,1525	0,1725

**Tabelle 3.60:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Wie der Vergleich in Tabelle 3.60 zeigt, weisen sowohl die Differenz zum individuellen Schwellwert, die Falsch-Positiv-Rate als auch die Wahrscheinlichkeit für die Hypothese darauf hin, dass Kombination [5,1] tatsächlich manipuliert ist. Der Messwerttest liefert auch für das zweite Manipulationsbeispiel die richtige Detektion.

### Manipulationsbeispiel 3

Für das dritte Manipulationsbeispiel wurde eine Manipulation von Größe 1 um  $+1,26\sigma$  und von Größe 5 um  $-1,26\sigma$  simuliert. In Tabelle 3.61 ist die Untersuchung der Einzelgrößen dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1812	0,2891	1,7678	-0,1422	0,8128
2	0,3640	0,8983	0,3696	-1,5404	-1,5404
3	0,3273	0,8634	0,3514	-1,5586	-0,6036
4	0,3677	0,9902	0,5134	-1,3966	-1,3966
5	0,1950	0,6386	1,4605	-0,4495	-0,4495
6	0,2760	0,8440	1,1343	-0,7757	0,1793

**Tabelle 3.61:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,91 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,96 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Unter den Einzelgrößen in Tabelle 3.61 finden sich Detektionen der Größen 1 und 6. Aufgrund des Schwellwerts für die Untersuchung auf Manipulationen höherer Vielfachheit werden Kombinationen der Vielfachheit 2 mit den Größen 1, 5 und 6 in Tabelle 3.62 dargestellt.

Auch bei gegenläufiger Manipulation der beiden Größen 1 und 5 finden sich unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 Detektionen der Kombinationen [1,5] und [5,1]. Der Hinweis

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,4034	0,8660	0,2491	-2,0109	-2,0109
1 3	0,4394	0,6851	0,9697	-1,2903	-1,2903
1 4	0,3724	0,9731	0,4194	-1,8406	-1,8406
1 5	0,2514	0,7385	1,2184	-1,0416	0,0884
1 6	0,2857	0,8248	1,3073	-0,9527	-0,9527
5 1	0,4478	0,5718	1,4100	-0,8500	0,2800
5 2	0,3642	0,8764	0,4039	-1,8561	-1,8561
5 3	0,3388	0,8698	0,8234	-1,4366	-1,4366
5 4	0,3829	0,9860	0,4259	-1,8341	-1,8341
5 6	0,3336	0,8261	1,2961	-0,9639	-0,9639
6 1	0,2052	0,2853	1,8367	-0,4233	-0,4233
6 2	0,3765	0,8867	0,3607	-1,8993	-1,8993
6 3	0,3291	0,8508	0,3375	-1,9225	-1,9225
6 4	0,3831	0,9869	0,3835	-1,8765	-0,7465
6 5	0,1857	0,5766	1,8617	-0,3983	-0,3983

**Tabelle 3.62:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,26 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,13 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

auf eine Manipulation der Vielfachheit 3 ergibt sich für die Kombinationen [1,5] bzw. [5,1] und [5,6] bzw. [6,5]. Die Kombinationen [1,6] und [6,1] weisen ebenfalls eine hohe Prüfgröße auf. Es gibt unter den erwarten Kombinationen höherer Vielfachheit jedoch keine, die sowohl Größe 1 als auch Größe 6 enthält. Daher gilt für die Vorauswahl für die Detektion von Manipulationen höherer Ordnung bei Kombination [1,6] bzw. [6,1] der allgemeine, nicht der reduzierte Schwellwert. Dieser wird von der Prüfgröße nicht überschritten. Daher werden Kombinationen mit [1,6] in Tabelle 3.63 nicht berücksichtigt. Ohne Schwellwertanpassung finden sich Detektionen in Kombinationen [6,1] und [6,5]. Die Kombination [6,5] würde aufgrund der deutlich höheren Prüfgröße als die tatsächliche Manipulation angenommen werden.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 in Tabelle 3.63 findet sich keine weitere Detektion. In Tabelle 3.64 sind die Detektionen zusammengefasst.

Der Vergleich erlaubt keine eindeutige Entscheidung zwischen einer Manipulation in Größe 1, auf die sowohl die Differenz zum individuellen Schwellwert als auch die geringe Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit hinweist, und einer Manipulation in Kombination [1,5], auf die die hohe Wahrscheinlichkeit für die Hypothese hinweist.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 5 2	0,4087	0,8330	0,2902	-2,3598	-2,3598
1 5 3	0,6996	0,8711	0,7065	-1,9435	-1,9435
1 5 4	0,3851	0,9698	0,3019	-2,3481	-2,3481
1 5 6	0,3475	0,8191	1,3546	-1,2954	-1,2954
5 6 1	0,4794	0,5370	1,4175	-1,2325	-1,2325
5 6 2	0,3652	0,8513	0,4064	-2,2436	-2,2436
5 6 3	0,3392	0,8435	0,8649	-1,7851	-0,4601
5 6 4	0,3827	0,9711	0,4225	-2,2275	-2,2275

**Tabelle 3.63:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,65 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 2,65 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die angepasste Schwellwert von 1,33 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1812	0,2891	1,7678	-0,1422	0,8128
6	0,2760	0,8440	1,1343	-0,7757	0,1793
1 5	0,2514	0,7385	1,2184	-1,0416	0,0884
5 1	0,4478	0,5718	1,4100	-0,8500	0,2800

**Tabelle 3.64:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

### Manipulationsbeispiel 4

Im vierten Beispiel wurde eine nicht erwartete Manipulation in Größe 2 mit der doppelten Manipulationshöhe von  $2,52\sigma$  simuliert. Die Einzelgrößen sind in Tabelle 3.65 aufgeführt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8897	0,9471	0,7352	-1,1748	-0,2198
2	0,1526	0,4398	2,3287	0,4187	0,4187
3	0,3396	0,9147	0,3563	-1,5537	-0,5987
4	0,3368	0,9233	0,4425	-1,4675	-1,4675
5	0,3209	0,8764	0,2684	-1,6416	-1,6416
6	0,2112	0,7265	0,8815	-1,0285	-0,0735

**Tabelle 3.65:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,91 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,96 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Einzelgrößen in Tabelle 3.65 findet sich eine Detektion in der tatsächlich manipulierten Größe 2. Kombinationen der Vielfachheit 2 mit Größen 1, 2 und 6 werden in Tabelle 3.66 untersucht.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,1366	0,3364	2,3564	0,0964	0,0964
1 3	0,5851	0,8809	0,6344	-1,6256	-1,6256
1 4	0,3421	0,9166	0,4672	-1,7928	-1,7928
1 5	0,3193	0,8514	0,2886	-1,9714	-0,8414
1 6	0,2164	0,6950	0,9153	-1,3447	-1,3447
2 1	0,8597	0,8860	0,2176	-2,0424	-2,0424
2 3	0,3439	0,9115	0,3100	-1,9500	-0,8200
2 4	0,4468	0,9294	0,4731	-1,7869	-1,7869
2 5	0,3283	0,8723	0,2667	-1,9933	-1,9933
2 6	0,2327	0,7311	0,8551	-1,4049	-1,4049
6 1	0,8867	0,8976	0,8004	-1,4596	-1,4596
6 2	0,1290	0,3800	2,3195	0,0595	0,0595
6 3	0,3500	0,9127	0,3522	-1,9078	-1,9078
6 4	0,3547	0,9593	0,5514	-1,7086	-0,5786
6 5	0,3014	0,8308	0,6423	-1,6177	-1,6177

**Tabelle 3.66:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,26 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,13 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 finden sich weitere Detektionen von [1,2] und [6,2]. Da in beiden Fällen Größe 2 die getestete ist, während Größen 1 bzw. 6 aus dem System

entfernt wurden, stellt die Manipulation in Größe 2 die Erklärung für diese Detektionen dar. Die Differenz zum Schwellwert ist in beiden Fällen aber sehr gering. Für beide Kombinationen werden außerdem die höheren Kombinationen in Tabelle 3.67 untersucht.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	1,1170	0,7015	0,4965	-2,1535	-0,8285
1 2 4	0,4433	0,9064	0,4726	-2,1774	-2,1774
1 2 5	0,3393	0,8595	0,3061	-2,3439	-2,3439
1 2 6	0,2373	0,6809	0,8699	-1,7801	-1,7801
2 6 1	0,9073	0,8826	0,1966	-2,4534	-2,4534
2 6 3	0,3556	0,8957	0,3076	-2,3424	-2,3424
2 6 4	0,4765	0,9626	0,5228	-2,1272	-0,8022
2 6 5	0,3102	0,8140	0,5840	-2,0660	-2,0660

**Tabelle 3.67:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwellwert von 2,65 und zur individuellen Schwellen, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 2,65 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,33 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 (Tabelle 3.67) findet sich keine weitere Detektion. Der Messwerttest detektiert also auch die unerwartete Manipulation mit höherer Auslenkung erfolgreich.

### Systematische Bewertung

Die Leistung des Messwerttests im Bezug auf die Beispiele sind in Tabelle 3.68 zusammengefasst. Unter den fünf Manipulationsbeispielen werden vier eindeutig und richtig detektiert, im fünften Fall ist die richtige Detektion unter den Manipulationshypthesen. Ohne die Schwellwertanpassung würden lediglich drei Beispiele eindeutig und richtig detektiert werden. In Beispiel 2 wäre die tatsächliche Manipulation unter den möglichen Manipulationen. In Beispiel 3 würde die Detektion ohne Schwellwertanpassung zu einer falschen Detektion führen.

Manipulation	ohne SW-Anpassung	Eindeutig	mit SW-Anpassung	Eindeutig
unmanip. keine	keine	✓	keine	✓
Bsp. 1 1	1	✓	1	✓
Bsp. 2 [1,5]	[1,5]/[3,6]		[1,5]	✓
Bsp. 3 [1,5]	1/5/[6,1]/[6,5]		1/[1,5]	
Bsp. 4 2	2	✓	2	✓

**Tabelle 3.68:** Leistung des Messwerttests in den Beispielen

Für eine objektive und allgemeine Bewertung der Leistungsfähigkeit des Tests wird der Anteil der Flächen betrachtet, den die ROC-Kurven mit der Diagonale einschließen. Die Werte sind für verschiedene Fälle in Tabelle 3.69 zusammengefasst.

Vielfachheit	Flächenanteil ohne Anpassung ( $SA_{MT} = 0$ )	Flächenanteil bei $SA_{MT} = 0,5$	Vielfachheits-spezifisches $SA_{MT}$	Flächenanteil bei spezifischem $SA_{MT}$
1	0,6693	0,7916	0,29	0,7350
2	0,6732	0,8189	0,15	0,7138
3	0,5934	0,7138	0,16	0,6258

**Tabelle 3.69:** Anteil der Fläche, die von ROC-Kurve und Diagonale eingeschlossen wird.

Die Flächen unter den verschiedenen ROC-Kurven in Tabelle 3.69 zeigen, dass der Messwerttest aussagekräftig ist und dass er durch die Berücksichtigung des Vorwissens deutlich verbessert wird.

### 3.4.4 Globaltest

#### Schwellwertanpassung

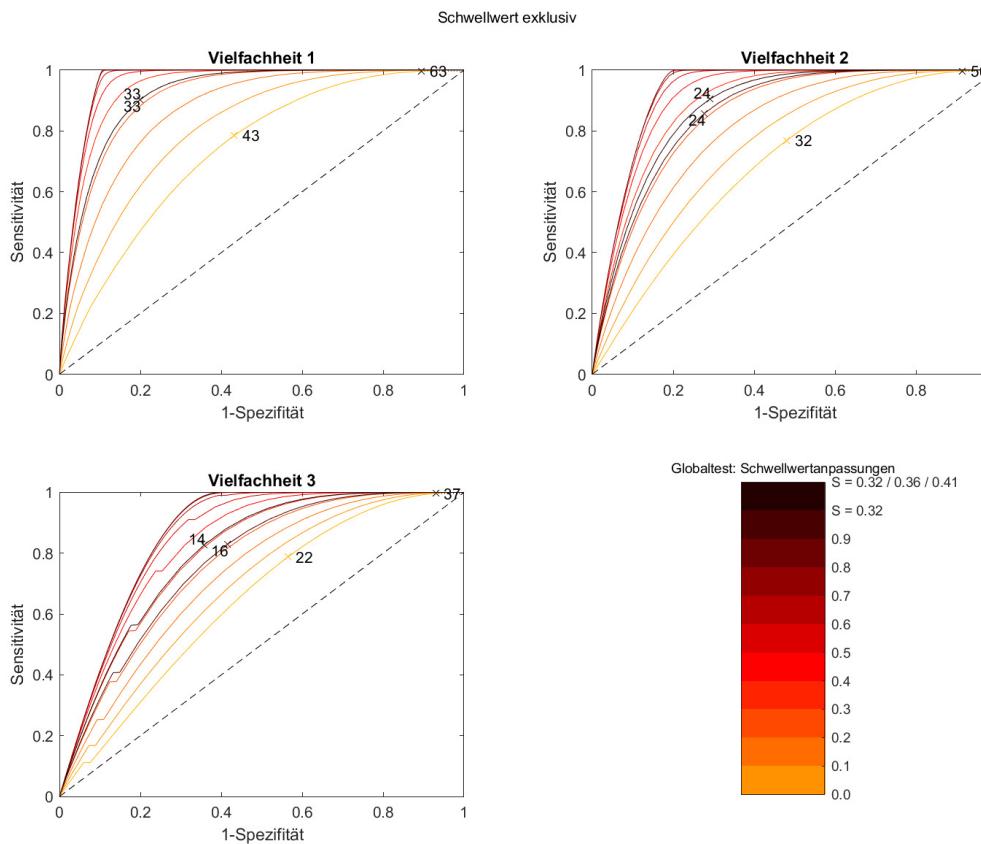
Beim Globaltest wird die Schwellwertanpassung über die Richtig-Positiv-Rate bestimmt, wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben. In den ROC-Kurven in Abbildung 3.16 wird auf der Kurve ohne Schwellwertanpassung (der hellste Orangeton) sowohl der optimale Schwellwert bestimmt als auch der Schwellwert bei der Richtig-Positiv-Rate von 99,7%. Der optimale Schwellwert liegt für Vielfachheit 1 bei  $SW_{\text{ohne\_1\_GT}} = 43$ , für Vielfachheit 2 bei  $SW_{\text{ohne\_2\_GT}} = 32$  und für Vielfachheit 3 bei  $SW_{\text{ohne\_3\_GT}} = 22$ . Die Schwellwerte bei der Richtig-Positiv-Rate von 99,7% für die Vielfachheiten 1, 2 und 3 sind  $SW_{99,7\%\_1\_GT} = 63$ ,  $SW_{99,7\%\_2\_GT} = 50$  und  $SW_{99,7\%\_3\_GT} = 37$  (rechts oben in den Abbildungen 3.16). Daraus werden über Gleichung 3.8 die Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_GT} = 0,32$ ,  $SA_{2\_GT} = 0,36$  und  $SA_{3\_GT} = 0,41$  berechnet.

Da die Prüfgröße beim Globaltest nicht von der Auslenkung der manipulierten Größen abhängt, ist die alternative Bestimmung über verschiedene Manipulationshöhen nur eingeschränkt sinnvoll.

#### Schwellwerte

Für die Bestimmung der Schwellwerte für die Detektion werden die ROC-Kurven für die zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_GT} = 0,32$ ,  $SA_{2\_GT} = 0,36$  und  $SA_{3\_GT} = 0,41$  untersucht. Zusätzlich wird in Abbildung 3.16 für alle Vielfachheiten eine Kurve mit der geringsten Schwellwertanpassung von  $SA_{GT} = 0,32$  berechnet.

Abbildung 3.16 zeigt, dass die Manipulationsdetektion mit dem Globaltest auch im dynamischen Fall sehr aussagekräftige Ergebnisse liefert. Die ermittelten Schwellwerte sind in Tabelle 3.70 aufgelistet. Da die allgemeinen Schwellwerte mit  $(SW_{0\_k\_GT})$  und ohne Schwell-



**Abbildung 3.16:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Globaltest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert wird jeweils nur die Kombination betrachtet, die alle manipulierten Größen und ausschließlich diese enthält. Die optimalen Schwellwerte bei den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_GT} = 0,32$ ,  $SA_{2\_GT} = 0,36$  und  $SA_{3\_GT} = 0,41$ , bei einer gemeinsamen Schwellwertanpassung von  $SA_{GT} = 0,32$  sowie ohne Anpassung sind markiert und beschriftet.

wertanpassung ( $SW_{\text{ohne } k \text{-GT}}$ ) sehr ähnlich sind, nehmen die angepassten Schwellwerte ( $SW_{1-k \text{-GT}}$ ) beinahe die Werte der Schwellwerte bei 99,7% ( $SW_{99,7\%-k \text{-GT}}$ ) an.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anpassung ( $SA_{GT} = 0$ )	Vielfachheits-spezifisches $SA_{k\_GT}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_GT}$ allgemein ( $SW_0$ )	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_GT}$ angepasst ( $SW_1$ )
1	43	0,32	33	48,53
2	32	0,36	24	37,50
3	22	0,41	14	23,73

**Tabelle 3.70:** Schwellwerte für Detektion über den Globaltest.

Durch das iterative Vorgehen beim Globaltest ist eine Vorauswahl für eine Untersuchung auf Kombinationen höherer Vielfachheit nicht sinnvoll. Die ROC-Kurven für die Detektion aller Untermengen der manipulierten Kombination ist im Anhang, Abbildung A.2 dargestellt. Die Kurven dokumentieren eine sehr geringe Aussagekraft eines solchen Tests.

### Beispiel Unmanipuliert

Zunächst wird die Prüfgröße für das vollständige System berechnet. In Tabelle 3.71 ist die Auswertung für das vollständige System in der ersten Zeile dargestellt. In den folgenden Zeilen werden die Prüfgrößen für das um jeweils eine Größe reduzierte System angegeben.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
	1,51 e-9	0,8218	32,6631	-0,3369	-0,3369
1	6,87 e-9	0,6441	29,3568	-3,6432	-19,1726
2	3,14 e-8	0,6991	27,3002	-5,6998	-5,6998
3	9,52 e-8	0,8122	27,9445	-5,0555	-20,5849
4	2,56 e-7	0,8736	30,6295	-2,3705	-2,3705
5	4,69 e-6	0,9840	25,0976	-7,9024	-7,9024
6	2,97 e-6	0,9799	29,6505	-3,3495	-18,8789

**Tabelle 3.71:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 33 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 48,53 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Bereits für das vollständige System liegt die Prüfgröße unter dem Schwellwert. Das System wird also als nicht fehlerbehaftet und damit nicht manipuliert erkannt. Wie zu erwarten, zeigt auch die Prüfung der Einzelgrößen keinen Hinweis auf eine Manipulation.

### Manipulationsbeispiel 1

Beim ersten Manipulationsbeispiel wurde Größe 1 um  $+1,26\sigma$  manipuliert. Die Auswertung der Prüfgrößen des vollständigen Systems und des um eine Größe reduzierten Systems ist in Tabelle 3.72 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
	1,27e-11	0,4397	38,6877	5,6877	5,6877
1	6,87 e-9	0,6441	29,3568	-3,6432	-19,1726
2	8,07e-10	0,3543	32,7987	-0,2013	-0,2013
3	1,05 e-8	0,6174	31,5084	-1,4916	-17,0210
4	3,24 e-9	0,4938	36,7780	3,7780	3,7780
5	1,86 e-7	0,8661	30,6885	-2,3115	-2,3115
6	5,20 e-8	0,7942	36,0943	3,0943	-12,4351

**Tabelle 3.72:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 33 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 48,53 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

Die Prüfgröße für das gesamte System überschreitet den Schwellwert, es wird also eine Manipulation erkannt. Nach Entfernen der Einzelgrößen erfüllt das System den Schwellwert für die Größen 1, 2, 4, 5 und 6. Für eine Entscheidung werden in Tabelle 3.73 die Prüfgrößen nach Entfernen von zwei Größen betrachtet. Für die tatsächlich manipulierte Größe muss die Prüfgröße auch für alle Kombinationen unter dem Schwellwert liegen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	6,24 e-7	0,5912	20,3732	-3,6268	-3,6268
1 3	3,08 e-7	0,5461	20,3772	-3,6228	-3,6228
1 4	9,14 e-7	0,6551	23,8315	-0,1685	-0,1685
1 5	1,38 e-5	0,9089	17,8876	-6,1124	-19,6124
1 6	9,94 e-6	0,9090	22,7017	-1,2983	-1,2983
2 3	8,66 e-7	0,5725	20,7759	-3,2241	-16,7241
2 4	1,54 e-7	0,3967	26,9732	2,9732	2,9732
2 5	7,52 e-6	0,8215	20,5723	-3,4277	-3,4277
2 6	1,74 e-6	0,7082	26,0636	2,0636	2,0636
3 4	8,19 e-7	0,5638	25,4140	1,4140	1,4140
3 5	2,00 e-5	0,8792	20,2502	-3,7498	-3,7498
3 6	1,17 e-5	0,8668	24,8510	0,8510	0,8510
4 5	7,37 e-7	0,5629	25,1382	1,1382	1,1382
4 6	1,24 e-7	0,4775	31,2239	7,2239	-6,2761
5 6	8,66 e-6	0,8818	25,1440	1,1440	1,1440

**Tabelle 3.73:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwelwert von 37,50 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

Tatsächlich liegen in Tabelle 3.73 lediglich für Größe 1 die Prüfgrößen für alle Kombinationen unter dem Schwellwert. Größe 1 wird also richtig als die manipulierte detektiert.

## Manipulationsbeispiel 2

Beim zweiten Beispiel erhöht die Manipulation Größen 1 und 5. In Tabelle 3.74 ist die Untersuchung des Gesamtsystems und der Einzelgrößen dargestellt.

Für das vollständige System zeigt die Analyse eine Manipulation. Als mögliche manipulierte Größen kommen 1, 2, 4, 5 und 6 in Betracht. Für eine Entscheidung oder weitere Detektion werden in Tabelle 3.75 die Kombinationen der Vielfachheit 2 untersucht.

In Tabelle 3.75 liefern für keine der Größen alle Kombinationen eine Detektion. Die Werte sind also nicht durch die Manipulation einer einzelnen Größe erklärbar. Für alle Kombinationen, die eine Detektion liefern, werden daher in Tabelle 3.76 die Kombinationen der Vielfachheit 3 untersucht.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
	6,45e-13	0,2275	41,5300	8,5300	8,5300
1	7,00e-11	0,2434	35,2352	2,2352	-13,2942
2	7,76e-11	0,1876	35,1896	2,1896	2,1896
3	5,75e-11	0,1838	34,5917	1,5917	-13,9377
4	1,27 e-8	0,6264	37,1573	4,1573	4,1573
5	1,86 e-7	0,8661	30,6885	-2,3115	-2,3115
6	2,60 e-7	0,8994	36,4188	3,4188	-12,1106

**Tabelle 3.74:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 33 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 48,53 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	1,18 e-8	0,2042	25,5193	1,5193	1,5193
1 3	5,97e-10	0,0745	24,9866	0,9866	0,9866
1 4	5,78 e-7	0,6033	27,2234	3,2234	3,2234
1 5	1,38 e-5	0,9089	17,8876	-6,1124	-19,6124
1 6	8,60 e-6	0,9002	26,2111	2,2111	2,2111
2 3	9,79 e-9	0,1565	22,9558	-1,0442	-14,5442
2 4	9,07 e-7	0,5976	27,0176	3,0176	3,0176
2 5	7,52 e-6	0,8215	20,5723	-3,4277	-3,4277
2 6	1,05 e-5	0,8741	26,0896	2,0896	2,0896
3 4	7,33 e-7	0,5509	24,9649	0,9649	0,9649
3 5	2,00 e-5	0,8792	20,2502	-3,7498	-3,7498
3 6	1,85 e-5	0,8991	23,9945	-0,0055	-0,0055
4 5	7,37 e-7	0,5629	25,1382	1,1382	1,1382
4 6	6,25 e-7	0,6571	31,4311	7,4311	-6,0689
5 6	8,66 e-6	0,8818	25,1440	1,1440	1,1440

**Tabelle 3.75:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 37,50 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	2,47 e-7	0,0530	15,5396	1,5396	-8,1892
1 2 5	8,84 e-4	0,9169	9,0705	-4,9295	-4,9295
1 3 5	5,51 e-4	0,8396	9,2014	-4,7986	-4,7986
1 3 6	1,09 e-4	0,7142	14,8346	0,8346	0,8346
1 4 5	5,74 e-5	0,5490	12,9840	-1,0160	-1,0160
1 4 6	2,95 e-5	0,5938	21,7098	7,7098	7,7098
1 5 6	5,63 e-4	0,9282	12,4613	-1,5387	-1,5387
2 3 4	1,04 e-4	0,5539	14,0721	0,0721	0,0721
2 3 5	1,21 e-3	0,8847	9,4980	-4,5020	-4,5020
2 3 6	9,77 e-4	0,9132	13,1827	-0,8173	-0,8173
2 4 5	3,44 e-5	0,4023	15,0800	1,0800	1,0800
2 4 6	3,62 e-5	0,5971	21,8419	7,8419	-1,8869
2 5 6	3,54 e-4	0,8480	14,9631	0,9631	0,9631
3 4 5	6,60 e-5	0,4631	14,2141	0,2141	-9,5147
3 4 6	4,16 e-5	0,5879	18,7975	4,7975	4,7975
3 5 6	5,16 e-4	0,9190	15,2267	1,2267	-8,5021
4 5 6	2,10 e-5	0,5567	20,2213	6,2213	6,2213

**Tabelle 3.76:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 14 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 14 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die angepasste Schwellwert von 23,73 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

In Tabelle 3.76 liefern alle Kombinationen der Vielfachheit 3, die die Kombinationen [1,5] und [3,5] enthalten, eine Detektion. Durch die geringe Systemgröße können für Kombinationen der Vielfachheit 4 keine Prüfgrößen berechnet werden. Aufgrund der deutlich höheren Differenz zum Schwellwert würde die Entscheidung zugunsten der Kombination [1,5] fallen. Auch für das zweite Manipulationsbeispiel liefert der Globaltest die richtige Detektion. Ohne Schwellwertanpassung wäre keine Manipulation erkannt worden, da bereits die Prüfgröße für das vollständige System von 41,53 den Schwellwert von  $SW_{\text{ohne\_1\_GT}} = 43$  unterschreitet.

### Manipulationsbeispiel 3

Für das dritte Beispiel, mit gegenläufigen Manipulationen in Größen 1 und 5, wird in Tabelle 3.77 wieder das unreduzierte System und das um jeweils eine Größe reduzierte System untersucht.

In Tabelle 3.77 wird das Gesamtsystem als manipuliert detektiert. Unter den Einzelgrößen liefern Größen 1, 3, 5 und 6 eine Detektion. Zur Entscheidung werden im zweiten Schritt in Tabelle 3.78 alle Kombinationen der Vielfachheit 2 mit diesen Größen betrachtet.

Für keine der zuvor identifizierten Einzelgrößen 1, 3, 5 und 6 finden sich in Tabelle 3.78 Detektionen für alle Kombinationen der jeweiligen Größe. Der beobachtete Fehler geht also

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
	6,74e-13	0,2301	46,4918	13,4918	13,4918
1	2,62 e-9	0,5520	34,5772	1,5772	-13,9523
2	2,64e-11	0,1335	41,9298	8,9298	8,9298
3	2,86 e-8	0,7117	36,8390	3,8390	-11,6904
4	9,41e-12	0,0984	45,3571	12,3571	12,3571
5	1,86 e-7	0,8661	30,6885	-2,3115	-2,3115
6	1,24e-10	0,2617	44,6309	11,6309	-3,8985

**Tabelle 3.77:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 33 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 48,53 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	1,71 e-7	0,4452	25,7603	1,7603	1,7603
1 3	3,80 e-6	0,8147	23,2344	-0,7656	-0,7656
1 4	2,80 e-8	0,2854	28,3288	4,3288	4,3288
1 5	1,38 e-5	0,9089	17,8876	-6,1124	-19,6124
1 6	2,43 e-7	0,5609	26,9063	2,9063	2,9063
2 3	1,44 e-6	0,6318	26,5411	2,5411	-10,9589
2 4	3,12e-10	0,0403	35,7806	11,7806	11,7806
2 5	7,52 e-6	0,8215	20,5723	-3,4277	-3,4277
2 6	3,49 e-9	0,1333	34,8707	10,8707	10,8707
3 4	1,44 e-7	0,3705	29,5572	5,5572	5,5572
3 5	2,00 e-5	0,8792	20,2502	-3,7498	-3,7498
3 6	1,63 e-6	0,6785	28,7285	4,7285	4,7285
4 5	7,37 e-7	0,5629	25,1382	1,1382	1,1382
4 6	2,95e-10	0,0656	39,8657	15,8657	2,3657
5 6	8,66 e-6	0,8818	25,1440	1,1440	1,1440

**Tabelle 3.78:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 37,50 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

nicht auf die Manipulation einer einzelnen Größe zurück. In Tabelle 3.79 werden Kombinationen der Vielfachheit 3 der Kombinationen [1,3], [1,5], [2,3], [2,5] und [3,5] untersucht.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 in Tabelle 3.78 liefern alle Kombinationen mit [1,5] und [3,5] eine Detektion. Für [1,3], [2,3] und [2,5] findet sich jeweils mindestens eine Kombination, die keine Detektion liefert. Für eine Entscheidung zwischen den Kombinationen [1,5] und [3,5], werden die Differenzen zum Schwellwert in Tabelle 3.78 betrachtet. Mit der Entscheidung für Kombination [1,5], liefert der Globaltest auch in diesem Beispiel die richtige Detektion. Bei klassischer Betrachtung ohne Schwellwertanpassung mit dem

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	1,98 e-4	0,6948	14,2576	0,2576	-9,4712
1 2 5	8,84 e-4	0,9169	9,0705	-4,9295	-4,9295
1 3 4	3,96 e-5	0,5248	16,4299	2,4299	2,4299
1 3 5	5,51 e-4	0,8396	9,2014	-4,7986	-4,7986
1 3 6	2,55 e-4	0,8219	13,8631	-0,1369	-0,1369
1 4 5	5,74 e-5	0,5490	12,9840	-1,0160	-1,0160
1 5 6	5,63 e-4	0,9282	12,4613	-1,5387	-1,5387
2 3 4	6,90 e-6	0,2108	18,9740	4,9740	4,9740
2 3 5	1,21 e-3	0,8847	9,4980	-4,5020	-4,5020
2 3 6	6,22 e-5	0,5604	18,3251	4,3251	4,3251
2 4 5	3,44 e-5	0,4023	15,0800	1,0800	1,0800
2 5 6	3,54 e-4	0,8480	14,9631	0,9631	0,9631
3 4 5	6,60 e-5	0,4631	14,2141	0,2141	-9,5147
3 5 6	5,16 e-4	0,9190	15,2267	1,2267	-8,5021

**Tabelle 3.79:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 14 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 14 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die angepasste Schwellwert von 23,73 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Schwellwert  $SW_{\text{ohne\_2\_GT}} = 32$ , wären weitere Detektionen in den Kombinationen [1,2], [1,4], [1,6], [3,4], [3,6], [4,5] und [5,6] zu finden. Das bedeutet, dass die Detektion eines Einzelfehlers für die Größen 1, 3 und 5 bestätigt wäre, eine Unterscheidung aber nicht möglich wäre. Aufgrund der geringsten Prüfgröße würde eine Manipulation in Größe 5 angenommen werden.

#### Manipulationsbeispiel 4

Für das Beispiel einer unerwarteten Manipulation in Größe 2 werden in Tabelle 3.80 das unreduzierte System und die Einzelgrößen untersucht.

Das System wird in Tabelle 3.80 richtig als fehlerbehaftet identifiziert und Größe 2 liefert eine Detektion. Zur Bestätigung in Tabelle 3.81 werden Kombinationen der Vielfachheit 2 mit Größe 2 betrachtet.

Da in Tabelle 3.81 alle Kombinationen eine Detektion liefern, identifiziert der Globaltest auch beim vierten Beispiel die tatsächlich manipulierte Größe, die in diesem Fall Größe 2 ist.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	8,48e-17	0,0108	70,3493	37,3493	37,3493
2	2,45e-16	0,0014	69,2548	36,2548	20,7254
2	3,14 e-8	0,6991	27,3002	-5,6998	-5,6998
3	1,13e-14	0,0062	69,1926	36,1926	20,6632
4	5,03e-14	0,0118	70,8304	37,8304	37,8304
5	1,02e-12	0,0463	66,3836	33,3836	33,3836
6	5,22e-13	0,0419	71,1933	38,1933	22,6639

**Tabelle 3.80:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 33 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 48,53 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	6,24 e-7	0,5912	20,3732	-3,6268	-3,6268
2 3	1,62 e-6	0,6449	18,9786	-5,0214	-18,5214
2 4	3,92 e-6	0,7609	21,8228	-2,1772	-2,1772
2 5	6,82 e-5	0,9605	16,2256	-7,7744	-7,7744
2 6	4,00 e-5	0,9501	20,7490	-3,2510	-3,2510

**Tabelle 3.81:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 37,50 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

### Systematische Bewertung

Der Globaltest liefert für alle Manipulationsbeispiele die richtige Detektion, wie in Tabelle 3.82 noch einmal zusammengefasst ist. Auch ohne die Schwellwertanpassung werden die Beispiele richtig ausgewertet, lediglich die Eindeutigkeit der Detektion ist geringer.

Manipulation	ohne SW-Anpassung	Eindeutig	mit SW-Anpassung	Eindeutig
unmanip. keine	keine	✓	keine	✓
Bsp. 1 1	1	✓	1	✓
Bsp. 2 [1,5]	[1,5]		[1,5]	✓
Bsp. 3 [1,5]	[1,5]		[1,5]	✓
Bsp. 4 2	2	✓	2	✓

**Tabelle 3.82:** Leistung des Globaltests in den Beispielen

Da Beispiele keine objektive Bewertung der Leistung eines Tests zulassen, werden hierfür die Flächen unter den jeweiligen ROC-Kurven angegeben. Die Werte in Tabelle 3.83 geben den Anteil der Fläche oberhalb der Diagonale an, der von der ROC-Kurve und der Diagonale eingeschlossen wird.

Vielfachheit	Flächenanteil ohne Anpassung ( $SA_{GT} = 0$ )	Vielfachheits-spezifisches $SA_{GT}$	Flächenanteil bei spezifischem $SA_{GT}$
1	0,7344	0,32	0,9187
2	0,6911	0,36	0,8753
3	0,6435	0,41	0,8013

**Tabelle 3.83:** Anteil der Fläche, die von ROC-Kurve und Diagonale eingeschlossen wird.

Wie die Flächenanteile in Tabelle 3.83 zeigen, ist der Globaltest aussagekräftig und wird durch die Schwellwertanpassung deutlich verbessert.

### 3.4.5 Hypothesentest

#### Schwellwertanpassung

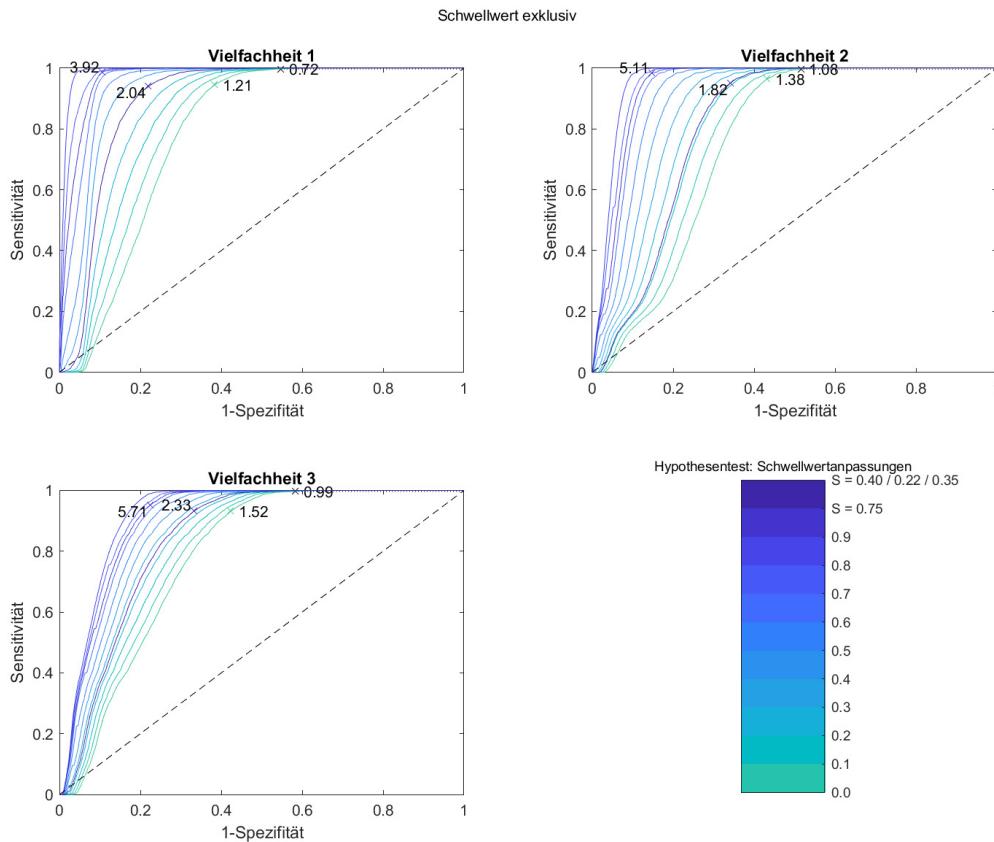
Aufgrund der Berücksichtigung von 100 Zeitpunkten, wird für die Bestimmung der Schwellwertanpassung über die Forderung einer Richtig-Positiv-Rate von 97%, der Punkt bei der Richtig-Positiv-Rate von 99,7% auf der Kurve ohne Schwellwertanpassung (helles türkis) abgelesen. Der Schwellwert für diesen Punkt liegt bei  $SW_{99,7\%\_1\_Hypo} = 0,52$  für Vielfachheit 1, bei  $SW_{99,7\%\_2\_Hypo} = 3,00$  für Vielfachheit 2 und bei  $SW_{99,7\%\_3\_Hypo} = 3,70$  für Vielfachheit 3. Optimale Schwellwerte auf der Kurve ohne Schwellwertanpassung sind  $SW_{\text{ohne\_1\_Hypo}} = 4,16$  für Vielfachheit 1,  $SW_{\text{ohne\_2\_Hypo}} = 5,93$  für Vielfachheit 2 und  $SW_{\text{ohne\_3\_Hypo}} = 6,75$  für Vielfachheit 3. Über Gleichung 3.7 werden daraus die Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_Hypo} = 0,88$ ,  $SA_{2\_Hypo} = 0,49$  und  $SA_{3\_Hypo} = 0,45$  berechnet.

Alternativ kann auch hier die Schwellwertanpassung  $SA_{Hypo}$  über Gleichung 3.12 bestimmt werden. Da die Prüfgröße beim Hypothesentest quadratisch von der Auslenkung der Manipulation abhängt, erhält man für die Verdopplung der Auslenkung die vierfache Prüfgröße. Über Gleichung 3.12 erhält man daher für alle Vielfachheiten eine Schwellwertanpassung von  $SA_{Hypo} = 0,75$ .

#### Schwellwerte

Die Schwellwerte werden wieder in der ROC-Kurve Abb. 3.17 über den optimalen Schwellwert, mit dem größten Abstand zur Diagonale, bestimmt. Abgelesen werden sie auf den Kurven mit der zuvor bestimmten Schwellwertanpassung  $SA_{Hypo}$ . Die Beschriftung zeigt die allgemeinen Schwellwerte, die für erwartete Manipulationen gemäß Gleichung 3.5 angepasst werden.

Die ROC-Kurven Abb. 3.17 zeigen, dass die Manipulationsdetektion über den Hypothesentest aussagekräftig ist.



**Abbildung 3.17:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Hypothesentest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert wird jeweils nur die Kombination betrachtet, die alle manipulierten Größen und ausschließlich diese enthält. Die optimalen Schwellwerte bei den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_Hypo} = 0,40$ ,  $SA_{2\_Hypo} = 0,22$  bzw.  $SA_{3\_Hypo} = 0,35$  und der Schwellwertanpassung  $SA_{Hypo} = 0,75$  für alle Vielfachheiten sowie auf den Kurven ohne Anpassung sind markiert und beschriftet.

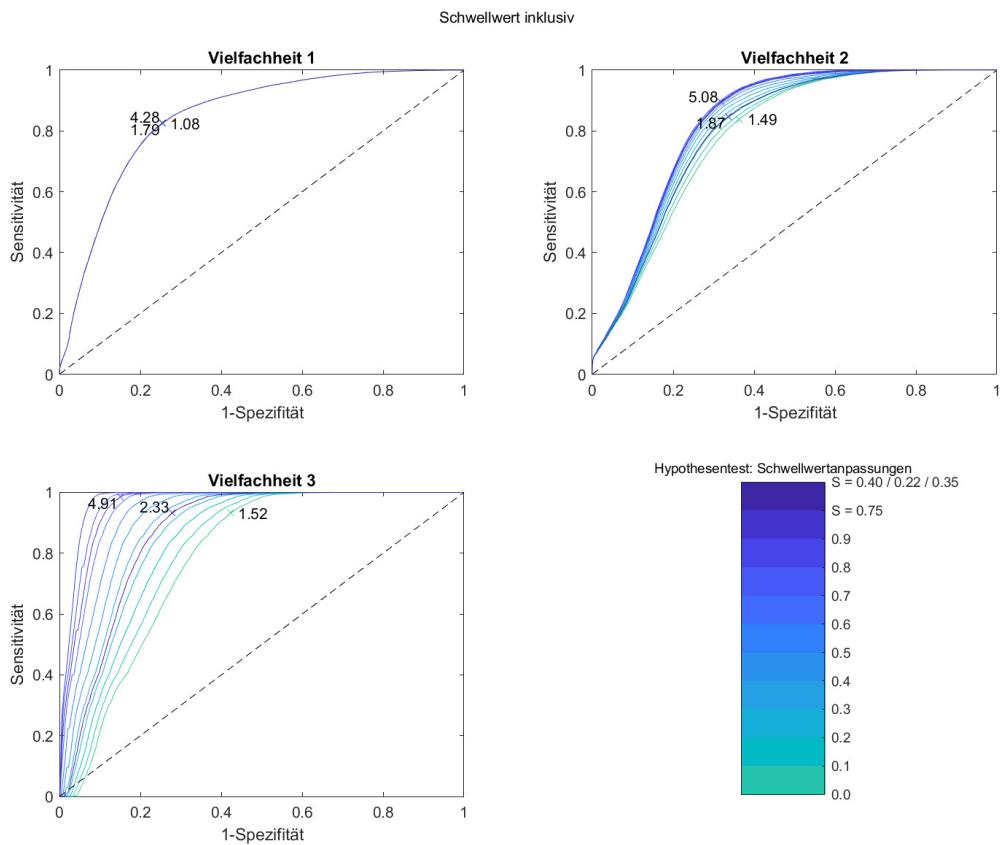
Die Schwellwerte, die in der ROC-Kurve beschriftet sind, werden in Tabelle 3.84 zusammengefasst. Abhängig von der Vielfachheit (erste Spalte) werden die Schwellwerte in der zweiten Spalte ohne Schwellwertanpassung, in der dritten Spalte mit der Schwellwertanpassung aus dem Störverhältnis und in der vierten Spalte mit den Schwellwertanpassungen aus der Richtig-Positiv-Rate angegeben. Für beide Methoden der Schwellwertanpassung wird der allgemeine Schwellwert  $SW_{0\_k\_Hypo}$  und der angepasste Schwellwert  $SW_{1\_k\_Hypo}$ , der für die erwarteten Manipulationen gültig ist, aufgeführt. Als tatsächlich manipuliert, also richtig-positiv oder falsch-negativ, betrachtet werden hier nur die vollständigen manipulierten Kombinationen.

Zur Vorauswahl der Kombinationen für die Detektion von Manipulationen der nächst höheren Vielfachheit, werden ROC-Kurven (Abb. 3.18) verwendet, bei denen jede Untermenge

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{Hypo} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{Hypo} = 0,75$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_Hypo}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_Hypo}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	1,21	3,92	0,40	2,04
2	1,38	5,11	0,22	1,82
3	1,52	5,71	0,35	2,33

**Tabelle 3.84:** Schwellwerte für Detektion über den Hypothesentest.

einer manipulierten Kombination als tatsächlich manipuliert, also als richtig-positiv oder falsch-negativ gewertet wird.



**Abbildung 3.18:** ROC-Kurve für die Identifikation von Kandidaten für Manipulationen mit höherer Vielfachheit mit dem Hypothesentest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als 'manipuliert' werden alle Untermengen der tatsächlich manipulierten Kombinationen betrachtet. Der optimale Schwellwert ist ohne Schwellwertanpassung und mit den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen markiert und beschriftet.

Die Schwellwerte werden für alle Untermengen der erwarteten Kombinationen angepasst. Unter den Einzelgrößen gilt für alle der reduzierte Grenzwert und unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 sind nur [1,4] und [1,6] keine Bestandteile höherer Kombinationen. Für die Einzelgrößen liegen daher die Kurven mit den Verschiebungen übereinander. Erst ab

Vielfachheit 2 wirkt sich die Schwellwertanpassung aus. Die ermittelten Schwellwerte sind in Tabelle 3.85 zusammengefasst.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{Hypo} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{Hypo} = 0,75$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_Hypo}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_Hypo}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	1,08	4,28	1,07	0,40
2	1,49	5,08	1,27	0,22
3	1,52	4,91	1,23	0,35

**Tabelle 3.85:** Schwellwerte für Vorauswahl über den Hypothesentest.

Im folgenden Beispiel wird eine Schwellwertanpassung von  $SA_{Hypo} = 0,75$  genutzt.

### Beispiel Unmanipuliert

Für den unmanipulierten Fall werden die Einzelgrößen in Tabelle 3.86 ausgewertet.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,9588	0,8535	0,2104	-3,7096	-0,7696
2	0,9700	0,8109	0,0890	-3,8310	-3,8310
3	0,9450	0,9429	0,1511	-3,7689	-0,8289
4	0,9584	0,8554	0,1201	-3,7999	-3,7999
5	0,9524	0,8860	0,3802	-3,5398	-3,5398
6	0,9673	0,8201	0,7045	-3,2155	-0,2755

**Tabelle 3.86:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 3,92 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,98 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Unter den Einzelgrößen in Tabelle 3.86 finden sich keine Detektionen. Auch der Schwellwert für die Untersuchung auf Manipulationen höherer Vielfachheit wird nicht überschritten. Der Hypothesentest identifiziert diesen Fall also richtig als unmanipuliert.

### Manipulationsbeispiel 1

Für das erste Manipulationsbeispiel mit einem Offset von  $1,26\sigma$  in Größe 1, werden die Einzelgrößen in Tabelle 3.87 ausgewertet.

Unter den Einzelgrößen in Tabelle 3.87 findet sich eine Detektion in Größe 1. Kombinationen mit Größe 1 werden in Tabelle 3.88 auf Manipulationen geprüft.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 findet sich in Tabelle 3.88 eine weitere Detektion in Kombination [1,5]. Kombinationen der Vielfachheit 3 mit [1,3] und [1,5] werden in Tabelle 3.89 untersucht.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,9588	0,6135	2,3210	-1,5990	1,3410
2	0,9092	0,6996	0,2618	-3,6582	-3,6582
3	0,8860	0,7554	0,6524	-3,2676	-0,3276
4	0,8560	0,8664	0,1173	-3,8027	-3,8027
5	0,8516	0,8938	0,3694	-3,5506	-3,5506
6	0,8659	0,8211	0,6983	-3,2217	-0,2817

**Tabelle 3.87:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 3,92 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,98 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,9735	0,9823	0,7053	-4,4047	-4,4047
1 3	0,9637	0,9846	3,7319	-1,3781	-1,3781
1 4	0,9764	0,9816	1,3517	-3,7583	-3,7583
1 5	0,9696	0,9832	1,6365	-3,4735	0,3590
1 6	0,9841	0,9797	1,9985	-3,1115	-3,1115

**Tabelle 3.88:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,11 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,28 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	0,9735	0,9999	0,8862	-4,8238	-0,5413
1 2 5	0,9841	0,9999	0,6652	-5,0448	-5,0448
1 3 4	0,9822	0,9999	1,8469	-3,8631	-3,8631
1 3 5	0,9927	0,9999	4,8452	-0,8648	-0,8648
1 3 6	0,9888	0,9999	3,0111	-2,6989	-2,6989
1 4 5	0,9808	0,9999	0,9441	-4,7659	-4,7659
1 5 6	0,9841	0,9999	2,0725	-3,6375	-3,6375

**Tabelle 3.89:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,71 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 5,71 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,43 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 in Tabelle 3.89 findet sich keine weitere Detektion.

Unter den beiden Detektionen in Größe 1 und Kombination [1,5] wird aufgrund der deutlich geringeren Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit eine Manipulation in Größe 1 ausgewählt. Die Manipulation in Größe 1 wird durch den Hypothesentest also richtig detektiert.

## Manipulationsbeispiel 2

Für das zweite Manipulationsbeispiel, mit einer Manipulation der Größen 1 und 5 um  $+1,26\sigma$ , werden die Einzelgrößen in Tabelle 3.90 untersucht.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8951	0,6190	2,2323	-1,6877	1,2523
2	0,8517	0,7007	0,2594	-3,6606	-3,6606
3	0,8556	0,6919	1,0871	-2,8329	0,1071
4	0,8153	0,8056	0,2205	-3,6995	-3,6995
5	0,8516	0,7009	2,1782	-1,7418	-1,7418
6	0,8504	0,7035	3,0094	-0,9106	2,0294

**Tabelle 3.90:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 3,92 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,98 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Unter den Einzelgrößen finden sich Detektionen in den Größen 1, 3 und 6. Hinweise auf Manipulationen der Vielfachheit 2 finden sich für die Größen 1, 3, 5 und 6. In Tabelle 3.91 ist die Untersuchung der Kombinationen der Vielfachheit 2 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,9092	0,9831	0,6834	-4,4266	-4,4266
1 3	0,8957	0,9863	3,6003	-1,5097	-1,5097
1 4	0,9279	0,9782	1,3745	-3,7355	-3,7355
1 5	0,9696	0,9661	2,3442	-2,7658	1,0667
1 6	0,9631	0,9681	2,3843	-2,7257	-2,7257
2 3	0,9255	0,9789	0,5000	-4,6100	-0,7775
2 4	0,8627	0,9931	0,2896	-4,8204	-4,8204
2 5	0,9177	0,9810	0,4799	-4,6301	-4,6301
2 6	0,9172	0,9811	0,3998	-4,7102	-4,7102
3 4	0,8822	0,9893	0,7856	-4,3244	-4,3244
3 5	0,8864	0,9884	1,5100	-3,6000	-3,6000
3 6	0,9216	0,9799	1,3553	-3,7547	-3,7547
4 5	0,8592	0,9937	0,7343	-4,3757	-4,3757
4 6	0,8521	0,9949	1,2574	-3,8526	-0,0201
5 6	0,8659	0,9925	4,0762	-1,0338	-1,0338

**Tabelle 3.91:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,11 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,28 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Die Untersuchung der Kombinationen der Vielfachheit 2 zeigen nur eine Detektion bei Kombination [1,5]. Die Vorauswahl für eine Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 3 umfasst [1,3], [1,5], [3,5], [3,6] und [5,6]. Die Kombinationen sind in Tabelle 3.92 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	0,9258	0,9999	0,9849	-4,7251	-0,4426
1 2 5	0,9841	0,9997	0,9216	-4,7884	-4,7884
1 3 4	0,9282	0,9999	1,8622	-3,8478	-3,8478
1 3 5	0,9927	0,9996	6,6487	0,9387	0,9387
1 3 6	0,9639	0,9998	3,5084	-2,2016	-2,2016
1 4 5	0,9808	0,9997	1,3362	-4,3738	-4,3738
1 5 6	0,9841	0,9997	2,9013	-2,8087	-2,8087
2 3 5	0,9583	0,9998	0,6000	-5,1100	-5,1100
2 3 6	0,9986	0,9996	0,6047	-5,1053	-5,1053
2 5 6	0,9338	0,9999	0,5468	-5,1632	-5,1632
3 4 5	0,8991	1,0000	0,8596	-4,8504	-0,5679
3 4 6	0,9233	0,9999	1,1490	-4,5610	-4,5610
3 5 6	0,9217	0,9999	2,0588	-3,6512	0,6313
4 5 6	0,8676	1,0000	1,3119	-4,3981	-4,3981

**Tabelle 3.92:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,71 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 5,71 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die angepasste Schwellwert von 1,43 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 finden sich zwei weitere Detektionen in [1,3,5] und [3,5,6]. Zum Vergleich werden alle Detektionen in Tabelle 3.93 zusammengefasst.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8951	0,6190	2,2323	-1,6877	1,2523
3	0,8556	0,6919	1,0871	-2,8329	0,1071
6	0,8504	0,7035	3,0094	-0,9106	2,0294
1 5	0,9696	0,9661	2,3442	-2,7658	1,0667
1 3 5	0,9927	0,9996	6,6487	0,9387	0,9387
3 5 6	0,9217	0,9999	2,0588	-3,6512	0,6313

**Tabelle 3.93:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Die geringste Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit weist die Detektion von Größe 1 auf, die im Vergleich ausgewählt werden würde. Die zusätzlichen Detektionen sind leicht durch die Struktur des Systems erklärbar. Weil Größen 3 und 5 im gleichen Zweig liegen, ist eine Manipulation in einer der Größen leicht mit der Manipulation der anderen Größe mit umgedrehtem Vorzeichen verwechselt werden. Das gleiche gilt für Größen 1 und 6. In diesem Fall ist aber sowohl eine Größe des Zweigs mit 3 und 5 als auch eine der Größen 1 und 6, die von der Summe der Zweige abhängen, manipuliert. Wäre nur eine der Größen manipuliert, würde das eine eindeutige Unterscheidung der beiden Manipulationen ermöglichen. Eine Manipulation in [1,5] ist also kaum von einer Manipulation in [3,6] unterscheidbar. Die statistischen Fehler sorgen hier dafür, dass Größen 3 und 5 gemeinsam in Detektionen auftreten.

### Manipulationsbeispiel 3

Im dritten Manipulationsbeispiel werden Größen 1 und 5 in entgegengesetzten Richtungen manipuliert. Zunächst werden die Einzelgrößen in Tabelle 3.94 betrachtet.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,9646	0,6081	2,4115	-1,5085	1,4315
2	0,9116	0,6985	0,2642	-3,6558	-3,6558
3	0,8678	0,8206	0,3523	-3,5677	-0,6277
4	0,8492	0,9280	0,2281	-3,6919	-3,6919
5	0,8516	0,9068	1,7607	-2,1593	-2,1593
6	0,8479	0,9428	1,4358	-2,4842	0,4558

**Tabelle 3.94:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 3,92 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,98 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Unter den Einzelgrößen in Tabelle 3.94 finden sich Detektionen in Größen 1 und 6. Die Vorauswahl für die Untersuchung auf Manipulationen höherer Vielfachheit umfasst Größen 1, 5 und 6. Die Kombinationen der Vielfachheit 2 mit diesen Größen werden in Tabelle 3.95 betrachtet.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,9789	0,9815	0,7278	-4,3822	-4,3822
1 3	0,9921	0,9782	4,6599	-0,4501	-0,4501
1 4	0,9708	0,9834	1,4341	-3,6759	-3,6759
1 5	0,9696	0,9837	2,1808	-2,9292	0,9033
1 6	0,9672	0,9842	2,2098	-2,9002	-2,9002
2 5	0,9177	0,9939	0,4322	-4,6778	-4,6778
2 6	0,9143	0,9944	0,3212	-4,7888	-4,7888
3 5	0,8864	0,9979	1,3498	-3,7602	-3,7602
3 6	0,8702	0,9992	0,4915	-4,6185	-4,6185
4 5	0,8592	0,9998	0,6035	-4,5065	-4,5065
4 6	0,8496	1,0000	0,6752	-4,4348	-0,6023
5 6	0,8659	0,9995	3,4032	-1,7068	-1,7068

**Tabelle 3.95:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,11 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,28 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 wird nur die tatsächlich manipulierte Kombination [1,5] detektiert. Für die Untersuchung auf eine Manipulation der Vielfachheit 3 wer-

den die Kombinationen [1,3], [1,5], [3,5] und [5,6] vorausgewählt, die in Tabelle 3.96 untersucht werden.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 3 4	0,9997	0,9999	2,3138	-3,3962	-3,3962
1 3 5	0,9927	0,9999	6,2324	0,5224	0,5224
1 3 6	0,9946	0,9999	3,9065	-1,8035	-1,8035
1 4 5	0,9808	0,9999	1,2457	-4,4643	-4,4643
1 5 6	0,9841	0,9999	2,7100	-3,0000	-3,0000
2 3 5	0,9583	1,0000	0,5586	-5,1514	-5,1514
2 5 6	0,9338	1,0000	0,4967	-5,2133	-5,2133
3 4 5	0,8991	1,0000	0,7728	-4,9372	-0,6547
3 5 6	0,9217	1,0000	1,8693	-3,8407	0,4418
4 5 6	0,8676	1,0000	1,1078	-4,6022	-4,6022

**Tabelle 3.96:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,71 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 5,71 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die angepasste Schwellwert von 1,43 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 werden [1,3,5] und [3,5,6] detektiert. Ein Vergleich aller Detektionen erfolgt in Tabelle 3.97.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,9646	0,6081	2,4115	-1,5085	1,4315
6	0,8479	0,9428	1,4358	-2,4842	0,4558
1 5	0,9696	0,9837	2,1808	-2,9292	0,9033
1 3 5	0,9927	0,9999	6,2324	0,5224	0,5224
3 5 6	0,9217	1,0000	1,8693	-3,8407	0,4418

**Tabelle 3.97:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Wie bei Manipulationsbeispiel 2 geht die Vielzahl der Detektionen zurück auf die Verwechselbarkeit von Manipulationen in Größen 1 und 6 bzw. Größen 3 und 5. Aufgrund der Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit würde Größe 1 ausgewählt werden.

#### Manipulationsbeispiel 4

Als Beispiel für eine unerwartete Manipulation wird eine Manipulation in Größe 2 untersucht. Tabelle 3.98 zeigt die Auswertung der Einzelgrößen.

Detektionen finden sich bei den Einzelgrößen in Tabelle 3.98 in Größen 1 und 2. In Tabelle 3.99 werden Kombinationen der Vielfachheit 2 mit den Größen 1, 2 und 4 betrachtet.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,5527	0,6511	5,5192	1,5992	4,5392
2	0,9700	0,2489	5,5213	1,6013	1,6013
3	0,5022	0,9105	0,1604	-3,7596	-0,8196
4	0,5043	0,8848	1,8630	-2,0570	-2,0570
5	0,5048	0,8796	0,3926	-3,5274	-3,5274
6	0,5140	0,8080	0,8018	-3,1182	-0,1782

**Tabelle 3.98:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 3,92 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,98 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,9735	0,7625	7,0100	1,9000	1,9000
1 3	0,6968	0,9195	18,7319	13,6219	13,6219
1 4	0,5603	0,9880	4,1282	-0,9818	-0,9818
1 5	0,5580	0,9888	3,6771	-1,4329	2,3996
1 6	0,5691	0,9848	4,5780	-0,5320	-0,5320
2 3	0,9730	0,7627	4,2292	-0,8808	2,9517
2 4	0,9782	0,7601	5,6374	0,5274	0,5274
2 5	0,9802	0,7590	4,9136	-0,1964	-0,1964
2 6	0,9960	0,7510	5,3107	0,2007	0,2007
3 4	0,5075	0,9997	0,7478	-4,3622	-4,3622
4 5	0,5152	0,9990	1,1092	-4,0008	-4,0008
4 6	0,5392	0,9944	4,1615	-0,9485	2,8840

**Tabelle 3.99:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,11 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,28 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 finden sich zahlreiche Detektionen. Allerdings liegen die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeiten für alle detektierten Kombinationen deutlich über der für Größe 2. Das gilt auch für die Kombinationen der Vielfachheit 3, die im Anhang in Tabelle A.49 dargestellt sind.

### Systematische Bewertung

Unter den Beispielen werden nur das unmanipulierte Beispiel und die Manipulation von Größen 1 und 2 richtig detektiert. Bei den Manipulationen der Vielfachheit 2 wird nur Größe 1 als manipuliert erkannt. In Tabelle 3.100 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Verglichen mit dem Messwerttest ist die Höhe der Beispielmanipulation eher gering, weil die Nutzung mehrerer Messzeitpunkte hier zu einer geringeren Verbesserung der Detektion

<b>Manipulation</b>		<b>ohne SW-Anpassung</b>	<b>Eindeutig</b>	<b>mit SW-Anpassung</b>	<b>Eindeutig</b>
unmanip.	keine	keine	✓	keine	✓
Bsp. 1	1	1	✓	1	✓
Bsp. 2	[1,5]	1/[1,3,5]		1/[1,3,5]	
Bsp. 3	[1,5]	1/[1,3,5]		1/[1,3,5]	
Bsp. 4	2	2	✓	2	✓

**Tabelle 3.100:** Leistung des Hypothesentests in den Beispielen

führt. Eine höhere Manipulation würde zu einer besseren und eindeutigeren Detektion führen. Für diese könnte dann der große Vorteil des Hypothesentests, die Einsetzbarkeit auch bei geringen verbleibenden Redundanzen, genutzt werden. Für eine objektive Beurteilung des Hypothesentests, werden in Tabelle 3.101 die Flächenanteile der ROC-Kurven zwischen Diagonale und Kurve angegeben.

<b>Vielfachheit</b>	<b>Flächenanteil ohne Anpassung (<math>SA_{Hypo} = 0</math>)</b>	<b>Flächenanteil bei <math>SA_{Hypo} = 0,75</math></b>	<b>Vielfachheits-spezifisches <math>SA_{Hypo}</math></b>	<b>Flächenanteil bei spezifischem <math>SA_{Hypo}</math></b>
1	0,6674	0,8153	0,40	0,7282
2	0,6950	0,8643	0,22	0,7330
3	0,7644	0,8890	0,35	0,8195

**Tabelle 3.101:** Anteil der Fläche, die von ROC-Kurve und Diagonale eingeschlossen wird.

Die hohen eingeschlossenen Flächenanteile zeigen, dass der Hypothesentest grundsätzlich eine hohe Aussagekraft aufweist. Die Schwellwertanpassungen verbessern die Aussagekraft weiter.

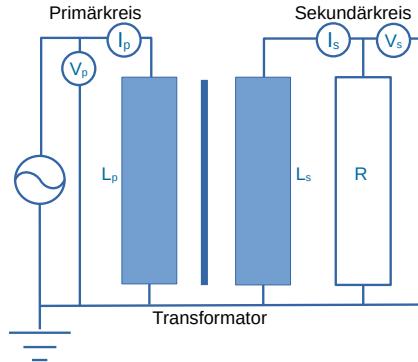


## 4 Evaluierung am Beispiel regelbarer Ortsnetztrafo (RONT)

Zur Evaluierung wird ein regelbarer Ortsnetztransformator simuliert. Im zukünftigen Energiesystem mit dezentraler Erzeugung, können Erzeugungskapazitäten wie Solaranlagen im Ortsnetz angeschlossen sein. Bei Nacht sind die alten, hierarchisch angelegten Netzarchitekturen, die einen Energiefluss von der jeweils höheren Spannungsebene zu niedrigeren voraussetzen, weiterhin passend. Am Tag, wenn dezentral Strom eingespeist wird, steigt in dem betroffenen Bereich die Spannung an, was mit einem festen Übersetzungsverhältnis am Transformator, neben der Abregelung der Solaranlage, in der Nähe des Trafos auch zu einer Spannung oberhalb des Sollbereichs führen kann. Liegt die Erzeugung in einem Zweig über dem Verbrauch, kann ein flexibler Transformator es ermöglichen, die Energie auch in die nächst höhere Spannungsebene einzuspeisen, was eine Abregelung vermeiden und damit eine bessere Nutzung der Ressourcen ermöglichen würde [34]. Die regelbaren Ortnetttransformatoren werden, ebenso wie Strangregler, also regelbare Transformatoren mit einer 1:1-Übersetzung, immer häufiger verbaut und werden in Zukunft in hoher Zahl benötigt. Sie haben Netzwerkschnittstellen und können, bei Verbindung mit dem Internet, online konfiguriert werden [46].

Innerhalb der einzelnen Stufen kann das Verhalten eines Transformators linear beschrieben werden. Die grundsätzlichen Größen des Transformators sind in Abbildung 4.1 skizziert. Für den Wechsel der Stufen wird das Modell ausgetauscht. Das verwendete Modell (Abb. 4.2) enthält außerdem statische und dynamische Systemzusammenhänge.

### 4.1 Dynamische Beschreibung des verlustbehafteten RONT



**Abbildung 4.1:** Transformator

Die dynamische Beschreibung des Transformators enthält nur die realen Ströme und Spannungen. Primärspannung  $U_p$ , Primärstrom  $I_p$ , Sekundärspannung  $U_s$ , Sekundärstrom  $I_s$  sind die messbaren Systemgrößen, die einen Trafo-Zustand unmittelbar definieren. Sie hängen über die klassischen Transformator-Gleichungen 4.1 und 4.2 zusammen [22] [77].  $L_p$  und  $L_s$  sind dabei die Selbstinduktivitäten von Primär- und Sekundärspule. Die Gegeninduktivität  $M$  ist für den idealen, also verlustfreien, Transformator definiert als  $M = \sqrt{L_p \cdot L_s}$  [22]. Beim realen, verlustbehafteten Trafo besteht eine verringerte Induktivität, die über einen Koppelfaktor  $k$  in der Gleichung berücksichtigt wird [77]. Die Gegeninduktivität wird also zu  $M = k \cdot \sqrt{L_p \cdot L_s}$ . Die Primärspannung  $U_p = U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$  ist die einzige Eingangsgröße. Um das System mit drei unabhängigen Ausgangsgrößen vollständig zu definieren ist also eine weitere Gleichung erforderlich. Das Verhältnis von Sekundärspannung  $U_s$  und Sekundärstrom  $I_s$  hängt von der sekundärseitig angeschlossenen Last ab. Für das Beispiel wurde eine rein Ohmsche Last  $R$  gewählt, die zur Gültigkeit einer zusätzlichen Gleichung 4.3 auf Verbraucherseite mit  $U_v = U_s$  und  $I_v = I_s$  führt [22] [77]. Strom und Spannung sind also auf der Sekundärseite synchron.

$$U_p - L_p \cdot \frac{dI_p}{dt} + M \cdot \frac{dI_s}{dt} = 0 \quad (4.1)$$

$$U_s - M \cdot \frac{dI_p}{dt} + L_s \cdot \frac{dI_s}{dt} = 0 \quad (4.2)$$

$$U_v - R \cdot I_v = 0 \quad (4.3)$$

Beim regelbaren Ortsnetztrafo treffen die angegebenen Gleichungen nur für den aktuell gewählten Abgriff zu. Da das resultierende Magnetfeld, verursacht durch Primärstrom auf der

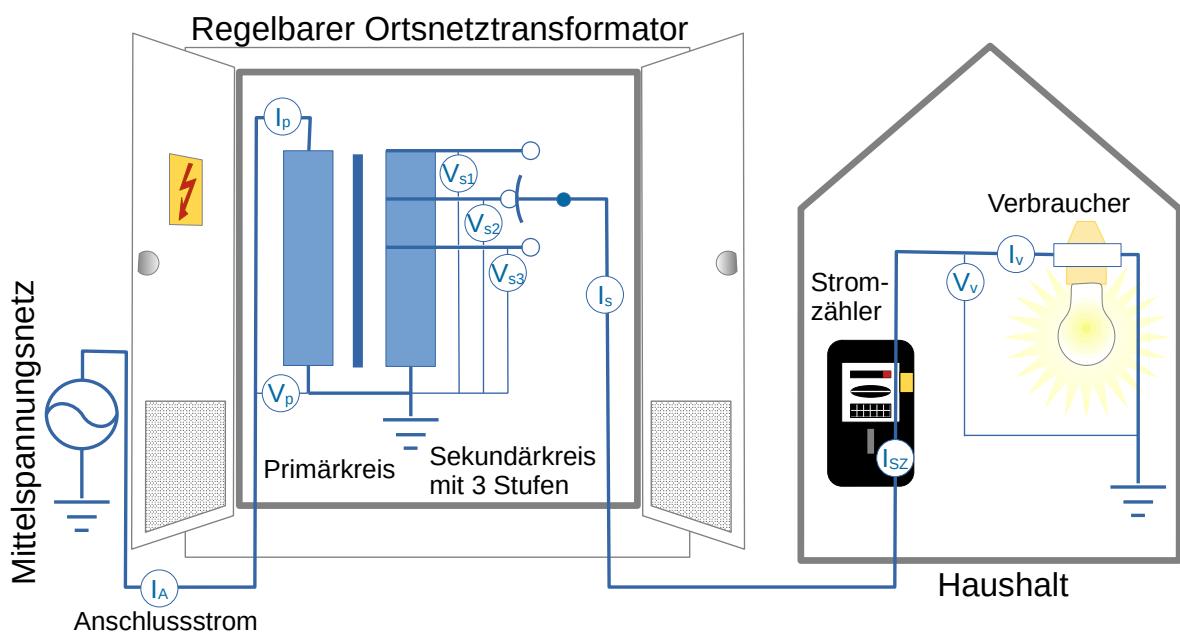
Primärseite, und dem dagegen gerichteten Magnetfeld, verursacht durch den Verbrauchstrom, durch alle Teile der Spule fließt, berechnet sich die Spannung des betrachteten Abgriffs  $U_{Agr}$  sich aus der Spannung am aktuell gewählten Abgriff  $U_s = U_{aAgr}$  über das Verhältnis der Windungszahlen (Gl. 4.4) [22].

$$U_{Agr} = \frac{n_{Agr}}{n_{aAgr}} \cdot U_{aAgr} \quad (4.4)$$

Da das Quadrat der Windungszahlen  $n$  proportional ist zu den Induktivitäten  $L$  ( also  $n^2 \sim L$  ), werden die Windungszahlen hier durch die bekannten Induktivitäten ersetzt (Gl. 4.5) [77].

$$U_{Agr} = \sqrt{\frac{L_{Agr}}{L_s}} \cdot U_s \quad (4.5)$$

Um ausreichend Redundanz zu gewährleisten, wird im Beispielmodell außerdem eine zusätzliche Messung des Sekundär- oder Verbraucherstroms  $I_s = I_v$ , beispielsweise an einem Stromzähler  $I_{SZ} = I_s = I_v$ , und einen Anschlusstrom des Trafos  $I_A = I_p$  eingeführt. Das simulierte Beispielsystem ist in Abbildung 4.2 mit allen Variablen skizziert.



**Abbildung 4.2:** Aufbau des Evaluierungssystems

Das Variablenarray des simulierten Beispielsystems ist wie folgt aufgebaut:

- $I_A$  Anschlussstrom
- $I_p$  Primärstrom
- $I_s$  Sekundärstrom
- $I_v$  Verbraucherstrom
- $I_{SZ}$  Stromzähler-Messwert
- $U_p$  Primärspannung
- $U_{s1}$  Spannung an Abgriff 1
- $U_{s2}$  Spannung an Abgriff 2
- $U_{s3}$  Spannung an Abgriff 3
- $U_v$  Verbraucherspannung

Da die Sekundärspule an den verschiedenen Abgriffen  $i$  unterschiedliche Selbstinduktivitäten  $L_{si}$  und damit auch verschiedene Gegeninduktivitäten  $M_i = k \cdot \sqrt{L_p \cdot L_{si}}$  aufweist, werden die Induktivitäten über einen Übersetzungsfaktor  $f_{si}$  an die jeweilige Trafostufe  $i$  angepasst:

$$L_{si} = L_{s0} \cdot f_{si} \quad M_i = M_0 \cdot \sqrt{f_{si}} \quad (4.6)$$

Das System soll über die beiden klassischen Systemgleichungen 4.7 und 4.8 beschrieben werden.

$$\frac{dx}{dt} = \mathbf{A} \cdot x + \mathbf{B} \cdot u \quad (4.7)$$

$$y = \mathbf{C} \cdot x + \mathbf{D} \cdot u \quad (4.8)$$

Dazu werden zunächst die Größen die als Ableitungen vorliegen von den direkt vorliegenden Größen getrennt und die Gleichungen als Matrizen formuliert, so dass Systemgleichung 4.7 zunächst zu einer Form 4.9 variiert wird

$$\mathbf{Z} \cdot \frac{dx}{dt} = \mathbf{A}_0 \cdot x + \mathbf{B}_0 \cdot u \quad \Rightarrow \quad \frac{dx}{dt} = \mathbf{Z}^{-1} \cdot \mathbf{A}_0 \cdot x + \mathbf{Z}^{-1} \cdot \mathbf{B}_0 \cdot u = \mathbf{A}_{dyn} \cdot x + \mathbf{B}_{dyn} \cdot u \quad (4.9)$$

Für das Beispielsystem wurden für die Größen folgende Werte gewählt:

$$\begin{aligned} U_{p\_eff} &= 10.000V \Rightarrow U_{p0} = U_{p\_eff} \cdot \sqrt{2} \approx 14.142.136V \Rightarrow U_p = U_{p0} \cdot \cos(50Hz \cdot 2\pi \cdot t) \\ U_{s\_eff} &= 230V \Rightarrow U_{s0} = U_{s\_eff} \cdot \sqrt{2} \approx 325V \\ L_p &= L_0, \quad L_{s0} = L_0 \cdot \frac{U_{s0}^2}{U_{p0}^2} \\ k &= 0,9 \end{aligned}$$

Die Primärimpedanz wird  $L_0 = 1$  gesetzt, weil die Dynamik lediglich vom Verhältnis der In-

duktivitäten abhängt, die über das Verhältnis von Primär- und Sekundärspannung festgelegt wird.

Als Leistung wird mit  $P_{Traf0} = \frac{100.000}{\sqrt{2}} VA$  gewählt, der Widerstand  $R_0$  mit  $R_0 = 10 \cdot \frac{U_{s,eff}^2}{P_{Traf0}} \approx 7,5\Omega$ .

Die Matrix  $Z$  bzw.  $Z^{-1}$  wird für die Gleichungen 4.1 und 4.2 zu

$$Z = \begin{bmatrix} L_p & -M_0 \cdot \sqrt{f_{si}} \\ M_0 \cdot \sqrt{f_{si}} & -L_{s0} \cdot f_{si} \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad Z^{-1} = \frac{1}{(L_{s0} \cdot L_p - M_0^2)} \cdot \begin{bmatrix} L_{s0} & \frac{-M_0}{\sqrt{f_{si}}} \\ \frac{M_0}{\sqrt{f_{si}}} & \frac{-L_p}{f_{si}} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Da nur die Primärspannung Eingangsgröße ist, muss bei den Matrizen  $A_0$  und  $B_0$  und damit auch bei  $A$  und  $B$ , sowie  $C$  und  $D$  zwischen der Simulation und der Reconciliation unterschieden werden.

Die erste Gleichung lautet:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_p & -M_0 \cdot \sqrt{f_{si}} \\ M_0 \cdot \sqrt{f_{si}} & -L_{s0} \cdot f_{si} \end{bmatrix}}_Z \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_p \\ I_s \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & R_0 \end{bmatrix}}_{A_0} \cdot \begin{pmatrix} I_p \\ I_s \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_0} \cdot U_p \quad (4.11)$$

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_p \\ I_s \end{pmatrix}}_{A_{dyn}} = \underbrace{\frac{R_0}{(L_{s0} \cdot L_p - M_0^2)}}_{\cdot} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \frac{-M_0}{\sqrt{f_{si}}} \\ 0 & \frac{-L_p}{f_{si}} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_p \\ I_s \end{pmatrix} + \underbrace{\frac{1}{(L_{s0} \cdot L_p - M_0^2)} \cdot \begin{bmatrix} L_{s0} \\ \frac{M_0}{\sqrt{f_{si}}} \end{bmatrix}}_{B_{dyn}} \cdot U_p \quad (4.12)$$

Aus Gleichung 4.12 kann über die Matlabfunktion „c2d“ die zeitdiskrete Darstellung nach dem Schema  $x(t+1) = A_{diskret} \cdot x(t) + B_{diskret} \cdot u(t)$  berechnet werden.

Für die **Simulation** erfolgt die Berechnung der anderen Größen, aus den drei in Gleichung 4.11 bestimmten, über Matrix  $D$  und der vom aktuell genutzten Abgriff abhängigen Matrix  $C$ . Gleichung 4.8 wird dadurch zu Gleichung 4.13

$$y(t) = C \cdot \begin{bmatrix} I_p(t) \\ I_s(t) \end{bmatrix} + D \cdot U_p(t) \quad (4.13)$$

Matrix  $D$  enthält nur einen Eintrag für die Primärspannung  $u_p$ , die Spannungen an den Abgriffen sind über einen Faktor mit der Sekundärspannung verbunden. Da die Sekundärspannung nur mit Hilfe der Last definierbar ist, werden die Abgriffsspannungen über den Sekundärstrom berechnet.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{L_{s1}}{L_{aAgr}}} \cdot R_0 \\ 0 & \sqrt{\frac{L_{s2}}{L_{aAgr}}} \cdot R_0 \\ 0 & \sqrt{\frac{L_{s3}}{L_{aAgr}}} \cdot R_0 \\ 0 & R_0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Für die **Reconciliation** müssen die enthaltenen Redundanzen stärker formuliert werden. Die Matrizen  $\mathbf{C}$  und  $\mathbf{D}$  sind dadurch von der Trafostufe abhängig.

$y$	$\mathbf{C}$	$\mathbf{D}$	aAgr
$I_A$	$I_A \quad I_p \quad I_s \quad I_v \quad I_{SZ}$	$U_p \quad U_{s1} \quad U_{s2} U_{s3} U_v$	
$I_p$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
$I_s$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
$I_v$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
$I_{SZ}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
$U_p$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	1
$U_{s1}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & R_0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
$U_{s2}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{\frac{L_{s2}}{L_{s1}}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
$U_{s3}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{\frac{L_{s3}}{L_{s1}}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
$U_v$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	2
	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \sqrt{\frac{L_{s1}}{L_{s2}}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & R_0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \sqrt{\frac{L_{s3}}{L_{s2}}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$	
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	

$$\left| \begin{array}{cc} \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{\frac{L_{s1}}{L_{s3}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{\frac{L_{s2}}{L_{s3}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{matrix} \end{array} \right| \quad 3$$

**Tabelle 4.1:** Systemmatrizen  $\mathbf{C}$  und  $\mathbf{D}$  abhängig vom aktuellen Abgriff aAgr, also der aktuell gewählten Trafostufe.

Die Matrizen werden nach dem Schema 4.14 zur Systemmatrix zusammengesetzt. Die 0 vor der  $\mathbf{A}_{diskret}$ -Matrix soll andeuten, dass wegen dem im Größenvektor doppelt vorhandenen Primärstrom eine 0-Spalte eingefügt werden muss. Für jede Transistorstufe wird eine eigene Systemmatrix angelegt. Bei Stufenwechseln werden aus den beiden relevanten Systemmatrizen die zum entsprechenden Zeitpunkt gehörenden Zeilen zusammengesetzt und die zusammengesetzte Matrix verwendet. Da der letzte Zeitpunkt pro Abschnitt nur zur Bildung einer Differenz einzelner Werte dient, während für die anderen der Messwert übernommen wird, werden die reconcilierten Werte für diesen Zeitpunkt verworfen und die Werte im nächsten Zeitabschnitt mit berücksichtigt und reconciliert.

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} - \mathbb{I}_x & \mathbf{D} - \mathbb{I}_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0, \mathbf{A}_{diskret} & \mathbf{B}_{diskret} & -\mathbb{I}_x & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & \mathbf{C} - \mathbb{I}_x & \mathbf{D} - \mathbb{I}_u & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0, \mathbf{A}_{diskret} & \mathbf{B}_{diskret} & -\mathbb{I}_x & 0 & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Die für die Simulation und die Reconciliation verwendeten Varianzen sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Variable	$I_A$	$I_p$	$I_s$	$I_v$	$I_{SZ}$	$U_p$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_v$
Varianz $\sigma$	0.014A	0.014A	0.5A	0.4A	0.4 A	150V	3V	3V	3V	3V

**Tabelle 4.2:** Varianzen der Variablen

Die Frequenz des Spannungsverlaufs im (europäischen) Stromnetz liegt bei 50 Hz, die Kreisfrequenz wird also zu  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz}$ . Die gewählte Abtastrate liegt mit 1000 Hz bei der zehnfachen Nyquist-Frequenz und übererfüllt damit gemäß dem Nyquist-Theorem die Bedingung, die Informationen des analogen Signals zu erhalten. Die Reconciliation erfolgt in Abschnitten von 10 Zeitpunkten über längere simulierte Abschnitte.

## 4.2 Aufstellung des Vorwissens

Das Vorwissen zu Eigenschaften  $P_i$  der Komponenten mit dem Vorwissen-Skalierungsfaktor  $I_i$  wird in Tabelle 4.3 aufgestellt.

Eigenschaft $P_i$	Vorwissen-Skalierungsfaktor $I_i$	Größen $X_i$ mit Eigenschaft $P_i$
online konfigurierbar	1	$[I_v], [I_{SZ}]$
online kommuniziert	0,5	$[I_A], [U_v]$
falsche Trafostufe	1	$[U_p]$
Gemeinsames Messgerät	1	$[I_p, U_p], [I_v, U_v], [U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}]$
magnetisch gekoppelte Größen	0,5	$[I_s, U_p], [I_p, U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}]$
Ströme im Trafo	0,5	$[I_p, I_s]$
Spannungen im Trafo	0,5	$[U_p, U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}]$
gleicher Hersteller	0,5	$[I_A, I_s, I_{SZ}]$
gleiches Netz	1	$[I_v, I_{SZ}, U_v]$

**Tabelle 4.3:** Aufstellung informationstechnischer Eigenschaften von Größen des RONT, zur Verbesserung der Manipulationsdetektion

## 4.3 Simulationsbeispiele

Als Beispielmanipulationen des RONT, wird neben dem unmanipulierten Fall, eine Manipulation der Trafostufe und eine Manipulation der beiden Ströme im Trafo  $I_p$  und  $I_s$  simuliert. Die Manipulation der Trafostufe beutet, dass in der Steuerung eine falsche Trafostufe hinterlegt ist, wodurch eine weitere Anpassung des Trafos, die noch möglich wäre, nicht ausgeführt wird. Diese Manipulation äußert sich bei der Data Reconciliation in einer scheinbar um 20% veränderten Primärspannung  $U_p$ . Die gemeinsame Manipulation von Primär- und Sekundärstrom im Trafo ( $I_p$  und  $I_s$ ), ist eher als lokale Sabotage naheliegend und nur bedingt als Cyber-Angriff. Daher ist für diese Kombination auch eine Vulnerabilität von  $I_i = 0,5$  angesetzt und damit als Beispiel für eine reduzierte Vulnerabilität gewählt. Wegen der Betrachtung von Abschnitten über 10 Zeitpunkte, wird analog zum dynamischen Beispiel in Abschnitt 3.4.2, eine Manipulation um  $+4\sigma / \sqrt[4]{10} \approx +2,25\sigma$  betrachtet um eine Vergleichbarkeit mit der Manipulation des statischen Beispiels um  $3\sigma$  zu erhalten.

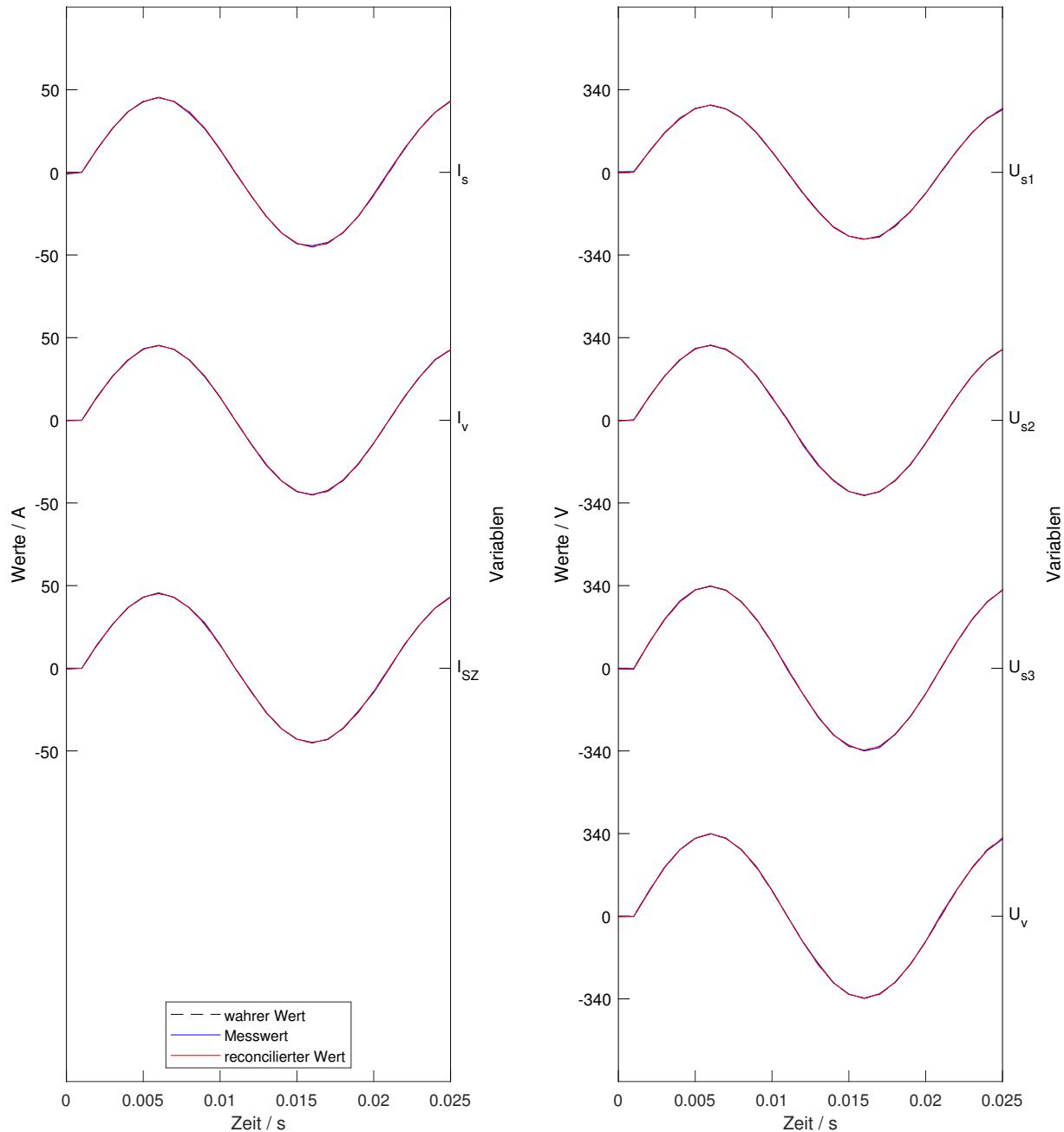
Die drei Detektionsmethoden werden also anhand der folgenden Fälle evaluiert:

- Beispiel Unmanipuliert: System mit statistischen Fehlern, ohne Manipulation
- Manipulationsbeispiel 1: falsche Trafostufe => Primärspannung  $U_p$  um 20% ihres Wertes

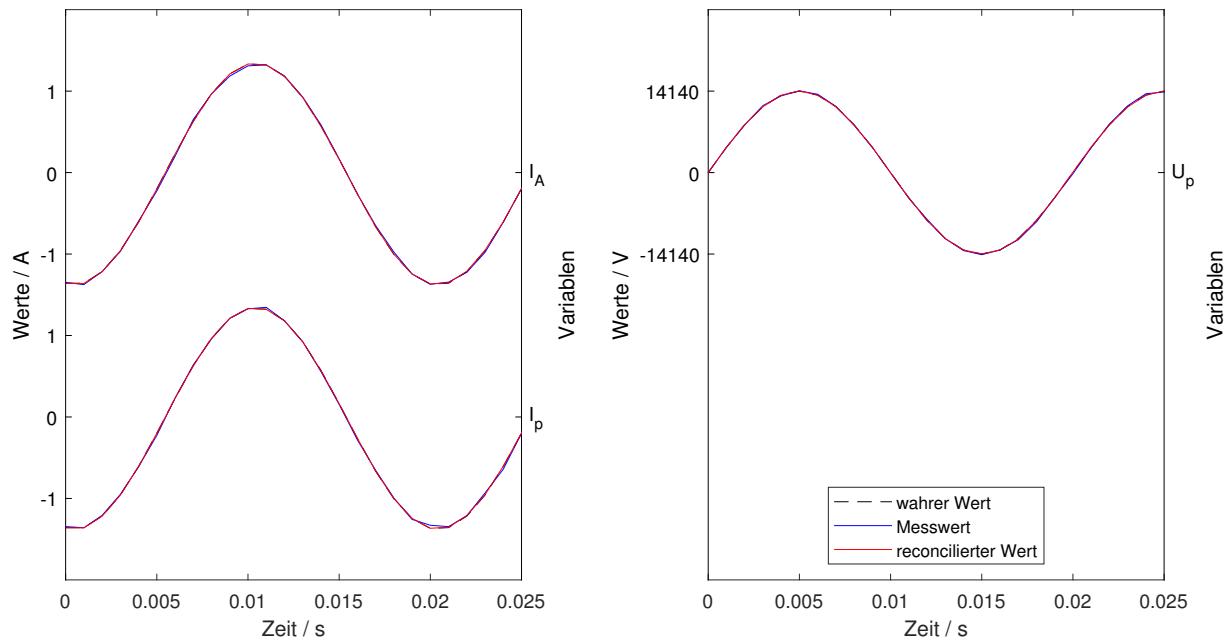
- Manipulationsbeispiel 2: Primärstrom  $I_p$  und Sekundärstrom  $I_s$  jeweils um  $+2,25\sigma$

Im Folgenden werden die Werte des Simulationsbeispiels für alle drei Fälle dargestellt (Abbildungen 4.4, 4.3, 4.5, 4.6, 4.8, 4.7). Schwarz gestrichelt sind jeweils die wahren Werte, blau die Messwerte und rot die reconcilierten Werte. Die statistischen Fehler sind, ebenso wie die Manipulationen relativ klein.

### Beispiel Unmanipuliert

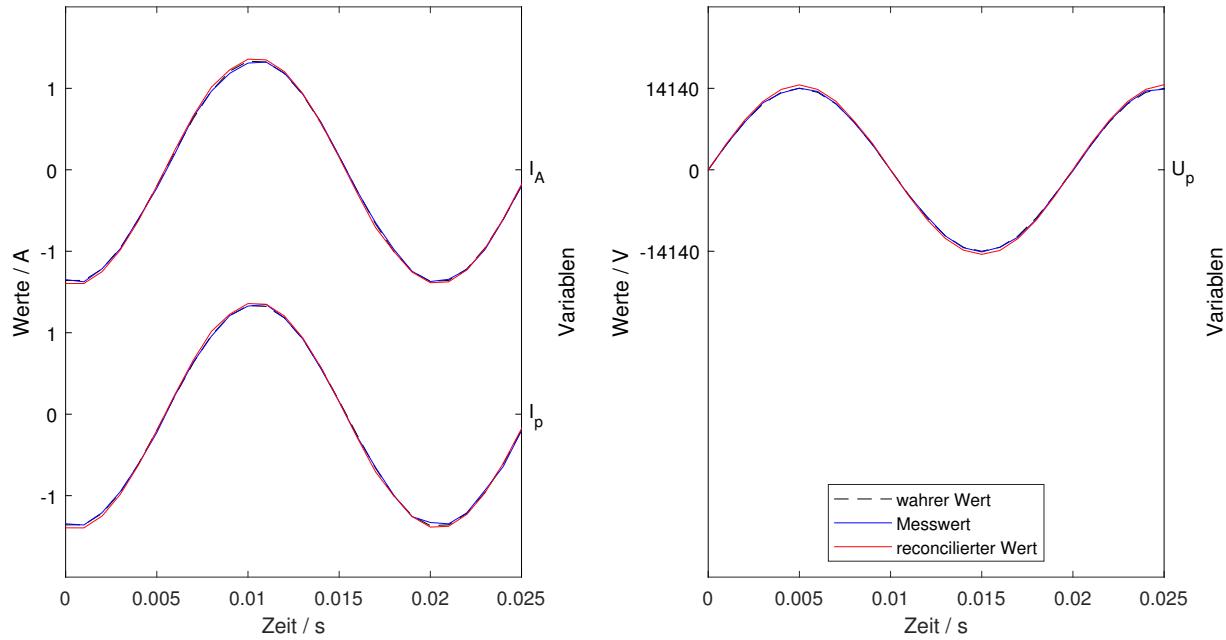


**Abbildung 4.3:** Sekundärstrom  $I_s$ , Verbraucherstrom  $I_v$ , Stromzählerwert  $I_{sz}$ , die Spannungen der drei Abgriffe für die Trafostufen  $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$ ,  $U_{s3}$  und der Verbraucherstrom  $U_v$  im unmanipulierten Fall.



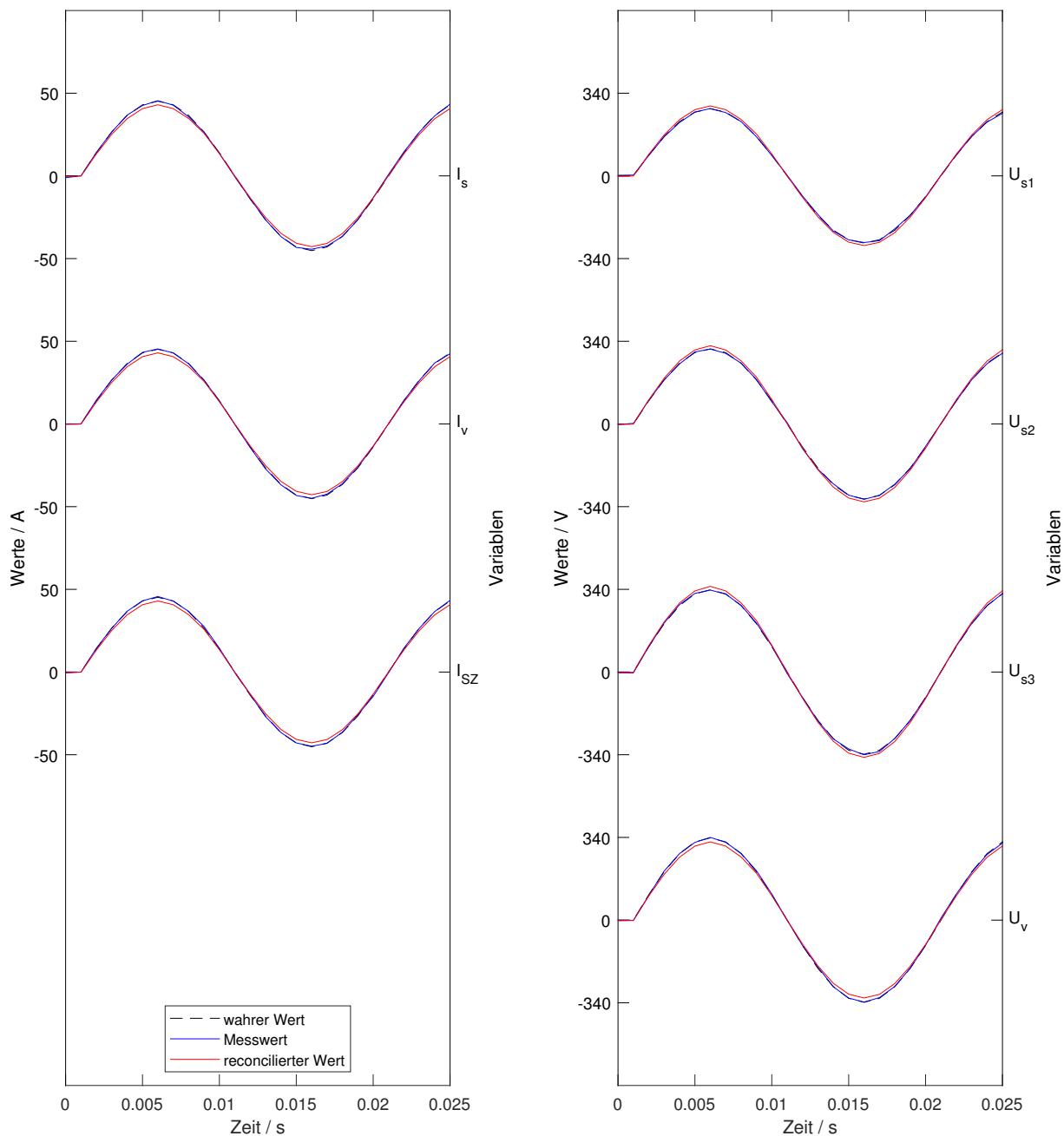
**Abbildung 4.4:** Anschlussstrom  $I_A$ , Primärstrom  $I_p$  und Primärspannung  $U_p$  im unmanipulierten Fall.

### Manipulationsbeispiel 1



**Abbildung 4.5:** Anschlussstrom  $I_A$ , Primärstrom  $I_p$  und Primärspannung  $U_p$  mit Manipulation der Trafostufe und daraus resultierender scheinbarer Verschiebung der Primärspannung  $U_p$ .

Die Abweichung durch die Manipulation wirkt klein, weil sie nicht als tatsächlich verschobene Werte auftritt, sondern nur durch die veränderte Erwartung des Modells mit dem die Reconciliation durchgeführt wird. Dadurch wird der 20% große Fehler, wie bei allen Mani-



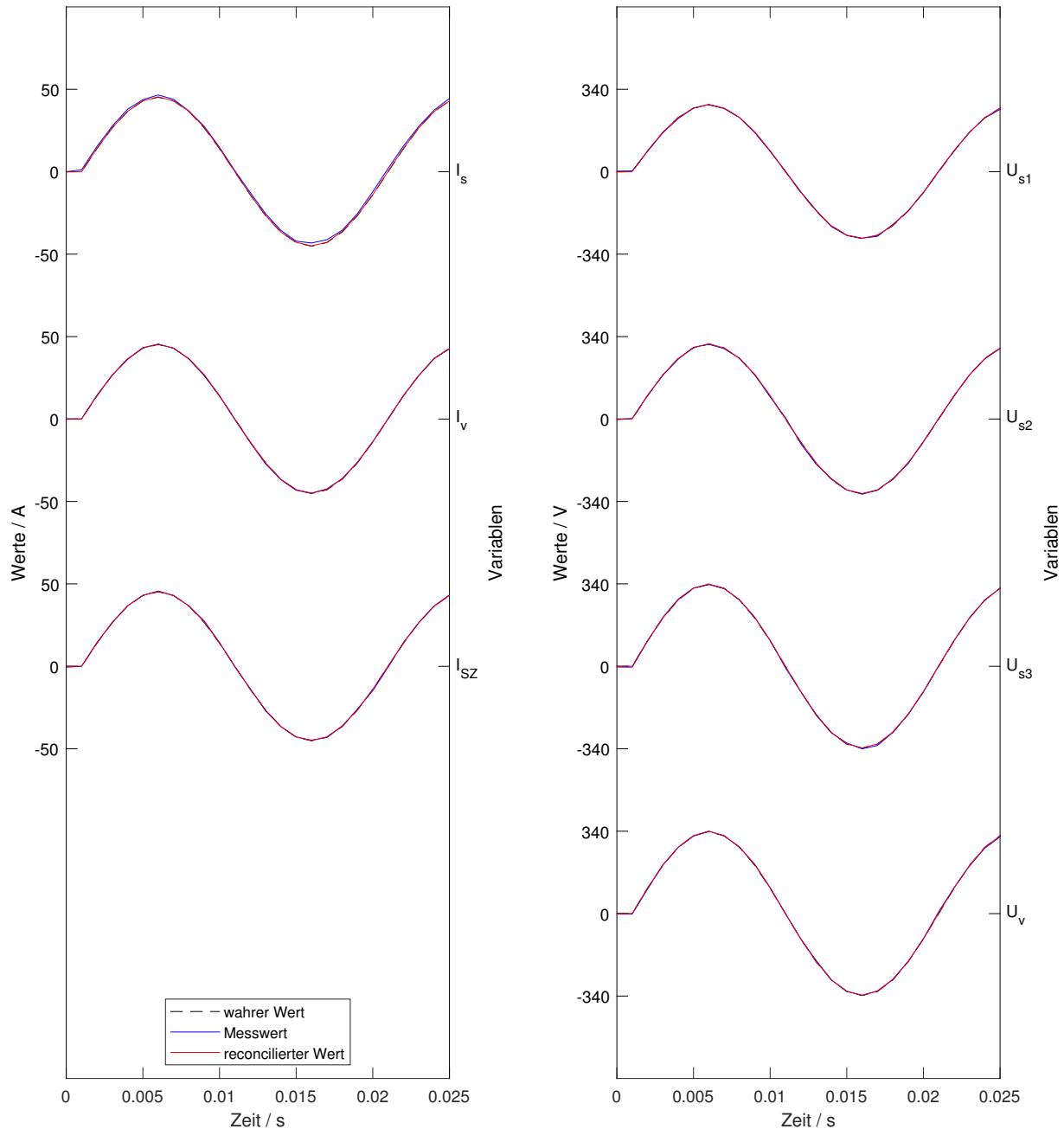
**Abbildung 4.6:** Sekundärstrom  $I_s$ , Verbraucherstrom  $I_v$ , Stromzählerwert  $I_{sz}$ , die Spannungen der drei Abgriffe für die Trafostufen  $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$ ,  $U_{s3}$  und der Verbraucherstrom  $U_v$  mit Manipulation der Trafostufe und daraus resultierender scheinbarer Verschiebung der Primärspannung  $U_p$ .

pulationen, auf alle Größen verteilt, wobei die höchste Abweichung bei der Primärspannung verbleibt. Die Manipulation äußert sich hier also nur durch eine Abweichung der reconcilierten Werte.

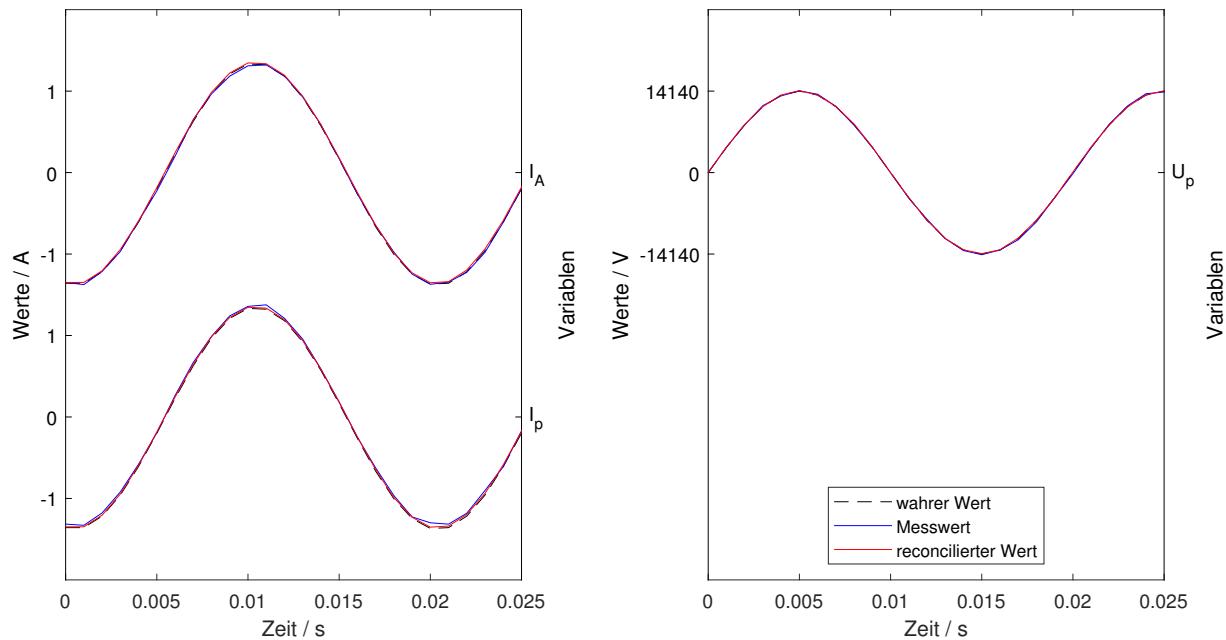
### Manipulationsbeispiel 2

Durch die geringen statistischen Fehler, können sehr geringe Manipulationen detektiert wer-

den. In diesem Beispiel sind Primärstrom  $I_p$  und Sekundärstrom  $I_s$  um  $+2,25\sigma$  manipuliert. Die Abbildungen 4.8 und 4.7 zeigen eine klare Abweichung der blauen Messwerte von den schwarz gestrichelten wahren Werten. Die reconcilierte Werte liegen zwischen beiden.



**Abbildung 4.7:** Sekundärstrom  $I_s$ , Verbraucherstrom  $I_v$ , Stromzählerwert  $I_{sz}$ , die Spannungen der drei Abgriffe für die Trafostufen  $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$ ,  $U_{s3}$  und der Verbraucherstrom  $U_v$  mit Manipulation des Primär- und Sekundärstroms ( $I_p$  und  $I_s$ ).



**Abbildung 4.8:** Anschlussstrom  $I_A$ , Primärstrom  $I_p$  und Primärspannung  $U_p$  mit Manipulation des Primär- und Sekundärstroms ( $I_p$  und  $I_s$ ).

## 4.4 Messwerttest

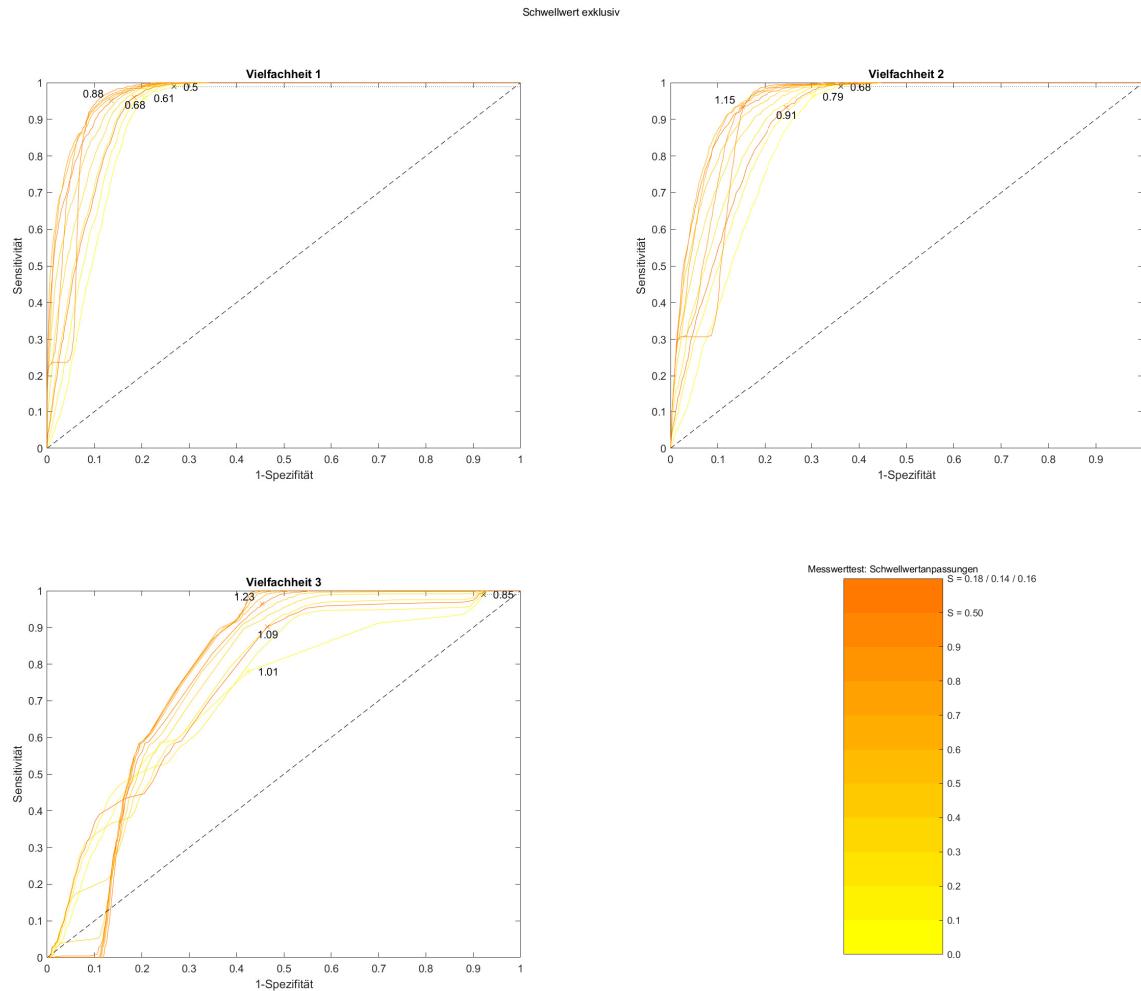
### 4.4.1 Schwellwertanpassung

Für die Berechnung der Schwellwertanpassung über die Richtig-Positiv-Rate muss für die Vergleichbarkeit mit dem statischen Beispiel berücksichtigt werden, dass die Prüfgrößen aus Werten von 10 Zeitpunkten berechnet werden. Die Forderung einer Richtig-Positiv-Rate von 97% für die Einzelpunkte führt gemäß Gleichung 3.9 zu einer Richtig-Positiv-Rate von 99% für 10 Zeitpunkte. Die Forderung einer Richtig-Positiv-Rate von 99% wird im Folgenden zur Berechnung der Schwellwertanpassungen verwendet. In Abbildung 4.9 ist der jeweilige Schnittpunkt einer Gerade bei einer Richtig-Positiv-Rate von 99% mit der ROC-Kurve ohne Schwellwertanpassung für die entsprechende Vielfachheit gekennzeichnet und beschriftet. Die Schwellwerte an den Schnittpunkten liegen bei  $SW_{99\%-1\_MT} = 0,50$ ,  $SW_{99\%-2\_MT} = 0,68$  und  $SW_{99\%-3\_MT} = 0,85$ . Zusammen mit den optimalen Schwellwerten auf den ROC-Kurven ohne Schwellwertanpassungen von  $SW_{\text{ohne-1\_MT}} = 0,61$ ,  $SW_{\text{ohne-2\_MT}} = 0,79$  sowie  $SW_{\text{ohne-3\_MT}} = 1,01$ , die in Abb. 4.9 ebenfalls markiert sind, ergeben sich über Gleichung 3.7 Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_MT} = 0,18$ ,  $SA_{2\_MT} = 0,14$  und  $SA_{3\_MT} = 0,16$ .

Die Schwellwertanpassung aus dem Störverhältnis  $SA_{MT}$ , die über Gleichung 3.11 berechnet wird, führt, aufgrund der Normierung der Prüfgrößen, wie in den Beispielen zu einer maximalen Schwellwertanpassung von  $SA_{MT} = 0,50$ .

#### 4.4.2 Schwellwerte

In den ROC-Kurven in Abb. 4.9 werden die Schwellwerte  $SW_{0\_x\_MT}$  und  $SW_{\text{ohne\_}x\_MT}$  über den optimalen Schwellwert, mit dem größten Abstand zur Diagonale, bestimmt. Die Beschriftung zeigt auch auf der ROC-Kurve mit Schwellwertanpassung die allgemeinen Schwellwerte  $SW_{0\_x\_MT}$ , die für erwartete Manipulationen gemäß Gleichung 3.5 angepasst werden.



**Abbildung 4.9:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Messwerttest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert werden jeweils nur die Kombinationen betrachtet, die alle manipulierten Größen und ausschließlich diese enthalten. Die optimalen Schwellwerte bei den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{MT} = 0,18$ ,  $SA_{MT} = 0,14$  bzw.  $SA_{MT} = 0,16$  und der Schwellwertanpassung  $SA_{MT} = 0,50$  für alle Vielfachheiten sowie auf den Kurven ohne Anpassung sind markiert und beschriftet.

Die ROC-Kurven Abb. 4.9 dokumentieren eine deutliche Aussagekraft des Messwerttests und die Verbesserung durch die Nutzung der Zusatzinformationen.

Die Schwellwerte sind in der ROC-Kurve Abb. 4.9 beschriftet und in Tabelle 4.4 zusammen-

gefasst. Die Vielfachheit ist in der ersten Spalte aufgetragen. Für diese werden in der zweiten Spalte die Schwellwerte ohne Schwellwertanpassung angegeben, die auch für den Vergleich mit der klassischen Detektionsmethode herangezogen werden. In der dritten Spalte sind die Schwellwerte angegeben, für die Kurven mit der Schwellwertanpassung, die über das Störverhältnis bestimmt wurde. In der vierten Spalte sind die Schwellwerte für die Schwellwertanpassung aus der Richtig-Positiv-Rate dargestellt. Für beide Methoden wird der allgemeine Schwellwert  $SW_{0,k\_MT}$  und die angepassten Schwellwerte (mit  $I_i = 1$  und  $I_i = 0,5$ ), die für die erwarteten Manipulationen gültig sind, aufgeführt. Als tatsächlich manipuliert, also richtig-positiv oder falsch-negativ, betrachtet werden hier nur die vollständigen manipulierten Kombinationen, nicht jedoch Untermengen davon.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{MT} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{MT} = 0,5$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_MT}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_MT}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	0,61	0,88	0,44/0,66	0,68
2	0,79	1,15	0,58/0,86	0,91
3	1,01	1,23	0,62/0,92	1,09

**Tabelle 4.4:** Schwellwerte für Detektion über den Messwerttest.

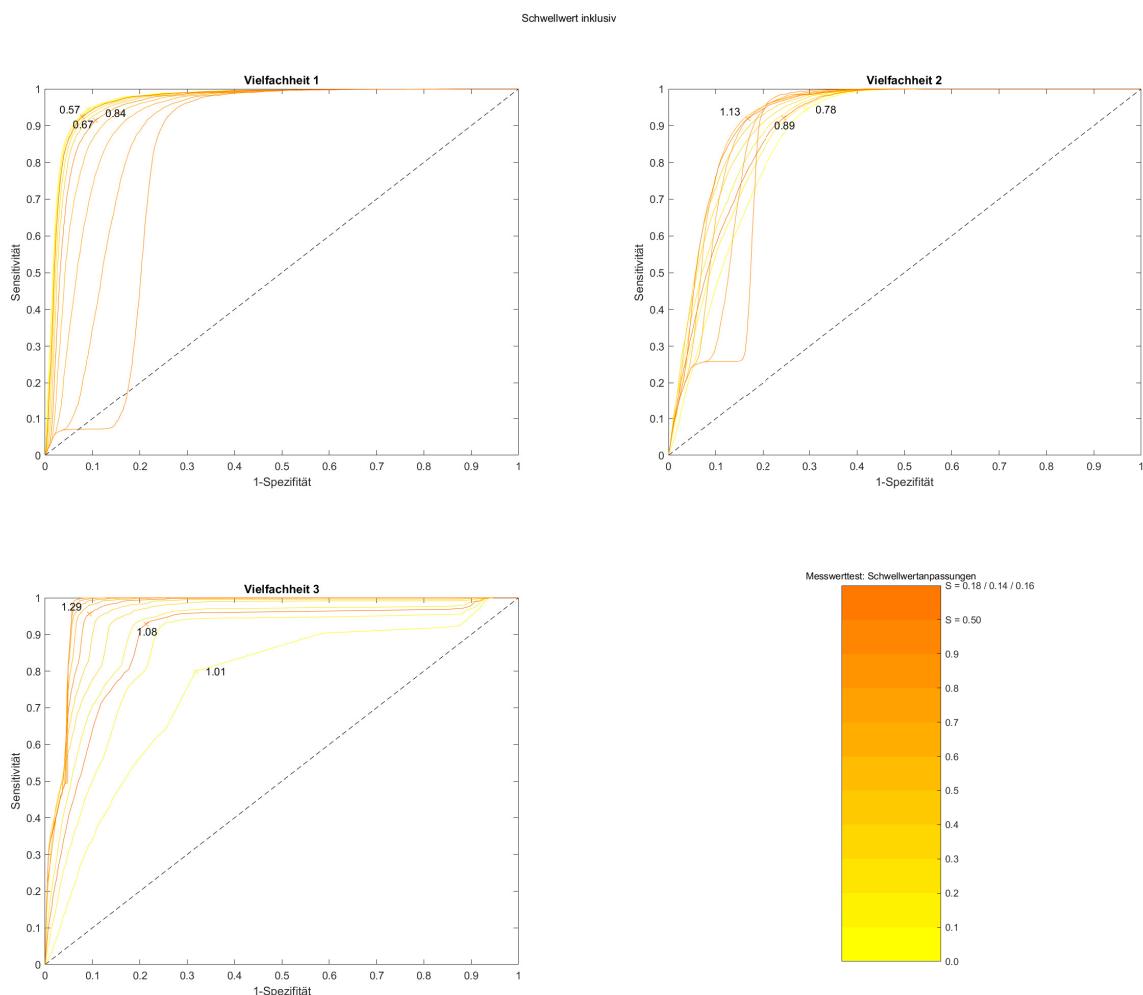
Die Vorauswahl von Kombinationen für die Untersuchung auf Manipulationen der nächst höheren Vielfachheit, erfolgt über Schwellwerte, die auf ROC-Kurven (Abb. 4.10) bestimmt werden, bei denen jede Untermenge einer manipulierten Kombination als tatsächlich manipuliert, also als richtig-positiv oder falsch-negativ betrachtet wird.

Eine Anpassung der Schwellwerte erfolgt hier für die Untermengen der erwarteten Kombinationen. Die Schwellwerte sind in den ROC-Kurven in Abbildung 4.10 aufgetragen und in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{MT} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{MT} = 0,5$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_MT}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_MT}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	0,57	0,67	0,34/0,50	0,84
2	0,78	1,13	0,57/0,85	0,89
3	1,01	1,29	0,65/0,97	1,08

**Tabelle 4.5:** Schwellwerte für Vorauswahl von Kombinationen zur Detektion von Kombinationen höherer Vielfachheit mit Hilfe des Messwerttests.

Interessant ist bei dieser Betrachtung insbesondere die Schwellwertanpassung für die Einzelgrößen. Die Schwellwertanpassung führt hier zu einer so starken Reduzierung der Spezifität, dass für die Vorauswahl für die Einzelgrößen der Schwellwert auf der Kurve ohne Schwellwertanpassung verwendet wird. Wie in den Beispielen wird in der folgenden Auswertung diese Schwellwertanpassung von  $SA_{MT} = 0,50$  verwendet.



**Abbildung 4.10:** ROC-Kurve für die Identifikation von Kandidaten für Manipulationen mit höherer Vielfachheit mit dem Messwerttest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als 'manipuliert' werden alle Untermengen der tatsächlich manipulierten Kombinationen betrachtet. Der optimale Schwellwert ist ohne Schwellwertanpassung und mit den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen markiert und beschriftet.

#### 4.4.3 Beispiel Unmanipuliert

Die Prüfgrößen der Einzelgrößen für das unmanipulierte System sind in Tabelle 4.6 aufgestellt. Die Größen, die den Schwellwert zur Vorauswahl für die Detektion von Kombinationen der nächst höheren Vielfachheit überschreiten, sind in den Tabellen blass rot markiert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	0,6067	0,9169	0,3386	-0,5414	-0,3214
$I_p$	0,3716	0,7383	0,3230	-0,5570	-0,5570
$I_s$	0,6898	0,9832	0,2862	-0,5938	-0,5938
$I_v$	0,9038	0,9888	0,1600	-0,7200	-0,2800
$I_{SZ}$	0,7512	0,8807	0,2610	-0,6190	-0,1790
$U_p$	0,0017	0,8400	0,3135	-0,5665	-0,1265

$U_{s1}$	0,0960	0,9501	0,3885	-0,4915	-0,4915
$U_{s2}$	0,0925	0,8220	0,5298	-0,3502	-0,3502
$U_{s3}$	0,1092	0,9520	0,5829	-0,2971	-0,2971
$U_v$	0,1074	0,9636	0,2627	-0,6173	-0,3973

**Tabelle 4.6:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,88 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition  $I_p, I_s, U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}$  oder für die der angepasste Schwellwert von 0,44 gilt für die stark exponierten Größen  $I_v, I_{SZ}, U_p$  und 0,66 gilt für die moderat exponierten Größen  $I_A, U_v$ . Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Der Messwerttest liefert für die Einzelgrößen im unmanipulierten Fall keine Detektion. In Tabelle 4.7 sind die Kombinationen der Vielfachheit 2 mit den Größen  $I_A, U_{s1}, U_{s2}$  und  $U_{s3}$  dargestellt, die den Schwellwert von 1,27 für die Vorauswahl zur Detektion von Manipulationen höherer Vielfachheit überschreiten.

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	$I_p$	0,3577	0,7033	0,0741	-1,0759	-1,0759
$I_A$	$I_s$	0,6892	0,9785	0,2829	-0,8671	-0,8671
$I_A$	$I_v$	0,9056	0,9834	0,1259	-1,0241	-1,0241
$I_A$	$I_{SZ}$	0,7548	0,8659	0,2800	-0,8700	-0,8700
$I_A$	$U_p$	0,0017	0,8167	0,2983	-0,8517	-0,8517
$I_A$	$U_{s1}$	0,0972	0,9424	0,3556	-0,7944	-0,7944
$I_A$	$U_{s2}$	0,0939	0,8216	0,5396	-0,6104	-0,6104
$I_A$	$U_{s3}$	0,1093	0,9540	0,6239	-0,5261	-0,5261
$I_A$	$U_v$	0,1064	0,9472	0,2588	-0,8912	-0,8912
$U_{s1}$	$I_A$	0,6157	0,9081	0,3429	-0,8071	-0,8071
$U_{s1}$	$I_p$	0,3725	0,7081	0,3266	-0,8234	-0,8234
$U_{s1}$	$I_s$	0,6669	0,9649	0,2913	-0,8587	-0,8587
$U_{s1}$	$I_v$	0,9284	0,9888	0,1858	-0,9642	-0,9642
$U_{s1}$	$I_{SZ}$	0,7624	0,8914	0,2387	-0,9113	-0,9113
$U_{s1}$	$U_p$	0,0017	0,8426	0,3413	-0,8087	-0,8087
$U_{s1}$	$U_{s2}$	0,0897	0,7717	0,5331	-0,6169	-0,6169
$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,1124	0,9413	0,5677	-0,5823	-0,5823
$U_{s1}$	$U_v$	0,1118	0,9596	0,2698	-0,8802	-0,8802
$U_{s2}$	$I_A$	0,6194	0,9119	0,3406	-0,8094	-0,8094
$U_{s2}$	$I_p$	0,3760	0,7144	0,3188	-0,8312	-0,8312
$U_{s2}$	$I_s$	0,6902	0,9666	0,2331	-0,9169	-0,9169
$U_{s2}$	$I_v$	0,9523	0,9975	0,1621	-0,9879	-0,9879
$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,7083	0,8772	0,2768	-0,8732	-0,8732
$U_{s2}$	$U_p$	0,0018	0,8498	0,2996	-0,8504	-0,8504
$U_{s2}$	$U_{s1}$	0,0903	0,9095	0,4413	-0,7087	-0,7087
$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,1149	0,9311	0,5943	-0,5557	-0,5557
$U_{s2}$	$U_v$	0,1145	0,9713	0,2198	-0,9302	-0,9302
$U_{s3}$	$I_A$	0,6103	0,9113	0,3294	-0,8206	-0,8206

$U_{s3}$	$I_p$	0,3764	0,7081	0,3247	-0,8253	-0,8253
$U_{s3}$	$I_s$	0,7084	0,9851	0,2733	-0,8767	-0,8767
$U_{s3}$	$I_v$	0,8662	0,9697	0,1314	-1,0186	-1,0186
$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,7292	0,8545	0,2702	-0,8798	-0,8798
$U_{s3}$	$U_p$	0,0018	0,8370	0,3159	-0,8341	-0,8341
$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0974	0,9433	0,3430	-0,8070	-0,8070
$U_{s3}$	$U_{s2}$	0,0928	0,8012	0,5596	-0,5904	-0,5904
$U_{s3}$	$U_v$	0,1088	0,9767	0,2464	-0,9036	-0,9036

**Tabelle 4.7:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,15 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,575 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten [ $I_v, U_v$ ] und [ $I_p, U_p$ ] und 0,8625 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten [ $I_p, I_s$ ] und [ $I_s, U_p$ ]. Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Auch unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 finden sich in Tabelle 4.7 keine Detektionen. Der Schwellwert für Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 3 von 1,13 wird von den Kombinationen [ $I_A, U_{s3}$ ], [ $U_{s1}, U_{s3}$ ] und [ $U_{s2}, U_{s3}$ ] überschritten. Kombinationen der Vielfachheit 3 mit dieser Vorauswahl werden in Tabelle 4.8 dargestellt.

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	$U_{s3}$	$I_p$	0,0026	0,0057	1,0083	-0,2217
$I_A$	$U_{s3}$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9953	-0,2347
$I_A$	$U_{s3}$	$I_v$	0,0920	0,1111	0,9985	-0,2315
$I_A$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,0088	0,0177	0,9980	-0,2320
$I_A$	$U_{s3}$	$U_p$	4,85e-63	0,00 e+0	0,9914	-0,2386
$I_A$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0052	0,0752	0,9997	-0,2303
$I_A$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	2,30 e-6	2,24 e-5	0,9984	-0,2316
$I_A$	$U_{s3}$	$U_v$	0,0129	0,1105	0,9989	-0,2311
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_A$	0,6209	0,9011	0,3335	-0,8965
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_p$	0,3783	0,6748	0,3290	-0,9010
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_s$	0,6809	0,9662	0,2779	-0,9521
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_v$	0,8934	0,9642	0,0999	-1,1301
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,7414	0,8630	0,2458	-0,9842
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_p$	0,0018	0,8430	0,3487	-0,8813
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	0,0896	0,7419	0,5674	-0,6626
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_v$	0,1153	0,9733	0,2530	-0,9770
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_p$	0,3827	0,6824	0,3201	-0,9099
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_s$	0,7106	0,9690	0,2096	-1,0204
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_v$	0,9211	0,9817	0,1291	-1,1009
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,6711	0,8419	0,2976	-0,9324
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_p$	0,0018	0,8520	0,3001	-0,9299
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0910	0,8920	0,4002	-0,8298
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_v$	0,1196	0,9868	0,1595	-1,0705

**Tabelle 4.8:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,23 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 1,23 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,615 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten  $[I_v, I_{SZ}, U_v]$  und  $[U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}]$ . Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 mit diesen vorausgewählten Kombinationen, finden sich in Tabelle 4.8 weder weitere Detektionen noch Hinweise auf Manipulationen höherer Vielfachheit.

Der Messwerttest erkennt den nicht manipulierten Fall also richtig als unmanipuliert.

#### 4.4.4 Manipulationsbeispiel 1

Für das erste Manipulationsbeispiel, mit manipulierter Transformatorstufe, sind die Prüfgrößen der Einzelgrößen in Tabelle 4.9 aufgestellt. Die manipulierte Transformatorstufe führt zu einer Verschiebung der Primärspannung  $U_p$ . Alle Größen, die eine Detektion liefern sind rot eingefärbt, eine blass rote Färbung zeigt Größen, die zusätzlich die Vorauswahl für die Detektion von Manipulationen der nächst höheren Vielfachheit erfüllen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	0,2278	0,4775	0,1734	-0,7066	-0,4866
$I_p$	0,2607	0,4494	0,7923	-0,0877	-0,0877
$I_s$	0,2154	0,3307	1,9547	1,0747	1,0747
$I_v$	0,1499	0,2174	2,9557	2,0757	2,5157
$I_{SZ}$	0,1872	0,2228	3,1074	2,2274	2,6674
$U_p$	7,76 e-4	0,3500	2,5721	1,6921	2,1321
$U_{s1}$	0,0349	0,3004	1,7294	0,8494	0,8494
$U_{s2}$	0,0175	0,1430	1,5855	0,7055	0,7055
$U_{s3}$	0,0368	0,3319	1,9159	1,0359	1,0359
$U_v$	0,0231	0,2473	2,7812	1,9012	2,1212

**Tabelle 4.9:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,88 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition  $I_p, I_s, U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}$  oder für die der angepasste Schwellwert von 0,44 gilt für die stark exponierten Größen  $I_v, I_{SZ}, U_p$  und 0,66 gilt für die moderat exponierten Größen  $I_A, U_v$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transformatorstufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.

Die Manipulationshöhe ist mit 20% des Wertes sehr hoch. Durch die Reconciliation, die Grundlage des Messwerttests ist, wird diese hohe Abweichung auf alle Größen verteilt. Daher liefert der Messwerttest für das erste Manipulationsbeispiel eine Detektion in allen Größen, außer  $I_A$  und  $I_p$ . Den Schwellwert von 1,27 für die Vorauswahl auf Manipulationen höherer Vielfachheit überschreiten alle Größen, außer  $I_A$ . Die Kombinationen der Vielfachheit 2 sind in Tabelle A.83 dargestellt. Auch dort finden sich Detektionen in der Mehrheit der Kombinationen. Bei der Betrachtung der Wahrscheinlichkeit, dass das System mit der gestesteten Größe nicht manipuliert ist  $Pr\{a|H_0\}$ , fällt auf, dass diese, sowohl für die Einzelgröße  $U_p$ , als auch für alle Kombinationen, deren letzte Komponente  $U_p$  ist, deutlich geringer ist, als in den anderen Fällen. Diese Kombinationen sind in Tabelle 4.10 zusammengestellt.

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_p$	$U_p$	7,00 e-4	0,3140	3,0070	1,8570	2,4320
$I_s$	$U_p$	9,86 e-4	0,4222	1,6405	0,4905	0,7780
$I_v$	$U_p$	9,36 e-4	0,4186	2,2621	1,1121	1,1121
$I_{SZ}$	$U_p$	9,46 e-4	0,4124	2,2519	1,1019	1,1019
$U_{s1}$	$U_p$	6,85 e-4	0,3051	2,7858	1,6358	1,6358
$U_{s2}$	$U_p$	6,48 e-4	0,3002	2,7924	1,6424	1,6424
$U_{s3}$	$U_p$	6,59 e-4	0,3145	2,8647	1,7147	1,7147
$U_v$	$U_p$	9,10 e-4	0,4228	2,2763	1,1263	1,1263

**Tabelle 4.10:** Kombinationen mit getester Größe  $U_p$ . Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,15 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,575 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 0,8625 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transformatorstufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.

Da beim Messwerttest im Fall von Mehrfachkombinationen alle verdächtigten Größen bis auf eine entfernt werden und der eigentliche Test an der verbleibenden Größe erfolgt, erlaubt der Wert vor allem Aussagen zu dieser getesteten Größe. Der Messwerttest liefert bei dieser Betrachtung also tatsächlich die Primärspannung  $U_p$  als manipulierte Größe. Die vorausgewählten Kombinationen der Vielfachheit 3 sind in Tabelle A.84 dargestellt. Dort können nicht für alle Kombinationen Werte berechnet werden, aber unter den Kombinationen die Detektionen aufweisen, ist ebenfalls der Zusammenhang zwischen der Primärspannung  $U_p$  als getester Größe und sehr geringen Wahrscheinlichkeiten dafür, dass in  $U_p$  keine Manipulation vorliegt, erkennbar.

#### 4.4.5 Manipulationsbeispiel 2

Für das zweite Beispiel wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primär- ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_s$ ) simuliert. Für diese Kombination gilt eine Vulnerabilität von  $I_i = 0,5$ , also eine verringerte Schwellwertanpassung. Die Detektion für die Einzelgrößen ist in Tabelle 4.11 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	0,3140	0,5818	2,1779	1,2979	1,5179
$I_p$	0,4330	0,5833	2,3259	1,4459	1,4459
$I_s$	0,1233	0,2974	2,1878	1,3078	1,3078
$I_v$	0,9401	0,9981	0,2517	-0,6283	-0,1883
$I_{SZ}$	0,6934	0,9123	0,2624	-0,6176	-0,1776
$U_p$	0,0015	0,7523	0,4444	-0,4356	0,0044
$U_{s1}$	0,0905	0,9268	0,6021	-0,2779	-0,2779
$U_{s2}$	0,0855	0,7918	0,6360	-0,2440	-0,2440
$U_{s3}$	0,1054	0,9210	0,4915	-0,3885	-0,3885
$U_v$	0,1116	0,9715	0,3086	-0,5714	-0,3514

**Tabelle 4.11:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,88 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition  $I_p, I_s, U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}$  oder für die der angepasste Schwellwert von 0,44 gilt für die stark exponierten Größen  $I_v, I_{SZ}, U_p$  und 0,66 gilt für die moderat exponierten Größen  $I_A, U_v$ . Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primär- ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_p$ ).

Unter den Einzelgrößen (Tabelle 4.11) finden sich Detektionen in den Größen  $I_A, I_p, I_s$  und  $U_p$ . Zusätzlich überschreiten auch die Größen  $U_{s1}, U_{s2}$  und  $U_{s3}$  den Schwellwert für die Untersuchung auf Manipulationen der nächst höheren Vielfachheit. Die Kombinationen der Vielfachheit 2, die diese Größen enthalten, sind in Tabelle A.85 dargestellt. In Tabelle 4.12 sind die Kombinationen zusammengefasst, die eine Detektion liefern.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A \quad I_s$	0,1215	0,2771	2,2349	1,0849	1,0849
$I_p \quad I_s$	0,1210	0,2838	2,1901	1,0401	1,3276
$I_s \quad I_A$	0,3171	0,5453	2,2364	1,0864	1,0864
$I_s \quad I_p$	0,4484	0,5745	2,2616	1,1116	1,3991
$U_p \quad I_A$	0,3148	0,5718	2,1446	0,9946	0,9946
$U_p \quad I_p$	0,4280	0,5749	2,3621	1,2121	1,7871
$U_p \quad I_s$	0,1246	0,2789	2,1814	1,0314	1,3189
$U_{s1} \quad I_A$	0,3144	0,5647	2,1708	1,0208	1,0208
$U_{s1} \quad I_p$	0,4305	0,5811	2,3339	1,1839	1,1839
$U_{s1} \quad I_s$	0,1417	0,3098	2,1514	1,0014	1,0014
$U_{s2} \quad I_A$	0,3194	0,5709	2,1723	1,0223	1,0223
$U_{s2} \quad I_p$	0,4337	0,5822	2,3325	1,1825	1,1825

$U_{s2}$	$I_s$	0,1427	0,3211	2,1384	0,9884	0,9884
$U_{s3}$	$I_A$	0,3156	0,5629	2,1808	1,0308	1,0308
$U_{s3}$	$I_p$	0,4241	0,5819	2,3231	1,1731	1,1731
$U_{s3}$	$I_s$	0,1243	0,2917	2,2348	1,0848	1,0848

**Tabelle 4.12:** Kombinationen, die eine Detektion liefern: Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,15 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,575 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 0,8625 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ . Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primär- ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_p$ ).

Es finden sich unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 zahlreiche weitere Detektionen. In allen Fällen sind die letzten, und damit die untersuchten Größen,  $I_s$ ,  $I_p$  und  $I_A$ . Die tatsächlich manipulierte Kombination  $[I_p, I_s]$  wird dabei in beiden Orientierungen mit der zweithöchsten bzw. dritthöchsten Differenz zur individuellen Schwelle detektiert. Eine weist außerdem unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 die geringste Wahrscheinlichkeit  $Pr\{a|H_0\}$  auf. Die Kombination mit der höchsten Differenz zum individuellen Schwellwert  $[U_p, I_p]$  liefert in umgekehrter Orientierung keine Detektion, was darauf hinweist, dass die Ursache für die Detektion in Größe  $I_p$  liegt. Tatsächlich weist im Modell  $U_p$  einen engen Zusammenhang mit  $I_s$  auf.

Die vorausgewählten Kombinationen der Vielfachheit 3 sind in Tabelle A.86 ausgewertet. In Tabelle 4.13 sind wieder die Kombinationen zusammengefasst, die eine Detektion liefern.

Größe Nr.			$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_s$	$U_p$	$I_A$	0,0506	0,1016	1,7426	0,5126	0,5126
$I_s$	$U_{s3}$	$I_A$	0,4516	0,6197	2,5141	1,2841	1,2841
$I_s$	$U_{s3}$	$I_p$	0,3444	0,5608	2,3506	1,1206	1,1206
$U_p$	$U_{s1}$	$I_A$	0,3150	0,5511	2,1372	0,9072	0,9072
$U_p$	$U_{s1}$	$I_p$	0,4246	0,5723	2,3706	1,1406	1,1406
$U_p$	$U_{s1}$	$I_s$	0,1449	0,2909	2,1407	0,9107	0,9107
$U_p$	$U_{s2}$	$I_A$	0,3209	0,5582	2,1386	0,9086	0,9086
$U_p$	$U_{s2}$	$I_p$	0,4279	0,5737	2,3691	1,1391	1,1391
$U_p$	$U_{s2}$	$I_s$	0,1457	0,2998	2,1275	0,8975	0,8975
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_A$	0,3215	0,5529	2,1637	0,9337	0,9337
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_p$	0,4303	0,5801	2,3423	1,1123	1,1123
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_s$	0,1691	0,3387	2,0897	0,8597	0,8597
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_A$	0,3177	0,5442	2,1730	0,9430	0,9430
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_p$	0,4194	0,5793	2,3322	1,1022	1,1022
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_s$	0,1469	0,3090	2,1979	0,9679	0,9679
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	0,0800	0,7121	0,7106	-0,5194	0,0956
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_A$	0,3239	0,5524	2,1746	0,9446	0,9446
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_p$	0,4230	0,5812	2,3305	1,1005	1,1005

$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_s$	0,1484	0,3223	2,1821	0,9521	0,9521
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0821	0,8424	0,6886	-0,5414	0,0736

**Tabelle 4.13:** Kombinationen, die eine Detektion liefern: Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,23 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 1,23 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,615 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten  $[I_v, I_{SZ}, U_v]$  und  $[U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}]$ . Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primär- ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_p$ ).

In Tabelle 4.13 ist zu sehen, dass fast alle detektierten Kombinationen als getestete, also letzte Größe  $I_A$ ,  $I_p$  oder  $I_s$  aufweisen. Lediglich zwei sehr geringe Schwellwertüberschreitungen treten für  $U_{s1}$  und  $U_{s2}$  auf. Da für die Ströme in keinem Fall Detektionen mit anderer Reihenfolge der Größen, also einer anderen Größe als geprüfter Größe auftreten, können sie verworfen werden. Auch die geringeren Differenzen zum individuellen Schwellwert sind etwas geringer.

Der Messwerttest liefert also auch für eine Manipulation der Kombination  $[I_p, I_s]$  die richtige Detektion.

## 4.5 Globaltest

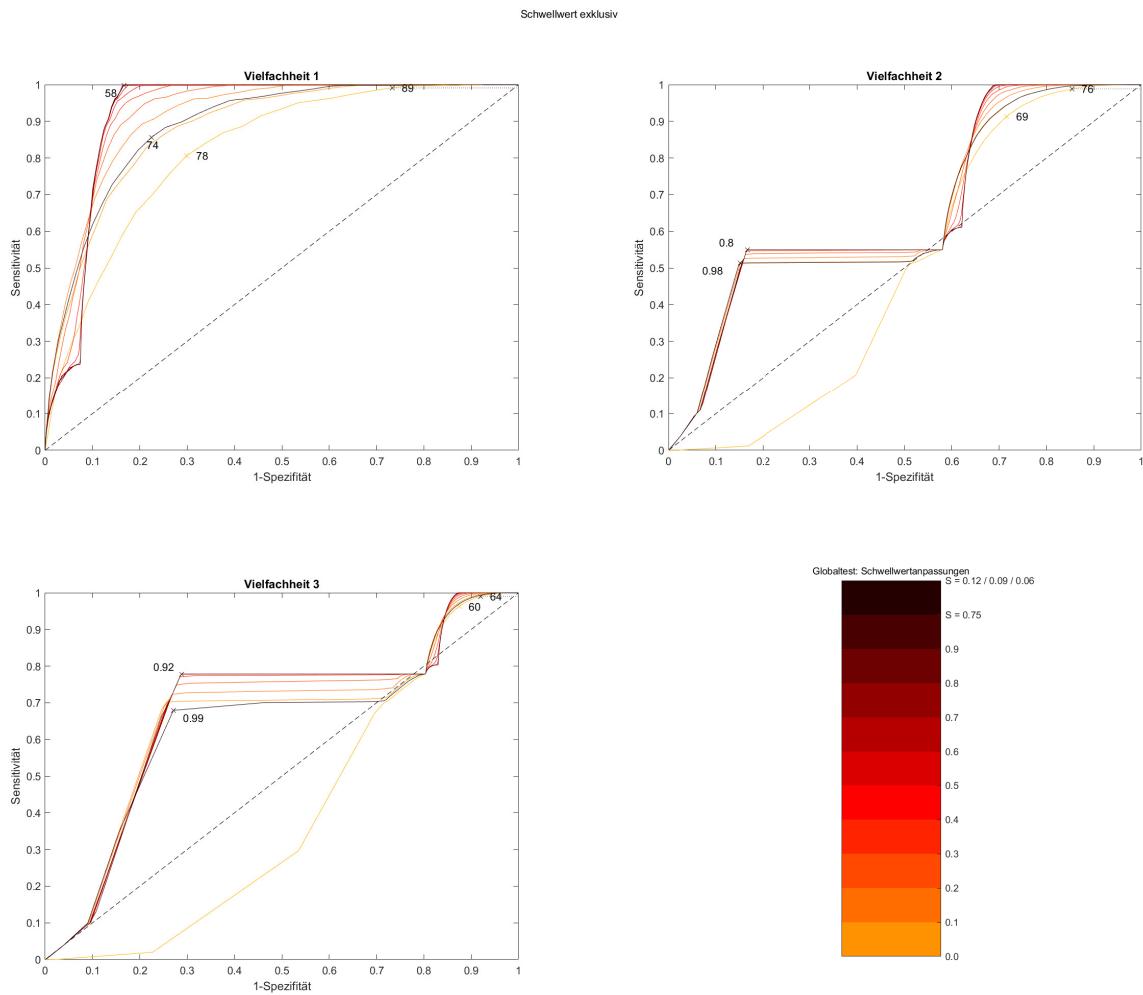
### 4.5.1 Schwellwertanpassung

Die Schwellwertanpassung über die Richtig-Positiv-Rate wird für den Globaltest über Gleichung 3.8 berechnet. In den ROC-Kurven in Abbildung 4.11 wird auf der Kurve ohne Schwellwertanpassung (der hellste Orangeton) sowohl der optimale Schwellwert bestimmt als auch der Schwellwert bei der Richtig-Positiv-Rate von 99%. Die Forderung einer Richtig-Positiv-Rate von 99% ergibt sich aus einer Berücksichtigung von 10 Zeitpunkten bei der Forderung einer Richtig-Positiv-Rate von 97% für Einzelzeitpunkte. Die optimalen Schwellwerte auf der ROC-Kurve ohne Schwellwertanpassung liegen bei  $SW_{\text{ohne\_1\_GT}} = 78$ ,  $SW_{\text{ohne\_2\_GT}} = 69$  und  $SW_{\text{ohne\_3\_GT}} = 60$ . Die Schwellwerte bei der Richtig-Positiv-Rate von 99% sind  $SW_{99\%,1\_GT} = 89$ ,  $SW_{99\%,2\_GT} = 76$  und  $SW_{99,7\%,3\_GT} = 64$  (rechts oben in den Abbildungen 4.11). Daraus ergeben sich Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_GT} = 0,12$ ,  $SA_{2\_GT} = 0,09$  und  $SA_{3\_GT} = 0,06$ .

Da die Prüfgröße beim Globaltest bei erfolgreicher Detektion den Wert 0 annimmt, ist die alternative Bestimmung über das Störverhältnis nicht direkt möglich. Allerdings ist die Prüfgröße abhängig vom Quadrat der Auslenkung der Manipulation. Analog zum Hypothesentest ist daher für normierte Schwellwerte eine Schwellwertanpassung aufgrund des Störverhältnisses von  $SA_{GT} = 0,75$  begründbar.

### 4.5.2 Schwellwerte

In Abbildung 4.11 sind die Schwellwerte auf den ROC-Kurven für die zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_GT} = 0,12$ ,  $SA_{2\_GT} = 0,09$  und  $SA_{3\_GT} = 0,06$  sowie  $SA_{GT} = 0,75$  markiert und beschriftet. Aufgrund der sehr geringen Schwellwertanpassungen aus der Richtig-Positiv-Rate, werden hier die ROC-Kurven aus den normierten Schwellwerten verwendet, um für die Detektion den optimalen Schwellwert für die Schwellwertanpassung aus dem Störverhältnis von  $SA_{GT} = 0,75$  verwenden zu können.



**Abbildung 4.11:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Globaltest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert wird jeweils nur die Kombination betrachtet, die alle manipulierten Größen und ausschließlich diese enthält. Die optimalen Schwellwerte bei den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_GT} = 0,12$ ,  $SA_{2\_GT} = 0,09$  und  $SA_{3\_GT} = 0,06$ , bei einer gemeinsamen Schwellwertanpassung von  $SA_{GT} = 0,75$  sowie ohne Anpassung sind markiert und beschriftet.

Beim Globaltest zeigt Abbildung 4.11, dass nicht alle Tests für alle Modelle geeignet sind. Für das vorliegende RONT-Modell ist der Globaltest nur eingeschränkt nutzbar. Für Einzelgrö-

ßen weist er noch eine hohe Aussagekraft auf, für Mehrfachfehler ist diese aber stark eingeschränkt. Die Form zeigt, dass es sowohl Kombinationen gibt, für die die Detektion funktioniert, als auch Kombinationen für die sie nicht funktioniert. Noch deutlicher zeigt sich dies bei der Auftragung mit nicht normierten Schwellwerten (Abbildung A.3). Allerdings weisen die ROC-Kurven dort auf eine sehr geringe Aussagekraft hin, was, neben der Verwendung der Schwellwertanpassung von  $SA_{GT} = 0,75$ , die nur für normierte Schwellwerte gültig ist, der Grund für die Verwendung der ROC-Kurven mit normierten Schwellwerten ist. In Tabelle 4.14 sind die Schwellwerte für die Detektion mit dem Globaltest angegeben. Neben den Schwellwerten auf der ROC-Kurve ohne Schwellwertanpassung (zweite Spalte) sind die allgemeinen und die angepassten Schwellwerte angegeben für die Schwellwertanpassung aus dem Störverhältnis (dritte Spalte) und aus der Richtig-Positiv Rate (vierte Spalte).

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{MT} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{MT} = 0,5$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_MT}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_MT}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	78	58 232,00/92,80	0,12	74 84,09/78,72
2	69	0,80 3,20/1,28	0,09	0,98 1,08/1,03
3	60	0,92 3,68/1,47	0,06	0,99 1,05/1,02

**Tabelle 4.14:** Schwellwerte für Detektion über den Globaltest.

Durch das iterative Vorgehen beim Globaltest ist eine Vorauswahl für eine Untersuchung auf Kombinationen höherer Vielfachheit nicht sinnvoll. Die ROC-Kurven, wie sie bei Messwerttest und Globaltest für die Vorauswahl möglicherweise manipulierter Kombinationen verwendet werden, sind im Anhang, Abbildung A.4 dargestellt. Die Kurven dokumentieren die sehr geringe Aussagekraft eines solchen Tests.

Die geringe Eignung des Globaltests zeigt sich auch in der Auswertung des Beispiels.

### 4.5.3 Beispiel Unmanipuliert

In Tabelle 4.15 sind der Test des gesamten Systems und die Einzelgrößen aufgeführt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	1,975593e-14	0,9884	0,0000	-58,0000	-58,0000
	1,774527e-11	0,9986	65,9908	7,9908	-26,8092
$I_p$	8,065164e-13	0,9858	65,3829	7,3829	7,3829
$I_s$	5,314689e-13	0,9832	68,9944	10,9944	10,9944
$I_v$	1,987709e-13	0,9752	71,0680	13,0680	-160,9320
$I_{SZ}$	8,073974e-14	0,9620	67,1021	9,1021	-164,8979
$U_p$	1,897773e-13	0,9760	67,8433	9,8433	-164,1567
$U_{s1}$	7,021826e-13	0,9856	69,5485	11,5485	11,5485
$U_{s2}$	2,200039e-13	0,9734	68,1620	10,1620	10,1620
$U_{s3}$	5,398919e-13	0,9831	69,4991	11,4991	11,4991
$U_v$	1,993018e-13	0,9718	69,2656	11,2656	-23,5344

**Tabelle 4.15:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 58 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition  $I_p, I_s, U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}$  oder für die der angepasste Schwellwert von 232 gilt für die stark exponierten Größen  $I_v, ISZ, U_p$  und 92,8 gilt für die moderat exponierten Größen  $I_A, U_v$ .

Die erste Zeile in Tabelle 4.15 deutet aufgrund der negativen Differenz zum Schwellwert auf ein unmanipuliertes System hin. Da dies aber nicht ebenfalls auf alle Einzelgrößen zurifft, wird das System hier als fehlerbehaftet betrachtet. Für Größen  $I_A, I_v, ISZ, U_p$  und  $U_v$ , die alle aufgrund der Schwellwertanpassung den individuellen Schwellwert unterschreiten, wird in der nächst höheren Vielfachheit geprüft, ob das System ohne diese Größen frei von Großfehlern sein könnte (Tabelle 4.16).

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	$I_v$	3,27e-11	0,9835	62,7506	61,9506	61,9506
$I_A$	$ISZ$	6,72e-11	0,9916	55,7426	54,9426	54,9426
$I_A$	$U_p$	0,00 e+0	0,0000	0,9982	0,1982	0,1982
$I_A$	$U_v$	0,00 e+0	0,0000	1,0099	0,2099	0,2099
$I_p$	$I_v$	7,28e-12	0,9685	59,4795	58,6795	58,6795
$I_p$	$ISZ$	0,00 e+0	0,0000	1,0038	0,2038	0,2038
$I_p$	$U_p$	0,00 e+0	0,0000	1,0005	0,2005	-2,1995
$I_p$	$U_v$	0,00 e+0	0,0000	1,0052	0,2052	0,2052
$I_s$	$I_v$	4,40e-12	0,9600	62,8202	62,0202	62,0202
$I_s$	$ISZ$	2,79e-12	0,9504	59,4254	58,6254	58,6254
$I_s$	$U_p$	0,00 e+0	0,0000	0,9976	0,1976	-0,2824
$I_s$	$U_v$	0,00 e+0	0,0000	1,0097	0,2097	0,2097
$I_v$	$ISZ$	8,40e-13	0,9247	61,0865	60,2865	60,2865
$I_v$	$U_p$	1,26e-12	0,9428	62,4643	61,6643	61,6643
$I_v$	$U_{s1}$	0,00 e+0	0,0000	1,0099	0,2099	0,2099
$I_v$	$U_{s2}$	9,79e-124	0,0000	1,2345	0,4345	0,4345
$I_v$	$U_{s3}$	0,00 e+0	0,0000	1,0097	0,2097	0,2097
$I_v$	$U_v$	0,00 e+0	0,0000	1,0097	0,2097	-2,1903
$ISZ$	$U_p$	8,09e-13	0,9308	58,0747	57,2747	57,2747
$ISZ$	$U_{s1}$	2,32e-12	0,9469	60,2633	59,4633	59,4633
$ISZ$	$U_{s2}$	0,00 e+0	0,0000	1,0097	0,2097	0,2097
$ISZ$	$U_{s3}$	0,00 e+0	0,0000	1,0097	0,2097	0,2097
$ISZ$	$U_v$	0,00 e+0	0,0000	1,0097	0,2097	0,2097
$U_p$	$U_{s1}$	5,56e-12	0,9667	60,6345	59,8345	59,8345
$U_p$	$U_{s2}$	1,53e-12	0,9388	59,0163	58,2163	58,2163
$U_p$	$U_{s3}$	0,00 e+0	0,0000	0,9985	0,1985	0,1985
$U_p$	$U_v$	0,00 e+0	0,0000	1,0001	0,2001	0,2001
$U_{s1}$	$U_v$	1,38e-111	0,0000	1,0999	0,2999	0,2999
$U_{s2}$	$U_v$	1,74e-12	0,9331	60,8489	60,0489	60,0489
$U_{s3}$	$U_v$	7,05e-12	0,9667	61,7175	60,9175	60,9175

**Tabelle 4.16:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,8 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 3,2 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 1,28 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ .

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle 4.16 unterschreiten lediglich die Kombinationen  $[I_p, U_p]$  und  $[I_v, U_v]$ , für die ebenfalls ein angepasster Schwellwert gilt, den individuellen Schwellwert. Es wird also keine der Einzelgrößen bestätigt, da hierfür alle Kombinationen mit einer Größe den Schwellwert unterschreiten müssten. Für die Kombinationen  $[I_p, U_p]$  und  $[I_v, U_v]$  können noch Kombinationen der Vielfachheit 3 untersucht werden (Tabelle 4.17).

Größe Nr.			$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_p$	$U_p$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0015	0,0815	0,0815
$I_p$	$U_p$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9977	0,0777	0,0777
$I_p$	$U_p$	$ISZ$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0036	0,0836	0,0836
$I_p$	$U_p$	$I_v$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0004	0,0804	0,0804
$I_p$	$U_p$	$U_{s1}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0006	0,0806	0,0806
$I_p$	$U_p$	$U_{s2}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0003	0,0803	0,0803
$I_p$	$U_p$	$U_{s3}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0039	0,0839	0,0839
$I_p$	$U_p$	$U_v$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0045	0,0845	0,0845
$I_v$	$U_v$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0099	0,0899	0,0899
$I_v$	$U_v$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0057	0,0857	0,0857
$I_v$	$U_v$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0097	0,0897	0,0897
$I_v$	$U_v$	$ISZ$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0097	0,0897	-2,6703
$I_v$	$U_v$	$U_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0005	0,0805	0,0805
$I_v$	$U_v$	$U_{s1}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0097	0,0897	0,0897
$I_v$	$U_v$	$U_{s2}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0097	0,0897	0,0897
$I_v$	$U_v$	$U_{s3}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0097	0,0897	0,0897

**Tabelle 4.17:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,92 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 0,92 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 3,68 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten  $[I_v, ISZ, U_v]$  und  $[U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}]$ .

In Tabelle 4.17 findet sich keine Kombination, die den Schwellwert unterschreitet. Der Globaltest liefert für den unmanipulierten Fall also keine klare Informationen über das System.

#### 4.5.4 Manipulationsbeispiel 1

Bei Manipulationsbeispiel 1 soll Größe  $U_p$  detektiert werden, die durch eine manipulierte Transformatorstufe verschoben sein soll. Tabelle 4.18 zeigt die Bewertung des nicht reduzierten Systems und des um jeweils eine Größe reduzierten Systems.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
	1,683224e-228	0	0,0000	-58,0000	-58,0000
$I_A$	1,847929e-215	0	914,9495	856,9495	822,1495
$I_p$	5,035621e-209	0	889,7019	831,7019	831,7019
$I_s$	1,022796e-202	0	851,5823	793,5823	793,5823
$I_v$	2,560107e-188	0	802,9437	744,9437	570,9437
$I_{SZ}$	4,764100e-184	0	771,4993	713,4993	539,4993
$U_p$	2,836628e-214	0	900,8100	842,8100	668,8100
$U_{s1}$	6,887482e-210	0	871,1169	813,1169	813,1169
$U_{s2}$	3,685739e-208	0	861,3568	803,3568	803,3568
$U_{s3}$	5,340427e-209	0	866,3232	808,3232	808,3232
$U_v$	1,994610e-189	0	809,1532	751,1532	716,3532

**Tabelle 4.18:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 58 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition  $I_p, I_s, U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}$  oder für die der angepasste Schwellwert von 232 gilt für die stark exponierten Größen  $I_v, I_{SZ}, U_p$  und 92,8 gilt für die moderat exponierten Größen  $I_A, U_v$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transformatorstufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.

In Tabelle 4.18 scheint die Bewertung des unreduzierten Systems darauf hin zu deuten, dass kein Großfehler vorhanden ist. Unter den Einzelgrößen unterschreitet jedoch keine den individuellen Schwellwert. Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 (Tabelle A.87) finden sich wieder Detektionen in den Kombinationen  $[I_p, U_p]$ ,  $[I_s, U_p]$  und  $[I_v, U_v]$ . Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 mit diesen beiden Kombinationen (Tabelle A.88) findet sich, ebenfalls aufgrund der Schwellwertverschiebung, eine Detektion in Kombination  $[I_v, U_v, I_{SZ}]$ .

Auch für Manipulationsbeispiel 1 liefert der Globaltest ein unklares Bild. Die Schwellwertverschiebung stellt dabei nicht wirklich einen Störfaktor dar, da das Bild ohne diese kaum anders wäre.

#### 4.5.5 Manipulationsbeispiel 2

Für Manipulationsbeispiel 2 wurden die Größen  $I_p$  und  $I_s$  um einen Betrag von  $+2,25\sigma$  manipuliert. Das unreduzierte Gesamtsystem und die Einzelgrößen werden in Tabelle 4.19 mit dem Globaltest untersucht.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	1,508419e-27	0,0074	0,0000	-58,0000	-58,0000
	4,267138e-18	0,4852	108,8925	50,8925	16,0925
	3,497505e-19	0,2990	106,8659	48,8659	48,8659
	1,044941e-19	0,2423	97,1295	39,1295	39,1295
$I_v$	1,147693e-26	0,0020	140,3960	82,3960	-91,6040
$ISZ$	5,120738e-27	0,0015	137,5768	79,5768	-94,4232
$U_p$	8,028250e-26	0,0045	134,2241	76,2241	-97,7759
$U_{s1}$	6,050564e-26	0,0035	138,6371	80,6371	80,6371
$U_{s2}$	2,088910e-26	0,0023	136,7748	78,7748	78,7748
$U_{s3}$	4,713486e-26	0,0032	138,0933	80,0933	80,0933
$U_v$	2,573166e-26	0,0025	139,3376	81,3376	46,5376

**Tabelle 4.19:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 58 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition  $I_p$ ,  $I_s$ ,  $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$ ,  $U_{s3}$  oder für die der angepasste Schwellwert von 232 gilt für die stark exponierten Größen  $I_v$ ,  $ISZ$ ,  $U_p$  und 92,8 gilt für die moderat exponierten Größen  $I_A$ ,  $U_v$ . Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primär- ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_p$ ).

Auch hier (Tabelle 4.19) weist die Unterschreitung des Schwellwerts für das Gesamtsystem auf ein unmanipuliertes System hin, wogegen aber die Überschreitungen der Schwellwerte in den Einzelgrößen spricht. Für die Größen  $I_v$ ,  $ISZ$  und  $U_p$ , die aufgrund der Schwellwertanpassung den Schwellwert unterschreiten, werden Kombinationen der Vielfachheit 2 untersucht (Tabelle 4.20).

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_v$ $I_A$	4,71e-20	0,0474	122,1870	121,3870	121,3870
$I_p$ $I_v$	2,59e-18	0,1663	100,3641	99,5641	99,5641
$I_v$ $I_s$	8,73e-19	0,1274	90,9665	90,1665	90,1665
$I_v$ $ISZ$	3,73e-26	2,80 e-4	131,2596	130,4596	130,4596
$I_v$ $U_p$	3,88e-25	8,92 e-4	128,3715	127,5715	127,5715
$I_v$ $U_{s1}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0098	0,2098	0,2098
$I_v$ $U_{s2}$	1,24e-143	0,00 e+0	1,4048	0,6048	0,6048
$I_v$ $U_{s3}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0097	0,2097	0,2097
$I_v$ $U_v$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0097	0,2097	-2,1903
$ISZ$ $I_A$	1,49e-17	0,2476	99,4538	98,6538	98,6538
$ISZ$ $I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0173	0,2173	0,2173
$ISZ$ $I_s$	5,26e-19	0,1115	87,6694	86,8694	86,8694

$I_{SZ}$	$I_v$	3,73e-26	2,80 e-4	131,2596	130,4596	130,4596
$I_{SZ}$	$U_p$	2,66e-25	7,56 e-4	125,1851	124,3851	124,3851
$I_{SZ}$	$U_{s1}$	1,62e-25	5,00 e-4	130,1186	129,3186	129,3186
$I_{SZ}$	$U_{s2}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0097	0,2097	0,2097
$I_{SZ}$	$U_{s3}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0097	0,2097	0,2097
$I_{SZ}$	$U_v$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0097	0,2097	0,2097
$U_p$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9991	0,1991	0,1991
$U_p$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0093	0,2093	-2,1907
$U_p$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9989	0,1989	-0,2811
$U_p$	$I_{SZ}$	2,66e-25	7,56 e-4	125,1851	124,3851	124,3851
$U_p$	$I_v$	3,88e-25	8,92 e-4	128,3715	127,5715	127,5715
$U_p$	$U_{s1}$	2,67e-24	0,0018	126,2946	125,4946	125,4946
$U_p$	$U_{s2}$	7,83e-25	0,0010	124,1644	123,3644	123,3644
$U_p$	$U_{s3}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0041	0,2041	0,2041
$U_p$	$U_v$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0055	0,2055	0,2055

**Tabelle 4.20:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,8 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 3,2 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 1,28 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ . Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primär- ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_p$ ).

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle 4.20 finden sich wieder Detektionen in den als wahrscheinlicher angenommenen Kombinationen  $[I_p, U_p]$ ,  $[I_s, U_p]$  und  $[I_v, U_v]$ . Unter den Dreifachkombinationen findet sich eine weitere Detektion, die Kombination  $[I_v, I_{SZ}, U_v]$ . Auch an Manipulationsbeispiel 2 demonstriert der Globaltest seine fehlende Eignung für das RONT-Modell.

## 4.6 Hypothesentest

### 4.6.1 Schwellwertanpassung

Für die Bestimmung der Schwellwertanpassung über die Forderung einer Richtig-Positiv-Rate von 97%, wird wegen der Berücksichtigung von 10 Zeitpunkten, der Punkt bei der Richtig-Positiv-Rate von 99% auf der ROC-Kurve ohne Schwellwertanpassung (Abb. 4.12, helles türkis) abgelesen. Die Schwellwerte an diesen Punkten liegen bei  $SW_{99\%\_1\_Hypo} = 0,28$ ,  $SW_{99\%\_2\_Hypo} = 0,44$  und  $SW_{99\%\_3\_Hypo} = 0,69$ . Mit den optimalen Schwellwerten auf der Kurve ohne Schwellwertanpassung sind  $SW_{\text{ohne\_1\_Hypo}} = 0,45$ ,  $SW_{\text{ohne\_2\_Hypo}} = 0,71$  und  $SW_{\text{ohne\_3\_Hypo}} = 1,13$  lassen sich über Gleichung 3.7 die Schwellwertanpassungen be-

rechnen. Die Schwellwertanpassungen liegen bei  $SA_{1\_Hypo} = 0,38$ ,  $SA_{2\_Hypo} = 0,38$  und  $SA_{3\_Hypo} = 0,39$ .

Die alternative Schwellwertanpassung  $SA_{Hypo}$  über Gleichung 3.12 liefert wieder eine Schwellwertanpassung von  $SA_{Hypo} = 0,75$ .

#### 4.6.2 Schwellwerte

Die verwendeten Schwellwerte sind wieder in den ROC-Kurven Abb. 4.12 die optimalen Schwellwerte, also die Punkte, die größten Abstand zur Diagonale aufweisen. Bestimmt werden sie auf den Kurven, für deren Erstellung, die zuvor bestimmte Schwellwertanpassung  $SA_{Hypo}$  angewendet wurde. Die Beschriftung der Abbildung zeigt die allgemeinen Schwellwerte, die für erwartete Manipulationen gemäß Gleichung 3.5 angepasst werden.

Die ROC-Kurven Abb. 3.17 weichen deutlich von den Diagonalen ab und zeigen so, dass die Manipulationsdetektion über den Hypothesentest aussagekräftig ist.

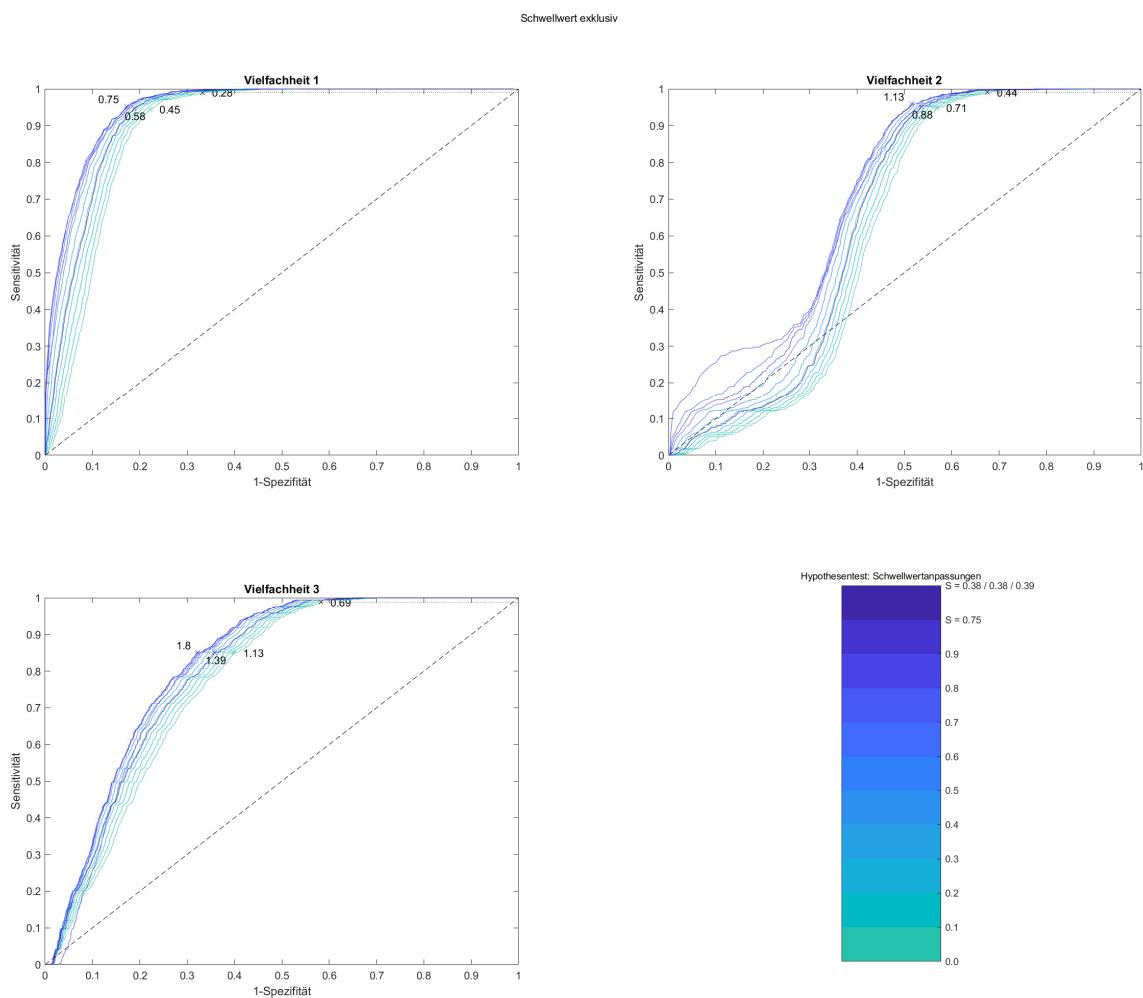
Die Schwellwerte aus den ROC-Kurven (Abb. 4.12) sind, für die drei Vielfachheiten (erste Spalte), in Tabelle 4.21 zusammengefasst. In der zweiten Spalte sind die Schwellwerte ohne Schwellwertanpassung, in der dritten Spalte die Schwellwerte mit Schwellwertanpassung aus dem Störverhältnis und in der vierten Spalte die Schwellwerte mit den Schwellwertanpassungen aus der Richtig-Positiv-Rate angegeben. Für beide Methoden der Schwellwertanpassung wird der allgemeine Schwellwert  $SW_{0\_k\_Hypo}$  und der angepasste Schwellwert  $SW_{1\_k\_Hypo}$ , der für die erwarteten Manipulationen gültig ist, aufgeführt. Als tatsächlich manipuliert, also richtig-positiv oder falsch-negativ, betrachtet werden hier nur die vollständigen manipulierten Kombinationen.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{Hypo} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{Hypo} = 0,75$ allgemein ( $SW_0$ )	$SA_{k\_Hypo}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_Hypo}$ allgemein ( $SW_0$ )	angepasst
1	0,45	0,75	0,19/0,47	0,38	0,58
2	0,71	1,13	0,28/0,71	0,38	0,88
3	1,13	1,80	0,45/1,13	0,39	1,39

**Tabelle 4.21:** Schwellwerte für Detektion über den Hypothesentest.

Für die Vorauswahl von Kombinationen für die Detektion von Manipulationen der nächst höheren Vielfachheit, werden ROC-Kurven (Abb. 4.13) verwendet, bei denen jede Untermenge einer manipulierten Kombination als tatsächlich manipuliert gewertet wird.

Für Vielfachheit 1 zeigt sich auch hier, dass die Schwellwertverschiebung zu einer Reduzierung der Spezifität führt, weshalb für die Vorauswahl der Schwellwert ohne Schwellwertverschiebung von 0,44 verwendet wird. Für die höheren Vielfachheiten bietet die Schwellwertanpassung einen Vorteil. Die in Abbildung 4.13 ermittelten Schwellwerte sind in Tabelle 4.22 zusammengefasst.

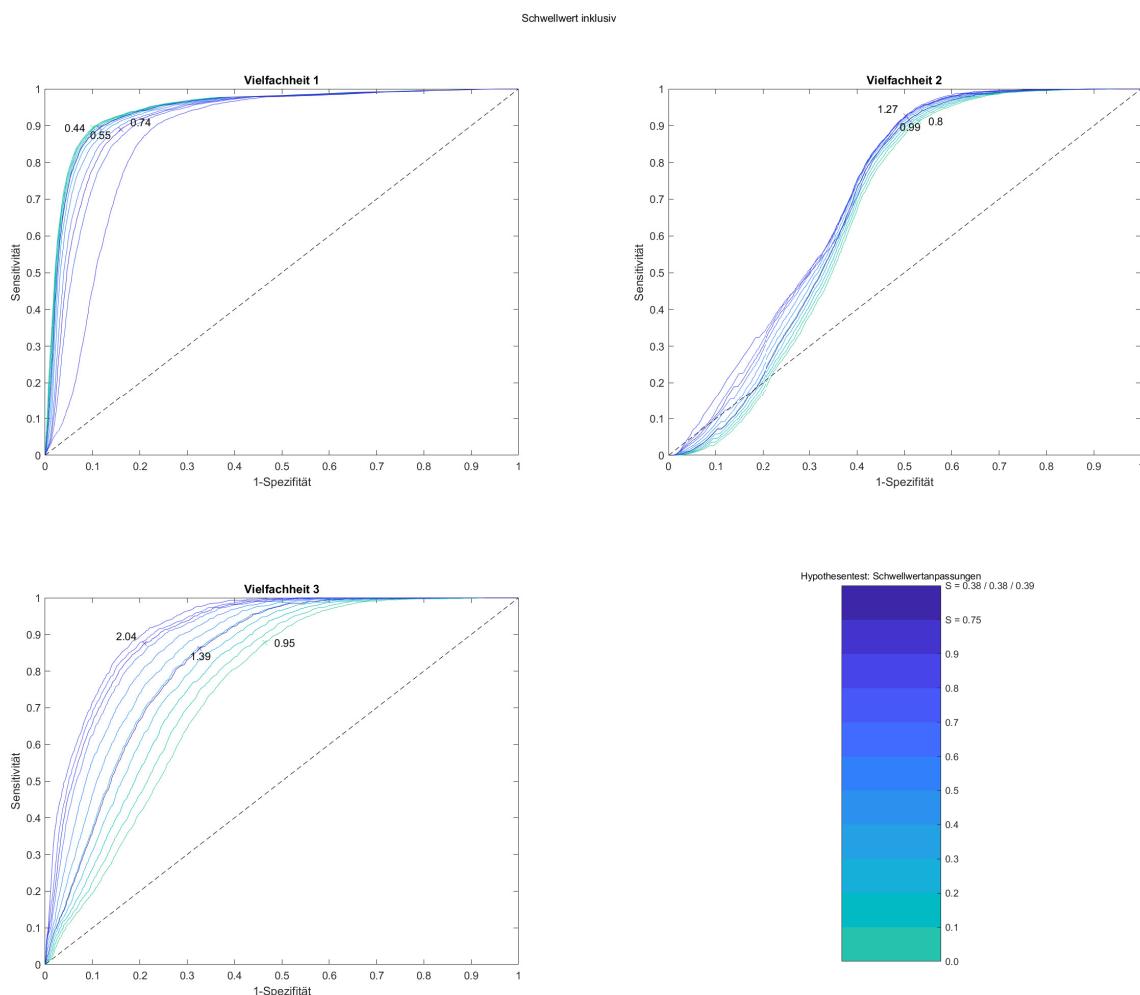


**Abbildung 4.12:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Hypothesentest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert wird jeweils nur die Kombination betrachtet, die alle manipulierten Größen und ausschließlich diese enthält. Die optimalen Schwellwerte bei den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_Hypo} = 0,38$ ,  $SA_{2\_Hypo} = 0,38$  bzw.  $SA_{3\_Hypo} = 0,39$  und der Schwellwertanpassung  $SA_{Hypo} = 0,75$  für alle Vielfachheiten sowie auf den Kurven ohne Anpassung sind markiert und beschriftet.

Vielfachheit	Schwellwert ohne Anp. ( $SA_{Hypo} = 0$ )	Schwellwert bei $SA_{Hypo} = 0,75$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst	$SA_{k\_Hypo}$	Schwellwert bei spez. $SA_{k\_Hypo}$ allgemein ( $SW_0$ ) angepasst
1	0,44	0,55	0,14/0,34	0,38
2	0,80	1,27	0,32/0,79	0,38
3	0,95	2,04	0,51/1,28	0,39

**Tabelle 4.22:** Schwellwerte für Vorauswahl über den Hypothesentest.

Im folgenden Beispiel wird eine Schwellwertanpassung von  $SA_{Hypo} = 0,75$  genutzt.



**Abbildung 4.13:** ROC-Kurve für die Identifikation von Kandidaten für Manipulationen mit höherer Vielfachheit mit dem Hypothesentest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als 'manipuliert' werden alle Untermengen der tatsächlich manipulierten Kombinationen betrachtet. Der optimale Schwellwert ist ohne Schwellwertanpassung und mit den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen markiert und beschriftet.

#### 4.6.3 Beispiel Unmanipuliert

Die Untersuchung der Einzelgrößen im unmanipulierten Beispiel erfolgt in Tabelle 4.23.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	0,8881	0,8394	0,0388	-0,7112	-0,4300
$I_p$	0,8881	0,8394	0,0388	-0,7112	-0,7112
$I_s$	0,9445	0,6853	0,0689	-0,6811	-0,6811
$I_v$	0,8854	0,8520	0,0851	-0,6649	-0,1024
$I_{SZ}$	0,8879	0,8403	0,0863	-0,6637	-0,1012
$U_p$	0,8844	0,8568	0,0948	-0,6552	-0,0927
$U_{s1}$	0,8710	0,9632	0,0221	-0,7279	-0,7279
$U_{s2}$	0,8702	0,9893	0,0524	-0,6976	-0,6976

$U_{s3}$	0,8726	0,9396	0,0578	-0,6922	-0,6922
$U_v$	0,8759	0,9078	0,1535	-0,5965	-0,3152

**Tabelle 4.23:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,75 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition  $I_p, I_s, U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}$  oder für die der angepasste Schwellwert von 0,1875 gilt für die stark exponierten Größen  $I_v, I_{SZ}, U_p$  und 0,46875 gilt für die moderat exponierten Größen  $I_A, U_v$ . Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Unter den Einzelgrößen (Tabelle 4.23) werden alle richtig als nicht manipuliert identifiziert. Größe  $U_v$  überschreitet den Schwellwert von 0,55 für die Untersuchung auf Kombinationen der Vielfachheit 2. Kombinationen mit der Verbraucherspannung  $U_v$  werden in Tabelle 4.24 untersucht.

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	$U_v$	0,8941	0,9993	0,1031	-1,0269	-1,0269
$I_p$	$U_v$	0,8941	0,9993	0,1028	-1,0272	-1,0272
$I_s$	$U_v$	0,9575	0,9917	0,1215	-1,0085	-1,0085
$I_v$	$U_v$	0,8883	0,9996	0,1299	-1,0001	-0,1526
$I_{SZ}$	$U_v$	0,8906	0,9995	0,1758	-0,9542	-0,9542
$U_p$	$U_v$	0,8903	0,9995	0,1316	-0,9984	-0,9984
$U_{s1}$	$U_v$	0,8778	0,9999	0,1016	-1,0284	-1,0284
$U_{s2}$	$U_v$	0,8765	0,9999	0,1129	-1,0171	-1,0171
$U_{s3}$	$U_v$	0,8772	0,9999	0,1131	-1,0169	-1,0169

**Tabelle 4.24:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,13 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,2825 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 0,70625 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ . Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Die Kombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle 4.24 zeigen ebenfalls keine Detektion und zusätzlich keine Hinweise auf Manipulationen der Vielfachheit 3.

Der Hypothesentest liefert für den unmanipulierten Fall also keine Detektion und damit das richtige Ergebnis.

#### 4.6.4 Manipulationsbeispiel 1

Für Manipulationsbeispiel 1, für das eine Manipulation der Transformatortufe angenommen wurde, die zu einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  führt, werden die Einzelgrößen in Tabelle 4.25 ausgewertet.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	2,373458e-13	0,9265	0,0464	-0,7036	-0,4224
$I_p$	2,373458e-13	0,9265	0,0464	-0,7036	-0,7036
$I_s$	8,595689e-11	5,95 e-4	7,1164	6,3664	6,3664
$I_v$	1,162273e-11	0,0053	6,6297	5,8797	6,4422
$I_{SZ}$	1,211555e-11	0,0050	5,4695	4,7195	5,2820
$U_p$	3,226154e-11	0,0017	17,7702	17,0202	17,5827
$U_{s1}$	1,301469e-11	0,0046	6,0158	5,2658	5,2658
$U_{s2}$	3,733076e-11	0,0015	7,5148	6,7648	6,7648
$U_{s3}$	9,310420e-11	5,46 e-4	8,9749	8,2249	8,2249
$U_v$	5,161384e-12	0,0130	4,2712	3,5212	3,8025

**Tabelle 4.25:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,75 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition  $I_p, I_s, U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}$  oder für die angepasste Schwellwert von 0,1875 gilt für die stark exponierten Größen  $I_v, I_{SZ}, U_p$  und 0,46875 gilt für die moderat exponierten Größen  $I_A, U_v$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transformatortufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.

Unter den Einzelgrößen in Tabelle 4.25 finden sich Detektionen in allen Größen, außer  $I_A$  und  $I_p$ . Die höchste Differenz zum individuellen Schwellwert weist dabei  $U_p$  auf. Für alle detektierten Größen müssen außerdem Kombinationen der Vielfachheit 2 untersucht werden, was in Tabelle A.89 erfolgt. Alle Kombinationen der Vielfachheit 2, außer der durch die Vorauswahl ausgeschlossenen Kombination  $[I_A, I_p]$ , liefern eine Detektion. In Tabelle 4.26 werden die Detektionen mit der höchsten Differenz zum Schwellwert zusammengefasst.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_s \quad U_p$	3,75e-11	0,0126	176,8064	175,6764	176,1001
$I_v \quad U_p$	9,35e-11	0,0051	203,8766	202,7466	202,7466
$U_p \quad U_{s2}$	1,13 e-9	4,17 e-4	167,5208	166,3908	166,3908
$U_p \quad U_{s3}$	1,19 e-9	3,97 e-4	125,4125	124,2825	124,2825

**Tabelle 4.26:** Detektionen mit den höchsten Differenzen zum Schwellwert. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,13 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,2825 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 0,70625 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transformatortufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.

Tabelle 4.26 zeigt, dass der Hypothesentest statistische Fehler in anderen Größen ebenfalls als Großfehler detektiert und Kombinationen von Größe  $U_p$  mit  $I_s$ ,  $I_v$ ,  $U_{s2}$  und  $U_{s3}$  detektieren würde. Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 (Tabelle A.90) überschreiten alle den Schwellwert zur Detektion. Derart hohe Überschreitungen wie bei Vielfachheit 3 treten aber nicht auf.

#### 4.6.5 Manipulationsbeispiel 2

Das Manipulationsbeispiel 2 weist eine Manipulation von Primär- und Sekundärstrom ( $I_p$  und  $I_s$ ) um  $+2,25\sigma$  auf. Die Einzelgrößen sind in Tabelle 4.27 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	0,1227	0,0879	4,9505	4,2005	4,4818
$I_p$	0,1227	0,0879	4,9505	4,2005	4,2005
$I_s$	0,1829	0,0541	4,7046	3,9546	3,9546
$I_v$	0,0288	0,9195	0,2038	-0,5462	0,0163
$I_{SZ}$	0,0287	0,9313	0,0167	-0,7333	-0,1708
$U_p$	0,0720	0,1743	6,4954	5,7454	6,3079
$U_{s1}$	0,0297	0,7848	0,1546	-0,5954	-0,5954
$U_{s2}$	0,0297	0,7863	0,2654	-0,4846	-0,4846
$U_{s3}$	0,0293	0,8329	0,2747	-0,4753	-0,4753
$U_v$	0,0310	0,6873	0,1388	-0,6112	-0,3299

**Tabelle 4.27:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,75 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition  $I_p$ ,  $I_s$ ,  $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$ ,  $U_{s3}$  oder für die der angepasste Schwellwert von 0,1875 gilt für die stark exponierten Größen  $I_v$ ,  $I_{SZ}$ ,  $U_p$  und 0,46875 gilt für die moderat exponierten Größen  $I_A$ ,  $U_v$ . Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primär- ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_p$ ).

Unter den Einzelgrößen treten Detektionen in den Größen  $I_A$ ,  $I_p$ ,  $I_s$ ,  $I_v$  und  $U_p$  auf, wobei  $U_p$  die höchste Differenz zum individuellen Schwellwert aufweist und  $I_v$  eine sehr geringe. Alle

Größen, bis auf  $I_{SZ}$ , überschreiten den Schwellwert von 0,55 für die Vorauswahl für Kombinationen höherer Vielfachheit. Die Kombinationen der Vielfachheit 2 sind in Tabelle A.91 dargestellt. Da fast alle Kombinationen Detektionen liefern, sind die Kombinationen mit den höchsten Differenzen zum Schwellwert in Tabelle 4.28 zusammengefasst.

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_p$	$I_s$	0,1234	0,4101	6,0066	4,8766	5,3003
$I_p$	$I_{SZ}$	0,2486	0,2171	8,9387	7,8087	7,8087
$I_p$	$U_p$	0,1275	0,3987	6,2396	5,1096	5,9571
$I_s$	$I_v$	0,2486	0,2171	12,4013	11,2713	11,2713
$I_s$	$I_{SZ}$	0,1275	0,3987	49,3045	48,1745	48,1745
$I_s$	$U_p$	0,1274	0,3989	94,7218	93,5918	94,0155
$I_s$	$U_{s1}$	0,1256	0,4040	39,9950	38,8650	38,8650
$I_s$	$U_{s2}$	0,1332	0,3835	34,6631	33,5331	33,5331
$I_s$	$U_{s3}$	0,1332	0,3835	31,5414	30,4114	30,4114
$I_v$	$I_{SZ}$	0,1274	0,3989	34,1677	33,0377	33,0377
$I_v$	$U_p$	0,1256	0,4040	94,4920	93,3620	93,3620
$I_v$	$U_{s1}$	0,1332	0,3835	32,4125	31,2825	31,2825
$I_v$	$U_{s2}$	0,1332	0,3835	29,2328	28,1028	28,1028
$I_v$	$U_{s3}$	0,1857	0,2845	35,3051	34,1751	34,1751
$I_{SZ}$	$U_p$	0,1332	0,3835	91,3759	90,2459	90,2459
$I_{SZ}$	$U_{s1}$	0,1332	0,3835	32,4125	31,2825	31,2825
$I_{SZ}$	$U_{s2}$	0,1857	0,2845	38,5902	37,4602	37,4602
$U_p$	$U_{s1}$	0,1857	0,2845	24,6007	23,4707	23,4707
$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0781	0,5985	32,4035	31,2735	31,2735

**Tabelle 4.28:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,13 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,2825 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 0,70625 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ . Simulierte wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primär- ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_p$ ).

Die tatsächlich manipulierte Kombination  $[I_p, I_s]$  liefert zwar eine deutliche Differenz zum Schwellwert (Tabelle 4.28), aufgrund der höheren Differenz zum individuellen Schwellwert würde aber die Kombination  $[I_s, U_p]$  detektiert werden.

## 4.7 Fazit der Evaluierung

Messwert- und Hypothesentest erlauben die Detektion einer Manipulation, können also unterscheiden, ob das System manipuliert wurde oder nicht. Die Lokalisierung der Manipulation fällt insbesondere beim Hypothesentest schwerer, da in vielen Fällen Veränderun-

gen durch eine Manipulationen durch mehrere Variablenkombinationen erklärbar wären. Redundante Messungen, insbesondere in den Größen mit geringen Redundanzen, wie der Primärspannung  $U_p$  könnten die Lokalisierbarkeit verbessern. Die vielen Zusammenhänge zwischen den Größen machen außerdem die Detektion durch den Globaltest, bei dem Größen aus dem System entfernt werden müssen, unmöglich. Insgesamt ist der Messwerttest für das RONT-Modell am Besten geeignet, wie bereits die ROC-Kurven 4.9, 4.11 und 4.12 nahelegen. Zu höheren Vielfachheiten hin kann ein zusätzlicher Einsatz des Hypothesentests von Vorteil sein, weil auch der Messwerttest für Mehrfachfehler auf das Entfernen von Größen angewiesen ist.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird ein neues Verfahren zur Detektion von Cyber-Angriffen auf cyber-physikalische Systeme entwickelt, das auf Basis von Zwangsbedingungen und Redundanzen im System Anomalien detektiert sowie lokalisiert und dadurch gezielte Gegenmaßnahmen ermöglicht. Grundidee des neuen Verfahrens ist es, Vorwissen über informationstechnische Eigenschaften und damit über die Vulnerabilität des Systems bzgl. Cyber-Angriffen in die Detektion und Lokalisierung zu integrieren.

Dazu wird in Kapitel 1 zunächst der Bedarf für ein solches Verfahren über die Energiewende motiviert, die mit einer hohen Zahl remote gesteuerter Anlagen realisiert wird, und über die Betrachtung bekannter Angriffe auf cyber-physikalische Systeme plausibel gemacht. Der Stand der Technik bei Schutzmaßnahmen wird sowohl für Informationssysteme als auch für physikalische Systeme betrachtet. Die Anforderungen für die cyber-physikalischen Systeme, wie die Komponenten des Energiesystems, werden aufgestellt und die Eignung existierender Maßnahmen für cyber-physikalische Systeme diskutiert. Am Ende von Kapitel 1 werden die verbleibenden Sicherheitslücken zusammengefasst und die erwartete Wirksamkeit der neu entwickelten Sicherheitsebene auf die Lücken skizziert.

Die als Grundlage für das in dieser Arbeit vorgestellte neue Verfahren ausgewählte Data Reconciliation wird am Anfang von Kapitel 2 ausführlich dargestellt. Darauf aufbauend wird die Data Reconciliation im Rahmen dieser Arbeit auf dynamische Systemgleichungen erweitert. Eine mögliche Nutzung nichtlinearer Zusammenhänge im Rahmen der Data Reconciliation wird diskutiert. Zum späteren Vergleich werden drei klassische Verfahren zur Anomaliedetektion, die auf der Data Reconciliation basieren, ausgewählt und vorgestellt. Der Messwerttest wertet die Differenzen zwischen gemessenen und reconcilierten Werten aus. Globaltest und Hypothesentest nutzen die Residuen der Systemgleichung. Anschließend werden die durch den Nullraum des Systemmodells bedingten Grenzen der Detektierbarkeit und Lokalisierbarkeit gezielter Manipulationen beschrieben und quantifiziert. Außerdem wird ein detaillierter Vergleich der verwandten Verfahren Kalmanfilter, der verschiedenen Varianten der Data Reconciliation und der sogenannten „Dynamic Data Reconciliation“ hinsichtlich der Korrektur der Messwerte und der Fehlerdetektion vorgenommen.

In Kapitel 3 wird für das neue Konzept zur Detektion von Cyber-Angriffen auf Energiesystemkomponenten die grundlegende Idee, Vorwissen über informationstechnische Eigenschaften der Komponenten für die Detektion zu nutzen, zunächst skizziert und dann das konkrete

Verfahren ausführlich vorgestellt. Die Formale Beschreibung des Vorwissens macht es verfügbar für die Nutzung zur Detektion. Anstelle globaler Schwellwerte für die Tests, werden für die einzelnen Eigenschaften individualisierte Schwellwerte definiert. Dazu werden zunächst mit Hilfe von ROC-Kurven für jede Vielfachheit von Fehlern allgemeine Schwellwerte, über Forderungen an Sensitivität oder Spezifität oder über eine Optimierung beider, bei gleicher Gewichtung, bestimmt. Diese Schwellwerte werden im Rahmen des Verfahrens, abhängig von Erfolgswahrscheinlichkeit und Schadenspotential eines Angriffs auf Basis einer Eigenschaft, für die einzelnen Eigenschaften so angepasst, dass sie bei informationstechnisch durch Cyberangriffe eher zu erwartenden Manipulationen, leichter zu erfüllen sind. Als weiterer Faktor ermöglicht die maximale Schwellwertanpassung die Berücksichtigung zusätzlicher Bedingungen für Angriffe mit besonders hohem Schadenspotential oder sie begrenzt die Anpassung auch bei Eigenschaften mit hohem Risiko so, dass die Erkennung unerwarteter Manipulationen nicht vollständig unterdrückt wird. Für ihre Bestimmung werden zwei alternative Anforderungen vorgeschlagen, die sich an die Sensitivität der Detektionen bzw. an das Verhältnis der Manipulationshöhe von erwarteten und unerwarteten Manipulationen richten. Zur Reduktion der Rechenzeit wird die Möglichkeit einer Vorauswahl von Größen für die Detektion von Manipulationen höherer Vielfachheit anhand der Prüfgröße untersucht. Dazu wird ein Schwellwert über eine weitere ROC-Kurve bestimmt, bei der jede Untermenge der tatsächlichen Manipulation als manipuliert gewertet wird. Schließlich wird beschrieben, wie gezielte Gegenmaßnahmen zu Angriffen, die die jeweiligen Eigenschaften ausnutzen, formal beschrieben werden. Sie erhalten jeweils die Einordnung der Kosten einer Anwendung und können Vorbedingungen zum Systemzustand enthalten. Das neu entwickelte Verfahren wird anhand eines statischen und eines dynamischen Beispieldiagramms Schritt für Schritt demonstriert und die Leistungsfähigkeit der einzelnen Tests hinsichtlich Aussagekraft, Rechenaufwand und Eignung für Systeme mit geringer Redundanz, verglichen. Mit beiden Systemen kann für alle Tests gezeigt werden, dass Manipulationen durch das neue Verfahren besser detektiert und lokalisiert werden, als mit dem klassischen Verfahren.

Die Evaluierung erfolgt in Kapitel 4 anhand eines regelbaren Ortsnetztransformators (RONT), dem zukünftig im Energiesystem eine wichtige Bedeutung bei der optimalen Nutzung der vorhandenen Erzeugungskapazität zukommen wird. Sie demonstriert die Nutzbarkeit für ein reales System, zeigt aber auch Unterschiede der Detektionsmethoden im Bezug auf ihre Eignung für Systemmodelle auf. Anhand des RONT-Beispiel kann gezeigt werden, dass das neue Verfahren auch für Komponenten des Energiesystems erfolgreich eingesetzt werden kann.

Die Anwendbarkeit auf ein reales System stellt eine entscheidende Anforderung dar. Das neue Verfahren für die Detektion von Cyber-Angriffen wird hier an linearen Systemen demonstriert. Tatsächlich sind die meisten realen Systeme zwar nichtlinear, lassen sich aber

oft linearisieren. Außerdem sind die Methoden auch auf nichtlineare Modelle anwendbar, sofern diese lösbar sind. Für den Messwerttest wurde dies für die zugrundeliegende Anomaliedetektion in [50] gezeigt. Der Messwerttest wird dabei auf Basis optimierter Daten durchgeführt, die über eine alternative, nichtlineare Optimierung gewonnen werden. Die Anwendbarkeit von Hypothesentest und Globaltest auf nichtlineare Systeme wurde in Abschnitt 2.3 diskutiert und als naheliegend eingestuft. Hinsichtlich der Nichtlinearität ist die neue Detektionsmethode für Cyber-Angriffe also auch auf reale Systeme anwendbar.

Die Arbeit konzentriert sich auf Komponenten des Energiesystems, weil diese aktuell stark gefährdet sind. Das Verfahren ist aber nicht auf diese beschränkt, sondern für alle cyber-physikalischen Systeme mit ausreichender Instrumentierung und Redundanzen im System nutzbar. Viele dieser Systeme teilen auch die Anforderungen aus Abschnitt 1.3.2, auf deren Basis die Auswahl der zugrundeliegenden mathematischen Methode und die Entwicklung des neuen Verfahrens erfolgt. In zukünftigen Arbeiten ist daher zu untersuchen, wie sich das neue Verfahren zur Detektion von Cyberangriffen auf andere Anwendungsbereiche übertragen lässt.

In zukünftigen Arbeiten ist außerdem zu untersuchen, wie das Wissen über den aktuellen Systemzustand im Fall eines detektierten Cyber-Angriffs systematisch eingeschätzt und für die Bewertung der Sicherheit der Kenntnis über den aktuellen Systemzustand genutzt werden kann, wie in Abschnitt A.6.1 skizziert.



# **A Anhang**

## **A.1 Statisches Beispiel**

### **A.1.1 Messwerttest**

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,4962	0,9999	0,2323	-5,1577	-5,1577
1 3	0,4924	0,9998	0,2800	-5,1100	-5,1100
1 4	0,4896	0,9997	0,3111	-5,0789	-5,0789
1 5	0,4938	0,9999	0,2634	-5,1266	-2,4316
1 6	0,5027	0,9932	0,6792	-4,7108	-4,7108
2 1	0,4980	1,0000	0,2062	-5,1838	-5,1838
2 3	0,4929	0,9998	0,2747	-5,1153	-2,4203
2 4	0,5049	0,9937	0,6662	-4,7238	-4,7238
2 5	0,4942	0,9999	0,2582	-5,1318	-5,1318
2 6	0,4881	0,9996	0,3268	-5,0632	-5,0632
3 1	0,4987	1,0000	0,1942	-5,1958	-5,1958
3 2	0,4974	1,0000	0,2151	-5,1749	-2,4799
3 4	0,4912	0,9998	0,2940	-5,0960	-5,0960
3 5	0,5099	0,9949	0,6364	-4,7536	-4,7536
3 6	0,4892	0,9997	0,3149	-5,0751	-5,0751
4 1	0,4992	1,0000	0,1864	-5,2036	-5,2036
4 2	0,5130	0,9956	0,6169	-4,7731	-4,7731
4 3	0,4945	0,9999	0,2550	-5,1350	-5,1350
4 5	0,4957	0,9999	0,2385	-5,1515	-5,1515
4 6	0,4900	0,9997	0,3071	-5,0829	-2,3879
5 1	0,4985	1,0000	0,1984	-5,1916	-2,4966
5 2	0,4971	1,0000	0,2193	-5,1707	-5,1707
5 3	0,5082	0,9946	0,6467	-4,7433	-4,7433
5 4	0,4908	0,9998	0,2981	-5,0919	-5,0919
5 6	0,4888	0,9997	0,3190	-5,0710	-5,0710
6 1	0,5150	0,9961	0,6038	-4,7862	-4,7862
6 2	0,4982	1,0000	0,2021	-5,1879	-5,1879
6 3	0,4949	0,9999	0,2498	-5,1402	-5,1402
6 4	0,4923	0,9998	0,2810	-5,1090	-2,4140
6 5	0,4961	0,9999	0,2333	-5,1567	-5,1567

**Tabelle A.1:** Messwerttest mit unmanipuliertem Beispiel. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,39 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,695 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	0,5060	0,9995	0,2432	-5,9968	-2,8768
1 2 4	0,5713	0,9860	0,7039	-5,5361	-5,5361
1 2 5	0,5072	0,9996	0,2260	-6,0140	-6,0140
1 2 6	0,5713	0,9860	0,7039	-5,5361	-5,5361
1 3 2	0,5098	0,9998	0,1836	-6,0564	-2,9364
1 3 4	0,5042	0,9993	0,2657	-5,9743	-5,9743
1 3 5	0,5760	0,9881	0,6741	-5,5659	-5,5659
1 3 6	0,5760	0,9881	0,6741	-5,5659	-5,5659
1 4 2	0,5790	0,9894	0,6546	-5,5854	-5,5854
1 4 3	0,5071	0,9996	0,2268	-6,0132	-6,0132
1 4 5	0,5083	0,9997	0,2096	-6,0304	-6,0304

1	4	6	0,5790	0,9894	0,6546	-5,5854	-5,5854
1	5	2	0,5097	0,9998	0,1871	-6,0529	-6,0529
1	5	3	0,5744	0,9874	0,6844	-5,5556	-5,5556
1	5	4	0,5040	0,9993	0,2692	-5,9708	-5,9708
1	5	6	0,5744	0,9874	0,6844	-5,5556	-5,5556
1	6	2	0,5638	1,0000	0,0493	-6,1907	-6,1907
1	6	3	0,5642	1,0000	0,0103	-6,2297	-6,2297
1	6	4	0,5638	1,0000	0,0493	-6,1907	-6,1907
1	6	5	0,5642	1,0000	0,0103	-6,2297	-6,2297
2	3	1	0,5112	0,9999	0,1575	-6,0825	-2,9625
2	3	4	0,5780	0,9890	0,6610	-5,5790	-5,5790
2	3	5	0,5780	0,9890	0,6610	-5,5790	-5,5790
2	3	6	0,5028	0,9991	0,2832	-5,9568	-5,9568
2	4	1	0,5634	1,0000	0,0754	-6,1646	-6,1646
2	4	3	0,5642	1,0000	0,0103	-6,2297	-6,2297
2	4	5	0,5642	1,0000	0,0103	-6,2297	-6,2297
2	4	6	0,5634	1,0000	0,0754	-6,1646	-3,0446
2	5	1	0,5110	0,9999	0,1610	-6,0790	-6,0790
2	5	3	0,5764	0,9883	0,6713	-5,5687	-5,5687
2	5	4	0,5764	0,9883	0,6713	-5,5687	-5,5687
2	5	6	0,5025	0,9990	0,2866	-5,9534	-5,9534
2	6	1	0,5829	0,9909	0,6285	-5,6115	-5,6115
2	6	3	0,5077	0,9997	0,2181	-6,0219	-6,0219
2	6	4	0,5829	0,9909	0,6285	-5,6115	-2,4915
2	6	5	0,5088	0,9998	0,2009	-6,0391	-6,0391
3	4	1	0,5120	0,9999	0,1411	-6,0989	-6,0989
3	4	2	0,5853	0,9918	0,6117	-5,6283	-5,6283
3	4	5	0,5853	0,9918	0,6117	-5,6283	-2,5083
3	4	6	0,5042	0,9993	0,2667	-5,9733	-5,9733
3	5	1	0,5634	1,0000	0,0754	-6,1646	-6,1646
3	5	2	0,5638	1,0000	0,0493	-6,1907	-6,1907
3	5	4	0,5638	1,0000	0,0493	-6,1907	-3,0707
3	5	6	0,5634	1,0000	0,0754	-6,1646	-3,0446
3	6	1	0,5872	0,9924	0,5987	-5,6413	-5,6413
3	6	2	0,5112	0,9999	0,1585	-6,0815	-6,0815
3	6	4	0,5062	0,9995	0,2406	-5,9994	-5,9994
3	6	5	0,5872	0,9924	0,5987	-5,6413	-2,5213
4	5	1	0,5118	0,9999	0,1445	-6,0955	-6,0955
4	5	2	0,5838	0,9912	0,6221	-5,6179	-5,6179
4	5	3	0,5838	0,9912	0,6221	-5,6179	-2,4979
4	5	6	0,5039	0,9992	0,2702	-5,9698	-5,9698
4	6	1	0,5898	0,9933	0,5792	-5,6608	-5,6608
4	6	2	0,5898	0,9933	0,5792	-5,6608	-2,5408
4	6	3	0,5088	0,9998	0,2017	-6,0383	-6,0383
4	6	5	0,5098	0,9998	0,1845	-6,0555	-6,0555
5	6	1	0,5857	0,9919	0,6090	-5,6310	-5,6310
5	6	2	0,5110	0,9999	0,1619	-6,0781	-6,0781

5	6	3		0,5857	0,9919	0,6090	-5,6310	-2,5110
5	6	4		0,5059	0,9995	0,2441	-5,9959	-5,9959

**Tabelle A.2:** Messwerttest mit unmanipuliertem Beispiel. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 6,24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 6,24 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 3,12 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Größe Nr.				$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle
1	2	3	4	0,6370	0,9692	0,4034	-5,8366
1	2	3	5	0,6370	0,9692	0,4034	-5,8366
1	2	3	6	0,6370	0,9692	0,4034	-5,8366
1	2	4	3	0,5642	1,0000	0,0073	-6,2327
1	2	4	5	0,5642	1,0000	0,0073	-6,2327
1	2	5	3	0,6354	0,9679	0,4094	-5,8306
1	2	5	4	0,6354	0,9679	0,4094	-5,8306
1	2	5	6	0,6354	0,9679	0,4094	-5,8306
1	2	6	3	0,5642	1,0000	0,0073	-6,2327
1	2	6	5	0,5642	1,0000	0,0073	-6,2327
1	3	4	2	0,6441	0,9750	0,3749	-5,8651
1	3	4	5	0,6441	0,9750	0,3749	-5,8651
1	3	4	6	0,6441	0,9750	0,3749	-5,8651
1	3	5	2	0,5638	1,0000	0,0348	-6,2052
1	3	5	4	0,5638	1,0000	0,0348	-6,2052
1	3	6	2	0,5638	1,0000	0,0348	-6,2052
1	3	6	4	0,5638	1,0000	0,0348	-6,2052
1	4	5	2	0,6426	0,9739	0,3809	-5,8591
1	4	5	3	0,6426	0,9739	0,3809	-5,8591
1	4	5	6	0,6426	0,9739	0,3809	-5,8591
1	4	6	3	0,5642	1,0000	0,0073	-6,2327
1	4	6	5	0,5642	1,0000	0,0073	-6,2327
1	5	6	2	0,5638	1,0000	0,0348	-6,2052
1	5	6	4	0,5638	1,0000	0,0348	-6,2052
2	3	4	1	0,5634	0,9999	0,0533	-6,1867
2	3	4	6	0,5634	0,9999	0,0533	-6,1867
2	3	5	1	0,5634	0,9999	0,0533	-6,1867
2	3	5	6	0,5634	0,9999	0,0533	-6,1867
2	3	6	1	0,6477	0,9778	0,3599	-5,8801
2	3	6	4	0,6477	0,9778	0,3599	-5,8801
2	3	6	5	0,6477	0,9778	0,3599	-5,8801
2	4	5	1	0,5634	0,9999	0,0533	-6,1867
2	4	5	6	0,5634	0,9999	0,0533	-6,1867
2	4	6	3	0,5642	1,0000	0,0073	-6,2327
2	4	6	5	0,5642	1,0000	0,0073	-6,2327

2	5	6	1	0,6463	0,9767	0,3658	-5,8742
2	5	6	3	0,6463	0,9767	0,3658	-5,8742
2	5	6	4	0,6463	0,9767	0,3658	-5,8742
3	4	5	1	0,5634	0,9999	0,0533	-6,1867
3	4	5	6	0,5634	0,9999	0,0533	-6,1867
3	4	6	1	0,6541	0,9825	0,3314	-5,9086
3	4	6	2	0,6541	0,9825	0,3314	-5,9086
3	4	6	5	0,6541	0,9825	0,3314	-5,9086
3	5	6	2	0,5638	1,0000	0,0348	-6,2052
3	5	6	4	0,5638	1,0000	0,0348	-6,2052
4	5	6	1	0,6528	0,9816	0,3374	-5,9026
4	5	6	2	0,6528	0,9816	0,3374	-5,9026
4	5	6	3	0,6528	0,9816	0,3374	-5,9026

**Tabelle A.3:** Messwerttest mit unmanipuliertem Beispiel. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 4 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall und Prüfgröße und Differenz zur Schwelle für Dreifachkombinationen von 6,24. Für die Kombinationen [1,2,4,6]; [1,3,5,6] und [2,3,4,5] ist aufgrund des Aufbaus des Beispielsystems keine Aussage möglich. Alle anderen Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,4962	0,9999	0,2323	-5,1577	-5,1577
1 3	0,4924	0,9998	0,2800	-5,1100	-5,1100
1 4	0,4896	0,9997	0,3111	-5,0789	-5,0789
1 5	0,4938	0,9999	0,2634	-5,1266	-2,4316
1 6	0,5027	0,9932	0,6792	-4,7108	-4,7108

**Tabelle A.4:** Messwerttest mit Manipulationsbeispiel 1. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,39 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,695 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1.

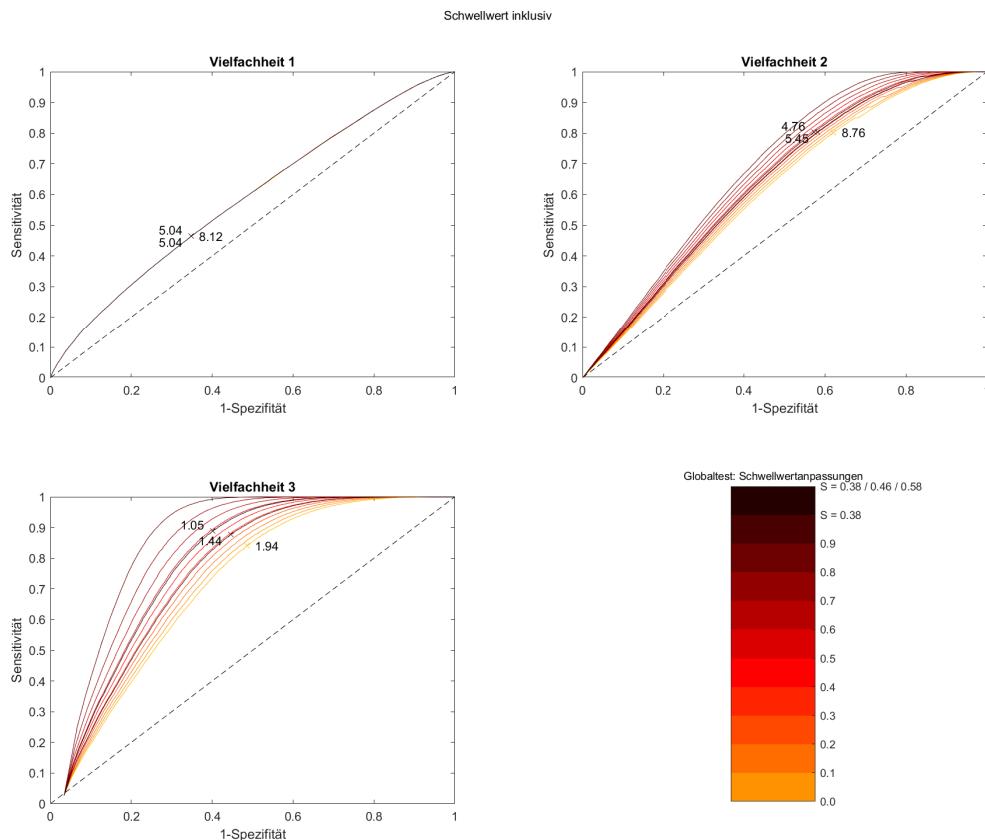
Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 5 2	0,5097	0,9998	0,1871	-6,0529	-6,0529
1 5 3	0,5744	0,9874	0,6844	-5,5556	-5,5556
1 5 4	0,5040	0,9993	0,2692	-5,9708	-5,9708
1 5 6	0,5744	0,9874	0,6844	-5,5556	-5,5556
3 6 1	0,5872	0,9924	0,5987	-5,6413	-5,6413
3 6 2	0,5112	0,9999	0,1585	-6,0815	-6,0815
3 6 4	0,5062	0,9995	0,2406	-5,9994	-5,9994
3 6 5	0,5872	0,9924	0,5987	-5,6413	-2,5213

**Tabelle A.5:** Messwerttest mit Manipulationsbeispiel 2. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 6,24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 6,24 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 3,12 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

### A.1.2 Globaltest

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,2086	0,9056	0,1982	-2,3118	-2,3118
1 3	0,1376	0,9126	0,1830	-2,3270	-2,3270
1 4	0,2535	0,9178	0,1715	-2,3385	-2,3385
1 5	0,2096	0,9100	0,1886	-2,3214	-4,4596
1 6	0,1993	0,9994	0,0013	-2,5087	-2,5087
2 3	0,2808	0,9150	0,1776	-2,3324	-4,4705
2 4	0,3937	0,9986	0,0029	-2,5071	-2,5071
2 5	0,2102	0,9125	0,1831	-2,3269	-2,3269
2 6	0,2552	0,9240	0,1580	-2,3520	-2,3520
3 4	0,3696	0,9266	0,1525	-2,3575	-2,3575
3 5	0,2136	0,9980	0,0041	-2,5059	-2,5059
3 6	0,2570	0,9303	0,1446	-2,3654	-2,3654
4 5	0,1835	0,9242	0,1576	-2,3524	-2,3524
4 6	0,1410	0,9351	0,1342	-2,3758	-4,5139
5 6	0,1851	0,9279	0,1496	-2,3604	-2,3604

**Tabelle A.6:** Globaltest mit unmanipuliertem Beispiel. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,51 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 4,65 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.



**Abbildung A.1:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Globaltest und der Skalierung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als Manipulation werden alle Untermengen der manipulierten Kombinationen betrachtet. Der optimale Schwellwert ist markiert und beschriftet. Die Kurven verlaufen nahe der Diagonale, der Einsatz der Schwellwerte für die Vorauswahl von Kombinationen ist daher nicht sinnvoll.

<b>Größe Nr.</b>	<b><math>Pr\{a H_0\}</math></b>	<b><math>Pr\{f_p\}</math></b>	<b>Prüfgröße</b>	<b>Diff. allg. Schwelle</b>	<b>Diff. individ. Schwelle</b>
1 2 3	0,2123	0,6867	0,1627	-0,8873	-2,3373
1 2 4	0,2821	0,9942	5,35 e-5	-1,0499	-1,0499
1 2 5	0,2996	0,6823	0,1676	-0,8824	-0,8824
1 2 6	0,2821	0,9942	5,35 e-5	-1,0499	-1,0499
1 3 4	0,3036	0,7077	0,1406	-0,9094	-0,9094
1 3 5	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-1,0488
1 3 6	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-1,0488
1 4 5	0,3710	0,7033	0,1451	-0,9049	-0,9049
1 4 6	0,2821	0,9942	5,35 e-5	-1,0499	-1,0499
1 5 6	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-1,0488
2 3 4	0,5634	0,9575	0,0028	-1,0472	-1,0472
2 3 5	0,5634	0,9575	0,0028	-1,0472	-1,0472
2 3 6	0,3739	0,7189	0,1295	-0,9205	-0,9205
2 4 5	0,5634	0,9575	0,0028	-1,0472	-1,0472
2 4 6	0,2821	0,9942	5,35 e-5	-1,0499	-2,4999
2 5 6	0,3047	0,7145	0,1338	-0,9162	-0,9162
3 4 5	0,5634	0,9575	0,0028	-1,0472	-2,4972
3 4 6	0,3083	0,7403	0,1098	-0,9402	-0,9402
3 5 6	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-2,4988
4 5 6	0,2176	0,7358	0,1138	-0,9362	-0,9362

**Tabelle A.7:** Globaltest mit unmanipuliertem Beispiel. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,05 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 1,05 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,50 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

<b>Größe Nr.</b>	<b><math>Pr\{a H_0\}</math></b>	<b><math>Pr\{f_p\}</math></b>	<b>Prüfgröße</b>	<b>Diff. allg. Schwelle</b>
1 2 4 6	0,2821	0,9942	5,35 e-5	-1,0499
1 3 5 6	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488
2 3 4 5	0,5634	0,9575	0,0028	-1,0472

**Tabelle A.8:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 4 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall und Prüfgröße und Differenz zur Schwelle für Dreifachkombinationen von 1,05. Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
5 1 2	0,2996	0,6823	0,1676	-0,8824	-0,8824
5 1 3	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-1,0488
5 1 4	0,3710	0,7033	0,1451	-0,9049	-0,9049
5 1 6	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-1,0488
6 3 1	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-1,0488
6 3 2	0,3739	0,7189	0,1295	-0,9205	-0,9205
6 3 4	0,3083	0,7403	0,1098	-0,9402	-0,9402
6 3 5	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-2,4988

**Tabelle A.9:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,05 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 1,05 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,50 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simulierte wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 5 2	0,2996	0,6823	0,1676	-0,8824	-0,8824
1 5 3	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-1,0488
1 5 4	0,3710	0,7033	0,1451	-0,9049	-0,9049
1 5 6	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-1,0488
1 3 2	0,0953	0,1840	1,7653	0,7153	-0,7347
1 3 4	0,1297	0,1747	1,8417	0,7917	0,7917
1 3 6	0,2819	0,9722	0,0012	-1,0488	-1,0488

**Tabelle A.10:** Globaltest mit Manipulationsbeispiel 3. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,05 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 1,05 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,50 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simulierte wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
2 1	2,09 e-1	9,06 e-1	0,1982	-2,3118	-2,3118
2 3	2,81 e-1	9,15 e-1	0,1776	-2,3324	-4,4705
2 4	3,94 e-1	9,99 e-1	0,0029	-2,5071	-2,5071
2 5	2,10 e-1	9,13 e-1	0,1831	-2,3269	-2,3269
2 6	2,55 e-1	9,24 e-1	0,1580	-2,3520	-2,3520

**Tabelle A.11:** Globaltest mit Manipulationsbeispiel 4. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,51 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 4,65 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simulierte wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

### A.1.3 Hypothesentest

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,9056	0,9985	0,0803	-20,9197	-20,9197
1 3	0,9126	0,9978	0,0955	-20,9045	-20,9045
1 4	0,9178	0,9973	0,1070	-20,8930	-20,8930
1 5	0,9100	0,9981	0,0899	-20,9101	-5,1601
1 6	0,9994	0,9832	0,4158	-20,5842	-20,5842
2 3	0,9150	0,9976	0,0605	-20,9395	-5,1895
2 4	0,9986	0,9834	0,4134	-20,5866	-20,5866
2 5	0,9125	0,9978	0,0572	-20,9428	-20,9428
2 6	0,9240	0,9966	0,1204	-20,8796	-20,8796
3 4	0,9266	0,9963	0,0756	-20,9244	-20,9244
3 5	0,9980	0,9836	0,4116	-20,5884	-20,5884
3 6	0,9303	0,9958	0,1339	-20,8661	-20,8661
4 5	0,9242	0,9966	0,0725	-20,9275	-20,9275
4 6	0,9351	0,9952	0,1442	-20,8558	-5,1058
5 6	0,9279	0,9961	0,1289	-20,8711	-20,8711

**Tabelle A.12:** Hypothesentest mit unmanipuliertem Beispiel. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 21 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 5,25 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	0,9219	1,0000	0,0695	-31,9305	-7,9305
1 2 4	1,0000	1,0000	0,4177	-31,5823	-31,5823
1 2 5	0,9196	1,0000	0,0665	-31,9335	-31,9335
1 2 6	1,0000	1,0000	0,4177	-31,5823	-31,5823
1 3 4	0,9321	1,0000	0,0827	-31,9173	-31,9173
1 3 5	0,9994	1,0000	0,4159	-31,5841	-31,5841
1 3 6	0,9994	1,0000	0,4159	-31,5841	-31,5841
1 4 5	0,9300	1,0000	0,0800	-31,9200	-31,9200
1 4 6	1,0000	1,0000	0,4177	-31,5823	-31,5823
1 5 6	0,9994	1,0000	0,4159	-31,5841	-31,5841
2 3 4	0,9986	1,0000	0,1378	-31,8622	-31,8622
2 3 5	0,9986	1,0000	0,1378	-31,8622	-31,8622
2 3 6	0,9373	1,0000	0,0894	-31,9106	-31,9106
2 4 5	0,9986	1,0000	0,1378	-31,8622	-31,8622
2 4 6	1,0000	1,0000	0,4177	-31,5823	-7,5823
2 5 6	0,9353	1,0000	0,0868	-31,9132	-31,9132
3 4 5	0,9986	1,0000	0,1378	-31,8622	-7,8622
3 4 6	0,9466	1,0000	0,1012	-31,8988	-31,8988
3 5 6	0,9994	1,0000	0,4159	-31,5841	-7,5841
4 5 6	0,9447	1,0000	0,0988	-31,9012	-31,9012

**Tabelle A.13:** Hypothesentest mit unmanipuliertem Beispiel. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 32 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 32 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 8 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle
1 2 3 4	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
1 2 3 5	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
1 2 3 6	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
1 2 4 5	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
1 2 4 6	1,0000	1,0000	0,2784	-31,7216
1 2 5 6	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
1 3 4 5	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
1 3 4 6	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
1 3 5 6	0,9994	1,0000	0,2773	-31,7227
1 4 5 6	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
2 3 4 5	0,9986	1,0000	0,2756	-31,7244
2 3 4 6	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
2 3 5 6	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
2 4 5 6	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215
3 4 5 6	1,0000	1,0000	0,2785	-31,7215

**Tabelle A.14:** Hypothesentest mit unmanipuliertem Beispiel. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 4 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall und Prüfgröße und Differenz zur Schwelle für Dreifachkombinationen von 32. Alle Kombinationen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 5	0,9196	0,0745	5,5836	-26,4164	-26,4164
1 2 6	0,1070	0,4312	7,5069	-24,4931	-24,4931
1 3 5	0,9994	0,0692	14,2086	-17,7914	-17,7914
1 3 6	0,9994	0,0692	14,2086	-17,7914	-17,7914
1 4 5	0,9300	0,0738	5,5971	-26,4029	-26,4029
1 5 6	0,9994	0,0692	14,2086	-17,7914	-17,7914
2 3 6	0,9373	0,0733	5,6065	-26,3935	-26,3935
3 4 6	0,9466	0,0726	5,6183	-26,3817	-26,3817
<b>3 5 6</b>	<b>0,9994</b>	<b>0,0692</b>	<b>14,2086</b>	<b>-17,7914</b>	<b>6,2086</b>

**Tabelle A.15:** Hypothesentest mit Manipulationsbeispiel 2. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 32 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 32 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 8 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	0,4137	0,0317	6,7225	-25,2775	-1,2775
1 2 4	0,1038	0,1091	12,6577	-19,3423	-19,3423
1 2 5	0,9196	0,0152	7,6812	-24,3188	-24,3188
1 2 6	0,1038	0,1091	12,6577	-19,3423	-19,3423
1 3 4	0,3982	0,0328	6,6767	-25,3233	-25,3233
1 3 5	0,9994	0,0141	19,4525	-12,5475	-12,5475
1 3 6	0,9994	0,0141	19,4525	-12,5475	-12,5475
1 4 5	0,9300	0,0150	7,6947	-24,3053	-24,3053
1 5 6	0,9994	0,0141	19,4525	-12,5475	-12,5475
2 3 5	0,0940	0,1188	4,1203	-27,8797	-27,8797
2 5 6	0,3933	0,0332	6,6618	-25,3382	-25,3382
3 4 5	0,0940	0,1188	4,1203	-27,8797	-3,8797
<b>3 5 6</b>	<b>0,9994</b>	<b>0,0141</b>	<b>19,4525</b>	<b>-12,5475</b>	<b>11,4525</b>
4 5 6	0,3781	0,0344	6,6147	-25,3853	-25,3853

**Tabelle A.16:** Hypothesentest mit Manipulationsbeispiel 3. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 32 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 32 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 8 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	9,22 e-1	2,37 e-5	15,8318	-16,1682	7,8318
1 2 4	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	7,8234	7,8234
1 2 5	9,20 e-1	2,38 e-5	15,8288	-16,1712	-16,1712
1 2 6	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	7,8234	7,8234
1 4 6	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	7,8234	7,8234
2 3 4	9,99 e-1	2,20 e-5	13,2731	-18,7269	-18,7269
2 3 5	9,99 e-1	2,20 e-5	13,2731	-18,7269	-18,7269
2 3 6	9,37 e-1	2,34 e-5	15,8517	-16,1483	-16,1483
2 4 5	9,99 e-1	2,20 e-5	13,2731	-18,7269	-18,7269
2 4 6	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	7,8234	31,8234
2 5 6	9,35 e-1	2,34 e-5	15,8491	-16,1509	-16,1509
3 4 6	7,44 e-4	2,06 e-2	7,2858	-24,7142	-24,7142
4 5 6	7,28 e-4	2,10 e-2	7,2586	-24,7414	-24,7414

**Tabelle A.17:** Hypothesentest mit Manipulationsbeispiel 4. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 32 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 32 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 8 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle
1 2 3 4	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
1 2 3 5	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
1 2 3 6	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
1 2 4 5	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
1 2 4 6	1,0000	9,81 e-5	26,5489	-5,4511
1 2 5 6	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
1 3 4 5	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
1 3 4 6	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
1 3 5 6	1,43 e-4	2,36 e-1	8,8434	-23,1566
1 4 5 6	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
2 3 4 5	0,9986	9,82 e-5	26,5461	-5,4539
2 3 4 6	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
2 3 5 6	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
2 4 5 6	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510
3 4 5 6	1,0000	9,81 e-5	26,5490	-5,4510

**Tabelle A.18:** Hypothesentest mit Manipulationsbeispiel 4. Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 4 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall und Prüfgröße und Differenz zur Schwelle für Dreifachkombinationen von 32. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

## A.2 Statisches Beispiel mit vielfachheitsabhängiger Schwellwertanpassung

Für das Beispiel, das in Abschnitt 3.3.2 vorgestellt wurde, wird hier für den Messwerttest und den Hypothesentest die Detektion mit den vielfachheitsabhängigen Schwellwertanpassungen demonstriert.

### A.2.1 Messwerttest

Die vielfachheitsabhängige Schwellwertanpassung  $S$  wird aus Abschnitt 3.3.3 überommen. Für Vielfachheit 1 liegt sie bei  $S = 0,67$ , für Vielfachheit 2 bei  $S = 0,35$  und für Vielfachheit 3 bei  $S = 0,30$ .

Daraus ergeben sich die in Abschnitt 3.3.3 berechneten Schwellwerte, die hier in Tabelle A.19 zusammengefasst werden.

Vielfachheit	Vielfachheits-spezifisches $S$	Schwellwert für Detektion		Schwellwert Vorauswahl für höhere Vielfachh.	
		allgemein	angepasst	allgemein	angepasst
1	0,67	5,01	1,65	6,91	2,28
2	0,35	4,24	2,76	4,73	3,07
3	0,30	4,64	3,25	(4,52	3,16)

**Tabelle A.19:** Schwellwerte für Detektion über den Messwerttest.

### Beispiel Unmanipuliert

Beim Messwerttest wird jeweils eine Größe auf Manipulation geprüft. Für die Untersuchung auf Mehrfachmanipulationen werden bereits als mutmaßlich oder tatsächlich manipuliert identifizierte Werte entfernt und die verbleibenden Größen untersucht. Das bedeutet, dass beim Messwerttest unterschieden werden muss, ob die betreffende Größe entfernt wurde oder ob sie getestet wird. Man erhält also beispielsweise unterschiedliche Werte der Prüfgröße für die Kombinationen [1,2] und [2,1].

In Tabelle A.20 ist der Test der Einzelgrößen dargestellt.

Bei den Einzelgrößen (Tabelle A.20) wird, wie zu erwarten, keine als Fehlerbehaftet detektiert. Auch der angepasste Schwellwert von 2,28, ab dem eine Untersuchung auf Mehrfachfehler angezeigt ist, wird nicht überschritten. Der unmanipulierte Fall wird also richtig erkannt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,4774	1,0000	0,2642	-4,7458	-1,3891
2	0,4757	1,0000	0,2838	-4,7262	-4,7262
3	0,4713	0,9999	0,3285	-4,6815	-1,3248
4	0,4682	0,9999	0,3577	-4,6523	-4,6523
5	0,4729	0,9999	0,3130	-4,6970	-4,6970
6	0,4660	0,9998	0,3773	-4,6327	-1,2760

**Tabelle A.20:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,65 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

### Manipulationsbeispiel 1

Beim ersten Manipulationsbeispiel wird Größe 1 mit einem Offset von  $+3\sigma$  manipuliert. In Tabelle A.21 wird die Detektion für die Einzelgrößen dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0403	0,1436	2,7358	-2,2742	1,0825
2	0,4545	0,9993	0,4662	-4,5438	-4,5438
3	0,4605	0,9996	0,4215	-4,5885	-1,2318
4	0,4642	0,9997	0,3923	-4,6177	-4,6177
5	0,4585	0,9995	0,4370	-4,5730	-4,5730
6	0,1509	0,5522	1,8773	-3,1327	0,2240

**Tabelle A.21:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,65 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1.

Die Manipulation in Größe 1 wird eindeutig detektiert. Die Schwelle für Untersuchung auf Mehrfachmanipulationen wird ebenfalls nur von Größe 1 überschritten. In Tabelle A.22 wird die Detektion mit der entfernten Größe 1 gezeigt.

In Tabelle A.22 findet sich keine weitere Detektion. Auch der Schwellwert für die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 3 von 4,73 bzw. 3,07 wird nicht überschritten. Der Messwerttest liefert für die Beispielmanipulation in Größe 1 also die richtige Detektion.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,4962	0,9999	0,2323	-4,0077	-4,0077
1 3	0,4924	0,9998	0,2800	-3,9600	-3,9600
1 4	0,4896	0,9997	0,3111	-3,9289	-3,9289
1 5	0,4938	0,9999	0,2634	-3,9766	-2,4926
1 6	0,5027	0,9932	0,6792	-3,5608	-3,5608

**Tabelle A.22:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 4,24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,76 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1.

### Manipulationsbeispiel 2

Im zweiten Manipulationsbeispiel wird zusätzlich zur Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 5 eingebracht. In Tabelle A.23 wird die Detektion wieder mit der Betrachtung der Einzelgrößen begonnen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1313	0,4858	1,9858	-3,0242	0,3325
2	0,4757	1,0000	0,2838	-4,7262	-4,7262
3	0,1427	0,5250	1,9215	-3,0885	0,2682
4	0,4682	0,9999	0,3577	-4,6523	-4,6523
5	0,0547	0,1993	2,5630	-2,4470	-2,4470
6	0,0489	0,1770	2,6273	-2,3827	0,9740

**Tabelle A.23:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,01 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,65 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Unter den Einzelgrößen werden Größen 1, 3 und 6 als möglicherweise manipuliert detektiert. Den Schwellwert für Untersuchung auf Mehrfachmanipulationen überschreiten die Größen 5 und 6. In Tabelle A.24 werden also Kombinationen mit Größen 5 und 6 dargestellt.

Unter den Kombinationen mit Vielfachheit 2 (Tabelle A.24) wird die tatsächlich manipulierte Kombination [5,1] detektiert. Ohne Schwellwertanpassung würde auch Kombination [3,6] detektiert werden, weil der Wert der Prüfgröße beinahe den Betrag der Kombination [5,1] erreicht. Der reduzierte Schwellwert für die Untersuchung auf Kombinationen mit Vielfachheit 3 von 3,07 wird für keine Kombination überschritten.

Für das Beispiel einer Manipulation in den Größen 1 und 5 mit der gleichen Manipulationsrichtung liefert der Messwerttest eine Detektion in Einzelgrößen 1, 3 und 6 sowie in der Kombination [5,1]. Durch die unterschiedliche Schwellwertanpassung bei verschiedenen Viel-

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
5 1	0,0434	0,1269	2,8016	-1,4384	0,0456
5 2	0,4823	0,9993	0,3807	-3,8593	-3,8593
5 3	0,4703	0,9808	0,8533	-3,3867	-3,3867
5 4	0,4905	0,9998	0,3019	-3,9381	-3,9381
5 6	0,1240	0,3892	2,1190	-2,1210	-2,1210
6 1	0,4616	0,9761	0,8962	-3,3438	-3,3438
6 2	0,4803	0,9991	0,3979	-3,8421	-3,8421
6 3	0,0475	0,1399	2,7502	-1,4898	-1,4898
6 4	0,4888	0,9997	0,3190	-3,9210	-2,4370
6 5	0,1386	0,4352	2,0333	-2,2067	-2,2067

**Tabelle A.24:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 4,24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,76 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

fachheiten sind die Differenzen zum individuellen Schwellwert zwischen den Vielfachheiten nicht vergleichbar. Für eine Entscheidung werden die Detektionen in Tabelle A.25 direkt verglichen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1313	0,4858	1,9858	-3,0242	0,3325
3	0,1427	0,5250	1,9215	-3,0885	0,2682
6	0,0489	0,1770	2,6273	-2,3827	0,9740
5 1	0,0434	0,1269	2,8016	-1,4384	0,0456

**Tabelle A.25:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Die höchsten Differenzen zum individuellen Schwellwert weist Größe 6 auf. Da diese Differenzen zwischen den Vielfachheiten nicht vergleichbar sind, wird für den Vergleich die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit  $Pr\{f_p\}$  betrachtet, also der Wahrscheinlichkeit, dass eine Größe oder Kombination mit dieser Prüfgröße als manipuliert detektiert wird, obwohl sie es tatsächlich nicht ist. Daraus ergibt sich die eindeutige Entscheidung zugunsten der tatsächlich manipulierten Kombination [1,5]. Der Messwerttest liefert also mit der Schwellwertanpassung auch hier das richtige Ergebnis.

### Manipulationsbeispiel 3

Im dritten Manipulationsbeispiel wird das Vorzeichen der Manipulation in Größe 5 umgedreht, während die Manipulation für Größe 1 beibehalten wird. Größe 1 wird also um  $+3\sigma$  manipuliert, Größe 5 um  $-3\sigma$ . In Tabelle A.26 wird die Detektion wieder mit den Einzelgrößen begonnen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0085	0,0263	3,4858	-1,5242	1,8325
2	0,2984	0,9017	1,2162	-3,7938	-3,7938
3	0,3316	0,9424	1,0785	-3,9315	-0,5748
4	0,3163	0,9253	1,1423	-3,8677	-3,8677
5	0,0095	0,0297	3,4370	-1,5730	-1,5730
6	0,3199	0,9295	1,1273	-3,8827	-0,5260

**Tabelle A.26:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,01 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,65 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Die Detektion unter den Einzelgrößen in Tabelle A.26 liefert eine Detektion in Größe 1. Die Detektion erfolgt nur aufgrund der Schwellwertanpassung. Größen 1 und 5 erfüllen die Bedingung zur Untersuchung auf Manipulationen mit höherer Vielfachheit. In Tabelle A.27 wird also die Detektion mit Kombinationen der Größen 1 und 5 durchgeführt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,4837	0,9994	0,3677	-3,8723	-3,8723
1 3	0,1306	0,4098	2,0800	-2,1600	-2,1600
1 4	0,4916	0,9998	0,2889	-3,9511	-3,9511
1 5	0,0486	0,1435	2,7366	-1,5034	-0,0194
1 6	0,4767	0,9838	0,8208	-3,4192	-3,4192
5 1	0,0434	0,1269	2,8016	-1,4384	0,0456
5 2	0,4823	0,9993	0,3807	-3,8593	-3,8593
5 3	0,4703	0,9808	0,8533	-3,3867	-3,3867
5 4	0,4905	0,9998	0,3019	-3,9381	-3,9381
5 6	0,1240	0,3892	2,1190	-2,1210	-2,1210

**Tabelle A.27:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 4,24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,76 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 wird nur die Kombination [5,1] detektiert. Der angepasste Schwellwert für eine Untersuchung auf Kombinationen höherer Vielfachheiten von 3,07 wird von keiner der Kombinationen erfüllt.

Die gegenläufige Beispielmanipulation in den Größen 1 und 5 wird vom Messwerttest also mit Hilfe des Vorwissens ebenfalls erfolgreich detektiert. Allerdings weiß die Prüfgröße für Größe 1 die höchste Differenz zur individuellen Schwelle auf und würde auch aufgrund der geringeren Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit tatsächlich detektiert werden.

### Manipulationsbeispiel 4

Die Detektion der Manipulation unerwarteter Größen muss erst bei der doppelten Abweichung, hier  $6\sigma$  erfolgen. Im folgenden Beispiel ist die laut Vorwissen für eine Manipulation unerwartete Größe 2 um das doppelte der erwarteten Manipulationen, also  $+6\sigma$  manipuliert. Tabelle A.28 zeigt die Einzelgrößen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1731	0,6221	1,7642	-3,2458	0,1109
2	9,39 e-7	1,73 e-6	6,2838	1,2738	1,2738
3	0,1603	0,5824	1,8285	-3,1815	0,1752
4	0,0477	0,1720	2,6423	-2,3677	-2,3677
5	0,1633	0,5920	1,8130	-3,1970	-3,1970
6	0,1509	0,5522	1,8773	-3,1327	0,2240

**Tabelle A.28:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,01 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,65 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Einzelgrößen wird in Tabelle A.28 Größe 2 als manipuliert detektiert. Für die Größen 2 und 4 wird auch der Schwellwert für die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 2 überschritten. In Tabelle A.29 sind daher alle Kombinationen mit den Größen 2 und 4 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
2 1	0,4980	1,0000	0,2062	-4,0338	-4,0338
2 3	0,4929	0,9998	0,2747	-3,9653	-2,4813
2 4	0,5049	0,9937	0,6662	-3,5738	-3,5738
2 5	0,4942	0,9999	0,2582	-3,9818	-3,9818
2 6	0,4881	0,9996	0,3268	-3,9132	-3,9132
4 1	0,0624	0,1883	2,5864	-1,6536	-1,6536
4 2	9,95 e-6	1,44 e-5	6,6169	2,3769	2,3769
4 3	0,0558	0,1667	2,6550	-1,5850	-1,5850
4 5	0,0573	0,1718	2,6385	-1,6015	-1,6015
4 6	0,0511	0,1516	2,7071	-1,5329	-0,0489

**Tabelle A.29:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 4,24 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 2,76 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle A.29 finden sich eine weitere Detektion bei [4,2]. Der angepasste Schwellwert für die Suche nach Kombinationen der Vielfachheit 3 wird ebenfalls von [4,2] überschritten. Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3, die

[2,4] enthalten, findet sich keine weitere Detektion und keine Hinweise auf eine Manipulation der Vielfachheit 4.

Ein Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen wird in Tabelle A.30 angestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1731	0,6221	1,7642	-3,2458	0,1109
2	9,39 e-7	1,73 e-6	6,2838	1,2738	1,2738
3	0,1603	0,5824	1,8285	-3,1815	0,1752
6	0,1509	0,5522	1,8773	-3,1327	0,2240
4 2	9,95 e-6	1,44 e-5	6,6169	2,3769	2,3769

**Tabelle A.30:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Der Vergleich der Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeiten liefert die Detektion einer Manipulation in Größe 2. Die unwahrscheinliche Manipulation in Größe 2 wird also trotz der Schwellwertanpassung erfolgreich detektiert.

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Beispielmanipulationen sind zusammengefasst in Tabelle A.31.

Manipulation	ohne SW-Anpassung	Eindeutig	mit SW-Anpassung	Eindeutig
unmanip. keine	keine	✓	keine	✓
Bsp. 1 1	1	✓	1	✓
Bsp. 2 [1,5]	[1,5] / [3,6]		[1,5]	✓
Bsp. 3 [1,5]	1/5 / [1,5]		1 / [1,5]	
Bsp. 4 2	2	✓	2	✓

**Tabelle A.31:** Leistung des Messwerttests in den Beispielen

## A.2.2 Hypothesentest

Für das Beispiel mit vielfachheitsabhängiger Schwellwertanpassung  $S$ , werden die Werte übernommen, die in Abschnitt 3.3.5 berechnet wurden. Für Vielfachheit 1 liegt sie bei  $S = 0,89$ , für Vielfachheit 2 bei  $S = 0,64$  und für Vielfachheit 3 bei  $S = 0,76$ .

Daraus ergeben sich die in Abschnitt 3.3.5 berechneten Schwellwerte, die hier in Tabelle A.32 zusammengefasst werden.

Vielfachheit	Vielfachheits-spezifisches S	Schwellwert für Detektion		Schwellwert Vorauswahl für höhere Vielfachh.	
		allgemein	angepasst	allgemein	angepasst
1	0,89	25	2,75	46	5,06
2	0,64	16	5,76	23	8,28
3	0,76	35	8,40	(28	6,72)

**Tabelle A.32:** Schwellwerte für Detektion über den Hypothesentest.

### Beispiel Unmanipuliert

Zunächst wird der unmanipulierte Fall dargestellt. In Tabelle A.33 ist die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 1 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8905	0,8292	0,0698	-24,9302	-2,6802
2	0,8937	0,8167	0,0805	-24,9195	-24,9195
3	0,9019	0,7885	0,1079	-24,8921	-2,6421
4	0,9079	0,7702	0,1280	-24,8720	-24,8720
5	0,8989	0,7983	0,0980	-24,9020	-24,9020
6	0,9123	0,7580	0,1424	-24,8576	-2,6076

**Tabelle A.33:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 25 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 2,75 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Unter den Einzelgrößen (Tabelle A.33) tritt keine Detektion auf. Auch der Schwellwert von 46 bzw. der reduzierte Schwellwert von 5,06 für die Detektion von Manipulationen höherer Vielfachheit wird nicht überschritten. Der Hypothesentest identifiziert dieses Beispiel richtig als nicht manipuliert.

### Manipulationsbeispiel 1

Das erste Manipulationsbeispiel ist die Erhöhung der Größe 1 um  $3\sigma$ . In Tabelle A.34 sind die Einzelgrößen dargestellt.

In Tabelle A.34 werden Größe 1 und 6 als manipuliert detektiert. Der reduzierte Schwellwert für Untersuchung auf Manipulationen höherer Vielfachheiten von 5,06 wird von Größe 1 überschritten. Daher werden in Tabelle A.35 alle Kombinationen mit Größe 1 untersucht.

Unter den Kombinationen mit Vielfachheit 2 finden sich keine weiteren Detektionen oder Hinweise auf Manipulationen der Vielfachheit 3.

Der Hypothesentest detektiert also die tatsächlich manipulierte Größe 1.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8905	0,0255	7,4845	-17,5155	4,7345
2	0,0790	0,7035	0,2173	-24,7827	-24,7827
3	0,0780	0,7307	0,1776	-24,8224	-2,5724
4	0,0773	0,7487	0,1539	-24,8461	-24,8461
5	0,0783	0,7212	0,1910	-24,8090	-24,8090
6	0,2379	0,1253	3,5243	-21,4757	0,7743

**Tabelle A.34:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 25 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 2,75 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,9056	0,1557	5,0234	-10,9766	-10,9766
1 3	0,9126	0,1545	5,0386	-10,9614	-10,9614
1 4	0,9178	0,1537	5,0501	-10,9499	-10,9499
1 5	0,9100	0,1550	5,0330	-10,9670	-0,7270
1 6	0,9994	0,1416	7,8305	-8,1695	-8,1695

**Tabelle A.35:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 16 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 5,76 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1.

## Manipulationsbeispiel 2

Die nächste Beispielmanipulation ergibt sich aus der Erhöhung der beiden Größen 1 und 5 um  $+3\sigma$ . In Tabelle A.36 wird die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 1 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0326	0,1049	3,9433	-21,0567	1,1933
2	0,0090	0,8167	0,0805	-24,9195	-24,9195
3	0,0300	0,1167	3,6921	-21,3079	0,9421
4	0,0091	0,7702	0,1280	-24,8720	-24,8720
5	0,0783	0,0364	6,5690	-18,4310	-18,4310
6	0,0875	0,0319	6,9028	-18,0972	4,1528

**Tabelle A.36:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 25 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 2,75 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Bei den Einzelgrößen in Tabelle A.36 werden Manipulationen in Größen 1,3 und 6 detek-

tiert. Den Schwellwert für eine Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 2 überschreiten die Größen 5 und 6. In Tabelle A.24 werden die Kombinationen mit diesen Größen aufgeführt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 5	0,9100	0,0192	9,2851	-6,7149	3,5251
1 6	0,1070	0,1572	7,5051	-8,4949	-8,4949
2 5	0,0819	0,2025	2,6820	-13,3180	-13,3180
2 6	0,0920	0,1816	4,7008	-11,2992	-11,2992
3 5	0,0939	0,1779	7,1151	-8,8849	-8,8849
3 6	0,9303	0,0188	9,3291	-6,6709	-6,6709
4 5	0,0806	0,2058	2,6618	-13,3382	-13,3382
4 6	0,0903	0,1846	4,6655	-11,3345	-1,0945
5 6	0,3186	0,0543	7,1857	-8,8143	-8,8143

**Tabelle A.37:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 16 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 5,76 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Hier wird tatsächlich die Kombination [1,5] detektiert. Den höchsten Wert der Prüfgröße weißt allerdings die Kombination [3,6] auf, die ohne Nutzung des Vorwissens (Schwellwertanpassung) detektiert werden würde. Den Schwellwert für die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 3 überschreiten Kombinationen [1,5] und [3,6]. In Tabelle A.38 werden die Kombinationen der Vielfachheit 3 mit Kombinationen [1,5] und [3,6] untersucht.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 5	0,9196	0,0745	5,5836	-29,4164	-29,4164
1 3 5	0,9994	0,0692	14,2086	-20,7914	-20,7914
1 3 6	0,9994	0,0692	14,2086	-20,7914	-20,7914
1 4 5	0,9300	0,0738	5,5971	-29,4029	-29,4029
1 5 6	0,9994	0,0692	14,2086	-20,7914	-20,7914
2 3 6	0,9373	0,0733	5,6065	-29,3935	-29,3935
3 4 6	0,9466	0,0726	5,6183	-29,3817	-29,3817
3 5 6	0,9994	0,0692	14,2086	-20,7914	5,8086
4 5 6	0,3781	0,1610	4,5171	-30,4829	-30,4829

**Tabelle A.38:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 35 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 35 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 8,40 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Für die Entscheidung zwischen den verschiedenen Detektionen, werden sie in Tabelle A.39 zusammengefasst.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0326	0,1049	3,9433	-21,0567	1,1933
3	0,0300	0,1167	3,6921	-21,3079	0,9421
6	0,0875	0,0319	6,9028	-18,0972	4,1528
1 5	0,9100	0,0192	9,2851	-6,7149	3,5251
3 5 6	0,9994	0,0692	14,2086	-20,7914	5,8086

**Tabelle A.39:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Für Manipulationsbeispiel 2 wird aufgrund der geringsten Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit mit dem Hypothesentest bei Verwendung der Schwellwertanpassung also die tatsächlich manipulierte Kombination [1,5] detektiert.

### Manipulationsbeispiel 3

Beim dritten Manipulationsbeispiel ist wieder das Vorzeichen der Manipulation in Größe 5 umgedreht. Größe 1 ist also mit  $+3\sigma$  manipuliert, Größe 5 mit  $-3\sigma$ . Die Einzelgrößen sind in Tabelle A.40 aufgeführt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,0876	0,0044	12,1506	-12,8494	9,4006
2	0,0025	0,3207	1,4791	-23,5209	-23,5209
3	0,0022	0,3785	1,1632	-23,8368	-1,5868
4	0,0024	0,3510	1,3048	-23,6952	-23,6952
5	0,0783	0,0050	11,8129	-13,1871	-13,1871
6	0,0023	0,3573	1,2708	-23,7292	-1,4792

**Tabelle A.40:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 25 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 2,75 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Eine Einzelmanipulation (Tabelle A.40) wird in Größe 1 detektiert. Der Schwellwert für weitere Untersuchung von 5,06 wird von den Größen 1 und 5 erfüllt. Mit dieser Vorauswahl werden bei den Hypothesen mit Manipulationen der Vielfachheit 2 in Tabelle A.41 alle Kombinationen mit 1 und 5 aufgeführt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,0914	0,0331	8,1849	-7,8151	-7,8151
1 3	0,3387	0,0090	10,8043	-5,1957	-5,1957
1 4	0,0900	0,0337	8,1526	-7,8474	-7,8474
1 5	0,9100	0,0034	12,7810	-3,2190	7,0210
1 6	0,1037	0,0292	12,6559	-3,3441	-3,3441
2 5	0,0819	0,0369	4,7795	-11,2205	-11,2205
3 5	0,0939	0,0322	12,3590	-3,6410	-3,6410
4 5	0,0806	0,0375	4,7593	-11,2407	-11,2407
5 6	0,3186	0,0096	10,6816	-5,3184	-5,3184

**Tabelle A.41:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 16 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 5,76 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

Unter den Kombinationen mit Vielfachheit 2 wird nur Kombination [1,5] detektiert. Für die Kombinationen [1,3], [1,5], [3,5] und [5,6] werden in Tabelle A.42 die Kombinationen mit Vielfachheit 3 untersucht.

Unter den Kombinationen mit Vielfachheit 3 in Tabelle A.42 findet sich eine weitere Detektion der Kombination [3,5,6], die auch einen Hinweis auf eine Kombination der Vielfachheit

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	0,4137	0,0317	6,7225	-28,2775	-1,6775
1 2 5	0,9196	0,0152	7,6812	-27,3188	-27,3188
1 3 4	0,3982	0,0328	6,6767	-28,3233	-28,3233
1 3 5	0,9994	0,0141	19,4525	-15,5475	-15,5475
1 3 6	0,9994	0,0141	19,4525	-15,5475	-15,5475
1 4 5	0,9300	0,0150	7,6947	-27,3053	-27,3053
1 5 6	0,9994	0,0141	19,4525	-15,5475	-15,5475
2 3 5	0,0940	0,1188	4,1203	-30,8797	-30,8797
2 5 6	0,3933	0,0332	6,6618	-28,3382	-28,3382
3 4 5	0,0940	0,1188	4,1203	-30,8797	-4,2797
3 5 6	0,9994	0,0141	19,4525	-15,5475	11,0525
4 5 6	0,3781	0,0344	6,6147	-28,3853	-28,3853

**Tabelle A.42:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 35 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 35 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 8,4 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+3\sigma$  in Größe 1 und  $-3\sigma$  in Größe 5.

4 liefern. Unter den Vierfachkombinationen finden sich jedoch keine weiteren Detektionen. Unter den drei Detektionen Größe 1 und Kombinationen [1,5] und [3,5,6] liefert die Berücksichtigung der Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeiten die Entscheidung für Kombination [1,5]. Der Hypothesentest liefert in diesem Fall also die tatsächlich manipulierte Kombination.

#### Manipulationsbeispiel 4

Als Beispiel einer größeren Manipulation einer unerwarteten Größe, wird wieder die Manipulation der Größe 2 um  $+6\sigma$  dargestellt. Die Einzelgrößen werden in Tabelle A.43 untersucht.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	4,85 e-6	0,1497	3,1125	-21,8875	0,3625
2	8,94 e-1	2,89 e-7	39,4863	14,4863	14,4863
3	5,24 e-6	0,1354	3,3435	-21,6565	0,5935
4	1,76 e-5	0,0310	6,9816	-18,0184	-18,0184
5	5,14 e-6	0,1388	3,2870	-21,7130	-21,7130
6	5,56 e-6	0,1253	3,5243	-21,4757	0,7743

**Tabelle A.43:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 25 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 2,75 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Einzelgrößen in Tabelle A.43 liefert der Hypothesentest Detektionen für Größen

1, 2, 3 und 6. Kombinationen der Vielfachheit 2 werden in Tabelle A.44 untersucht für die Größen 2 und 4.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	9,06 e-1	3,79 e-6	26,3508	10,3508	10,3508
1 4	1,42 e-4	0,0240	8,8355	-7,1645	-7,1645
1 5	9,47 e-6	0,3300	3,4135	-12,5865	-2,3465
1 6	1,43 e-4	0,0239	13,2651	-2,7349	-2,7349
2 3	9,15 e-1	3,75 e-6	15,8228	-0,1772	10,0628
2 4	9,99 e-1	3,44 e-6	39,8191	23,8191	23,8191
2 5	9,13 e-1	3,76 e-6	15,8195	-0,1805	-0,1805
2 6	9,24 e-1	3,72 e-6	26,3909	10,3909	10,3909
3 4	1,59 e-4	0,0214	5,4361	-10,5639	-10,5639
4 5	1,55 e-4	0,0220	5,4033	-10,5967	-10,5967
4 6	1,74 e-4	0,0197	9,2346	-6,7654	3,4746

**Tabelle A.44:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 16 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 5,76 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Zweierkombinationen in Tabelle A.44 finden sich zahlreiche Detektionen. Für die Untersuchung auf Manipulationen der Vielfachheit 3 werden in Tabelle A.45 alle Kombinationen mit Größe 2 und mit Kombination [4,6] aufgestellt, da diese alle den Schwellwert für die Untersuchung auf Manipulationen überschreiten.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	9,22 e-1	2,37 e-5	15,8318	-19,1682	7,4318
1 2 4	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	4,8234	4,8234
1 2 5	9,20 e-1	2,38 e-5	15,8288	-19,1712	-19,1712
1 2 6	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	4,8234	4,8234
1 4 6	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	4,8234	4,8234
2 3 4	9,99 e-1	2,20 e-5	13,2731	-21,7269	-21,7269
2 3 5	9,99 e-1	2,20 e-5	13,2731	-21,7269	-21,7269
2 3 6	9,37 e-1	2,34 e-5	15,8517	-19,1483	-19,1483
2 4 5	9,99 e-1	2,20 e-5	13,2731	-21,7269	-21,7269
2 4 6	1,00 e+0	2,20 e-5	39,8234	4,8234	31,4234
2 5 6	9,35 e-1	2,34 e-5	15,8491	-19,1509	-19,1509
3 4 6	7,44 e-4	2,06 e-2	7,2858	-27,7142	-27,7142
4 5 6	7,28 e-4	2,10 e-2	7,2586	-27,7414	-27,7414

**Tabelle A.45:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 35 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 35 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 8,4 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+6\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Auch unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 liefern viele eine Detektion und erfül-

len den Schwellwert für die Vorauswahl für Kombinationen höherer Vielfachheit. Unter den Kombinationen mit Vielfachheit 4 findet sich keine weitere Detektion.

Unter den zahlreichen Detektionen weist Größe 2 die geringste Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit auf. Der Hypothesentest liefert also auch für dieses Beispiel die richtige Detektion.

## Zusammenfassung

Der Hypothesentest liefert also mit der vielfachheitsabhängigen Schwellwertanpassung für alle Beispiele die richtige Detektion, wie in Tabelle A.46 zusammengefasst.

<b>Manipulation</b>		<b>ohne SW-Anpassung</b>	<b>Eindeutig</b>	<b>mit SW-Anpassung</b>	<b>Eindeutig</b>
unmanip.	keine	keine	✓	keine	✓
Bsp. 1	1	1	✓	1	✓
Bsp. 2	[1,5]	[3,6]	✓ (falsch)	[1,5]	✓
Bsp. 3	[1,5]	[1,5]	✓	[1,5]	✓
Bsp. 4	2	2	✓	2	✓

**Tabelle A.46:** Leistung des Hypothesentests in den Beispielen

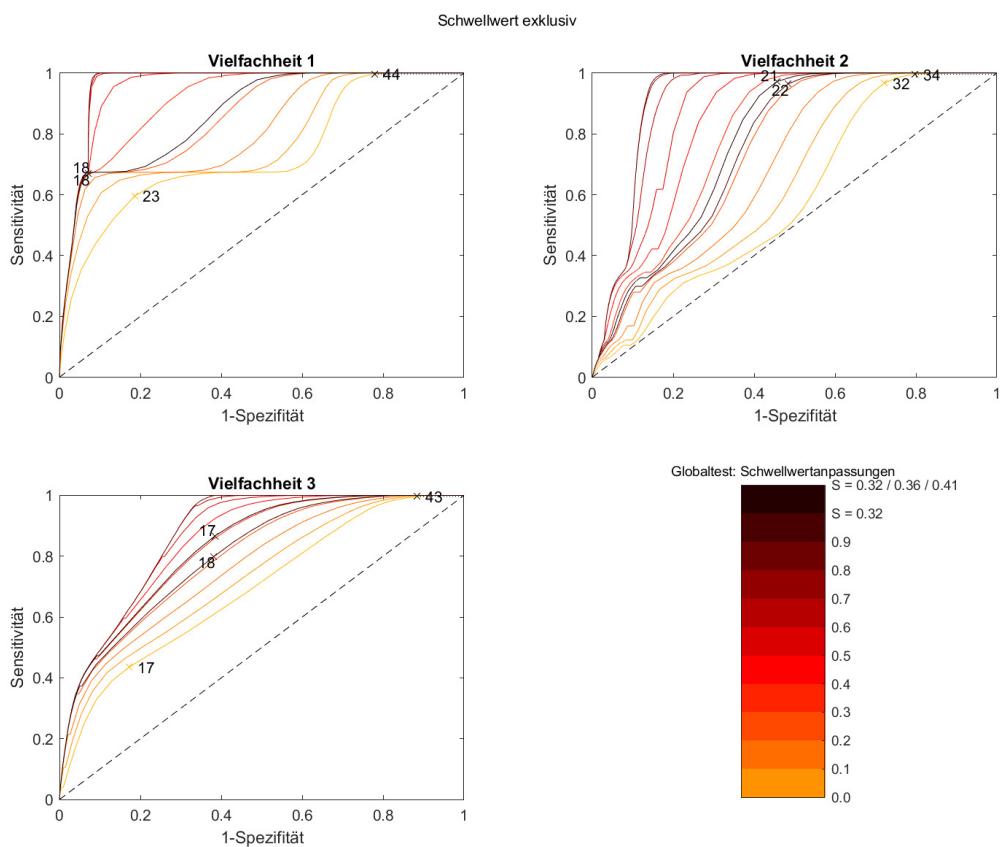
## A.3 Dynamisches Beispiel

### A.3.1 Messwerttest

<b>Größe Nr.</b>	<b>Norm.wert</b>	<b>Größe Nr.</b>	<b>Norm.wert</b>	<b>Größe Nr.</b>	<b>Norm.wert</b>
1 2	0,7775	1 2 3	1,0789	2 5 4	0,2437
1 3	0,6059	1 2 4	0,3834	2 5 6	0,0588
1 4	0,4105	1 2 5	0,2927	2 6 1	0,9639
1 5	0,3093	1 2 6	0,1142	2 6 3	0,4844
1 6	0,1242	1 3 2	1,2515	2 6 4	0,2509
2 1	0,9810	1 3 4	0,3692	2 6 5	0,2079
2 3	0,4969	1 3 5	0,2594	3 4 1	0,5625
2 4	0,3852	1 3 6	0,1149	3 4 2	0,6689
2 5	0,3099	1 4 2	0,7199	3 4 5	0,0861
2 6	0,1153	1 4 3	0,5765	3 4 6	0,0171
3 1	0,6241	1 4 5	0,1898	3 5 1	0,4246
3 2	0,7143	1 4 6	0,0176	3 5 2	0,7084
3 4	0,4069	1 5 2	0,7601	3 5 4	0,3377
3 5	0,2619	1 5 3	0,2468	3 5 6	0,0176
3 6	0,1163	1 5 4	0,3279	3 6 1	0,5978
4 1	0,9584	1 5 6	0,0586	3 6 2	0,7104
4 2	0,6781	1 6 2	0,7683	3 6 4	0,3382
4 3	0,4949	1 6 3	0,5531	3 6 5	0,0718
4 5	0,2117	1 6 4	0,3316	4 5 1	0,8516
4 6	0,0179	1 6 5	0,1841	4 5 2	0,6741
5 1	0,8910	2 3 1	0,6622	4 5 3	0,3892
5 2	0,7175	2 3 4	0,3748	4 5 6	0,0129
5 3	0,4015	2 3 5	0,2458	4 6 1	0,9420
5 4	0,3402	2 3 6	0,1065	4 6 2	0,6760
5 6	0,0592	2 4 1	0,9587	4 6 3	0,4864
6 1	0,9599	2 4 3	0,4851	4 6 5	0,2083
6 2	0,7180	2 4 5	0,2086	5 6 1	0,8726
6 3	0,4883	2 4 6	0,0293	5 6 2	0,7163
6 4	0,3403	2 5 1	0,8828	5 6 3	0,3918
6 5	0,2085	2 5 3	0,3954	5 6 4	0,3399

**Tabelle A.47:** Normierungswerte für Messwerttest: Prüfgrößen für die Simulation einer Manipulation mit  $1\sigma$  ohne statistische Fehler.

### A.3.2 Globaltest



**Abbildung A.2:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Globaltest und der Skalierung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als Manipulation werden alle Untermengen der manipulierten Kombinationen betrachtet. Der optimale Schwellwert ist markiert und beschriftet. Die Kurven verlaufen nahe der Diagonale, der Einsatz der Schwellwerte für die Vorauswahl von Kombinationen ist daher nicht sinnvoll.

### A.3.3 Hypothesentest

Größe Nr.		Norm.wert	Größe Nr.		Norm.wert	Größe Nr.		Norm.wert		
1	2	0,2395	1	2	3	0,2118	2	5	6	0,3269
1	3	0,0470	1	2	4	0,2293	3	4	5	0,1888
1	4	0,1156	1	2	5	0,2769	3	4	6	0,1487
1	5	0,1003	1	2	6	0,2538	3	5	6	0,0865
1	6	0,0800	1	3	4	0,0990	4	5	6	0,0803
2	3	0,3992	1	3	5	0,0394				
2	4	0,2980	1	3	6	0,0620				
2	5	0,3434	1	4	5	0,1810				
2	6	0,3170	1	4	6	0,1014				
3	4	0,1641	1	5	6	0,0856				
3	5	0,1023	2	3	4	0,3948				
3	6	0,1216	2	3	5	0,3959				
4	5	0,1252	2	3	6	0,4123				
4	6	0,0179	2	4	5	0,3678				
5	6	0,0592	2	4	6	0,2820				

**Tabelle A.48:** Normierungswerte für Hypothesentest: Prüfgrößen für die Simulation einer Manipulation mit  $1\sigma$  ohne statistische Fehler.

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	2	0,9735	0,9782	8,0141	2,3041	6,5866
1	2	0,9840	0,9770	7,3620	1,6520	1,6520
1	2	0,9841	0,9769	6,1183	0,4083	0,4083
1	2	0,9995	0,9751	6,6578	0,9478	0,9478
1	3	0,7102	0,9979	10,3759	4,6659	4,6659
1	3	0,7244	0,9974	27,6152	21,9052	21,9052
1	3	0,7190	0,9976	14,4406	8,7306	8,7306
1	4	0,5714	1,0000	2,8039	-2,9061	-2,9061
1	4	0,6013	0,9998	5,4640	-0,2460	-0,2460
1	5	0,5691	1,0000	4,4886	-1,2214	-1,2214
2	3	0,9812	0,9773	4,2953	-1,4147	-1,4147
2	3	0,9807	0,9773	4,2910	-1,4190	-1,4190
2	3	0,9993	0,9751	4,1215	-1,5885	-1,5885
2	4	0,9840	0,9770	4,6074	-1,1026	-1,1026
2	4	0,9961	0,9755	5,9964	0,2864	4,5689
2	5	0,9960	0,9755	5,2016	-0,5084	-0,5084
3	4	0,5156	1,0000	0,8020	-4,9080	-0,6255
3	4	0,5429	1,0000	1,2991	-4,4109	-4,4109
3	5	0,5181	1,0000	0,4689	-5,2411	-0,9586
4	5	0,5392	1,0000	2,4058	-3,3042	-3,3042

**Tabelle A.49:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 5,71 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 5,71 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die angepasste Schwellwert von 1,43 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

## A.4 Dynamisches Beispiel mit vielfachheitsabhängiger Schwellwertanpassung

### A.4.1 Messwerttest

In Tabelle A.50 sind die Schwellwerte für die Detektion mit dem Messwerttest zusammengefasst, deren Bestimmung in Abschnitt 3.4.3 beschrieben wird.

Vielfachheit	Vielfachheits-spezifisches $S$	Schwellwert für Detektion		Schwellwert Vorauswahl für höhere Vielfachh.	
		allgemein	angepasst	allgemein	angepasst
1	0,29	1,36	0,97	1,18	0,84
2	0,15	1,40	1,19	1,40	1,19
3	0,16	1,64	1,38	(1,58)	1,33)

**Tabelle A.50:** Schwellwerte für Detektion über den Messwerttest im dynamischen Beispiel.

### Beispiel Unmanipuliert

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8422	0,9238	0,2188	-1,1412	-0,7468
2	0,3820	0,9153	0,2679	-1,0921	-1,0921
3	0,3374	0,9291	0,3323	-1,0277	-0,6333
4	0,3543	0,9779	0,3131	-1,0469	-1,0469
5	0,3304	0,8840	0,2680	-1,0920	-1,0920
6	0,2220	0,7547	0,8510	-0,5090	-0,1146

**Tabelle A.51:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,36 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,97 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

Das Beispiel ohne Manipulation wird richtig als unmanipuliert erkannt, wie in Tabelle A.51 dargestellt.

### Manipulationsbeispiel 1

Die Manipulation um  $+1,26\sigma$  in Größe 1 wird bei der Untersuchung der Einzelgrößen (Tabelle A.52) richtig detektiert.

Die Untersuchung von Größenkombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle A.53 liefert keine weiteren Detektionen.

Die Manipulation in Beispiel 1 wird vom Messwerttest also richtig detektiert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,2806	0,4297	1,4508	0,0908	0,4852
2	0,3481	0,8904	0,3645	-0,9955	-0,9955
3	0,3331	0,8687	0,5060	-0,8540	-0,4596
4	0,3518	0,9745	0,3715	-0,9885	-0,9885
5	0,3055	0,8590	0,2891	-1,0709	-1,0709
6	0,2222	0,7510	0,8659	-0,4941	-0,0997

**Tabelle A.52:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,36 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,97 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,4039	0,8601	0,2538	-1,1462	-1,1462
1 3	0,5882	0,8464	0,5477	-0,8523	-0,8523
1 4	0,3606	0,9633	0,3039	-1,0961	-1,0961
1 5	0,3423	0,8821	0,3017	-1,0983	-0,8883
1 6	0,2283	0,7225	0,8745	-0,5255	-0,5255

**Tabelle A.53:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,40 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,19 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

## Manipulationsbeispiel 2

Die Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5 liefert unter den Einzelgrößen Detektionen in den Größen 1 und 6, wie in Tabelle A.54 dargestellt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,4110	0,5756	1,1339	-0,2261	0,1683
2	0,3312	0,8768	0,3595	-1,0005	-1,0005
3	0,3386	0,8855	0,8050	-0,5550	-0,1606
4	0,3333	0,9433	0,3093	-1,0507	-1,0507
5	0,3571	0,8899	1,0693	-0,2907	-0,2907
6	0,1803	0,6125	1,1623	-0,1977	0,1967

**Tabelle A.54:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,36 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,97 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

In Tabelle A.55 werden die Kombinationen der Vielfachheit 2 mit den Größen 1 und 6 untersucht. Eine Detektion findet sich in Kombination 1, 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,3904	0,8490	0,2677	-1,1323	-1,1323
1 3	0,6780	0,9345	0,6237	-0,7763	-0,7763
1 4	0,3421	0,9346	0,3488	-1,0512	-1,0512
1 5	0,3454	0,8727	1,3115	-0,0885	0,1215
1 6	0,1851	0,5923	1,1255	-0,2745	-0,2745
6 1	0,5242	0,6595	1,0479	-0,3521	-0,3521
6 2	0,3645	0,8740	0,4222	-0,9778	-0,9778
6 3	0,3415	0,8809	0,9577	-0,4423	-0,4423
6 4	0,3827	0,9860	0,4358	-0,9642	-0,7542
6 5	0,3304	0,8823	0,7758	-0,6242	-0,6242

**Tabelle A.55:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,40 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,19 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 (Tabelle A.56) finden sich keine weiteren Detektionen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 5 2	0,4087	0,8330	0,2902	-1,3498	-1,3498
1 5 3	0,6996	0,8711	0,7065	-0,9335	-0,9335
1 5 4	0,3851	0,9698	0,3019	-1,3381	-1,3381
1 5 6	0,3475	0,8191	1,3546	-0,2854	-0,2854

**Tabelle A.56:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,64 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 1,64 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,38 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Der Vergleich der Detektionen in Tabelle A.57 zeigt, dass die Entscheidung zwischen der Manipulation in Größe 1 und in Kombination [1,5] schwierig ist. Aufgrund der geringeren Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und der höheren Wahrscheinlichkeit für Größe 1 würde die Entscheidung zugunsten dieser Hypothese ausfallen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,4110	0,5756	1,1339	-0,2261	0,1683
6	0,1803	0,6125	1,1623	-0,1977	0,1967
1 5	0,3454	0,8727	1,3115	-0,0885	0,1215

**Tabelle A.57:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

### Manipulationsbeispiel 3

Für die gegenläufige Manipulation in Größen 1 und 5 finden sich unter den Einzelgrößen (Tabelle A.58) Detektionen in den Größen 1, 5 und 6.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1812	0,2891	1,7678	0,4078	0,8022
2	0,3640	0,8983	0,3696	-0,9904	-0,9904
3	0,3273	0,8634	0,3514	-1,0086	-0,6142
4	0,3677	0,9902	0,5134	-0,8466	-0,8466
5	0,1950	0,6386	1,4605	0,1005	0,1005
6	0,2760	0,8440	1,1343	-0,2257	0,1687

**Tabelle A.58:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,36 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,97 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Auch für die Untersuchung auf Mehrfachfehler der Vielfachheit 2 werden Kombinationen mit Größen 1, 5 und 6 ausgewählt. In Tabelle A.59 zeigen sich Detektionen für die Kombinationen [1, 5], [5, 1], [6, 1] und [6, 5]. Den Schwellwert für Untersuchung auf Mehrfachfehler der Vielfachheit 3 überschreitet zusätzlich die Kombination [5, 6], die diesbezüglich mit Kombination [6, 5] überein stimmt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,4034	0,8660	0,2491	-1,1509	-1,1509
1 3	0,4394	0,6851	0,9697	-0,4303	-0,4303
1 4	0,3724	0,9731	0,4194	-0,9806	-0,9806
1 5	0,2514	0,7385	1,2184	-0,1816	0,0284
1 6	0,2857	0,8248	1,3073	-0,0927	-0,0927
5 1	0,4478	0,5718	1,4100	0,0100	0,2200
5 2	0,3642	0,8764	0,4039	-0,9961	-0,9961
5 3	0,3388	0,8698	0,8234	-0,5766	-0,5766
5 4	0,3829	0,9860	0,4259	-0,9741	-0,9741
5 6	0,3336	0,8261	1,2961	-0,1039	-0,1039
6 1	0,2052	0,2853	1,8367	0,4367	0,4367
6 2	0,3765	0,8867	0,3607	-1,0393	-1,0393
6 3	0,3291	0,8508	0,3375	-1,0625	-1,0625
6 4	0,3831	0,9869	0,3835	-1,0165	-0,8065
6 5	0,1857	0,5766	1,8617	0,4617	0,4617

**Tabelle A.59:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,40 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,19 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Unter den ausgewählten Kombinationen der Vielfachheit 3 finden sich in Tabelle A.60 keine weiteren Detektionen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 5 2	0,4087	0,8330	0,2902	-1,3498	-1,3498
1 5 3	0,6996	0,8711	0,7065	-0,9335	-0,9335
1 5 4	0,3851	0,9698	0,3019	-1,3381	-1,3381
1 5 6	0,3475	0,8191	1,3546	-0,2854	-0,2854
1 6 2	0,3981	0,8391	0,2538	-1,3862	-1,3862
1 6 3	0,4785	0,6783	1,2584	-0,3816	-0,3816
1 6 4	0,3807	0,9605	0,2698	-1,3702	-1,3702
1 6 5	0,2421	0,6589	1,4102	-0,2298	-0,2298
5 6 1	0,4794	0,5370	1,4175	-0,2225	-0,2225
5 6 2	0,3652	0,8513	0,4064	-1,2336	-1,2336
5 6 3	0,3392	0,8435	0,8649	-0,7751	-0,5127
5 6 4	0,3827	0,9711	0,4225	-1,2175	-1,2175

**Tabelle A.60:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,64 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 1,64 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die angepasste Schwellwert von 1,38 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Der Vergleich der Detektionen in Tablelle A.61 zeigt kein eindeutiges Ergebnis. Die hohe Wahrscheinlichkeit würde für die Auswahl der tatsächlich manipulierten Kombination [5, 1] sprechen, die mit geringem Abstand geringste Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit findet sich bei der falschen Kombination [6, 1], die fast mit der Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit für die Einzelgröße 1 überein stimmt.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,1812	0,2891	1,7678	0,4078	0,8022
5	0,1950	0,6386	1,4605	0,1005	0,1005
6	0,2760	0,8440	1,1343	-0,2257	0,1687
1 5	0,2514	0,7385	1,2184	-0,1816	0,0284
5 1	0,4478	0,5718	1,4100	0,0100	0,2200
6 1	0,2052	0,2853	1,8367	0,4367	0,4367
6 5	0,1857	0,5766	1,8617	0,4617	0,4617

**Tabelle A.61:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

Der Messwerttest detektiert die gegenläufige Manipulation der Größen 1 und 5 richtig, aber nicht eindeutig.

### Manipulationsbeispiel 4

Die unerwartete Manipulation in Größe 2 wird unter den Einzelgrößen in Tabelle A.62 richtig und eindeutig detektiert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8897	0,9471	0,7352	-0,6248	-0,2304
2	0,1526	0,4398	2,3287	0,9687	0,9687
3	0,3396	0,9147	0,3563	-1,0037	-0,6093
4	0,3368	0,9233	0,4425	-0,9175	-0,9175
5	0,3209	0,8764	0,2684	-1,0916	-1,0916
6	0,2112	0,7265	0,8815	-0,4785	-0,0841

**Tabelle A.62:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,36 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 0,97 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Unter den Größenkombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle A.63 finden sich keine weiteren Detektionen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
2 1	0,8597	0,8860	0,2176	-1,1824	-1,1824
2 3	0,3439	0,9115	0,3100	-1,0900	-0,8800
2 4	0,4468	0,9294	0,4731	-0,9269	-0,9269
2 5	0,3283	0,8723	0,2667	-1,1333	-1,1333
2 6	0,2327	0,7311	0,8551	-0,5449	-0,5449

**Tabelle A.63:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,40 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,19 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Die unerwartete Manipulation in Größe 2 lässt sich mit dem Messwerttest eindeutig detektieren.

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Beispielmanipulationen sind zusammengefasst in Tabelle A.64. Die Manipulationen werden meist richtig detektiert. Die Schwellwertanpassung verbessert die Detektion.

<b>Manipulation</b>		<b>ohne SW-Anpassung</b>	<b>Eindeutig</b>	<b>mit SW-Anpassung</b>	<b>Eindeutig</b>
unmanip.	keine	keine	✓	keine	✓
Bsp. 1	1	1	✓	1	✓
Bsp. 2	[1,5]	keine		1/[1,5]	
Bsp. 3	[1,5]	[6,1]/1/[1,5]		[6,1]/1/[1,5]	
Bsp. 4	2	2	✓	2	✓

**Tabelle A.64:** Leistung des Messwerttests in den Beispielen

## A.4.2 Hypothesentest

Die Schwellwerte des Hypothesentests werden aus Abschnitt 3.4.5 übernommen und sind in Tabelle A.65 zusammengefasst.

<b>Vielfachheit</b>	<b>Vielfachheits-spezifisches S</b>	<b>Schwellwert für Detektion</b>		<b>Schwellwert Vorauswahl für höhere Vielfachh.</b>	
		<b>allgemein</b>	<b>angepasst</b>	<b>allgemein</b>	<b>angepasst</b>
1	0,40	2,04	1,22	1,79	1,07
2	0,22	1,82	1,42	1,87	1,46
3	0,35	2,33	1,51	(2,33)	1,51)

**Tabelle A.65:** Schwellwerte für Detektion über den Hypothesentest im dynamischen Beispiel.

### Beispiel Unmanipuliert

Die Betrachtung der Einzelgrößen in Tabelle A.66 liefert im unmanipulierten Beispiel keine Detektion.

<b>Größe Nr.</b>	<b><math>Pr\{a H_0\}</math></b>	<b><math>Pr\{f_p\}</math></b>	<b>Prüfgröße</b>	<b>Diff. allg. Schwelle</b>	<b>Diff. individ. Schwelle</b>
1	0,9588	0,8535	0,2104	-1,8296	-1,0136
2	0,9700	0,8109	0,0890	-1,9510	-1,9510
3	0,9450	0,9429	0,1511	-1,8889	-1,0729
4	0,9584	0,8554	0,1201	-1,9199	-1,9199
5	0,9524	0,8860	0,3802	-1,6598	-1,6598
6	0,9673	0,8201	0,7045	-1,3355	-0,5195

**Tabelle A.66:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,04 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,22 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Alle Größen werden hier richtig als nicht manipuliert identifiziert.

### Manipulationsbeispiel 1

In Manipulationsbeispiel 1 wird eine Manipulation in Größe 1 simuliert. Diese wird unter den Einzelgrößen (Tabelle A.67) auch richtig detektiert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,9588	0,6135	2,3210	0,2810	1,0970
2	0,9092	0,6996	0,2618	-1,7782	-1,7782
3	0,8860	0,7554	0,6524	-1,3876	-0,5716
4	0,8560	0,8664	0,1173	-1,9227	-1,9227
5	0,8516	0,8938	0,3694	-1,6706	-1,6706
6	0,8659	0,8211	0,6983	-1,3417	-0,5257

**Tabelle A.67:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,04 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,22 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 mit Größe 1 (Tabelle A.68) finden sich weitere Detektionen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,9735	0,9823	0,7053	-1,1147	-1,1147
1 3	0,9637	0,9846	3,7319	1,9119	1,9119
1 4	0,9764	0,9816	1,3517	-0,4683	-0,4683
1 5	0,9696	0,9832	1,6365	-0,1835	0,2169
1 6	0,9841	0,9797	1,9985	0,1785	0,1785

**Tabelle A.68:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,82 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,42 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

Auch unter den vorausgewählten Kombinationen der Vielfachheit 3 in Tabelle A.69 finden sich zwei Detektionen.

Zum Vergleich sind die Detektionen in Tabelle A.70 zusammengefasst. Die Wahrscheinlichkeiten für die Hypothesen sind alle ähnlich. Die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit für eine Manipulation in Größe 1 ist geringer als die anderer Hypothesen. Damit würde die tatsächlich manipulierte Größe 1 als zutreffend ausgewählt werden.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	0,9735	0,9999	0,8862	-1,4438	-0,6283
1 2 5	0,9841	0,9999	0,6652	-1,6648	-1,6648
1 2 6	0,9995	0,9999	0,7092	-1,6208	-1,6208
1 3 4	0,9822	0,9999	1,8469	-0,4831	-0,4831
1 3 5	0,9927	0,9999	4,8452	2,5152	2,5152
1 3 6	0,9888	0,9999	3,0111	0,6811	0,6811
1 4 5	0,9808	0,9999	0,9441	-1,3859	-1,3859
1 4 6	0,9878	0,9999	1,6368	-0,6932	-0,6932
1 5 6	0,9841	0,9999	2,0725	-0,2575	-0,2575

**Tabelle A.69:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,33 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 2,33 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,51 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,9588	0,6135	2,3210	0,2810	1,0970
1 3	0,9637	0,9846	3,7319	1,9119	1,9119
1 5	0,9696	0,9832	1,6365	-0,1835	0,2169
1 6	0,9841	0,9797	1,9985	0,1785	0,1785
1 3 5	0,9927	0,9999	4,8452	2,5152	2,5152
1 3 6	0,9888	0,9999	3,0111	0,6811	0,6811

**Tabelle A.70:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

## Manipulationsbeispiel 2

Bei der parallelen Manipulation der Größen 1 und 5 zeigen sich unter den Einzelgrößen in Tabelle A.71 drei Detektion in Größen 1, 5 und 6 und zusätzlich, als Vorauswahl für die Untersuchung von Kombinationen, Größe 3.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8951	0,6190	2,2323	0,1923	1,0083
2	0,8517	0,7007	0,2594	-1,7806	-1,7806
3	0,8556	0,6919	1,0871	-0,9529	-0,1369
4	0,8153	0,8056	0,2205	-1,8195	-1,8195
5	0,8516	0,7009	2,1782	0,1382	0,1382
6	0,8504	0,7035	3,0094	0,9694	1,7854

**Tabelle A.71:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,04 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,22 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 (Tabelle A.72) finden sich vier weitere Detektionen, die Kombinationen [1,3], [1,5], [1,6] und [5,6]. Zusätzlich wird die Kombination [3,5] für die Vorauswahl von Kombinationen der Vielfachheit 3 qualifiziert.

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	2	0,9092	0,9831	0,6834	-1,1366	-1,1366
1	3	0,8957	0,9863	3,6003	1,7803	1,7803
1	4	0,9279	0,9782	1,3745	-0,4455	-0,4455
1	5	0,9696	0,9661	2,3442	0,5242	0,9246
1	6	0,9631	0,9681	2,3843	0,5643	0,5643
2	3	0,9255	0,9789	0,5000	-1,3200	-0,9196
2	5	0,9177	0,9810	0,4799	-1,3401	-1,3401
2	6	0,9172	0,9811	0,3998	-1,4202	-1,4202
3	4	0,8822	0,9893	0,7856	-1,0344	-1,0344
3	5	0,8864	0,9884	1,5100	-0,3100	-0,3100
3	6	0,9216	0,9799	1,3553	-0,4647	-0,4647
4	5	0,8592	0,9937	0,7343	-1,0857	-1,0857
4	6	0,8521	0,9949	1,2574	-0,5626	-0,1622
5	6	0,8659	0,9925	4,0762	2,2562	2,2562

**Tabelle A.72:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,82 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,42 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Auch bei den Kombinationen der Vielfachheit 3 (Tabelle A.73) finden sich vier weitere Detektionen.

Zur Entscheidung werden die Detektionen in Tabelle A.74 verglichen.

Die geringste Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit weißt die Hypothese der Einzelgröße 1 auf, die damit trotz ihrer vergleichsweise geringen Wahrscheinlichkeit ausgewählt werden würde. Die Manipulation in Beispiel 2 wird also vom Hypothesentest erfolgreich, aber nicht eindeutig detektiert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	0,9258	0,9999	0,9849	-1,3451	-0,5296
1 2 5	0,9841	0,9997	0,9216	-1,4084	-1,4084
1 2 6	0,9789	0,9997	0,8338	-1,4962	-1,4962
1 3 4	0,9282	0,9999	1,8622	-0,4678	-0,4678
1 3 5	0,9927	0,9996	6,6487	4,3187	4,3187
1 3 6	0,9639	0,9998	3,5084	1,1784	1,1784
1 4 5	0,9808	0,9997	1,3362	-0,9938	-0,9938
1 4 6	0,9667	0,9998	1,9413	-0,3887	-0,3887
1 5 6	0,9841	0,9997	2,9013	0,5713	0,5713
2 3 5	0,9583	0,9998	0,6000	-1,7300	-1,7300
2 5 6	0,9338	0,9999	0,5468	-1,7832	-1,7832
3 4 5	0,8991	1,0000	0,8596	-1,4704	-0,6549
3 5 6	0,9217	0,9999	2,0588	-0,2712	0,5443
4 5 6	0,8676	1,0000	1,3119	-1,0181	-1,0181

**Tabelle A.73:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,33 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 2,33 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die angepasste Schwellwert von 1,51 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in den Größen 1 und 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,8951	0,6190	2,2323	0,1923	1,0083
5	0,8516	0,7009	2,1782	0,1382	0,1382
6	0,8504	0,7035	3,0094	0,9694	1,7854
1 3	0,8957	0,9863	3,6003	1,7803	1,7803
1 5	0,9696	0,9661	2,3442	0,5242	0,9246
1 6	0,9631	0,9681	2,3843	0,5643	0,5643
5 6	0,8659	0,9925	4,0762	2,2562	2,2562
1 3 5	0,9927	0,9996	6,6487	4,3187	4,3187
1 3 6	0,9639	0,9998	3,5084	1,1784	1,1784
1 5 6	0,9841	0,9997	2,9013	0,5713	0,5713
3 5 6	0,9217	0,9999	2,0588	-0,2712	0,5443

**Tabelle A.74:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

### Manipulationsbeispiel 3

Im dritten Manipulationsbeispiel werden die Größen 1 und 5 in gegenläufigen Richtungen manipuliert. Unter den Einzelgrößen in Tabelle A.75 finden sich Detektionen in Größen 1 und 3 sowie zusätzlich Größe 5 als mögliche Komponente einer manipulierten Größenkombination.

Unter den untersuchten Kombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle A.76 finden sich vier weitere Detektionen.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,9646	0,6081	2,4115	0,3715	1,1875
2	0,9116	0,6985	0,2642	-1,7758	-1,7758
3	0,8678	0,8206	0,3523	-1,6877	-0,8717
4	0,8492	0,9280	0,2281	-1,8119	-1,8119
5	0,8516	0,9068	1,7607	-0,2793	-0,2793
6	0,8479	0,9428	1,4358	-0,6042	0,2118

**Tabelle A.75:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,04 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,22 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,9789	0,9815	0,7278	-1,0922	-1,0922
1 3	0,9921	0,9782	4,6599	2,8399	2,8399
1 4	0,9708	0,9834	1,4341	-0,3859	-0,3859
1 5	0,9696	0,9837	2,1808	0,3608	0,7612
1 6	0,9672	0,9842	2,2098	0,3898	0,3898
2 5	0,9177	0,9939	0,4322	-1,3878	-1,3878
2 6	0,9143	0,9944	0,3212	-1,4988	-1,4988
3 5	0,8864	0,9979	1,3498	-0,4702	-0,4702
3 6	0,8702	0,9992	0,4915	-1,3285	-1,3285
4 5	0,8592	0,9998	0,6035	-1,2165	-1,2165
4 6	0,8496	1,0000	0,6752	-1,1448	-0,7444
5 6	0,8659	0,9995	3,4032	1,5832	1,5832

**Tabelle A.76:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,82 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,42 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Unter den untersuchten Kombinationen der Vielfachheit 3 in Tabelle A.77 finden sich ebenfalls weitere vier Detektionen.

In Tabelle A.78 werden die Detektionen zum Vergleich zusammengestellt.

Die ausgewählte Hypothese wäre bei Manipulationsbeispiel 3 eine Manipulation in Größe 1.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	0,9925	0,9999	1,0874	-1,2426	-0,4271
1 2 5	0,9841	0,9999	0,8624	-1,4676	-1,4676
1 2 6	0,9817	0,9999	0,7730	-1,5570	-1,5570
1 3 4	0,9997	0,9999	2,3138	-0,0162	-0,0162
1 3 5	0,9927	0,9999	6,2324	3,9024	3,9024
1 3 6	0,9946	0,9999	3,9065	1,5765	1,5765
1 4 5	0,9808	0,9999	1,2457	-1,0843	-1,0843
1 4 6	0,9709	1,0000	1,8035	-0,5265	-0,5265
1 5 6	0,9841	0,9999	2,7100	0,3800	0,3800
2 5 6	0,9338	1,0000	0,4967	-1,8333	-1,8333
3 5 6	0,9217	1,0000	1,8693	-0,4607	0,3548
4 5 6	0,8676	1,0000	1,1078	-1,2222	-1,2222

**Tabelle A.77:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,33 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 2,33 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,51 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+1,26\sigma$  in Größe 1 und  $-1,26\sigma$  in Größe 5.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,9646	0,6081	2,4115	0,3715	1,1875
6	0,8479	0,9428	1,4358	-0,6042	0,2118
1 3	0,9921	0,9782	4,6599	2,8399	2,8399
1 5	0,9696	0,9837	2,1808	0,3608	0,7612
1 6	0,9672	0,9842	2,2098	0,3898	0,3898
5 6	0,8659	0,9995	3,4032	1,5832	1,5832
1 3 5	0,9927	0,9999	6,2324	3,9024	3,9024
1 3 6	0,9946	0,9999	3,9065	1,5765	1,5765
1 5 6	0,9841	0,9999	2,7100	0,3800	0,3800
3 5 6	0,9217	1,0000	1,8693	-0,4607	0,3548

**Tabelle A.78:** Vergleich der detektierten Größen und Kombinationen über ihr Signifikanzniveau, die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit und die Differenz zur allgemeinen und zur individuellen Schwelle.

#### Manipulationsbeispiel 4

Bei der unerwarteten Manipulation in Größe 2 zeigt sich unter den Einzelgrößen in Tabelle A.79 zwei Detektionen und eine zusätzliche Vorauswahl. Größe 2 weist mit Abstand die höhere Wahrscheinlichkeit und die geringere Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit auf.

Unter den Kombinationen der Vielfachheit 2 in Tabelle A.80 finden sich sehr viele Detektionen. Alle weisen aber eine erheblich höhere Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit auf bei ähnlichen Wahrscheinlichkeiten. Gegenüber der Hypothese der manipulierten Größe 2 sind diese Hypothesen ausgeschlossen.

Auch unter den Kombinationen der Vielfachheit 3 in Tabelle A.81 finden sich viele Detektio-

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1	0,5527	0,6511	5,5192	3,4792	4,2952
2	0,9700	0,2489	5,5213	3,4813	3,4813
3	0,5022	0,9105	0,1604	-1,8796	-1,0636
4	0,5043	0,8848	1,8630	-0,1770	-0,1770
5	0,5048	0,8796	0,3926	-1,6474	-1,6474
6	0,5140	0,8080	0,8018	-1,2382	-0,4222

**Tabelle A.79:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 1 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Größen ohne erhöhte Exposition 2, 4, 5, oder für die der angepasste Schwellwert von 1,22 gilt für exponierte Größen 1, 3, 6. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2	0,9735	0,7625	7,0100	5,1900	5,1900
1 3	0,6968	0,9195	18,7319	16,9119	16,9119
1 4	0,5603	0,9880	4,1282	2,3082	2,3082
1 5	0,5580	0,9888	3,6771	1,8571	2,2575
1 6	0,5691	0,9848	4,5780	2,7580	2,7580
2 3	0,9730	0,7627	4,2292	2,4092	2,8096
2 4	0,9782	0,7601	5,6374	3,8174	3,8174
2 5	0,9802	0,7590	4,9136	3,0936	3,0936
2 6	0,9960	0,7510	5,3107	3,4907	3,4907
3 4	0,5075	0,9997	0,7478	-1,0722	-1,0722
4 5	0,5152	0,9990	1,1092	-0,7108	-0,7108
4 6	0,5392	0,9944	4,1615	2,3415	2,7419

**Tabelle A.80:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,42 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,5]; [2,3] und [4,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

nen, die aufgrund ihrer hohen Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit nicht als auszuwählende Hypothese in Betracht kommen.

Die unerwartete Manipulation in Größe 2 wird durch den Hypothesentest eindeutig detektiert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
1 2 3	0,9735	0,9782	8,0141	5,6841	6,4996
1 2 4	0,9840	0,9770	7,3620	5,0320	5,0320
1 2 5	0,9841	0,9769	6,1183	3,7883	3,7883
1 2 6	0,9995	0,9751	6,6578	4,3278	4,3278
1 3 4	0,7102	0,9979	10,3759	8,0459	8,0459
1 3 5	0,7244	0,9974	27,6152	25,2852	25,2852
1 3 6	0,7190	0,9976	14,4406	12,1106	12,1106
1 4 5	0,5714	1,0000	2,8039	0,4739	0,4739
1 4 6	0,6013	0,9998	5,4640	3,1340	3,1340
1 5 6	0,5691	1,0000	4,4886	2,1586	2,1586
2 3 4	0,9812	0,9773	4,2953	1,9653	1,9653
2 3 5	0,9807	0,9773	4,2910	1,9610	1,9610
2 3 6	0,9993	0,9751	4,1215	1,7915	1,7915
2 4 5	0,9840	0,9770	4,6074	2,2774	2,2774
2 4 6	0,9961	0,9755	5,9964	3,6664	4,4819
2 5 6	0,9960	0,9755	5,2016	2,8716	2,8716
3 4 5	0,5156	1,0000	0,8020	-1,5280	-0,7125
3 4 6	0,5429	1,0000	1,2991	-1,0309	-1,0309
3 5 6	0,5181	1,0000	0,4689	-1,8611	-1,0456
4 5 6	0,5392	1,0000	2,4058	0,0758	0,0758

**Tabelle A.81:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 2,33 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 2,33 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 1,52 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten [1,2,3]; [2,4,6]; [3,4,5] und [3,5,6]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,52\sigma$  in der unerwarteten Größe 2.

## Zusammenfassung

Die Leistung des Hypothesentests an den Beispielmanipulationen ist in Tabelle A.82 zusammengefasst. Die vielfachheitsabhängigen Schwellwertanpassungen scheinen im Beispiel zu einer deutlich wahrscheinlicheren Detektion von Einzelgrößen zu führen. Das hängt möglicherweise damit zusammen, dass durch die vielfachheitsspezifischen Abhängigkeiten kein direkter Vergleich der Differenzen zum Schwellwert möglich ist und daher für die Entscheidung zwischen verschiedenen Detektionen auf die Falsch-Positiv-Wahrscheinlichkeit zurück gegriffen werden muss, die die Detektion in Einzelgrößen deutlich bevorzugt.

Manipulation		ohne SW-Anpassung	Eindeutig	mit SW-Anpassung	Eindeutig
unmanip.	keine	keine	✓	keine	✓
Bsp. 1	1	1	✓	1	✓
Bsp. 2	[1,5]	1/[1,5]		1/[1,5]	
Bsp. 3	[1,5]	1		1	
Bsp. 4	2	2	✓	2	✓

**Tabelle A.82:** Leistung des Messwerttests in den Beispielen

## A.5 Evaluierung

### A.5.1 Messwerttest

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_p$	$I_A$	0,1684	0,3496	0,0035	-1,1465	-1,1465
$I_p$	$I_s$	0,2301	0,3340	1,7838	0,6338	0,9213
$I_p$	$I_v$	0,1611	0,2176	2,7422	1,5922	1,5922
$I_p$	$I_{SZ}$	0,1776	0,2230	2,8958	1,7458	1,7458
$I_p$	$U_p$	7,00 e-4	0,3140	3,0070	1,8570	2,4320
$I_p$	$U_{s1}$	0,0334	0,2599	1,9583	0,8083	0,8083
$I_p$	$U_{s2}$	0,0168	0,1273	1,8487	0,6987	0,6987
$I_p$	$U_{s3}$	0,0339	0,3184	2,2187	1,0687	1,0687
$I_p$	$U_v$	0,0253	0,2598	2,5662	1,4162	1,4162
$I_s$	$I_A$	0,2966	0,5493	0,2289	-0,9211	-0,9211
$I_s$	$I_p$	0,3152	0,5056	0,6022	-0,5478	-0,2603
$I_s$	$I_v$	0,1419	0,2087	3,1460	1,9960	1,9960
$I_s$	$I_{SZ}$	0,1946	0,2221	3,2997	2,1497	2,1497
$I_s$	$U_p$	9,86 e-4	0,4222	1,6405	0,4905	0,7780
$I_s$	$U_{s1}$	0,0393	0,3652	1,6084	0,4584	0,4584
$I_s$	$U_{s2}$	0,0195	0,1733	1,4472	0,2972	0,2972
$I_s$	$U_{s3}$	0,0372	0,3345	1,7765	0,6265	0,6265
$I_s$	$U_v$	0,0219	0,2380	2,9687	1,8187	1,8187
$I_v$	$I_A$	0,3418	0,6019	0,2007	-0,9493	-0,9493
$I_v$	$I_p$	0,3409	0,5505	0,7228	-0,4272	-0,4272

$I_v$	$I_s$	0,1898	0,3128	2,2426	1,0926	1,0926
$I_v$	$I_{SZ}$	0,2062	0,2223	3,5185	2,3685	2,3685
$I_v$	$U_p$	9,36 e-4	0,4186	2,2621	1,1121	1,1121
$I_v$	$U_{s1}$	0,0423	0,4095	1,4490	0,2990	0,2990
$I_v$	$U_{s2}$	0,0212	0,2032	1,2640	0,1140	0,1140
$I_v$	$U_{s3}$	0,0395	0,3409	1,6743	0,5243	0,5243
$I_v$	$U_v$	0,0195	0,2222	3,1841	2,0341	2,6091
$I_{SZ}$	$I_A$	0,3529	0,6067	0,2015	-0,9485	-0,9485
$I_{SZ}$	$I_p$	0,3445	0,5562	0,7221	-0,4279	-0,4279
$I_{SZ}$	$I_s$	0,2048	0,3071	2,2581	1,1081	1,1081
$I_{SZ}$	$I_v$	0,1685	0,2170	3,3842	2,2342	2,2342
$I_{SZ}$	$U_p$	9,46 e-4	0,4124	2,2519	1,1019	1,1019
$I_{SZ}$	$U_{s1}$	0,0425	0,4150	1,4314	0,2814	0,2814
$I_{SZ}$	$U_{s2}$	0,0218	0,2090	1,2436	0,0936	0,0936
$I_{SZ}$	$U_{s3}$	0,0447	0,3637	1,7094	0,5594	0,5594
$I_{SZ}$	$U_v$	0,0248	0,2276	3,2047	2,0547	2,0547
$U_p$	$I_A$	0,1755	0,3692	0,2578	-0,8922	-0,8922
$U_p$	$I_p$	0,2213	0,3670	0,9574	-0,1926	0,3824
$U_p$	$I_s$	0,2200	0,3320	1,8114	0,6614	0,9489
$U_p$	$I_v$	0,1475	0,2146	2,7902	1,6402	1,6402
$U_p$	$I_{SZ}$	0,1903	0,2224	2,9435	1,7935	1,7935
$U_p$	$U_{s1}$	0,0330	0,2579	1,9250	0,7750	0,7750
$U_p$	$U_{s2}$	0,0168	0,1267	1,8105	0,6605	0,6605
$U_p$	$U_{s3}$	0,0356	0,3231	2,1779	1,0279	1,0279
$U_p$	$U_v$	0,0230	0,2492	2,6143	1,4643	1,4643
$U_{s1}$	$I_A$	0,1817	0,3772	0,1643	-0,9857	-0,9857
$U_{s1}$	$I_p$	0,2288	0,3719	0,8332	-0,3168	-0,3168
$U_{s1}$	$I_s$	0,2279	0,3348	1,8354	0,6854	0,6854
$U_{s1}$	$I_v$	0,1493	0,2181	2,8176	1,6676	1,6676
$U_{s1}$	$I_{SZ}$	0,1907	0,2236	2,9716	1,8216	1,8216
$U_{s1}$	$U_p$	6,85 e-4	0,3051	2,7858	1,6358	1,6358
$U_{s1}$	$U_{s2}$	0,0169	0,1278	1,7789	0,6289	0,6289
$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0343	0,3138	2,1401	0,9901	0,9901
$U_{s1}$	$U_v$	0,0238	0,2603	2,6409	1,4909	1,4909
$U_{s2}$	$I_A$	0,1718	0,3608	0,1613	-0,9887	-0,9887
$U_{s2}$	$I_p$	0,2223	0,3556	0,8351	-0,3149	-0,3149
$U_{s2}$	$I_s$	0,2408	0,3363	1,8348	0,6848	0,6848
$U_{s2}$	$I_v$	0,1838	0,2302	2,8221	1,6721	1,6721
$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,1587	0,2139	2,9767	1,8267	1,8267
$U_{s2}$	$U_p$	6,48 e-4	0,3002	2,7924	1,6424	1,6424
$U_{s2}$	$U_{s1}$	0,0305	0,2483	1,9075	0,7575	0,7575
$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,0380	0,3108	2,1556	1,0056	1,0056
$U_{s2}$	$U_v$	0,0276	0,2650	2,6446	1,4946	1,4946
$U_{s3}$	$I_A$	0,1534	0,3321	0,1592	-0,9908	-0,9908
$U_{s3}$	$I_p$	0,2078	0,3336	0,8525	-0,2975	-0,2975
$U_{s3}$	$I_s$	0,2144	0,3341	1,8005	0,6505	0,6505
$U_{s3}$	$I_v$	0,1384	0,2087	2,7825	1,6325	1,6325

$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,2046	0,2275	2,9379	1,7879	1,7879
$U_{s3}$	$U_p$	6,59 e-4	0,3145	2,8647	1,7147	1,7147
$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0325	0,2418	1,9563	0,8063	0,8063
$U_{s3}$	$U_{s2}$	0,0171	0,1298	1,8471	0,6971	0,6971
$U_{s3}$	$U_v$	0,0213	0,2435	2,6045	1,4545	1,4545
$U_v$	$I_A$	0,3417	0,6009	0,2027	-0,9473	-0,9473
$U_v$	$I_p$	0,3434	0,5499	0,7263	-0,4237	-0,4237
$U_v$	$I_s$	0,1973	0,3200	2,2239	1,0739	1,0739
$U_v$	$I_v$	0,1318	0,2019	3,3387	2,1887	2,7637
$U_v$	$I_{SZ}$	0,2037	0,2221	3,4935	2,3435	2,3435
$U_v$	$U_p$	9,10 e-4	0,4228	2,2763	1,1263	1,1263
$U_v$	$U_{s1}$	0,0419	0,4077	1,4700	0,3200	0,3200
$U_v$	$U_{s2}$	0,0204	0,1903	1,2881	0,1381	0,1381
$U_v$	$U_{s3}$	0,0384	0,3367	1,6727	0,5227	0,5227

**Tabelle A.83:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,15 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,575 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 0,8625 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transformatorstufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_p$ $I_s$ $I_v$	0,1528	0,2059	2,9716	1,7416	1,7416
$I_p$ $I_s$ $I_{SZ}$	0,1848	0,2211	3,1275	1,8975	1,8975
$I_p$ $I_s$ $U_p$	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$I_p$ $I_s$ $U_{s1}$	0,0366	0,3039	1,8130	0,5830	0,5830
$I_p$ $I_s$ $U_{s2}$	0,0179	0,1395	1,6828	0,4528	0,4528
$I_p$ $I_s$ $U_{s3}$	0,0343	0,3173	2,0393	0,8093	0,8093
$I_p$ $I_s$ $U_v$	0,0240	0,2469	2,7922	1,5622	1,5622
$I_p$ $I_v$ $I_A$	0,2669	0,4843	0,0033	-1,2267	-1,2267
$I_p$ $I_v$ $I_s$	0,2029	0,3186	2,0930	0,8630	0,8630
$I_p$ $I_v$ $I_{SZ}$	0,1963	0,2215	3,3410	2,1110	2,1110
$I_p$ $I_v$ $U_p$	8,54 e-4	0,3720	2,6655	1,4355	1,4355
$I_p$ $I_v$ $U_{s1}$	0,0387	0,3347	1,6662	0,4362	0,4362
$I_p$ $I_v$ $U_{s2}$	0,0190	0,1559	1,5140	0,2840	0,2840
$I_p$ $I_v$ $U_{s3}$	0,0365	0,3241	1,8530	0,6230	0,6230
$I_p$ $I_v$ $U_v$	0,0213	0,2264	3,0018	1,7718	1,7718
$I_p$ $I_{SZ}$ $I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0060	-0,2240	-0,2240
$I_p$ $I_{SZ}$ $I_s$	8,04e-21	0,00 e+0	0,9986	-0,2314	-0,2314
$I_p$ $I_{SZ}$ $I_v$	0,1428	0,2080	1,5730	0,3430	0,3430
$I_p$ $I_{SZ}$ $U_p$	8,96 e-4	0,3851	0,9757	-0,2543	-0,2543
$I_p$ $I_{SZ}$ $U_{s1}$	0,0568	0,4823	0,9411	-0,2889	-0,2889
$I_p$ $I_{SZ}$ $U_{s2}$	0,0346	0,3279	0,7603	-0,4697	-0,4697
$I_p$ $I_{SZ}$ $U_{s3}$	0,0531	0,4376	0,9039	-0,3261	-0,3261

$I_p$	$I_{SZ}$	$U_v$	0,0210	0,2111	1,5899	0,3599	0,3599
$I_p$	$U_p$	$I_A$	3,36e-206	0,00 e+0	1,0062	-0,2238	-0,2238
$I_p$	$U_p$	$I_s$	1,26e-61	0,00 e+0	0,9981	-0,2319	-0,2319
$I_p$	$U_p$	$I_v$	0,1810	0,2079	1,4521	0,2221	0,2221
$I_p$	$U_p$	$I_{SZ}$	3,06 e-4	0,1111	1,0296	-0,2004	-0,2004
$I_p$	$U_p$	$U_{s1}$	0,0375	0,3169	0,9561	-0,2739	-0,2739
$I_p$	$U_p$	$U_{s2}$	0,0177	0,1837	0,9242	-0,3058	-0,3058
$I_p$	$U_p$	$U_{s3}$	0,0220	0,2160	0,8398	-0,3902	-0,3902
$I_p$	$U_p$	$U_v$	0,0277	0,2207	1,4256	0,1956	0,1956
$I_p$	$U_{s1}$	$I_A$	7,90e-21	0,00 e+0	0,9428	-0,2872	-0,2872
$I_p$	$U_{s1}$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0162	-0,2138	-0,2138
$I_p$	$U_{s1}$	$I_v$	0,0873	0,1111	0,9334	-0,2966	-0,2966
$I_p$	$U_{s1}$	$I_{SZ}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0414	-0,1886	-0,1886
$I_p$	$U_{s1}$	$U_p$	1,28e-68	0,00 e+0	0,9904	-0,2396	-0,2396
$I_p$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	6,47 e-7	5,84 e-6	1,0505	-0,1795	-0,1795
$I_p$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0095	0,1029	1,0520	-0,1780	-0,1780
$I_p$	$U_{s1}$	$U_v$	0,0106	0,1072	0,9285	-0,3015	-0,3015
$I_p$	$U_{s2}$	$I_A$	5,97e-19	0,00 e+0	0,9347	-0,2953	-0,2953
$I_p$	$U_{s2}$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0206	-0,2094	-0,2094
$I_p$	$U_{s2}$	$I_v$	0,0872	0,1111	0,9620	-0,2680	-0,2680
$I_p$	$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,0057	0,0114	0,9575	-0,2725	-0,2725
$I_p$	$U_{s2}$	$U_p$	4,97e-66	0,00 e+0	0,9893	-0,2407	-0,2407
$I_p$	$U_{s2}$	$U_{s1}$	0,0029	0,0457	1,0833	-0,1467	-0,1467
$I_p$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,0100	0,1055	1,0857	-0,1443	-0,1443
$I_p$	$U_{s2}$	$U_v$	0,0109	0,1084	0,9585	-0,2715	-0,2715
$I_p$	$U_{s3}$	$I_A$	3,67e-18	0,00 e+0	0,9349	-0,2951	-0,2951
$I_p$	$U_{s3}$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0206	-0,2094	-0,2094
$I_p$	$U_{s3}$	$I_v$	0,0932	0,1111	0,9620	-0,2680	-0,2680
$I_p$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,0252	0,0519	0,9575	-0,2725	-0,2725
$I_p$	$U_{s3}$	$U_p$	1,36e-61	0,00 e+0	0,9893	-0,2407	-0,2407
$I_p$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0083	0,0996	1,0833	-0,1467	-0,1467
$I_p$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	9,87 e-6	1,03 e-4	1,0844	-0,1456	-0,1456
$I_p$	$U_{s3}$	$U_v$	0,0160	0,1111	0,9585	-0,2715	-0,2715
$I_p$	$U_v$	$I_A$	7,07e-322	0,00 e+0	1,0045	-0,2255	-0,2255
$I_p$	$U_v$	$I_s$	2,51e-29	0,00 e+0	1,0004	-0,2296	-0,2296
$I_p$	$U_v$	$I_v$	0,1074	0,2026	1,6660	0,4360	0,4360
$I_p$	$U_v$	$I_{SZ}$	0,2324	0,2222	1,6073	0,3773	0,3773
$I_p$	$U_v$	$U_p$	6,28 e-4	0,2440	0,9394	-0,2906	-0,2906
$I_p$	$U_v$	$U_{s1}$	0,0339	0,2892	1,6351	0,4051	0,4051
$I_p$	$U_v$	$U_{s2}$	0,0310	0,3375	1,3640	0,1340	0,1340
$I_p$	$U_v$	$U_{s3}$	0,0227	0,2008	1,4414	0,2114	0,2114
$I_s$	$I_v$	$I_A$	0,4371	0,6571	0,2594	-0,9706	-0,9706
$I_s$	$I_v$	$I_p$	0,4211	0,5889	0,5255	-0,7045	-0,7045
$I_s$	$I_v$	$I_{SZ}$	0,2164	0,2221	3,7788	2,5488	2,5488
$I_s$	$I_v$	$U_p$	0,0015	0,5680	1,3239	0,0939	0,0939
$I_s$	$I_v$	$U_{s1}$	0,0533	0,4984	1,2873	0,0573	0,0573
$I_s$	$I_v$	$U_{s2}$	0,0283	0,2705	1,0774	-0,1526	-0,1526

$I_s$	$I_v$	$U_{s3}$	0,0413	0,3591	1,4922	0,2622	0,2622
$I_s$	$I_v$	$U_v$	0,0178	0,2077	3,4378	2,2078	2,2078
$I_s$	$I_{SZ}$	$I_A$	0,4478	0,6586	0,2602	-0,9698	-0,9698
$I_s$	$I_{SZ}$	$I_p$	0,4231	0,5936	0,5248	-0,7052	-0,7052
$I_s$	$I_{SZ}$	$I_v$	0,1626	0,2103	3,6443	2,4143	2,4143
$I_s$	$I_{SZ}$	$U_p$	0,0016	0,5608	1,3129	0,0829	0,0829
$I_s$	$I_{SZ}$	$U_{s1}$	0,0543	0,5127	1,2677	0,0377	0,0377
$I_s$	$I_{SZ}$	$U_{s2}$	0,0296	0,2813	1,0547	-0,1753	-0,1753
$I_s$	$I_{SZ}$	$U_{s3}$	0,0484	0,4045	1,5333	0,3033	0,3033
$I_s$	$I_{SZ}$	$U_v$	0,0240	0,2233	3,4608	2,2308	2,2308
$I_s$	$U_p$	$I_A$	0,1418	0,1984	1,2743	0,0443	0,0443
$I_s$	$U_p$	$I_p$	0,0530	0,1093	0,9400	-0,2900	-0,2900
$I_s$	$U_p$	$I_v$	0,1464	0,2160	1,4502	0,2202	0,2202
$I_s$	$U_p$	$I_{SZ}$	2,64 e-4	0,1109	1,0276	-0,2024	-0,2024
$I_s$	$U_p$	$U_{s1}$	0,0382	0,3288	0,7742	-0,4558	-0,4558
$I_s$	$U_p$	$U_{s2}$	0,0174	0,2070	0,8483	-0,3817	-0,3817
$I_s$	$U_p$	$U_{s3}$	0,0165	0,1918	0,8348	-0,3952	-0,3952
$I_s$	$U_p$	$U_v$	0,0266	0,2183	1,4215	0,1915	0,1915
$I_s$	$U_{s1}$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0536	-0,1764	-0,1764
$I_s$	$U_{s1}$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0676	-0,1624	-0,1624
$I_s$	$U_{s1}$	$I_v$	0,0941	0,1111	0,9620	-0,2680	-0,2680
$I_s$	$U_{s1}$	$I_{SZ}$	0,0161	0,0337	0,9575	-0,2725	-0,2725
$I_s$	$U_{s1}$	$U_p$	4,41e-63	0,00 e+0	0,9893	-0,2407	-0,2407
$I_s$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	7,92 e-6	8,33 e-5	1,0833	-0,1467	-0,1467
$I_s$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0147	0,1111	1,0857	-0,1443	-0,1443
$I_s$	$U_{s1}$	$U_v$	0,0148	0,1111	0,9585	-0,2715	-0,2715
$I_s$	$U_{s2}$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0534	-0,1766	-0,1766
$I_s$	$U_{s2}$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0675	-0,1625	-0,1625
$I_s$	$U_{s2}$	$I_v$	0,0878	0,1111	0,9619	-0,2681	-0,2681
$I_s$	$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,0061	0,0120	0,9574	-0,2726	-0,2726
$I_s$	$U_{s2}$	$U_p$	6,84e-66	0,00 e+0	0,9893	-0,2407	-0,2407
$I_s$	$U_{s2}$	$U_{s1}$	0,0030	0,0474	1,0831	-0,1469	-0,1469
$I_s$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,0102	0,1062	1,0856	-0,1444	-0,1444
$I_s$	$U_{s2}$	$U_v$	0,0112	0,1088	0,9583	-0,2717	-0,2717
$I_s$	$U_{s3}$	$I_A$	0,5970	0,8560	0,3105	-0,9195	-0,9195
$I_s$	$U_{s3}$	$I_p$	0,4179	0,6720	0,4994	-0,7306	-0,7306
$I_s$	$U_{s3}$	$I_v$	0,1253	0,2037	2,6707	1,4407	1,4407
$I_s$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,2050	0,2205	2,7926	1,5626	1,5626
$I_s$	$U_{s3}$	$U_p$	0,0016	0,7172	0,6517	-0,5783	-0,5783
$I_s$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0319	0,2222	1,5902	0,3602	0,3602
$I_s$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	0,0179	0,1305	1,6271	0,3971	0,3971
$I_s$	$U_{s3}$	$U_v$	0,0188	0,2020	2,5948	1,3648	1,3648
$I_s$	$U_v$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9884	-0,2416	-0,2416
$I_s$	$U_v$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9899	-0,2401	-0,2401
$I_s$	$U_v$	$I_v$	1,02e-12	1,06e-12	0,9061	-0,3239	-0,3239
$I_s$	$U_v$	$I_{SZ}$	1,02e-28	0,00 e+0	0,9035	-0,3265	-0,3265
$I_s$	$U_v$	$U_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9991	-0,2309	-0,2309

$I_s$	$U_v$	$U_{s1}$	1,48e-26	0,00 e+0	1,0086	-0,2214	-0,2214
$I_s$	$U_v$	$U_{s2}$	5,10e-47	0,00 e+0	1,0109	-0,2191	-0,2191
$I_s$	$U_v$	$U_{s3}$	4,22e-22	0,00 e+0	0,9036	-0,3264	-0,3264
$I_v$	$I_{SZ}$	$I_A$	0,5091	0,7041	0,2367	-0,9933	-0,9933
$I_v$	$I_{SZ}$	$I_p$	0,4545	0,6073	0,6322	-0,5978	-0,5978
$I_v$	$I_{SZ}$	$I_s$	0,1816	0,2671	2,6332	1,4032	1,4032
$I_v$	$I_{SZ}$	$U_p$	0,0012	0,4993	1,8435	0,6135	0,6135
$I_v$	$I_{SZ}$	$U_{s1}$	0,0625	0,5778	1,0655	-0,1645	-0,1645
$I_v$	$I_{SZ}$	$U_{s2}$	0,0366	0,3600	0,8204	-0,4096	-0,4096
$I_v$	$I_{SZ}$	$U_{s3}$	0,0529	0,4525	1,3985	0,1685	0,1685
$I_v$	$I_{SZ}$	$U_v$	0,0220	0,2173	3,7401	2,5101	3,1251
$I_v$	$U_p$	$I_A$	0,2753	0,5084	0,1968	-1,0332	-1,0332
$I_v$	$U_p$	$I_p$	0,2905	0,4813	0,8903	-0,3397	-0,3397
$I_v$	$U_p$	$I_s$	0,1917	0,3126	2,1181	0,8881	0,8881
$I_v$	$U_p$	$I_{SZ}$	0,2104	0,2221	3,3900	2,1600	2,1600
$I_v$	$U_p$	$U_{s1}$	0,0375	0,3250	1,6341	0,4041	0,4041
$I_v$	$U_p$	$U_{s2}$	0,0184	0,1492	1,4766	0,2466	0,2466
$I_v$	$U_p$	$U_{s3}$	0,0382	0,3245	1,8136	0,5836	0,5836
$I_v$	$U_p$	$U_v$	0,0190	0,2162	3,0514	1,8214	1,8214
$I_v$	$U_{s1}$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0545	-0,1755	-0,1755
$I_v$	$U_{s1}$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0686	-0,1614	-0,1614
$I_v$	$U_{s1}$	$I_s$	0,0866	0,1111	0,9632	-0,2668	-0,2668
$I_v$	$U_{s1}$	$I_{SZ}$	0,0182	0,0381	0,9574	-0,2726	-0,2726
$I_v$	$U_{s1}$	$U_p$	1,09e-62	0,00 e+0	0,9893	-0,2407	-0,2407
$I_v$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	1,01 e-5	1,07 e-4	1,0831	-0,1469	-0,1469
$I_v$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0152	0,1111	1,0855	-0,1445	-0,1445
$I_v$	$U_{s1}$	$U_v$	0,0152	0,1111	0,9584	-0,2716	-0,2716
$I_v$	$U_{s2}$	$I_A$	0,5189	0,7287	0,2533	-0,9767	-0,9767
$I_v$	$U_{s2}$	$I_p$	0,4727	0,6082	0,6365	-0,5935	-0,5935
$I_v$	$U_{s2}$	$I_s$	0,2041	0,3006	2,2694	1,0394	1,0394
$I_v$	$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,1679	0,2145	3,3357	2,1057	2,1057
$I_v$	$U_{s2}$	$U_p$	0,0012	0,5189	1,4655	0,2355	0,2355
$I_v$	$U_{s2}$	$U_{s1}$	0,0307	0,2222	1,5040	0,2740	0,2740
$I_v$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,0548	0,4608	1,0652	-0,1648	-0,1648
$I_v$	$U_{s2}$	$U_v$	0,0247	0,2226	3,0593	1,8293	1,8293
$I_v$	$U_{s3}$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9885	-0,2415	-0,2415
$I_v$	$U_{s3}$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9900	-0,2400	-0,2400
$I_v$	$U_{s3}$	$I_s$	7,13e-14	7,09e-14	0,9062	-0,3238	-0,3238
$I_v$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	2,24e-28	0,00 e+0	0,9034	-0,3266	-0,3266
$I_v$	$U_{s3}$	$U_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9991	-0,2309	-0,2309
$I_v$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	3,10e-26	0,00 e+0	1,0086	-0,2214	-0,2214
$I_v$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	1,57e-46	0,00 e+0	1,0109	-0,2191	-0,2191
$I_v$	$U_{s3}$	$U_v$	4,32e-22	0,00 e+0	0,9036	-0,3264	-0,3264
$I_v$	$U_v$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9911	-0,2389	-0,2389
$I_v$	$U_v$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9927	-0,2373	-0,2373
$I_v$	$U_v$	$I_s$	2,61e-17	0,00 e+0	0,9084	-0,3216	-0,3216
$I_v$	$U_v$	$I_{SZ}$	4,73e-35	0,00 e+0	0,9056	-0,3244	0,2906

$I_v$	$U_v$	$U_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9992	-0,2308	-0,2308
$I_v$	$U_v$	$U_{s1}$	1,40e-25	0,00 e+0	1,0091	-0,2209	-0,2209
$I_v$	$U_v$	$U_{s2}$	3,67e-56	0,00 e+0	1,0141	-0,2159	-0,2159
$I_v$	$U_v$	$U_{s3}$	1,71e-27	0,00 e+0	0,9057	-0,3243	-0,3243
$ISZ$	$U_p$	$I_A$	0,2873	0,5183	0,1962	-1,0338	-1,0338
$ISZ$	$U_p$	$I_p$	0,2945	0,4919	0,8897	-0,3403	-0,3403
$ISZ$	$U_p$	$I_s$	0,2075	0,3066	2,1346	0,9046	0,9046
$ISZ$	$U_p$	$I_v$	0,1678	0,2145	3,2551	2,0251	2,0251
$ISZ$	$U_p$	$U_{s1}$	0,0378	0,3251	1,6153	0,3853	0,3853
$ISZ$	$U_p$	$U_{s2}$	0,0188	0,1489	1,4550	0,2250	0,2250
$ISZ$	$U_p$	$U_{s3}$	0,0432	0,3393	1,8458	0,6158	0,6158
$ISZ$	$U_p$	$U_v$	0,0247	0,2265	3,0733	1,8433	1,8433
$ISZ$	$U_{s1}$	$I_A$	0,2919	0,5205	0,1942	-1,0358	-1,0358
$ISZ$	$U_{s1}$	$I_p$	0,3009	0,4911	0,7609	-0,4691	-0,4691
$ISZ$	$U_{s1}$	$I_s$	0,2166	0,3171	2,1584	0,9284	0,9284
$ISZ$	$U_{s1}$	$I_v$	0,1704	0,2162	3,2809	2,0509	2,0509
$ISZ$	$U_{s1}$	$U_p$	8,38 e-4	0,3532	2,4600	1,2300	1,2300
$ISZ$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	0,0199	0,1669	1,4235	0,1935	0,1935
$ISZ$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0422	0,3419	1,8431	0,6131	0,6131
$ISZ$	$U_{s1}$	$U_v$	0,0254	0,2310	3,0981	1,8681	1,8681
$ISZ$	$U_{s2}$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9885	-0,2415	-0,2415
$ISZ$	$U_{s2}$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9901	-0,2399	-0,2399
$ISZ$	$U_{s2}$	$I_s$	1,60e-16	1,97e-16	0,9062	-0,3238	-0,3238
$ISZ$	$U_{s2}$	$I_v$	5,54e-24	0,00 e+0	0,9035	-0,3265	-0,3265
$ISZ$	$U_{s2}$	$U_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9991	-0,2309	-0,2309
$ISZ$	$U_{s2}$	$U_{s1}$	5,28e-31	0,00 e+0	1,0086	-0,2214	-0,2214
$ISZ$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	1,59e-32	0,00 e+0	1,0109	-0,2191	-0,2191
$ISZ$	$U_{s2}$	$U_v$	1,92e-26	0,00 e+0	0,9036	-0,3264	-0,3264
$ISZ$	$U_{s3}$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9911	-0,2389	-0,2389
$ISZ$	$U_{s3}$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9927	-0,2373	-0,2373
$ISZ$	$U_{s3}$	$I_s$	2,79e-18	0,00 e+0	0,9084	-0,3216	-0,3216
$ISZ$	$U_{s3}$	$I_v$	7,33e-27	0,00 e+0	0,9057	-0,3243	-0,3243
$ISZ$	$U_{s3}$	$U_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9992	-0,2308	-0,2308
$ISZ$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	6,40e-27	0,00 e+0	1,0091	-0,2209	-0,2209
$ISZ$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	9,07e-59	0,00 e+0	1,0141	-0,2159	-0,2159
$ISZ$	$U_{s3}$	$U_v$	2,05e-29	0,00 e+0	0,9058	-0,3242	-0,3242
$ISZ$	$U_v$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0059	-0,2241	-0,2241
$ISZ$	$U_v$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0073	-0,2227	-0,2227
$ISZ$	$U_v$	$I_s$	1,53e-24	0,00 e+0	0,9050	-0,3250	-0,3250
$ISZ$	$U_v$	$I_v$	1,96e-37	0,00 e+0	0,9022	-0,3278	0,2872
$ISZ$	$U_v$	$U_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9994	-0,2306	-0,2306
$ISZ$	$U_v$	$U_{s1}$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0057	-0,2243	-0,2243
$ISZ$	$U_v$	$U_{s2}$	2,74e-77	0,00 e+0	1,0095	-0,2205	-0,2205
$ISZ$	$U_v$	$U_{s3}$	6,64e-40	0,00 e+0	0,9022	-0,3278	-0,3278
$U_p$	$U_{s1}$	$I_A$	0,1346	0,2693	0,2996	-0,9304	-0,9304
$U_p$	$U_{s1}$	$I_p$	0,1916	0,2960	1,0031	-0,2269	-0,2269
$U_p$	$U_{s1}$	$I_s$	0,2348	0,3386	1,6567	0,4267	0,4267

$U_p$	$U_{s1}$	$I_v$	0,1458	0,2140	2,6076	1,3776	1,3776
$U_p$	$U_{s1}$	$I_{SZ}$	0,1952	0,2229	2,7634	1,5334	1,5334
$U_p$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	0,0164	0,1196	2,0636	0,8336	0,8336
$U_p$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0328	0,2918	2,4739	1,2439	1,2439
$U_p$	$U_{s1}$	$U_v$	0,0241	0,2641	2,4292	1,1992	1,1992
$U_p$	$U_{s2}$	$I_A$	0,1260	0,2532	0,3025	-0,9275	-0,9275
$U_p$	$U_{s2}$	$I_p$	0,1861	0,2845	1,0063	-0,2237	-0,2237
$U_p$	$U_{s2}$	$I_s$	0,2481	0,3406	1,6513	0,4213	0,4213
$U_p$	$U_{s2}$	$I_v$	0,1803	0,2286	2,6067	1,3767	1,3767
$U_p$	$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,1638	0,2105	2,7633	1,5333	1,5333
$U_p$	$U_{s2}$	$U_{s1}$	0,0293	0,2292	2,1620	0,9320	0,9320
$U_p$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,0365	0,2873	2,5021	1,2721	1,2721
$U_p$	$U_{s2}$	$U_v$	0,0280	0,2707	2,4274	1,1974	1,1974
$U_p$	$U_{s3}$	$I_A$	0,1658	0,2388	1,1705	-0,0595	-0,0595
$U_p$	$U_{s3}$	$I_p$	0,0554	0,1300	0,8381	-0,3919	-0,3919
$U_p$	$U_{s3}$	$I_s$	0,1641	0,2217	1,2471	0,0171	0,0171
$U_p$	$U_{s3}$	$I_v$	0,1579	0,1839	1,3212	0,0912	0,0912
$U_p$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,1433	0,1746	1,3439	0,1139	0,1139
$U_p$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	2,89 e-4	0,1111	1,0532	-0,1768	-0,1768
$U_p$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	0,0585	0,5928	0,5879	-0,6421	-0,6421
$U_p$	$U_{s3}$	$U_v$	0,0249	0,2117	1,2964	0,0664	0,0664
$U_p$	$U_v$	$I_A$	0,2034	0,3099	1,1690	-0,0610	-0,0610
$U_p$	$U_v$	$I_p$	0,0812	0,1910	0,8202	-0,4098	-0,4098
$U_p$	$U_v$	$I_s$	0,1694	0,2230	1,2598	0,0298	0,0298
$U_p$	$U_v$	$I_v$	0,1638	0,1887	1,3404	0,1104	0,1104
$U_p$	$U_v$	$I_{SZ}$	0,1552	0,1960	1,3648	0,1348	0,1348
$U_p$	$U_v$	$U_{s1}$	3,13 e-4	0,1111	1,0552	-0,1748	-0,1748
$U_p$	$U_v$	$U_{s2}$	0,0307	0,2354	0,6768	-0,5532	-0,5532
$U_p$	$U_v$	$U_{s3}$	0,0203	0,2097	1,3242	0,0942	0,0942
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_A$	0,1331	0,2644	0,1902	-1,0398	-1,0398
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_p$	0,1943	0,2915	0,8866	-0,3434	-0,3434
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_s$	0,2576	0,3450	1,6887	0,4587	0,4587
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_v$	0,1928	0,2408	2,6528	1,4228	1,4228
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,1597	0,2079	2,8105	1,5805	1,5805
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$U_p$	5,37 e-4	0,2532	3,0653	1,8353	1,8353
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,0361	0,2699	2,4391	1,2091	1,8241
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$U_v$	0,0298	0,2853	2,4724	1,2424	1,2424
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_A$	0,1162	0,2342	0,2092	-1,0208	-1,0208
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_p$	0,1796	0,2734	0,9075	-0,3225	-0,3225
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_s$	0,2308	0,3461	1,6486	0,4186	0,4186
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_v$	0,1382	0,2129	2,6067	1,3767	1,3767
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,2166	0,2361	2,7653	1,5353	1,5353
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_p$	5,39 e-4	0,2658	3,1545	1,9245	1,9245
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	0,0167	0,1223	2,1011	0,8711	1,4861
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_v$	0,0219	0,2555	2,4254	1,1954	1,1954
$U_{s1}$	$U_v$	$I_A$	0,0678	0,1299	0,3316	-0,8984	-0,8984
$U_{s1}$	$U_v$	$I_p$	0,1136	0,2163	1,0167	-0,2133	-0,2133

$U_{s1}$	$U_v$	$I_s$	0,2984	0,4935	1,3582	0,1282	0,1282
$U_{s1}$	$U_v$	$I_v$	0,1440	0,2559	2,4641	1,2341	1,2341
$U_{s1}$	$U_v$	$I_{SZ}$	0,2659	0,3168	2,6671	1,4371	1,4371
$U_{s1}$	$U_v$	$U_p$	4,12 e-4	0,2092	4,6991	3,4691	3,4691
$U_{s1}$	$U_v$	$U_{s2}$	0,0327	0,2618	0,5452	-0,6848	-0,6848
$U_{s1}$	$U_v$	$U_{s3}$	0,0473	0,4711	2,3211	1,0911	1,0911
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_A$	0,1085	0,2189	0,2134	-1,0166	-1,0166
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_p$	0,1747	0,2643	0,9121	-0,3179	-0,3179
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_s$	0,2526	0,3533	1,6432	0,4132	0,4132
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_v$	0,1881	0,2546	2,6068	1,3768	1,3768
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,1816	0,2381	2,7664	1,5364	1,5364
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_p$	4,90 e-4	0,2422	3,1743	1,9443	1,9443
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0300	0,2260	2,1948	0,9648	1,5798
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_v$	0,0276	0,2671	2,4243	1,1943	1,1943
$U_{s2}$	$U_v$	$I_A$	0,2680	0,4946	0,1892	-1,0408	-1,0408
$U_{s2}$	$U_v$	$I_p$	0,2881	0,4616	0,7657	-0,4643	-0,4643
$U_{s2}$	$U_v$	$I_s$	0,2264	0,3284	2,1267	0,8967	0,8967
$U_{s2}$	$U_v$	$I_v$	0,1672	0,2185	3,2464	2,0164	2,0164
$U_{s2}$	$U_v$	$I_{SZ}$	0,1702	0,2098	3,4053	2,1753	2,1753
$U_{s2}$	$U_v$	$U_p$	7,98 e-4	0,3482	2,4855	1,2555	1,2555
$U_{s2}$	$U_v$	$U_{s1}$	0,0347	0,3068	1,6362	0,4062	0,4062
$U_{s2}$	$U_v$	$U_{s3}$	0,0402	0,3218	1,8776	0,6476	0,6476
$U_{s3}$	$U_v$	$I_A$	0,2435	0,4672	0,1713	-1,0587	-1,0587
$U_{s3}$	$U_v$	$I_p$	0,2677	0,4342	0,7836	-0,4464	-0,4464
$U_{s3}$	$U_v$	$I_s$	0,1880	0,3165	2,0982	0,8682	0,8682
$U_{s3}$	$U_v$	$I_v$	0,1112	0,1705	3,2175	1,9875	1,9875
$U_{s3}$	$U_v$	$I_{SZ}$	0,2250	0,2225	3,3774	2,1474	2,1474
$U_{s3}$	$U_v$	$U_p$	8,25 e-4	0,3517	2,5589	1,3289	1,3289
$U_{s3}$	$U_v$	$U_{s1}$	0,0345	0,2767	1,6819	0,4519	0,4519
$U_{s3}$	$U_v$	$U_{s2}$	0,0181	0,1441	1,5324	0,3024	0,3024

**Tabelle A.84:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,23 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 1,23 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,615 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten  $[I_v, I_{SZ}, U_v]$  und  $[U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}]$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transistorstufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	$I_p$	0,3801	0,6895	0,0961	-1,0539
$I_A$	$I_s$	0,1215	0,2771	2,2349	1,0849
$I_A$	$I_v$	0,9435	0,9971	0,2185	-0,9315
$I_A$	$I_{SZ}$	0,6988	0,8949	0,2711	-0,8789
$I_A$	$U_p$	0,0015	0,7314	0,4200	-0,7300
$I_A$	$U_{s1}$	0,0917	0,9173	0,5704	-0,5796
$I_A$	$U_{s2}$	0,0868	0,7923	0,6217	-0,5283

$I_A$	$U_{s3}$	0,1058	0,9189	0,5316	-0,6184	-0,6184
$I_A$	$U_v$	0,1106	0,9586	0,2761	-0,8739	-0,8739
$I_p$	$I_A$	0,6791	0,8914	0,0016	-1,1484	-1,1484
$I_p$	$I_s$	0,1210	0,2838	2,1901	1,0401	1,3276
$I_p$	$I_v$	0,9445	0,9972	0,2831	-0,8669	-0,8669
$I_p$	$ISZ$	0,7011	0,9028	0,2565	-0,8935	-0,8935
$I_p$	$U_p$	0,0015	0,7320	0,4623	-0,6877	-0,1127
$I_p$	$U_{s1}$	0,0902	0,9146	0,6252	-0,5248	-0,5248
$I_p$	$U_{s2}$	0,0865	0,7822	0,6631	-0,4869	-0,4869
$I_p$	$U_{s3}$	0,1056	0,9142	0,4690	-0,6810	-0,6810
$I_p$	$U_v$	0,1117	0,9594	0,3406	-0,8094	-0,8094
$I_s$	$I_A$	0,3171	0,5453	2,2364	1,0864	1,0864
$I_s$	$I_p$	0,4484	0,5745	2,2616	1,1116	1,3991
$I_s$	$I_v$	0,9227	0,9821	0,1810	-0,9690	-0,9690
$I_s$	$ISZ$	0,7715	0,8791	0,2262	-0,9238	-0,9238
$I_s$	$U_p$	0,0016	0,7532	0,2969	-0,8531	-0,5656
$I_s$	$U_{s1}$	0,0930	0,9176	0,4092	-0,7408	-0,7408
$I_s$	$U_{s2}$	0,0910	0,7947	0,5053	-0,6447	-0,6447
$I_s$	$U_{s3}$	0,1117	0,9493	0,5721	-0,5779	-0,5779
$I_s$	$U_v$	0,1087	0,9504	0,3009	-0,8491	-0,8491
$U_p$	$I_A$	0,3148	0,5718	2,1446	0,9946	0,9946
$U_p$	$I_p$	0,4280	0,5749	2,3621	1,2121	1,7871
$U_p$	$I_s$	0,1246	0,2789	2,1814	1,0314	1,3189
$U_p$	$I_v$	0,9558	0,9979	0,2705	-0,8795	-0,8795
$U_p$	$ISZ$	0,7302	0,9160	0,2506	-0,8994	-0,8994
$U_p$	$U_{s1}$	0,0933	0,9189	0,6244	-0,5256	-0,5256
$U_p$	$U_{s2}$	0,0884	0,8007	0,6618	-0,4882	-0,4882
$U_p$	$U_{s3}$	0,1079	0,9153	0,4816	-0,6684	-0,6684
$U_p$	$U_v$	0,1049	0,9279	0,3290	-0,8210	-0,8210
$U_{s1}$	$I_A$	0,3144	0,5647	2,1708	1,0208	1,0208
$U_{s1}$	$I_p$	0,4305	0,5811	2,3339	1,1839	1,1839
$U_{s1}$	$I_s$	0,1417	0,3098	2,1514	1,0014	1,0014
$U_{s1}$	$I_v$	0,9665	0,9969	0,2876	-0,8624	-0,8624
$U_{s1}$	$ISZ$	0,6986	0,9165	0,2738	-0,8762	-0,8762
$U_{s1}$	$U_p$	0,0015	0,7530	0,4899	-0,6601	-0,6601
$U_{s1}$	$U_{s2}$	0,0815	0,7441	0,7077	-0,4423	-0,4423
$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,1069	0,9095	0,4662	-0,6838	-0,6838
$U_{s1}$	$U_v$	0,1159	0,9632	0,3632	-0,7868	-0,7868
$U_{s2}$	$I_A$	0,3194	0,5709	2,1723	1,0223	1,0223
$U_{s2}$	$I_p$	0,4337	0,5822	2,3325	1,1825	1,1825
$U_{s2}$	$I_s$	0,1427	0,3211	2,1384	0,9884	0,9884
$U_{s2}$	$I_v$	0,9853	0,9943	0,3121	-0,8379	-0,8379
$U_{s2}$	$ISZ$	0,6490	0,8758	0,3540	-0,7960	-0,7960
$U_{s2}$	$U_p$	0,0015	0,7634	0,4907	-0,6593	-0,6593
$U_{s2}$	$U_{s1}$	0,0827	0,8817	0,6833	-0,4667	-0,4667
$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,1074	0,9029	0,4899	-0,6601	-0,6601
$U_{s2}$	$U_v$	0,1167	0,9712	0,3886	-0,7614	-0,7614

$U_{s3}$	$I_A$	0,3156	0,5629	2,1808	1,0308	1,0308
$U_{s3}$	$I_p$	0,4241	0,5819	2,3231	1,1731	1,1731
$U_{s3}$	$I_s$	0,1243	0,2917	2,2348	1,0848	1,0848
$U_{s3}$	$I_v$	0,8984	0,9873	0,1918	-0,9582	-0,9582
$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,6482	0,8755	0,3054	-0,8446	-0,8446
$U_{s3}$	$U_p$	0,0016	0,7537	0,4567	-0,6933	-0,6933
$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0913	0,9066	0,5917	-0,5583	-0,5583
$U_{s3}$	$U_{s2}$	0,0848	0,7613	0,6549	-0,4951	-0,4951
$U_{s3}$	$U_v$	0,1140	0,9794	0,2690	-0,8810	-0,8810

**Tabelle A.85:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,15 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,575 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 0,8625 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ . Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primär- ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_p$ ).

Größe Nr.			$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	$I_s$	$I_p$	0,3579	0,6715	0,0905	-1,1395	-1,1395
$I_A$	$I_s$	$I_v$	0,9233	0,9750	0,1539	-1,0761	-1,0761
$I_A$	$I_s$	$I_{SZ}$	0,7776	0,8614	0,2516	-0,9784	-0,9784
$I_A$	$I_s$	$U_p$	0,0020	0,8109	0,2213	-1,0087	-1,0087
$I_A$	$I_s$	$U_{s1}$	0,0945	0,9051	0,3601	-0,8699	-0,8699
$I_A$	$I_s$	$U_{s2}$	0,0928	0,7936	0,5097	-0,7203	-0,7203
$I_A$	$I_s$	$U_{s3}$	0,1125	0,9526	0,6232	-0,6068	-0,6068
$I_A$	$I_s$	$U_v$	0,1078	0,9295	0,3046	-0,9254	-0,9254
$I_A$	$U_p$	$I_p$	2,39e-180	0,00 e+0	1,0022	-0,2278	-0,2278
$I_A$	$U_p$	$I_s$	2,33e-73	0,00 e+0	0,9950	-0,2350	-0,2350
$I_A$	$U_p$	$I_v$	0,2206	0,2220	1,0192	-0,2108	-0,2108
$I_A$	$U_p$	$I_{SZ}$	2,83 e-4	0,1111	0,9988	-0,2312	-0,2312
$I_A$	$U_p$	$U_{s1}$	0,0198	0,2124	0,9968	-0,2332	-0,2332
$I_A$	$U_p$	$U_{s2}$	0,0296	0,2222	1,0211	-0,2089	-0,2089
$I_A$	$U_p$	$U_{s3}$	0,0164	0,1572	1,0269	-0,2031	-0,2031
$I_A$	$U_p$	$U_v$	0,0244	0,2138	0,9521	-0,2779	-0,2779
$I_A$	$U_{s1}$	$I_p$	0,1012	0,1111	1,0101	-0,2199	-0,2199
$I_A$	$U_{s1}$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9957	-0,2343	-0,2343
$I_A$	$U_{s1}$	$I_v$	0,0767	0,1061	0,9983	-0,2317	-0,2317
$I_A$	$U_{s1}$	$I_{SZ}$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9991	-0,2309	-0,2309
$I_A$	$U_{s1}$	$U_p$	3,02e-68	0,00 e+0	0,9915	-0,2385	-0,2385
$I_A$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	3,27 e-7	2,92 e-6	0,9983	-0,2317	-0,2317
$I_A$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0070	0,0901	0,9986	-0,2314	-0,2314
$I_A$	$U_{s1}$	$U_v$	0,0064	0,0850	0,9988	-0,2312	-0,2312
$I_A$	$U_{s2}$	$I_p$	2,58 e-5	4,19 e-5	1,0124	-0,2176	-0,2176
$I_A$	$U_{s2}$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9958	-0,2342	-0,2342
$I_A$	$U_{s2}$	$I_v$	0,0308	0,0749	0,9982	-0,2318	-0,2318

$I_A$	$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9988	-0,2312	-0,2312
$I_A$	$U_{s2}$	$U_p$	3,32e-75	0,00 e+0	0,9915	-0,2385	-0,2385
$I_A$	$U_{s2}$	$U_{s1}$	1,70 e-4	0,0022	0,9993	-0,2307	-0,2307
$I_A$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,0012	0,0169	0,9984	-0,2316	-0,2316
$I_A$	$U_{s2}$	$U_v$	9,76 e-4	0,0141	0,9986	-0,2314	-0,2314
$I_A$	$U_{s3}$	$I_p$	0,0036	0,0085	1,0106	-0,2194	-0,2194
$I_A$	$U_{s3}$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9959	-0,2341	-0,2341
$I_A$	$U_{s3}$	$I_v$	0,0920	0,1111	0,9985	-0,2315	-0,2315
$I_A$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,0088	0,0177	0,9980	-0,2320	-0,2320
$I_A$	$U_{s3}$	$U_p$	4,85e-63	0,00 e+0	0,9914	-0,2386	-0,2386
$I_A$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0052	0,0752	0,9997	-0,2303	-0,2303
$I_A$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	2,30 e-6	2,24 e-5	0,9984	-0,2316	-0,2316
$I_A$	$U_{s3}$	$U_v$	0,0129	0,1105	0,9989	-0,2311	-0,2311
$I_p$	$I_s$	$I_A$	0,6676	0,8786	0,0017	-1,2283	-1,2283
$I_p$	$I_s$	$I_v$	0,9235	0,9764	0,2089	-1,0211	-1,0211
$I_p$	$I_s$	$I_{SZ}$	0,7793	0,8690	0,2371	-0,9929	-0,9929
$I_p$	$I_s$	$U_p$	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$I_p$	$I_s$	$U_{s1}$	0,0935	0,8984	0,4114	-0,8186	-0,8186
$I_p$	$I_s$	$U_{s2}$	0,0928	0,7832	0,4937	-0,7363	-0,7363
$I_p$	$I_s$	$U_{s3}$	0,1129	0,9477	0,5550	-0,6750	-0,6750
$I_p$	$I_s$	$U_v$	0,1086	0,9330	0,3246	-0,9054	-0,9054
$I_p$	$U_p$	$I_A$	2,82e-202	0,00 e+0	1,0176	-0,2124	-0,2124
$I_p$	$U_p$	$I_s$	1,73e-57	0,00 e+0	1,0046	-0,2254	-0,2254
$I_p$	$U_p$	$I_v$	0,1827	0,2083	1,0406	-0,1894	-0,1894
$I_p$	$U_p$	$I_{SZ}$	2,96 e-4	0,1111	1,0079	-0,2221	-0,2221
$I_p$	$U_p$	$U_{s1}$	0,0328	0,2761	1,0383	-0,1917	-0,1917
$I_p$	$U_p$	$U_{s2}$	0,0138	0,1398	1,0061	-0,2239	-0,2239
$I_p$	$U_p$	$U_{s3}$	0,0211	0,2137	0,9419	-0,2881	-0,2881
$I_p$	$U_p$	$U_v$	0,0285	0,2209	1,0495	-0,1805	-0,1805
$I_p$	$U_{s1}$	$I_A$	6,80 e-6	1,03 e-5	1,0451	-0,1849	-0,1849
$I_p$	$U_{s1}$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0030	-0,2270	-0,2270
$I_p$	$U_{s1}$	$I_v$	0,0543	0,1034	0,9984	-0,2316	-0,2316
$I_p$	$U_{s1}$	$I_{SZ}$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9990	-0,2310	-0,2310
$I_p$	$U_{s1}$	$U_p$	1,11e-71	0,00 e+0	0,9915	-0,2385	-0,2385
$I_p$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	4,54 e-8	3,71 e-7	0,9983	-0,2317	-0,2317
$I_p$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0037	0,0549	0,9986	-0,2314	-0,2314
$I_p$	$U_{s1}$	$U_v$	0,0033	0,0489	0,9988	-0,2312	-0,2312
$I_p$	$U_{s2}$	$I_A$	0,0022	0,0049	1,0405	-0,1895	-0,1895
$I_p$	$U_{s2}$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0032	-0,2268	-0,2268
$I_p$	$U_{s2}$	$I_v$	0,0702	0,1100	0,9986	-0,2314	-0,2314
$I_p$	$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,0014	0,0024	0,9981	-0,2319	-0,2319
$I_p$	$U_{s2}$	$U_p$	4,69e-67	0,00 e+0	0,9914	-0,2386	-0,2386
$I_p$	$U_{s2}$	$U_{s1}$	0,0017	0,0264	0,9997	-0,2303	-0,2303
$I_p$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,0068	0,0893	0,9988	-0,2312	-0,2312
$I_p$	$U_{s2}$	$U_v$	0,0062	0,0842	0,9990	-0,2310	-0,2310
$I_p$	$U_{s3}$	$I_A$	0,0037	0,0085	1,0402	-0,1898	-0,1898
$I_p$	$U_{s3}$	$I_s$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0032	-0,2268	-0,2268

$I_p$	$U_{s3}$	$I_v$	0,0922	0,1111	0,9986	-0,2314	-0,2314
$I_p$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,0090	0,0181	0,9981	-0,2319	-0,2319
$I_p$	$U_{s3}$	$U_p$	5,54e-63	0,00 e+0	0,9914	-0,2386	-0,2386
$I_p$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0053	0,0760	0,9997	-0,2303	-0,2303
$I_p$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	2,40 e-6	2,34 e-5	0,9985	-0,2315	-0,2315
$I_p$	$U_{s3}$	$U_v$	0,0129	0,1106	0,9990	-0,2310	-0,2310
$I_s$	$U_p$	$I_A$	0,0506	0,1016	1,7426	0,5126	0,5126
$I_s$	$U_p$	$I_p$	0,1265	0,1717	0,7495	-0,4805	-0,4805
$I_s$	$U_p$	$I_v$	0,1440	0,2161	0,9634	-0,2666	-0,2666
$I_s$	$U_p$	$I_{SZ}$	2,52 e-4	0,1106	1,0020	-0,2280	-0,2280
$I_s$	$U_p$	$U_{s1}$	0,0332	0,3060	0,8923	-0,3377	-0,3377
$I_s$	$U_p$	$U_{s2}$	0,0126	0,1632	0,9658	-0,2642	-0,2642
$I_s$	$U_p$	$U_{s3}$	0,0159	0,1867	0,9517	-0,2783	-0,2783
$I_s$	$U_p$	$U_v$	0,0264	0,2182	0,9416	-0,2884	-0,2884
$I_s$	$U_{s1}$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9698	-0,2602	-0,2602
$I_s$	$U_{s1}$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0149	-0,2151	-0,2151
$I_s$	$U_{s1}$	$I_v$	0,0870	0,1111	0,9986	-0,2314	-0,2314
$I_s$	$U_{s1}$	$I_{SZ}$	0,0051	0,0099	0,9981	-0,2319	-0,2319
$I_s$	$U_{s1}$	$U_p$	2,55e-64	0,00 e+0	0,9914	-0,2386	-0,2386
$I_s$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	2,42 e-6	2,41 e-5	0,9986	-0,2314	-0,2314
$I_s$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0114	0,1090	0,9988	-0,2312	-0,2312
$I_s$	$U_{s1}$	$U_v$	0,0107	0,1077	0,9990	-0,2310	-0,2310
$I_s$	$U_{s2}$	$I_A$	0,00 e+0	0,00 e+0	0,9695	-0,2605	-0,2605
$I_s$	$U_{s2}$	$I_p$	0,00 e+0	0,00 e+0	1,0148	-0,2152	-0,2152
$I_s$	$U_{s2}$	$I_v$	0,0714	0,1102	0,9985	-0,2315	-0,2315
$I_s$	$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,0015	0,0026	0,9980	-0,2320	-0,2320
$I_s$	$U_{s2}$	$U_p$	6,91e-67	0,00 e+0	0,9914	-0,2386	-0,2386
$I_s$	$U_{s2}$	$U_{s1}$	0,0018	0,0279	0,9996	-0,2304	-0,2304
$I_s$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,0071	0,0913	0,9987	-0,2313	-0,2313
$I_s$	$U_{s2}$	$U_v$	0,0065	0,0864	0,9989	-0,2311	-0,2311
$I_s$	$U_{s3}$	$I_A$	0,4516	0,6197	2,5141	1,2841	1,2841
$I_s$	$U_{s3}$	$I_p$	0,3444	0,5608	2,3506	1,1206	1,1206
$I_s$	$U_{s3}$	$I_v$	0,2620	0,4658	0,8379	-0,3921	-0,3921
$I_s$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,2765	0,3558	0,9445	-0,2855	-0,2855
$I_s$	$U_{s3}$	$U_p$	0,0012	0,5468	0,6366	-0,5934	-0,5934
$I_s$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0318	0,2222	1,1694	-0,0606	-0,0606
$I_s$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	0,0170	0,1303	1,0755	-0,1545	-0,1545
$I_s$	$U_{s3}$	$U_v$	0,0365	0,3957	0,7457	-0,4843	-0,4843
$U_p$	$U_{s1}$	$I_A$	0,3150	0,5511	2,1372	0,9072	0,9072
$U_p$	$U_{s1}$	$I_p$	0,4246	0,5723	2,3706	1,1406	1,1406
$U_p$	$U_{s1}$	$I_s$	0,1449	0,2909	2,1407	0,9107	0,9107
$U_p$	$U_{s1}$	$I_v$	0,9921	0,9980	0,3230	-0,9070	-0,9070
$U_p$	$U_{s1}$	$I_{SZ}$	0,7512	0,9219	0,3106	-0,9194	-0,9194
$U_p$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	0,0843	0,7573	0,7435	-0,4865	-0,4865
$U_p$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,1089	0,9073	0,4526	-0,7774	-0,7774
$U_p$	$U_{s1}$	$U_v$	0,1088	0,9137	0,4013	-0,8287	-0,8287
$U_p$	$U_{s2}$	$I_A$	0,3209	0,5582	2,1386	0,9086	0,9086

$U_p$	$U_{s2}$	$I_p$	0,4279	0,5737	2,3691	1,1391	1,1391
$U_p$	$U_{s2}$	$I_s$	0,1457	0,2998	2,1275	0,8975	0,8975
$U_p$	$U_{s2}$	$I_v$	1,0106	0,9982	0,3501	-0,8799	-0,8799
$U_p$	$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,7024	0,8776	0,3479	-0,8821	-0,8821
$U_p$	$U_{s2}$	$U_{s1}$	0,0857	0,8746	0,7157	-0,5143	-0,5143
$U_p$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,1090	0,8969	0,4771	-0,7529	-0,7529
$U_p$	$U_{s2}$	$U_v$	0,1088	0,9268	0,4287	-0,8013	-0,8013
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_A$	0,3215	0,5529	2,1637	0,9337	0,9337
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_p$	0,4303	0,5801	2,3423	1,1123	1,1123
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_s$	0,1691	0,3387	2,0897	0,8597	0,8597
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_v$	1,0074	0,9852	0,4138	-0,8162	-0,8162
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$I_{SZ}$	0,6451	0,8541	0,4003	-0,8297	-0,8297
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$U_p$	0,0015	0,7635	0,5538	-0,6762	-0,6762
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,1077	0,8885	0,4604	-0,7696	-0,1546
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$U_v$	0,1199	0,9595	0,4910	-0,7390	-0,7390
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_A$	0,3177	0,5442	2,1730	0,9430	0,9430
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_p$	0,4194	0,5793	2,3322	1,1022	1,1022
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_s$	0,1469	0,3090	2,1979	0,9679	0,9679
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_v$	0,9286	0,9756	0,2791	-0,9509	-0,9509
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,6513	0,8671	0,3228	-0,9072	-0,9072
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_p$	0,0016	0,7547	0,4979	-0,7321	-0,7321
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_{s2}$	0,0800	0,7121	0,7106	-0,5194	0,0956
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_v$	0,1198	0,9718	0,3569	-0,8731	-0,8731
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_A$	0,3239	0,5524	2,1746	0,9446	0,9446
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_p$	0,4230	0,5812	2,3305	1,1005	1,1005
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_s$	0,1484	0,3223	2,1821	0,9521	0,9521
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_v$	0,9544	0,9640	0,3120	-0,9180	-0,9180
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$I_{SZ}$	0,5889	0,7994	0,4237	-0,8063	-0,8063
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_p$	0,0016	0,7645	0,4889	-0,7411	-0,7411
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_{s1}$	0,0821	0,8424	0,6886	-0,5414	0,0736
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_v$	0,1215	0,9738	0,3901	-0,8399	-0,8399

**Tabelle A.86:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,23 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 1,23 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,615 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten  $[I_v, I_{SZ}, U_v]$  und  $[U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}]$ . Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primärstrom ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_p$ ).

### A.5.2 Globaltest

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_{SZ}$	$I_A$	1,254075e-171	0	539,3310	538,5310
$I_{SZ}$	$I_p$	0	0	1,0252	0,2252
$I_{SZ}$	$I_s$	4,921138e-152	0	633,1702	632,3702
$I_{SZ}$	$I_v$	4,141304e-132	0	560,3015	559,5015

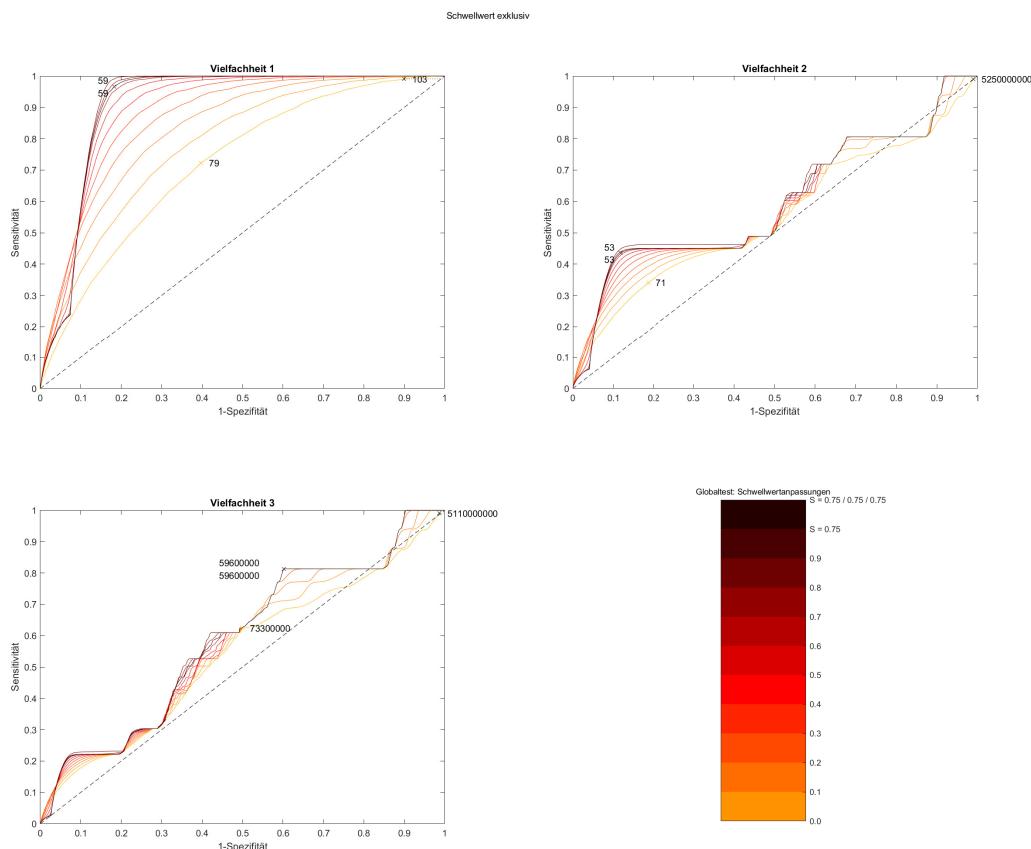
$I_{SZ}$	$U_p$	4,057062e-174	0	727,2290	726,4290	726,4290
$I_{SZ}$	$U_{s1}$	8,054534e-171	0	705,6152	704,8152	704,8152
$I_{SZ}$	$U_{s2}$	0	0	1,0246	0,2246	0,2246
$I_{SZ}$	$U_{s3}$	0	0	1,0246	0,2246	0,2246
$I_{SZ}$	$U_v$	0	0	1,0245	0,2245	0,2245
$I_v$	$I_A$	8,079778e-185	0	784,6771	783,8771	783,8771
$I_v$	$I_p$	2,355479e-174	0	748,1701	747,3701	747,3701
$I_v$	$I_s$	7,139834e-157	0	667,1040	666,3040	666,3040
$I_v$	$U_p$	2,565740e-178	0	757,3837	756,5837	756,5837
$I_v$	$U_{s1}$	0	0	0,9994	0,1994	0,1994
$I_v$	$U_{s2}$	0	0	3,5987	2,7987	2,7987
$I_v$	$U_{s3}$	0	0	1,0246	0,2246	0,2246
$I_v$	$U_v$	0	0	1,0246	0,2246	-2,1754
$U_v$	$I_A$	0	0	0,9996	0,1996	0,1996
$U_v$	$I_p$	0	0	1,0472	0,2472	0,2472
$U_v$	$I_s$	0	0	1,0246	0,2246	0,2246
$U_v$	$U_p$	0	0	1,1216	0,3216	0,3216
$U_v$	$U_{s1}$	2,513780e-181	0	1,5205	0,7205	0,7205
$U_v$	$U_{s2}$	3,277407e-175	0	734,8643	734,0643	734,0643
$U_v$	$U_{s3}$	4,282428e-176	0	741,4942	740,6942	740,6942
$I_s$	$I_A$	9,541720e-192	0	811,0142	810,2142	810,2142
$I_s$	$I_p$	9,800358e-188	0	796,1228	795,3228	794,8428
$I_s$	$U_p$	0	0	1,0609	0,2609	-0,2191
$I_s$	$U_{s1}$	0	0	0,9994	0,1994	0,1994
$I_s$	$U_{s2}$	0	0	0,9995	0,1995	0,1995
$I_s$	$U_{s3}$	0	0	3,3411	2,5411	2,5411
$U_{s2}$	$I_A$	0	0	1,0031	0,2031	0,2031
$U_{s2}$	$I_p$	0	0	0,9995	0,1995	0,1995
$U_{s2}$	$U_p$	2,748858e-190	0	782,4767	781,6767	781,6767
$U_{s2}$	$U_{s1}$	6,279818e-185	0	744,0336	743,2336	743,2336
$U_{s2}$	$U_{s3}$	9,630181e-183	0	731,3482	730,5482	730,5482
$I_p$	$I_A$	6,558549e-193	0	831,5371	830,7371	830,7371
$I_p$	$U_p$	0	0	1,0332	0,2332	-2,1668
$I_p$	$U_{s1}$	0	0	1,0030	0,2030	0,2030
$I_p$	$U_{s3}$	0	0	0,9996	0,1996	0,1996
$U_{s3}$	$I_A$	0	0	0,9996	0,1996	0,1996
$U_{s3}$	$U_p$	0	0	1,1313	0,3313	0,3313
$U_{s3}$	$U_{s1}$	1,235375e-185	0	746,7395	745,9395	745,9395
$U_{s1}$	$I_A$	0	0	1,0024	0,2024	0,2024
$U_{s1}$	$U_p$	1,097637e-192	0	795,6992	794,8992	794,8992

$U_p$	$I_A$	0	0	1,0310	0,2310	0,2310
-------	-------	---	---	--------	--------	--------

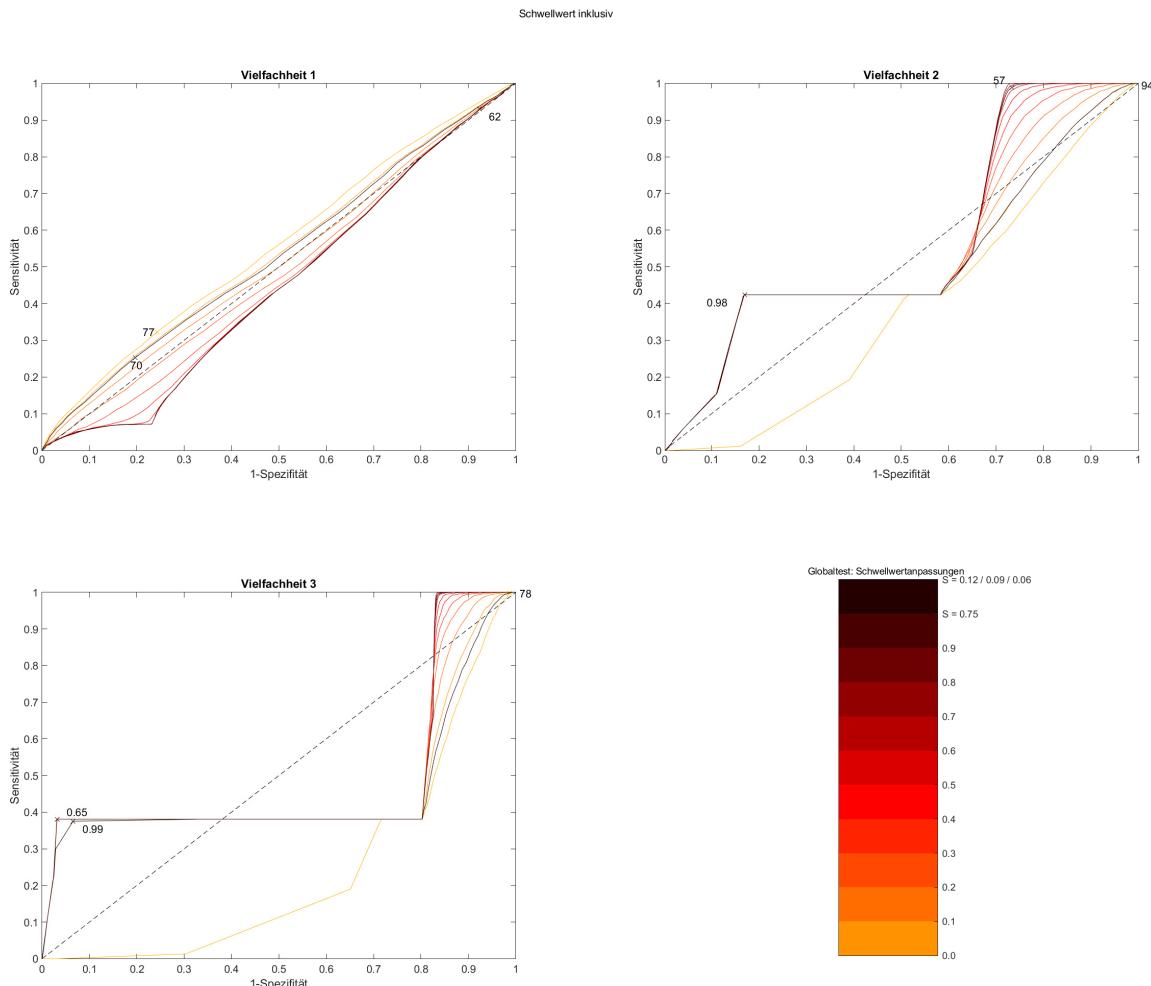
**Tabelle A.87:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,8 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 3,2 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 1,28 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transformatorstufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.

Größe Nr.			$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_p$	$U_p$	$I_A$	0	0	1,0654	0,1454	0,1454
$I_p$	$U_p$	$I_s$	0	0	1,0672	0,1472	0,1472
$I_p$	$U_p$	$I_{SZ}$	0	0	1,0230	0,1030	0,1030
$I_p$	$U_p$	$I_v$	0	0	1,0197	0,0997	0,0997
$I_p$	$U_p$	$I_A$	0	0	1,0654	0,1454	0,1454
$I_p$	$U_p$	$U_{s1}$	0	0	1,0348	0,1148	0,1148
$I_p$	$U_p$	$U_{s2}$	0	0	1,0358	0,1158	0,1158
$I_p$	$U_p$	$U_{s3}$	0	0	1,0480	0,1280	0,1280
$I_p$	$U_p$	$U_v$	0	0	1,0491	0,1291	0,1291
$I_s$	$U_p$	$I_A$	0	0	1,0773	0,1573	0,1573
$I_s$	$U_p$	$I_{SZ}$	2,112080e-144	0	597,3192	596,3992	596,3992
$I_v$	$U_p$	$I_s$	3,949826e-149	0	629,7092	628,7892	628,7892
$I_s$	$U_p$	$U_{s1}$	0	0	1,0663	0,1463	0,1463
$I_s$	$U_p$	$U_{s2}$	0	0	3,6286	2,7086	2,7086
$I_s$	$U_p$	$U_{s3}$	0	0	3,4873	2,5673	2,5673
$I_s$	$U_p$	$U_v$	0	0	4,3939	3,4739	3,4739
$I_v$	$U_v$	$I_A$	0	0	1,0009	0,0809	0,0809
$I_v$	$U_v$	$I_p$	0	0	1,0371	0,1171	0,1171
$I_v$	$U_v$	$I_s$	0	0	1,0305	0,1105	0,1105
$I_v$	$U_v$	$I_{SZ}$	0	0	1,0307	0,1107	-2,6493
$I_v$	$U_v$	$U_p$	0	0	1,1161	0,1961	0,1961
$I_v$	$U_v$	$U_{s1}$	0	0	1,0241	0,1041	0,1041
$I_v$	$U_v$	$U_{s2}$	0	0	1,0239	0,1039	0,1039
$I_v$	$U_v$	$U_{s3}$	0	0	1,0236	0,1036	0,1036

**Tabelle A.88:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 0,92 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 0,92 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 3,68 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten  $[I_v, I_{SZ}, U_v]$  und  $[U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}]$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transformatorstufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.



**Abbildung A.3:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Globaltest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert wird jeweils nur die Kombination betrachtet, die alle manipulierten Größen und ausschließlich diese enthält. Die Schwellwerte wurden für die Auftragung nicht normiert. Für Mehrfachfehler zeit sich eine sehr geringe Aussagekraft des Globaltests mit dem verwendeten RONT-Modell.



**Abbildung A.4:** ROC-Kurve für die Manipulationsdetektion mit dem Globaltest und der Anpassung des Schwellwerts aufgrund von Zusatzinformationen. Als manipuliert wird jeweils nur die Kombination betrachtet, die alle manipulierten Größen und ausschließlich diese enthält. Die optimalen Schwellwerte bei den zuvor bestimmten Schwellwertanpassungen von  $SA_{1\_GT} = 0,12$ ,  $SA_{2\_GT} = 0,09$  und  $SA_{3\_GT} = 0,06$ , bei einer gemeinsamen Schwellwertanpassung von  $SA_{GT} = 0,75$  sowie ohne Anpassung sind markiert und beschriftet.

### A.5.3 Hypothesentest

Größe Nr.		$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	$I_p$	2,37e-13	1,0000	0,0248	-1,1052	-1,1052
$I_A$	$I_s$	8,64e-11	0,0055	4,6341	3,5041	3,5041
$I_A$	$I_v$	1,17e-11	0,0401	3,7339	2,6039	2,6039
$I_A$	$ISZ$	1,22e-11	0,0385	3,0840	1,9540	1,9540
$I_A$	$U_p$	3,59e-11	0,0131	7,1525	6,0225	6,0225
$I_A$	$U_{s1}$	1,31e-11	0,0358	3,4814	2,3514	2,3514
$I_A$	$U_{s2}$	3,75e-11	0,0126	4,2881	3,1581	3,1581
$I_A$	$U_{s3}$	9,35e-11	0,0051	5,0482	3,9182	3,9182
$I_A$	$U_v$	5,18e-12	0,0891	2,4139	1,2839	1,2839
$I_p$	$I_s$	1,17e-11	0,0401	9,7484	8,6184	9,0421
$I_p$	$I_v$	1,22e-11	0,0385	6,6427	5,5127	5,5127
$I_p$	$ISZ$	3,59e-11	0,0131	13,8349	12,7049	12,7049
$I_p$	$U_p$	1,31e-11	0,0358	9,8863	8,7563	9,6038
$I_p$	$U_{s1}$	3,75e-11	0,0126	9,6225	8,4925	8,4925
$I_p$	$U_{s2}$	9,35e-11	0,0051	10,9709	9,8409	9,8409
$I_p$	$U_{s3}$	5,18e-12	0,0891	5,2048	4,0748	4,0748
$I_p$	$U_v$	5,18e-12	0,0891	2,4068	1,2768	1,2768
$I_s$	$I_v$	3,59e-11	0,0131	19,1941	18,0641	18,0641
$I_s$	$ISZ$	1,31e-11	0,0358	78,1206	76,9906	76,9906
$I_s$	$U_p$	3,75e-11	0,0126	176,8064	175,6764	176,1001
$I_s$	$U_{s1}$	9,35e-11	0,0051	86,2934	85,1634	85,1634
$I_s$	$U_{s2}$	5,18e-12	0,0891	36,9820	35,8520	35,8520
$I_s$	$U_{s3}$	5,18e-12	0,0891	33,6514	32,5214	32,5214
$I_s$	$U_v$	5,27 e-9	8,97 e-5	7,5713	6,4413	6,4413
$I_v$	$ISZ$	3,75e-11	0,0126	63,7770	62,6470	62,6470
$I_v$	$U_p$	9,35e-11	0,0051	203,8766	202,7466	202,7466
$I_v$	$U_{s1}$	5,18e-12	0,0891	34,5808	33,4508	33,4508
$I_v$	$U_{s2}$	5,18e-12	0,0891	31,1884	30,0584	30,0584
$I_v$	$U_{s3}$	5,27 e-9	8,97 e-5	77,9637	76,8337	76,8337
$I_v$	$U_v$	1,13 e-9	4,17 e-4	8,1772	7,0472	7,8947
$ISZ$	$U_p$	5,18e-12	0,0891	97,4887	96,3587	96,3587
$ISZ$	$U_{s1}$	5,18e-12	0,0891	34,5808	33,4508	33,4508
$ISZ$	$U_{s2}$	5,27 e-9	8,97 e-5	85,2180	84,0880	84,0880
$ISZ$	$U_{s3}$	1,13 e-9	4,17 e-4	35,0067	33,8767	33,8767
$ISZ$	$U_v$	1,19 e-9	3,97 e-4	7,3425	6,2125	6,2125
$U_p$	$U_{s1}$	5,27 e-9	8,97 e-5	54,3252	53,1952	53,1952
$U_p$	$U_{s2}$	1,13 e-9	4,17 e-4	167,5208	166,3908	166,3908
$U_p$	$U_{s3}$	1,19 e-9	3,97 e-4	125,4125	124,2825	124,2825
$U_p$	$U_v$	7,01e-10	6,74 e-4	9,3256	8,1956	8,1956
$U_{s1}$	$U_{s2}$	1,19 e-9	3,97 e-4	42,1474	41,0174	41,0174
$U_{s1}$	$U_{s3}$	7,01e-10	6,74 e-4	119,9028	118,7728	118,7728
$U_{s1}$	$U_v$	1,11e-10	0,0043	5,3127	4,1827	4,1827
$U_{s2}$	$U_{s3}$	1,11e-10	0,0043	35,2084	34,0784	34,0784
$U_{s2}$	$U_v$	2,51e-10	0,0019	6,1514	5,0214	5,0214

$U_{s3}$	$U_v$	5,04e-10	9,38 e-4	6,9791	5,8491	5,8491
----------	-------	----------	----------	--------	--------	--------

**Tabelle A.89:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,13 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,2825 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_v, U_v]$  und  $[I_p, U_p]$  und 0,70625 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten  $[I_p, I_s]$  und  $[I_s, U_p]$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transformatorstufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.

Größe Nr.			$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	$I_s$	$I_v$	1,22e-11	0,1385	5,2475	3,4475	3,4475
$I_A$	$I_s$	$I_{SZ}$	3,59e-11	0,0536	7,3424	5,5424	5,5424
$I_A$	$I_s$	$U_p$	1,31e-11	0,1304	5,8336	4,0336	4,0336
$I_A$	$I_s$	$U_{s1}$	3,75e-11	0,0515	7,7535	5,9535	5,9535
$I_A$	$I_s$	$U_{s2}$	9,35e-11	0,0224	8,6968	6,8968	6,8968
$I_A$	$I_s$	$U_{s3}$	5,18e-12	0,2791	4,1137	2,3137	2,3137
$I_A$	$I_s$	$U_v$	5,30 e-9	5,00 e-4	5,4811	3,6811	3,6811
$I_A$	$I_v$	$I_{SZ}$	1,31e-11	0,1304	7,3440	5,5440	5,5440
$I_A$	$I_v$	$U_p$	3,75e-11	0,0515	8,0827	6,2827	6,2827
$I_A$	$I_v$	$U_{s1}$	9,35e-11	0,0224	9,9309	8,1309	8,1309
$I_A$	$I_v$	$U_{s2}$	5,18e-12	0,2791	4,6801	2,8801	2,8801
$I_A$	$I_v$	$U_{s3}$	5,30 e-9	5,00 e-4	17,9278	16,1278	16,1278
$I_A$	$I_v$	$U_v$	1,14 e-9	0,0022	5,5195	3,7195	3,7195
$I_A$	$I_{SZ}$	$U_p$	9,35e-11	0,0224	9,2744	7,4744	7,4744
$I_A$	$I_{SZ}$	$U_{s1}$	5,18e-12	0,2791	4,7487	2,9487	2,9487
$I_A$	$I_{SZ}$	$U_{s2}$	5,30 e-9	5,00 e-4	18,2815	16,4815	16,4815
$I_A$	$I_{SZ}$	$U_{s3}$	1,14 e-9	0,0022	11,3991	9,5991	9,5991
$I_A$	$I_{SZ}$	$U_v$	1,20 e-9	0,0021	4,9577	3,1577	3,1577
$I_A$	$U_p$	$U_{s1}$	5,30 e-9	5,00 e-4	14,2812	12,4812	12,4812
$I_A$	$U_p$	$U_{s2}$	1,14 e-9	0,0022	13,0435	11,2435	11,2435
$I_A$	$U_p$	$U_{s3}$	1,20 e-9	0,0021	11,5401	9,7401	9,7401
$I_A$	$U_p$	$U_v$	7,80e-10	0,0031	6,0195	4,2195	4,2195
$I_A$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	1,20 e-9	0,0021	11,1523	9,3523	9,3523
$I_A$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	7,80e-10	0,0031	16,7566	14,9566	14,9566
$I_A$	$U_{s1}$	$U_v$	1,11e-10	0,0191	3,6838	1,8838	1,8838
$I_A$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	1,11e-10	0,0191	8,9103	7,1103	7,1103
$I_A$	$U_{s2}$	$U_v$	2,52e-10	0,0089	4,2099	2,4099	2,4099
$I_A$	$U_{s3}$	$U_v$	5,06e-10	0,0046	4,7139	2,9139	2,9139
$I_p$	$I_s$	$I_v$	3,59e-11	0,0536	8,9221	7,1221	7,1221
$I_p$	$I_s$	$I_{SZ}$	1,31e-11	0,1304	8,7255	6,9255	6,9255
$I_p$	$I_s$	$U_p$	3,75e-11	0,0515	14,0508	12,2508	12,2508
$I_p$	$I_s$	$U_{s1}$	9,35e-11	0,0224	11,8615	10,0615	10,0615
$I_p$	$I_s$	$U_{s2}$	5,18e-12	0,2791	5,5812	3,7812	3,7812
$I_p$	$I_s$	$U_{s3}$	5,30 e-9	5,00 e-4	8,6020	6,8020	6,8020
$I_p$	$I_s$	$U_v$	1,14 e-9	0,0022	9,3653	7,5653	7,5653

$I_p$	$I_v$	$I_{SZ}$	3,75e-11	0,0515	8,5175	6,7175	6,7175
$I_p$	$I_v$	$U_p$	9,35e-11	0,0224	13,0232	11,2232	11,2232
$I_p$	$I_v$	$U_{s1}$	5,18e-12	0,2791	4,6990	2,8990	2,8990
$I_p$	$I_v$	$U_{s2}$	5,30 e-9	5,00 e-4	18,0979	16,2979	16,2979
$I_p$	$I_v$	$U_{s3}$	1,14 e-9	0,0022	8,8228	7,0228	7,0228
$I_p$	$I_v$	$U_v$	1,20 e-9	0,0021	7,9171	6,1171	6,1171
$I_p$	$I_{SZ}$	$U_p$	5,18e-12	0,2791	6,2274	4,4274	4,4274
$I_p$	$I_{SZ}$	$U_{s1}$	5,30 e-9	5,00 e-4	18,4877	16,6877	16,6877
$I_p$	$I_{SZ}$	$U_{s2}$	1,14 e-9	0,0022	11,6165	9,8165	9,8165
$I_p$	$I_{SZ}$	$U_{s3}$	1,20 e-9	0,0021	7,9247	6,1247	6,1247
$I_p$	$I_{SZ}$	$U_v$	7,80e-10	0,0031	10,5423	8,7423	8,7423
$I_p$	$U_p$	$U_{s1}$	1,14 e-9	0,0022	18,4344	16,6344	16,6344
$I_p$	$U_p$	$U_{s2}$	1,20 e-9	0,0021	16,1985	14,3985	14,3985
$I_p$	$U_p$	$U_{s3}$	7,80e-10	0,0031	11,8480	10,0480	10,0480
$I_p$	$U_p$	$U_v$	1,11e-10	0,0191	5,6390	3,8390	3,8390
$I_p$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	7,80e-10	0,0031	16,7988	14,9988	14,9988
$I_p$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	1,11e-10	0,0191	5,7822	3,9822	3,9822
$I_p$	$U_{s1}$	$U_v$	2,52e-10	0,0089	6,7690	4,9690	4,9690
$I_p$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	2,52e-10	0,0089	6,6703	4,8703	4,8703
$I_p$	$U_{s2}$	$U_v$	5,06e-10	0,0046	7,4437	5,6437	5,6437
$I_p$	$U_{s3}$	$U_v$	5,06e-10	0,0046	4,6932	2,8932	2,8932
$I_s$	$I_v$	$I_{SZ}$	9,35e-11	0,0224	29,7990	27,9990	27,9990
$I_s$	$I_v$	$U_p$	5,18e-12	0,2791	29,3088	27,5088	27,5088
$I_s$	$I_v$	$U_{s1}$	5,30 e-9	5,00 e-4	13,5890	11,7890	11,7890
$I_s$	$I_v$	$U_{s2}$	1,14 e-9	0,0022	21,5456	19,7456	19,7456
$I_s$	$I_v$	$U_{s3}$	1,20 e-9	0,0021	15,9422	14,1422	14,1422
$I_s$	$I_v$	$U_v$	7,80e-10	0,0031	15,3294	13,5294	13,5294
$I_s$	$I_{SZ}$	$U_p$	5,30 e-9	5,00 e-4	28,0012	26,2012	26,2012
$I_s$	$I_{SZ}$	$U_{s1}$	1,14 e-9	0,0022	20,2971	18,4971	18,4971
$I_s$	$I_{SZ}$	$U_{s2}$	1,20 e-9	0,0021	19,3525	17,5525	17,5525
$I_s$	$I_{SZ}$	$U_{s3}$	7,80e-10	0,0031	17,5293	15,7293	15,7293
$I_s$	$I_{SZ}$	$U_v$	1,11e-10	0,0191	17,2801	15,4801	15,4801
$I_s$	$U_p$	$U_{s1}$	1,20 e-9	0,0021	43,7967	41,9967	41,9967
$I_s$	$U_p$	$U_{s2}$	7,80e-10	0,0031	112,1814	110,3814	110,3814
$I_s$	$U_p$	$U_{s3}$	1,11e-10	0,0191	36,0032	34,2032	34,2032
$I_s$	$U_p$	$U_v$	2,52e-10	0,0089	13,5472	11,7472	11,7472
$I_s$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	1,11e-10	0,0191	12,6231	10,8231	10,8231
$I_s$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	2,52e-10	0,0089	18,1497	16,3497	16,3497
$I_s$	$U_{s1}$	$U_v$	5,06e-10	0,0046	18,1495	16,3495	16,3495
$I_s$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	5,06e-10	0,0046	18,3672	16,5672	16,5672
$I_s$	$U_{s2}$	$U_v$	5,06e-10	0,0046	18,3672	16,5672	16,5672
$I_s$	$U_{s3}$	$U_v$	1,24 e-7	2,42 e-5	8,4165	6,6165	6,6165
$I_v$	$I_{SZ}$	$U_p$	1,14 e-9	0,0022	18,6274	16,8274	16,8274
$I_v$	$I_{SZ}$	$U_{s1}$	1,20 e-9	0,0021	19,7119	17,9119	17,9119
$I_v$	$I_{SZ}$	$U_{s2}$	7,80e-10	0,0031	47,4033	45,6033	45,6033
$I_v$	$I_{SZ}$	$U_{s3}$	1,11e-10	0,0191	14,3216	12,5216	12,5216
$I_v$	$I_{SZ}$	$U_v$	2,52e-10	0,0089	18,7340	16,9340	18,2840

$I_v$	$U_p$	$U_{s1}$	7,80e-10	0,0031	21,0734	19,2734	19,2734
$I_v$	$U_p$	$U_{s2}$	1,11e-10	0,0191	34,4033	32,6033	32,6033
$I_v$	$U_p$	$U_{s3}$	2,52e-10	0,0089	30,7545	28,9545	28,9545
$I_v$	$U_p$	$U_v$	5,06e-10	0,0046	15,8857	14,0857	14,0857
$I_v$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	2,52e-10	0,0089	15,6856	13,8856	13,8856
$I_v$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	5,06e-10	0,0046	18,7083	16,9083	16,9083
$I_v$	$U_{s1}$	$U_v$	5,06e-10	0,0046	18,7083	16,9083	16,9083
$I_v$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	5,06e-10	0,0046	18,8260	17,0260	17,0260
$I_v$	$U_{s2}$	$U_v$	1,24 e-7	2,42 e-5	31,6819	29,8819	29,8819
$I_v$	$U_{s3}$	$U_v$	1,60 e-8	1,73 e-4	9,3269	7,5269	7,5269
$ISZ$	$U_p$	$U_{s1}$	1,11e-10	0,0191	11,2974	9,4974	9,4974
$ISZ$	$U_p$	$U_{s2}$	2,52e-10	0,0089	13,5307	11,7307	11,7307
$ISZ$	$U_p$	$U_{s3}$	5,06e-10	0,0046	15,8857	14,0857	14,0857
$ISZ$	$U_p$	$U_v$	5,06e-10	0,0046	15,8857	14,0857	14,0857
$ISZ$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	5,06e-10	0,0046	16,1839	14,3839	14,3839
$ISZ$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	5,06e-10	0,0046	18,7083	16,9083	16,9083
$ISZ$	$U_{s1}$	$U_v$	1,24 e-7	2,42 e-5	32,0324	30,2324	30,2324
$ISZ$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	1,24 e-7	2,42 e-5	31,6819	29,8819	29,8819
$ISZ$	$U_{s2}$	$U_v$	1,60 e-8	1,73 e-4	18,2615	16,4615	16,4615
$ISZ$	$U_{s3}$	$U_v$	1,67 e-8	1,67 e-4	8,7248	6,9248	6,9248
$U_p$	$U_{s1}$	$U_{s2}$	5,06e-10	0,0046	39,4468	37,6468	37,6468
$U_p$	$U_{s1}$	$U_{s3}$	1,24 e-7	2,42 e-5	20,7898	18,9898	18,9898
$U_p$	$U_{s1}$	$U_v$	1,60 e-8	1,73 e-4	21,1993	19,3993	19,3993
$U_p$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	1,60 e-8	1,73 e-4	21,3701	19,5701	19,5701
$U_p$	$U_{s2}$	$U_v$	1,67 e-8	1,67 e-4	19,9905	18,1905	18,1905
$U_p$	$U_{s3}$	$U_v$	6,90 e-8	4,27 e-5	9,9119	8,1119	8,1119
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$U_{s3}$	1,67 e-8	1,67 e-4	18,1154	16,3154	17,6654
$U_{s1}$	$U_{s2}$	$U_v$	6,90 e-8	4,27 e-5	35,9832	34,1832	34,1832
$U_{s1}$	$U_{s3}$	$U_v$	8,03 e-8	3,69 e-5	9,5101	7,7101	7,7101
$U_{s2}$	$U_{s3}$	$U_v$	3,55 e-7	8,80 e-6	11,0655	9,2655	9,2655

**Tabelle A.90:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 3 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,8 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert 1,8 identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,45 gilt für die Gruppen mit Gemeinsamkeiten  $[I_v, ISZ, U_v]$  und  $[U_{s1}, U_{s2}, U_{s3}]$ . Simuliert wurde eine Manipulation der Transistorstufe, die sich in einer scheinbaren Manipulation der Primärspannung  $U_p$  äußert.

Größe Nr.	$Pr\{a H_0\}$	$Pr\{f_p\}$	Prüfgröße	Diff. allg. Schwelle	Diff. individ. Schwelle
$I_A$	$I_p$	0,1227	0,4120	2,6446	1,5146
$I_A$	$I_s$	0,9599	0,0588	4,7972	3,6672
$I_A$	$I_v$	0,1234	0,4101	2,3007	1,1707
$I_A$	$ISZ$	0,1232	0,4106	2,1951	1,0651
$I_A$	$U_p$	0,2486	0,2171	4,6212	3,4912
$I_A$	$U_{s1}$	0,1275	0,3987	2,1972	1,0672
$I_A$	$U_{s2}$	0,1274	0,3989	2,2973	1,1673

$I_A$	$U_{s3}$	0,1256	0,4040	2,3397	1,2097	1,2097
$I_A$	$U_v$	0,1332	0,3835	2,2625	1,1325	1,1325
$I_p$	$I_s$	0,1234	0,4101	6,0066	4,8766	5,3003
$I_p$	$I_v$	0,1232	0,4106	4,7279	3,5979	3,5979
$I_p$	$I_{SZ}$	0,2486	0,2171	8,9387	7,8087	7,8087
$I_p$	$U_p$	0,1275	0,3987	6,2396	5,1096	5,9571
$I_p$	$U_{s1}$	0,1274	0,3989	5,1551	4,0251	4,0251
$I_p$	$U_{s2}$	0,1256	0,4040	5,0848	3,9548	3,9548
$I_p$	$U_{s3}$	0,1332	0,3835	4,8784	3,7484	3,7484
$I_p$	$U_v$	0,1332	0,3835	2,2559	1,1259	1,1259
$I_s$	$I_v$	0,2486	0,2171	12,4013	11,2713	11,2713
$I_s$	$I_{SZ}$	0,1275	0,3987	49,3045	48,1745	48,1745
$I_s$	$U_p$	0,1274	0,3989	94,7218	93,5918	94,0155
$I_s$	$U_{s1}$	0,1256	0,4040	39,9950	38,8650	38,8650
$I_s$	$U_{s2}$	0,1332	0,3835	34,6631	33,5331	33,5331
$I_s$	$U_{s3}$	0,1332	0,3835	31,5414	30,4114	30,4114
$I_s$	$U_v$	0,1857	0,2845	3,4286	2,2986	2,2986
$I_v$	$I_{SZ}$	0,1274	0,3989	34,1677	33,0377	33,0377
$I_v$	$U_p$	0,1256	0,4040	94,4920	93,3620	93,3620
$I_v$	$U_{s1}$	0,1332	0,3835	32,4125	31,2825	31,2825
$I_v$	$U_{s2}$	0,1332	0,3835	29,2328	28,1028	28,1028
$I_v$	$U_{s3}$	0,1857	0,2845	35,3051	34,1751	34,1751
$I_v$	$U_v$	0,0316	0,9913	0,2099	-0,9201	-0,0726
$I_{SZ}$	$U_p$	0,1332	0,3835	91,3759	90,2459	90,2459
$I_{SZ}$	$U_{s1}$	0,1332	0,3835	32,4125	31,2825	31,2825
$I_{SZ}$	$U_{s2}$	0,1857	0,2845	38,5902	37,4602	37,4602
$I_{SZ}$	$U_{s3}$	0,0316	0,9913	0,8988	-0,2312	-0,2312
$I_{SZ}$	$U_v$	0,0315	0,9918	0,1108	-1,0192	-1,0192
$U_p$	$U_{s1}$	0,1857	0,2845	24,6007	23,4707	23,4707
$U_p$	$U_{s2}$	0,0316	0,9913	4,3011	3,1711	3,1711
$U_p$	$U_{s3}$	0,0315	0,9918	1,8932	0,7632	0,7632
$U_p$	$U_v$	0,0781	0,5985	2,5202	1,3902	1,3902
$U_{s1}$	$U_{s2}$	0,0315	0,9918	0,6363	-0,4937	-0,4937
$U_{s1}$	$U_{s3}$	0,0781	0,5985	32,4035	31,2735	31,2735
$U_{s1}$	$U_v$	0,0329	0,9833	0,1905	-0,9395	-0,9395
$U_{s2}$	$U_{s3}$	0,0329	0,9833	1,2628	0,1328	0,1328
$U_{s2}$	$U_v$	0,0330	0,9827	0,2638	-0,8662	-0,8662
$U_{s3}$	$U_v$	0,0324	0,9863	0,2687	-0,8613	-0,8613

**Tabelle A.91:** Wahrscheinlichkeit von Manipulationen mit Vielfachheit 2 für Nullhypothese, Signifikanzniveau für Falsch-Positiv-Fall, Prüfgröße und Differenz zur allgemeinen Schwelle von 1,13 und zur individuellen Schwelle, die entweder mit dem allgemeinen Schwellwert identisch ist für die Kombinationen ohne Gemeinsamkeiten oder für die der angepasste Schwellwert von 0,2825 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten [ $I_v, U_v$ ] und [ $I_p, U_p$ ] und 0,70625 gilt für die Gruppen mit stärkeren Gemeinsamkeiten [ $I_p, I_s$ ] und [ $I_s, U_p$ ]. Simuliert wurde eine Manipulation von  $+2,25\sigma$  in Primär- ( $I_p$ ) und Sekundärstrom ( $I_p$ ).

## A.6 Weiterführende Gedanken

### A.6.1 Bekanntheit des Systemzustands

Im Fall eines Angriffs ist eine wichtige Information um zu einer Entscheidung über das weitere Vorgehen zu kommen, wie sicher der Systemzustand bekannt ist und wie sicher der Betrieb in diesem Zustand ist. Beides wird für die einzelnen Hypothesen im Voraus berechnet, hängt aber teilweise noch vom aktuellen Wert einzelner Variablen ab.

In die Bewertung fließen ein

- die Anzahl und Diversität wahrscheinlicher Hypothesen bzw.
- die Anzahl der gesicherten Werte
- die Beobachtbarkeit des Systems
- die Redundanz mit der die verdächtigen Werte rekonstruiert werden können
- die Redundanz mit der unverdächtige Werte reconciliert werden können
- die Bedeutung der verdächtigen Werte, also ob sie das System in einen kritischen Zustand bringen können

In der Beurteilung des Systemzustandes gibt es verschiedene Abstufungen. Welche Sicherheitsanforderung an das jeweilige System gestellt wird, hängt davon ab wie hoch ein möglicher Schadensfall durch den Cyberangriff ausfallen könnte und welche Verluste und Konsequenzen sich aus den zur Verfügung stehenden Gegenmaßnahmen ergeben. Für reale Anlagen mit beschränkter Sensorsausstattung können möglicherweise nur geringere Sicherheitsanforderungen realisiert werden.

Ist die Detektion mehrdeutig, kommen also unterschiedliche Größen oder Kombinationen als manipuliert in Betracht, kann untersucht werden, ob das System bei Entfernung aller Manipulationshypotenosen, entweder gemeinsam oder einzeln, noch vollständig beobachtbar ist, ob also mit den vertrauenswürdigen Größen alle Systemgrößen rekonstruiert werden können. Weisen die vertrauenswürdigen Größen außerdem noch Redundanzen auf, besteht eine hohe Bekanntheit des Systemzustands. Lassen sich nach Entfernung verdächtiger Systemgrößen nicht mehr alle rekonstruieren, kann noch die Bedeutung der betreffenden Größe, deren Werte als unbekannt betrachtet werden können, untersucht werden. Können diese Größe keine kritischen Werte annehmen, kann noch von einer begrenzten Bekanntheit des Systemzustands ausgegangen werden.

Zusammengefasst wird die Sicherheit der Kenntnis des Systemzustandes in folgenden Stufen bewertet:

- System vollständig beobachtbar wenn alle an plausiblen Hypothesen beteiligten Variablen entfernt werden
- System im Fall aller plausiblen Hypothesen beobachtbar, wenn die verdächtigen Variablen entfernt werden
- Im Fall aller plausiblen Hypothesen sind alle systemrelevanten Variablen beobachtbar, wenn die verdächtigen Variablen entfernt werden
- Nicht beobachtbar sind nur solche Variablen, die einzeln und in Kombination keinen Schaden am System direkt oder indirekt anrichten können
- Systemzustand ist unbekannt, das System ist gefährdet

Die Sicherheit des Systemzustands selbst wird klassisch über den Vergleich mit Wertebereichen bestimmt. Im Fall eines Angriffs werden hier auch die rekonstruierten Werte untersucht. Diese Untersuchung erfolgt für jede Hypothese einzeln, weil sich bei Entfernung aller verdächtigen Werte kleine, statistische Messfehler stark auf die rekonstruierten Werte auswirken können. Sind Variablen nicht beobachtbar, werden diese im Rahmen ihres erreichbaren Wertebereichs unter Berücksichtigung der Werte unverdächtiger Variablen variiert und untersucht, ob Wertekombinationen existieren, die am System Schäden verursachen können.



# Literaturverzeichnis

- [1] ABEL, D.: *Petri-Netze für Ingenieure. Modellbildung und Analyse diskret gesteuerter Systeme*. Springer Verlag, 1990.
- [2] ADASH SPOL. S R.O.: Vibrationsdiagnose. <https://adash.com/de/vibrationdiagnose>.
- [3] ALBERTINI, A.: Diese Woche: Vibrationssensoren in Windkraftanlagen. *Windmesse - all in wind* (2012).
- [4] ALBUQUERQUE, J. S.; BIEGLER, L. T.: Data reconciliation and gross-error detection for dynamic systems. *Aiche Journal* 42 (1996), S. 2841–2856.
- [5] ALMASY, G.; SZTANO, T.: Checking and Correction of Measurements on the Basis of Linear System Model. *Problems of Control and Information Theory* 4 (1975), S. 57.
- [6] ANICAS, M.: What is a Firewall and How Does It Work? Tutorial, DigitalOcean, 2015.
- [7] BAI, S.; THIBAULT, J.; MCLEAN, D. D.: Dynamic Data Reconciliation For Improved Process Performance (2005), S. 485 – 498.
- [8] BAI, S.; THIBAULT, J.; MCLEAN, D. D.: Dynamic data reconciliation: Alternative to Kalman filter. *Journal of Process Control* 5 (2006) 16, S. 485 – 498.
- [9] BAI, S.; THIBAULT, J.; MCLEAN, D. D.: Simultaneous Measurement Bias Correction and Dynamic Data Reconciliation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 85 (2007) 1, S. 111 – 117.
- [10] BARRETO, S.; PIGNATI, M.; DÁN, G.; LE BOUDEC, J.-Y.; PAOLONE, M.: Undetectable Timing-Attack on Linear State-Estimation by Using Rank-1Approximation. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID* 9 (2018) 4, S. 3530 – 3542.
- [11] BAYLON, C.; BRUNT, R.; LIVINGSTONE, D.: Cyber Security at Civil Nuclear Facilities, Understanding the Risks. Techreport, Chatham House, 2015.
- [12] BEEK, C.: A Case of Mistaken Identity? The Role of BlackEnergy in Ukrainian Power Grid Disruption. Blog entry, McAfee, 2016.
- [13] BENCSÁTH, B.; PÉK, G.; BUTTYÁN, L.; FÉLEGYHÁZ, M.: W32.Stuxnet Dossier. Technical Report 0.93, Laboratory of Cryptography and System Security (CrySyS), 2011.

- [14] BENNOUNA, O.; HERAUD, N.; RODRIGUEZ, M.; CAMBLONG, H.: Data reconciliation & gross error detection applied to wind power. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part I-journal of Systems and Control Engineering - PROC INST MECH ENG I-J SYST C* 221 (2007), S. 497–506.
- [15] BERMAN, D.: What is SIEM? <https://logz.io/blog/what-is-siem/>.
- [16] BIGGS, J.: Hackers release source code for a powerful DDoS app called Mirai. <https://techcrunch.com/2016/10/10/hackers-release-source-code-for-a-powerful-ddos-app-called-mirai>, 2016.
- [17] BUCHMANN, J.: *Einführung in die Kryptographie*. Springer Spektrum, 2016.
- [18] BURNS, A.; DOBBING, B.; VARDANEGA, T.: Guide for the use of the Ada Ravenscar Profile in high integrity systems. [https://www.sigada.org/ada\\_letters/jun2004/ravenscar\\_article.pdf](https://www.sigada.org/ada_letters/jun2004/ravenscar_article.pdf), 2003.
- [19] CHEREPANOV, A.: WIN32/INDUSTROYER, A new threat for industrial control systems. techreport 2017-06-12, ESET, 2017.
- [20] DAROUACH, M.; ZASADZINSKI, M.: Data reconciliation in generalized linear dynamic system. *AICHE Journal* 37 (1991) 2, S. 193–201.
- [21] DECKER, H.-J.: *Technische Fehlerfrühdiagnose-Einrichtungen : Stand d. Technik u. neuartige Einsatzmöglichkeiten in d. Maschinenbauindustrie*. Schneider-Fresenius, Wolfgang, 1985.
- [22] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer-Lehrbuch, Springer Spektrum Berlin, Heidelberg, 2017.
- [23] DRAGOS, INC.: CHERNOVITE's PIPEDREAM Malware Targeting Industrial Control Systems (ICS). <https://www.dragos.com/blog/industry-news/chernovite-pipedream-malware-targeting-industrial-control-systems>, 2022.
- [24] ELBEZ, G.; REIBELT, K.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.; HAGENMEYER, V.: Analysis of cyber-physical attacks against the future energy system. Poster präsentiert auf 7. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie (2018), Karlsruhe, Deutschland, 26. Juni 2018, 34.15.01; LK 01, 2018.
- [25] ESPINER, T.: Trend Micro: Antivirus industry lied for 20 years. <https://www.zdnet.com/article/trend-micro-antivirus-industry-lied-for-20-years/>, 2008.

- [26] FALLIERE, N.; O MURCHU, L.; CHIEN, E.: W32.Stuxnet Dossier. techreport 1.4, Symantec Security Response, 2011.
- [27] FORMBY, D.; DURBHA, S.; BEYAH, R.: Out of Control: Ransomware for Industrial Control Systems. In: *RSAConference*, Bd. 4, 2017.
- [28] FRANK, P. M.: On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: a survey. *International Journal of Systems Science* 25 (1994) 12, S. 2129 – 2154.
- [29] GAGNON, R.: Wind Farm - DFIG Detailed Model. Techn. Ber., Matlab, 2019.
- [30] HONE OPTICAL FIBER & MORE: Stromleitung Glasfaserkabel. <https://www.honecable.com/de/glasfaserkabel/powerline-lichtwellenleiter/>.
- [31] HOTTELET, U.: Sicherheit 1.0. *Ampere* 1 (2013), S. 24–27.
- [32] HUBER, C.: *Infrarot-Thermografie in der Instandhaltung der chemischen Industrie*. Springer Vieweg, 2018.
- [33] IKTS: Industrielösungen - Akustische Diagnose - Fehlerdetektion I Signalbeurteilung I Qualitätssicherung.
- [34] INGMAR LEISSE: *Efficient Integration of Distributed Generation in Electricity Distribution Networks*. Dissertation, Lund University, 2013.
- [35] ISERMANN, R.: *Fault-Diagnosis Systems - An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer, 2006.
- [36] JOHNSON, B.; CABAN, D.; KROTOFIL, M.; SCALI, D.; BRUBAKER, N.; GLYER, C.: Attackers Deploy New ICS Attack Framework “TRITON” and Cause Operational Disruption to Critical Infrastructure. Techn. Ber., Mandiant, 2017.
- [37] KELLER, H. B.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; HAGENMEYER, V.: Zuverlässige und sichere Software offener Automatisierungssysteme der Zukunft – Herausforderungen und Lösungswege. *at - Automatisierungstechnik* 12 (2016) 64, S. 930–947.
- [38] KERKMANN, C.; NEUERER, D.: Windows 7, Bundesregierung zahlt fast eine Million Euro für veraltetes Microsoft-Betriebssystem. *Handelsblatt* (2020).
- [39] KLABNIK, STEVE ANDL NICHOLS, C.: *The Rust Programming Language*. nu starch press, 2023.
- [40] KRIESEL, D.: Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze. [http://www.dkriesel.com/\\_media/science/neuronalenetze-de-zeta2-2col-dkrieselcom.pdf](http://www.dkriesel.com/_media/science/neuronalenetze-de-zeta2-2col-dkrieselcom.pdf), 2007.
- [41] KRUSE, R.; GEBHARDT, J.; KLAWONN, F.: *Fuzzy-Systeme*. Vieweg+Teubner Verlag, 1994.

- [42] KUMAR, M.: TSMC Chip Maker Blames WannaCry Malware for Production Halt. <https://thehackernews.com/2018/08/tsmc-wannacry-ransomware-attack.html>, 2018.
- [43] LEIBMAN, M.; EDGAR, T.; LASDON, L.: Efficient data reconciliation and estimation for dynamic processes using nonlinear programming techniques. *Computers & Chemical Engineering* 16 (1992) 10, S. 963–986, an International Journal of Computer Applications in Chemical Engineering.
- [44] MADRON, F.: A New Approach to the Identification of Gross Errors in Chemical Engineering Measurements. *Chemical Engineering Science - CHEM ENG SCI* 40 (1985), S. 1855–1860.
- [45] MARCHTHALER, R.; DINGLER, S.: *Kalman-Filter - Einführung in die Zustandsschätzung und ihre Anwendung für eingebettete Systeme*. Springer Vieweg, 2017.
- [46] MASCHINENFABRIK REINHAUSEN GMBH: GRIDCON® TRANSFORMER SPANNUNGS-REGELUNG FÜR VERTEILUNGSNETZE. 2015.
- [47] MATHWORKS: *Foundations of Fuzzy Logic*. MathWorks, 2023.
- [48] MATTHES, J.: Persönliche Kommunikation.
- [49] MAUERER, J.: Safety und Security: Sicherheit bei vernetzten Industrieanlagen. *Computerwoche* (2015).
- [50] MCBRAYER, K. F.; EDGAR, T. F.: Bias detection and estimation in dynamic data reconciliation. *Journal of Process Control* 5 (1995) 4, S. 285–289, iFAC Symposium: Advanced Control of Chemical Processes.
- [51] MCCORMICK, J. W.; CHAPIN, P. C.: *Building High Integrity Applications with SPARK*. Cambridge University Press, 2015.
- [52] MICROSOFT: Win32/Sasser. <https://www.microsoft.com/en-us/wdsi/threats/malware-encyclopedia-description?name=Win32/Sasser>, 2004.
- [53] MORRIS, D.: Addressing Security Vulnerabilities in Embedded Applications Using Best Practice Software Development Processes And Standards. White paper, Programming Research Limited (PRQA), 2016.
- [54] NARASIMHAN, S.; JORDACHE, C.: *Data Reconciliation & Gross Error Detection*. Gulf Publishing Company, Houston Texas, 2000.
- [55] NARASIMHAN, S.; MAH, R. S. H.: Generalized Likelihood Ratio Method for Gross Error Detection. *AICHE Journal* 33 (1987), S. 1514 – 1521.

- [56] NEEF, S.; SCHÄFERS, T. P.: Schwachstellen aufgedeckt: Der leichtfertige Umgang mit kritischen Infrastrukturen . *golem.de* (2016).
- [57] NELSON, N.: The Impact of Dragonfly Malware on Industrial Control Systems. White paper, SANS, 2016.
- [58] NSA: Drovorub Malware: Fact Sheet & FAQs. Fact sheet, NSA, 2020.
- [59] PERFORCE SOFTWARE, INC.: MISRA C and MISRA C++. <https://www.perforce.com/resources/qac/misra-c-cpp#cpp-rules>, 2024.
- [60] POLYTECHNIQUE MONTRÉAL: Introduction to Data Reconciliation. 2003.
- [61] PROBST, M.: Zustandsüberwachung umsetzen - Wie MEMS-basierte Vibrationssensoren Windkraftanlagen überwachen. *all-electronics.de* (2022).
- [62] RADWARE: “BrickerBot” Results In Permanent Denial-of-Service. <https://www.radware.com/security/ddos-threats-attacks/brickerbot-pdos-permanent-denial-of-service>, 2017.
- [63] RECHTSLUPE: Zero-Day-Exploits – und der Staatstrojaner. 2021.
- [64] REIBELT, K.; EL-BEZ, G.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H.: Preliminary approaches to improve the smart Grid cyber security. Poster präsentiert auf 6. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie, 2. Juni 2017, 34.15.01; LK 01, 2017.
- [65] REIBELT, K.; EL BEZ, G.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.: IT-Sicherheit für die vernetzten cyber-physikalischen Komponenten zukünftiger Energiesysteme. Vortrag gehalten auf 82. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen, Fachverband Quantenoptik und Photonik (SAMOP 2018), Erlangen, Deutschland, 4.–9. März 2018, 37.98.11; LK 01, 2018.
- [66] REIBELT, K.; EL BEZ, G.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.: Preliminary Approaches for improving the Smart Grid Cyber Security. In: *Ideen und Innovationen für die Energie von morgen : Wissenschaftliche Beiträge des KIT zu den Jahrestagungen 2014, 2016 und 2017 des KIT-Zentrums Energie*. Hrsg.: W. Breh, Bd. 7747 von *KIT Scientific Reports*, S. 115–122, KIT Scientific Publishing, 37.98.11; LK 01, 2018.
- [67] REIBELT, K.; ELBEZ, G.; SCHERER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.; HAGENMEYER, V.: Modellbasiertes IT-Sicherheitssystem für vernetzte Komponenten zukünftiger Energiesysteme. Vortrag gehalten auf 83. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (SAMOP), Arbeitskreis Energie (2019), Rostock, Deutschland, 10.–15. März 2019, 37.98.11; LK 01, 2019.

- [68] REIBELT, K.; ELBEZ, G.; SCHNEIDER, O.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.; HAGENMEYER, V.: IT-security of cyber-physical systems for the future interacting energy system. Poster präsentiert auf 7. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie (2018), Karlsruhe, Deutschland, 26. Juni 2018, 37.98.11; LK 01, 2018.
- [69] REIBELT, K.; KELLER, H. B.; HAGENMEYER, V.; MATTHES, J.: Dynamic Model Based Detection of Cyberattacks in Industrial Facilities. In: *31st European Symposium on Computer Aided Process Engineering: ESCAPE-31*. Ed.: M. Türkay, Bd. 50 von *Computer aided chemical engineering*, S. 1339–1344, Elsevier, 37.12.01; LK 01, 2021.
- [70] REIBELT, K.; MATTHES, J.; KELLER, H. B.; HAGENMEYER, V.: Identification and Localization of Cyber-Attacks in Industrial Facilities. In: *ESCAPE 30, 30th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Milan, Italy, 30 August 2020 – 2 September 2020*. Ed.: S. Pierucci, Bd. 47 von *Computer-Aided Chemical Engineering*, S. 1747 – 1752, Elsevier, 34.14.02; LK 01, 2020.
- [71] REY, G. D.; BECK, F.: *Neuronale Netze, Eine Einführung*. 2018.
- [72] ROLLINS, D. K.; DEVANATHAN, S.: Unbiased estimation in dynamic data reconciliation. *AIChE Journal* 39 (1993) 8, S. 1330 – 1334.
- [73] ROOS, U.: Datendiode gegen Datendiebe. <https://www.heise.de/news/Datendiode-gegen-Datendiebe-2139499.html>, 2014.
- [74] ROSENBERG, J.; MAH, R. S. H.; IORDACHE, C.: Evaluation of schemes for detecting and identifying gross errors in process data. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 26 (1987) 3, S. 555–564.
- [75] SAMANI, R.: Updated BlackEnergy Trojan Grows More Powerful. Blog entry, McAfee, 2016.
- [76] SCHWENKEN, U.: *Eine Methode zur Fehlerbewertung und zur adaptiven Motorleistungsbegrenzung auf der Basis einer modellbasierten Diagnose am Beispiel eines PKW-Kühlsystems*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum, 2006.
- [77] SCHWIERZ, R.: Transformator. Laborpraktikum, Technische Universität Dresden, 2011.
- [78] SEACORD, R.: *CERT® C Coding Standard, Second Edition, The: 98 Rules for Developing Safe, Reliable, and Secure Systems, 2nd Edition*. Addison-Wesley Professional, 2014.
- [79] SHEREEN, E.; DELCOURT, M.; BARRETO, S.; DÁN, G.; LE BOUDEC, J.-Y.; PAOLONE, M.: Feasibility of Time Synchronization Attacks against PMU-based State-Estimation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (2019).

- [80] SHODAN: Search Engine for the Internet of Everything. <https://www.shodan.io/>.
- [81] SIDAK, Z.: Rectangular Confidence Regions for the Means of Multivariate Normal Distributions. *Journal of the American Statistical Association Journal of the American Statistical Association* 62 (1967) 318, S. 626–633.
- [82] STAHL, L.-F.: Gefahr im Kraftwerk. *c't - Magazin für Computertechnik*, 11/2013 (2013), S. 78–81.
- [83] STAHL, L.-F.; BENZ, B.; EIKENBERG, R.: Risiko verdrängt und vergessen. *c't - Magazin für Computertechnik*, 21/2015 (2015), S. 86–87.
- [84] STAHL, L.-F.; EIKENBERG, R.: Fünf nach zwölf. *c't - Magazin für Computertechnik*, 15/2013 (2013), S. 16–17.
- [85] SYMANTEC SECURITY RESPONSE: VPNFilter: New Router Malware with Destructive Capabilities. <https://symantec-enterprise-blogs.security.com/blogs/threat-intelligence/vpnfilter-iot-malware>, 2018.
- [86] TAMHANE, A. C.: A Note on the Use of Residuals for Detecting an Outlier in Linear Regression. *Biometrika* 69 (2010) 2, S. 488–489.
- [87] VDI: VDI 4499 Blatt 1. Vdi-richtlinie, VDI Verein Deutscher Ingeieure e.V., 2008.
- [88] VDI: VDI 4499 Blatt 2. Vdi-richtlinie, VDI Verein Deutscher Ingeieure e.V., 2011.
- [89] WIKIPEDIA USER HELGEHAN: Sasser (computer worm). [https://en.wikipedia.org/wiki/Sasser\\_\(computer\\_worm\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sasser_(computer_worm)).
- [90] WIKIPEDIA USER WIKIEDITOROFTODAY: Stuxnet. <https://en.wikipedia.org/wiki/Stuxnet>.
- [91] YIN, W.; GANG, R.; SHUQING, W.: Linear dynamic data reconciliation: Refinery application. *IFAC Proceedings Volumes* 34 (2001) 25, S. 561–566, 6th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems 2001, Jejudo Island, Korea, 4-6 June 2001.