



UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Institut für Informatik – Fachgebiet Wissensbasierte Systeme
Warburger Str. 100, D-33098 Paderborn

Model-based Diagnosis of Dynamic Systems - A Theoretical Framework

Studienarbeit für den Studiengang
Ingenieurinformatik/Elektrotechnik

von

Thomas A. Spanuth

Waldeyerweg 8

D-33100 Paderborn

vorgelegt bei

Prof. Dr. Benno Stein

(Gutachter)

Paderborn, 2008

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften entnommen wurden, kenntlich gemacht sind und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war.

Paderborn, den

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein völlig neuartiges, symptombasiertes Konzept (bzw. Modell) zur Evaluierung der Qualität von Diagnoseverfahren entwickelt und vorgestellt. Untersucht werden in diesem Zusammenhang sowohl die Art der Symptomgenerierung, auch als auch die charakteristischen Eigenschaften der daraus resultierenden Symptome. Darüber hinaus wird geprüft, welche generellen Anforderungen an eine Fehlerdiagnose gestellt werden und wie diese in Bezug zu den Symptomen stehen.

In einer Fallstudie wird dieses Modell auf verschiedenen Diagnoseverfahren aus der Praxis angewandt. Anhand der dabei erzielten Ergebnisse werden diese Verfahren anschließend miteinander verglichen.

Schlüsselwörter: Modellbasierte Diagnose, Evaluierungsmodell, Symptomgenerierung, Diagnosequalität

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	11
1. Einleitung.....	13
1.1. Motivation und Zielsetzung.....	13
1.2. Aufbau der Arbeit.....	15
2. Entwurf eines Evaluierungsmodells für Diagnoseverfahren.....	17
2.1. Symptomgenerierung.....	18
2.1.1. Kategorisierung der Verfahren.....	18
2.1.2. Wertebereich der Symptome.....	20
2.1.3. Interpretationsspielraum der Symptome.....	21
2.2. Symptombasiertes Evaluierungsmodell.....	22
2.2.1. Allgemeine Diagnoseanforderungen.....	22
2.2.2. 3D-Modell.....	22
3. Anwendung des Evaluierungsmodells in der Praxis.....	25
3.1. Verfahren aus der Literatur.....	25
3.2. Evaluierungsergebnisse.....	27
4. Zusammenfassung und Ausblick.....	33
Literaturverzeichnis.....	35

Abbildungsverzeichnis

1.1	Generelle Vorgehensweise bei der (modellbasierten) Fehlerdiagnose.....	14
2.1	3D-Modell zur Evaluierung von Diagnoseverfahren	23
3.1	Gesamtergebnisse der Evaluierung der einzelnen Diagnoseverfahren (inkl. Klassenzuweisung).....	28
3.2	Übersicht über die prozentuale Durchschnittsabweichung im Bereich der Effizienz (1. Dimension).....	29
3.3	Übersicht über die prozentuale Durchschnittsabweichung im Bereich der Robustheit (2. Dimension).....	29
3.4	Übersicht über die prozentuale Durchschnittsabweichung im Bereich der Generalisierbarkeit (3. Dimension).....	30

Tabellenverzeichnis

2.1	(Standard-) Verfahren zur Symptomgenerierung.....	20
3.1	Verfahrensübersicht (inkl. *Kategoriezuordnung; siehe Abb. 2.1).....	27

Einleitung

- Kapitel 1 -

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Diagnose technischer Systeme stellt aufgrund der zunehmenden Komplexität der Systeme eine immer schwierigere Aufgabe dar. Die in vielen Arbeiten vorgestellten Konzepte beziehen sich in aller Regel nur auf das zu diagnostizierende System allein und sind daher nur unter bestimmten Rahmenbedingungen allgemein anwendbar. Eine Übertragung auf andere Bereiche bzw. Systeme ist somit nur unter hohem Aufwand und mit erheblichen Schwierigkeiten möglich. Doch worin genau unterscheiden sich die unterschiedlichen Ansätze? Worin liegen die Schwierigkeiten der Übertragbarkeit? Und, welche Parallelen gibt es? Um diese Fragen zu beantworten, ist es zunächst einmal sinnvoll, sich die Prozessabfolge bei der Fehlerdiagnose genauer anzuschauen.

Das Prinzip der Fehlerdiagnose lässt sich generell gesehen in zwei Bereiche unterteilen (siehe Abbildung 1.1; [Hir06]): *Merkmalsextraktion* und *-interpretation*¹. Ziel bei der Merkmalsextraktion ist es, möglichst aussagekräftige Merkmale bzw. Merkmalsabweichungen (Symptome²) aus der zugrundeliegenden Menge an Messdaten zu identifizieren, die im Anschluß daran als Eingangsgrößen für die Merkmalsinterpretation eingesetzt werden können. Voraussetzung für eine sichere und zuverlässige Fehlerdiagnose sind dabei Merkmale, die signifikant hinsichtlich eines Fehlers und möglichst unbeeinflusst vom regulären Systemablauf sind [Reu01]. Im Rahmen der

¹ Anmerkung: Anstelle der Merkmalsextraktion und -interpretation findet man in der Literatur häufig auch die Bezeichnungen Fehlererkennung und -interpretation.

² Def.: Symptome stellen Abweichungen zwischen dem beobachtbaren und dem erwarteten Systemverhalten dar.

Merkmalsinterpretation besteht die weitere Diagnoseaufgabe darin, die gefundenen Merkmale hinsichtlich Fehlerort und -ursache genauer zu untersuchen. Hierzu benötigt man Fachwissen über das System sowie dessen Verhalten. Je nach Anwendungsfall kann dieses Wissen entweder explizit in Form von Prozessmodellen (modellbasiert) bzw. Expertenregeln (heuristisch) oder implizit in Form von Fallbeispielen (fallbasiert) vorliegen. In der Schnittstelle zwischen den beiden Bereichen befindet sich eine sogenannte Symptomdatenbasis, welche sämtliche innerhalb der Merkmalsextraktion identifizierten *Symptom-Fehler* Beziehungen beinhaltet. Sie bildet die Basis der Fehlerdiagnose, da sie entscheidenden Einfluss auf die spätere Diagnosegüte bzw. -qualität nimmt. Mit anderen Worten, entscheidend für die Fehlerdiagnose sind in erster Linie die gefundenen Merkmale. Handelt es sich hierbei bereits um wenig aussagekräftige und nur eingeschränkt gültige Merkmale, so wird auch die anschließende Phase der Merkmalsinterpretation nicht mehr wesentlich zur Diagnosegüte beitragen können. Um also die Qualität einer Fehlerdiagnose beurteilen zu können, ist es erforderlich, die innerhalb der Merkmalsextraktionsphase identifizierten Symptome näher zu untersuchen.

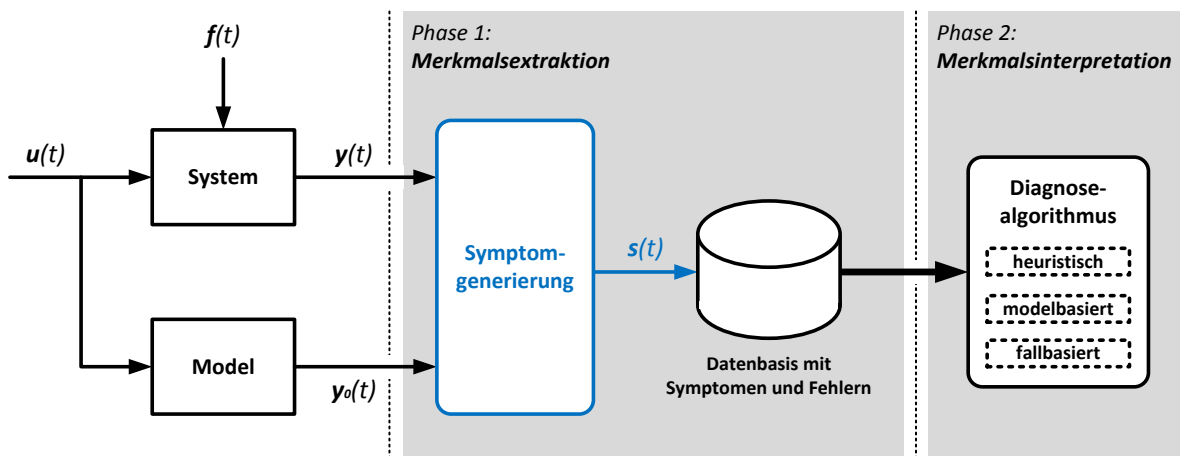


Abbildung 1.1: Generelle Vorgehensweise bei der (modellbasierten) Fehlerdiagnose. Durch einen Vergleich der gemessenen und simulierten Messwertevektoren, $y(t)$ bzw. $y_0(t)$, wird der Symptomvektor $s(t)$ gebildet.

Genau an dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. **Ziel der Arbeit** ist es, anhand der charakteristischen Züge der in der Symptomdatenbasis hinterlegten Symptome eine möglichst präzise Aussage über die Gesamtqualität einer Fehlerdiagnose zu erlangen. In einem ersten Schritt sollen dazu die wesentlichen Kennzahlen bzw. Metriken bestimmt werden, an denen die Diagnosegüte gemessen werden kann. Diese Kenngrößen sollen dann, in einem darauffolgenden Schritt, in Bezug zu den vorhandenen Symptomen gesetzt werden. Mit anderen Worten geht: Es geht darum ein Modell (bzw. Schema) zu entwerfen, welches es erlaubt, allein auf Basis der extrahierten Symptome eine genaue Aussage über die Qualität und Güte des eingesetzten Diagnoseverfahrens zu bekommen. Dieses Schema soll anschließend dazu verwendet werden aus der Litera-

tur bereits bekannte Diagnoseverfahren hinsichtlich ihrer Diagnoseeigenschaften zu beurteilen und miteinander zu vergleichen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Nach dem einleitenden Kapitel 1 werden in Kapitel 2 die an eine Fehlerdiagnose gestellten Anforderungen detailliert erläutert und vorgestellt. Darüber hinaus werden Verfahren zur Symptomentgenerierung diskutiert sowie die Merkmalsausprägungen der daraus resultierenden Symptome analysiert. Den Abschluss des Kapitels bildet eine zusammenfassende Bewertung in Form eines allgemeingültigen Schemas (bzw. Modells), welches eine direkte Schlussfolgerung zwischen den Symptomen und der Qualität der Fehlerdiagnose zulässt.

Kapitel 3 stellt die Anwendung des aus Kapitel 2 bekannten Evaluierungsmodells in der Praxis dar. Aus der Literatur bereits bekannte Diagnoseverfahren werden mit Hilfe des Schemas beurteilt und miteinander verglichen.

Der inhaltliche Teil der Arbeit wird durch die Zusammenfassung der Ergebnisse und den Ausblick in Kapitel 4 abgeschlossen.

Entwurf eines Evaluierungsmodells für Diagnoseverfahren

- Kapitel 2 -

In diesem Kapitel wird der Entwurf und Aufbau eines neuartigen Evaluierungsmodells für Diagnoseverfahren vorgestellt, welches auf den Symptomen beruht, die während der Merkmalsextraktionsphase gewonnenen wurden. Hierbei handelt es sich um ein dreidimensionales Modell mit dessen Hilfe die Effizienz, Robustheit und Generalisierbarkeit der Diagnoseverfahren untersucht werden kann. Dazu werden u.a. der Wertebereich sowie der Interpretationsspielraum der Symptome näher betrachtet.

Aufbau des Kapitels: In Abschnitt 2.1 erfolgt zunächst eine detaillierte Beschreibung zur systematischen Symptomgenerierung. Dabei wird neben der Vorstellung bekannter Verfahren zur Symptomerkennung auch auf die charakteristischen Eigenschaften (z.B. Wertebereich, Interpretationsspielraum) der daraus resultierenden Symptome näher eingegangen.

In Abschnitt 2.2 wird dann darauf aufbauend das Evaluierungsmodell, welches die Möglichkeit bietet auf Basis der extrahierten Symptome konkrete Rückschlüsse auf die zu erwartende Diagnosequalität zu ziehen, im Detail vorgestellt. Darüber hinaus erfolgt zusätzlich eine Kurzdarstellung über die Anforderungen, die im Allgemeinen an eine Fehlerdiagnose gestellt werden.

2.1 Symptomgenerierung

Bevor in Abschnitt 2.2 beim Entwurf des Evaluierungsmodells genauer auf die Zusammenhänge zwischen den Symptomen und der Diagnosequalität eingegangen wird, werden im Folgenden zunächst die unterschiedlichen Verfahren zur Symptomgenerierung sowie die charakteristischen Eigenschaften der daraus resultierenden Symptome näher betrachtet

2.1.1 Kategorisierung der Verfahren

Generell gesehen lassen sich die Verfahren zur Symptomgenerierung in eine der vier folgenden Kategorien unterteilen (siehe Abbildung 2.1): absolut, einfach, komplex und wissensbasiert.

Anmerkung: Mit Ausnahme der Gruppe der absoluten Verfahren, handelt es sich hierbei durchweg um modellbasierte Ansätze zur Merkmalsextraktion (bzw. Symptomgenerierung), bei denen dem zu überwachenden System zusätzlich ein abstrahiertes Modell des „fehlerfreien“ Systems parallel geschaltet wird. Dies ermöglicht es auch die dynamischen Zusammenhänge zwischen den Ein- und Ausgangssignalen mitzubersichtigen.

- **Absolute Verfahren (signalgestützt)** – In diesem Fall stehen für die Merkmalsextraktion (bzw. Symptomgenerierung) allein die mit Hilfe der im zu diagnostizierenden System zur Verfügung stehenden Sensorik gewonnenen Messwertereihen, $\mathbf{y}(t)$, zur Verfügung. Anhand von Toleranzbereichen $[y_{min}(t), y_{max}(t)]$, die zuvor für jede Messgröße $y \in \mathbf{y}$ einzeln festgelegt wurden, wird dabei überprüft, ob jeweils eine Über- bzw. Unterschreitung dieses festgelegten Wertebereichs vorliegt. Je nach Verfahren werden dazu entweder feste oder adaptive Grenzbereiche verwendet:

a. *Fester Grenzbereich:* $\{i \in \{min, max\} \wedge \alpha_{konstant} \in \mathbb{R} \mid y_i(t) = \alpha_{konstant}\}$

b. *Adaptiver Grenzbereich:* $\{i \in \{min, max\} \mid y_i(t) \in \mathbb{R}\}$

Aufgrund ihrer speziellen Struktur werden diese Verfahren in der Literatur häufig auch unter dem Begriff der sog. „Grenzwertüberwachung“ zusammengefasst. Für die Berechnung der Symptome gilt hierbei:

$$\mathbf{s}(t) = \begin{cases} OK & , falls \mathbf{y}_{min}(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{y}_{max}(t) \\ F & sonst \end{cases} \quad (1)$$

Anmerkung: In diesem Zusammenhang bezeichnen die Parameter *OK* den fehlerfreien Fall sowie *F* den fehlerhaften Fall.

- **Einfache Verrechnungsverfahren (modellbasiert)** – Bei den einfachen Verrechnungsverfahren, welche auf dem Vergleich des Messwerteprotokolls, $\mathbf{y}(t)$, eines fehlerhaften Systems mit dem entsprechenden Protokoll, $\mathbf{y}_0(t)$, des fehlerfreien Systems beruhen, geschieht die Berechnung der Symptome durch die Anwendung eines sog. „Differenzoperators³“, $\ominus : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \cup \{0/+, 0/-, +/0, +/-, -/0, -/+ \}$:

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{y}(t) \ominus \mathbf{y}_0(t) \quad (2)$$

Anmerkung: Ein Differenzwert von Null entspricht hierbei dem Soll-Verhalten!

- **Komplexe Verrechnungsverfahren (modellbasiert)** – Im Bereich der komplexen Verrechnungsverfahren wird bei der Generierung der Symptome neben der Anwendung einfacher mathematischer Operatoren, wie z.B. dem Differenzoperator \ominus , ferner auch auf die charakteristischen Eigenschaften der zugrundeliegenden Messwertevektoren, $\mathbf{y}(t)$ bzw. $\mathbf{y}_0(t)$, zurückgegriffen. Zwei häufig verwendete Verfahren in diesem Zusammenhang stellen die temporäre Stationarisierung und die statistische Rauschanalyse dar.

- Bei der *temporären Stationarisierung*, beispielsweise, werden die zeitlichen Verläufe der beobachtbaren Messwertereihen näher analysiert. Mittels linearer Approximation wird dazu gezielt die Messwerteentwicklung innerhalb eines bestimmten Zeitabschnitts/-raums, Δt , untersucht und ausgewertet, $x \in \{\mathbf{y}, \mathbf{y}_0\}$:

$$\mathbf{s}(t) = \theta_{\Delta t}(\mathbf{y}(t)) \ominus \theta_{\Delta t}(\mathbf{y}_0(t)) \quad , \text{ wobei } \theta_{\Delta t}(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t - \Delta t) \quad (3)$$

Doch nicht nur die temporären Eigenschaften der Messwertevektoren spielen bei der Symptomgenerierung eine entscheidende Rolle. Auch die statistischen Merkmale bilden eine wichtige Basis für die Extraktion möglichst aussagekräftiger Symptome.

- Bei der *statistischen Rauschanalyse* z.B. wird gezielt auf die in den Standardabweichungen⁴, $\sigma_{\Delta t}(\mathbf{y}(t))$ bzw. $\sigma_{\Delta t}(\mathbf{y}_0(t))$, der Messwertevektoren befindlichen Informationen über den in den Daten enthaltenen Rauschanteil zurückgegriffen, $x \in \{\mathbf{y}, \mathbf{y}_0\} \wedge X = \mathbf{x}(t - \Delta t), \dots, \mathbf{x}(t - 1), \mathbf{x}(t)$:

$$\mathbf{s}(t) = \sigma_{\Delta t}(\mathbf{y}(t)) / \sigma_{\Delta t}(\mathbf{y}_0(t)) \quad , \text{ wobei } \sigma_{\Delta t}(\mathbf{x}(t)) = \sqrt{E(X^2) - (E(X))^2} \quad (4)$$

³ Weitere Ausführungen zum Thema „Differenzoperator“ (inkl. Anwendungsbeispiele) werden in [Hus01] dargestellt.

⁴ Anmerkung: Der Parameter $E(X)$, der zur Berechnung der Standardabweichung einer Zufallsvariablen X eingesetzt wird, stellt deren Erwartungswert dar.

- **Wissensbasierte Verrechnungsverfahren (modellbasiert)** – Im Fall der wissensbasierten Verrechnungsverfahren wird zunächst eine auf Vorkenntnissen basierende intelligente Vorauswahl aus der zur Verfügung stehenden Menge an Messwerten getroffen. Im Anschluss daran werden auf Basis der bereits in den oberen Abschnitten vorgestellten Verrechnungsverfahren die eigentlichen Symptome generiert⁵.

Eingangssignale	Art	Resultierende(r) Symptommenge/-vektor
<i>Absolute Verfahren</i>		
$\mathbf{y}(t)$	signalbasiert	$\mathbf{s}(t) = \begin{cases} 0 & , falls \mathbf{y}_{min}(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{y}_{max}(t) \\ 1 & sonst \end{cases}$
<i>Einfache Verrechnungen</i>		
$\mathbf{y}(t), \mathbf{y}_0(t)$	modellbasiert	$\mathbf{s}(t) = \mathbf{y}(t) \ominus \mathbf{y}_0(t)$
<i>Komplexe Verrechnungen</i>		
$\mathbf{y}(t), \mathbf{y}_0(t)$	modellbasiert	$\mathbf{s}(t) = \theta_{\Delta t}(\mathbf{y}(t)) \ominus \theta_{\Delta t}(\mathbf{y}_0(t))$ (Variante 1: Temporäre Stationarisierung)
		$\mathbf{s}(t) = \sigma_{\Delta t}(\mathbf{y}(t)) / \sigma_{\Delta t}(\mathbf{y}_0(t))$ (Variante 2: Statistische Rauschanalyse)
<i>Wissensbasierte Verrechnungen</i>		
$\mathbf{y}(t), \mathbf{y}_0(t)$	modellbasiert	<i>Anmerkung:</i> Im Fall der wissensbasierten Verrechnungsverfahren wird zunächst eine auf Vorkenntnissen basierende intelligente Vorauswahl aus der zur Verfügung stehenden Menge an Messwerten getroffen. Im Anschluss daran werden auf Basis der bereits im oberen Abschnitt vorgestellten Verfahren die eigentlichen Symptome generiert.

Tabelle 2.1: (Standard-) Verfahren zur Symptomgenerierung.

2.1.2 Wertebereich der Symptome

Je nachdem, wie die Symptome berechnet und anschließend weiterverarbeitet wurden, lassen sich verschiedene Stufen der Skalierbarkeit unterscheiden⁶:

- **Nominal** – Bezeichnung für das niedrigste Skalenniveau, welches lediglich eine Entscheidung über den Gleichheitsgrad einer Merkmalsausprägung zulässt; d.h., es kann nur überprüft werden, ob Ausprägungen zwei beliebiger Merkmale „gleich“ oder „ungleich“ sind. Eine Unterscheidung im Sinne von „ist größer bzw. kleiner als“ ist in diesem Zusammenhang nicht möglich. Die Merkmale besitzen demnach eine rein qualitative Form (z.B. Geschlecht, Farben, etc.).

⁵ Auf detaillierte Ausführungen zu diesem Thema wird an dieser Stelle verzichtet und auf [NSBS08] verwiesen.

⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Skalenniveau>, zugegriffen am 01.09.2008.

- **Ordinal** – Die Reihenfolge der Merkmalswerte (z.B. $a < b < c$) ist in diesem Fall bekannt und festgelegt; d.h., eine Sortierung der Werte bezüglich ihrer Größe ist problemlos möglich. Über die Abstände zwischen zwei benachbarten Merkmalsklassen ist jedoch nichts bekannt. Auch hierbei handelt es sich wieder um qualitative Merkmale, wie z.B. die Platzierung in der Fußballbundesliga.
- **Kardinal** – Die Kardinalskala basiert auf insgesamt drei unterschiedlichen Skalierungen: Intervall-, Verhältnis- und Absolutskala. Sie beinhaltet Informationen sowohl über die Rangordnung der einzelnen Merkmale, als auch über das Abstandsverhältnis zwischen zwei benachbarten Merkmalsklassen. Im Vergleich zur Nominal- und Ordinalskala handelt es hierbei in aller Regel um reellwertige, quantitative Merkmale, wie z.B. die Geschwindigkeit in m/s.

2.1.3 Interpretationsspielraum der Symptome

Ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen Symptomen stellt deren Interpretationsspielraum dar. Unterschieden wird in diesem Zusammenhang wie folgt:

- **Allgemein gültig** – Bezogen auf die Anwendbarkeit der Symptome gibt es keinerlei Einschränkungen. Die Symptome sind allgemein gültig und weder an bestimmte Betriebs-szenarien (bzw. Eingangssignale) noch an einen festen Zeitraum gekoppelt. Darüber hinaus ist es auch nicht erforderlich, dass sich das System während der Diagnosephase – in der die Symptome zum Einsatz gekommen – in einem spezifischen Mode bzw. Zustand befindet.
- **Mode spezifisch** – Die Symptome stehen in direkter Abhängigkeit zu einer bestimmten Phase des Systems. Sollte sich das System außerhalb dieser Phase befinden, so verlieren die Symptome umgehend ihre Gültigkeit und Aussagekraft.
- **Betriebsszenario spezifisch** – Nur für bestimmte Betriebsszenarien (bzw. Eingangssignale) kann gewährleistet werden, dass die Symptome auch für die Diagnose des Systems eingesetzt werden können; d.h., die in den Symptomen beinhalteten Diagnoseinformationen stehen in direkter Abhängigkeit zu den betrachteten Betriebsszenarien.
- **Festes Zeitintervall** – Die Symptome sind nur innerhalb eines festen Zeitraumes gültig. In diesem Zusammenhang spielt es jedoch keine Rolle, in welchem Zustand sich das zu diagnostizierende System befindet oder welche Eingangssignale am System gerade anliegen.

2.2 Symptombasiertes Evaluierungsmodell

Bevor in Abschnitt 2.2.2 genauer auf den Entwurf und Aufbau eines symptombasierten Evaluierungsmodells eingegangen werden kann, ist es zunächst notwendig, die generellen Anforderungen, die an eine Fehlerdiagnose gestellt werden genauer zu untersuchen.

2.2.1 Allgemeine Diagnoseanforderungen

Viele der Anforderungen, die an das zu diagnostizierende System selbst gestellt werden, treffen so auch für das Diagnoseverfahren zu. Da auch dort nicht alle Anforderungen im gleichen Maße berücksichtigt bzw. erfüllt werden können, wird auch bei der Festlegung der Diagnoseanforderungen im Folgenden der Fokus lediglich auf die besonders hochpriorisierten Qualitätsaspekte gelegt, wie z.B. der Forderung nach hoher Robustheit und Zuverlässigkeit des verwendeten Diagnoseverfahrens. Darüber hinaus sollten der Komplexitätsgrad und der für die Anwendbarkeit des Diagnoseverfahrens erforderliche Aufwand nicht überdurchschnittlich hoch ausfallen, da dies wiederum ein erhöhtes Potential für zusätzliche Fehlerquellen beinhaltet. Bestrebenswert wäre demnach ein Verfahren, welches trotz seiner Schlichtheit (bzw. Einfachheit) eine hohe Effizienz erreicht. Da viele Systeme zudem ein dynamisches Verhalten aufweisen, sollte sich das Diagnoseverfahren auch für dynamische Prozesse eignen und eine hohe Generalisierbarkeit vorweisen. Ein qualitativ hochwertiges Diagnoseverfahren muss demnach über die folgenden Qualitätsmerkmale verfügen: *Effizienz, Robustheit* und *Generalisierbarkeit*.

2.2.2 3D-Modell

Nachdem nun die wesentlichen Anforderungen, die an ein Diagnoseverfahren im Allgemeinen gestellt werden, bekannt sind, besteht die weitere Aufgabe darin, die identifizierten Qualitätsmerkmale in direkten Bezug zu den aus der Merkmalsextraktion gewonnenen Symptomen zu setzen. Da die einzelnen Anforderungen völlig unabhängig voneinander sind, geschieht dies separat. Das finale Evaluierungsmodell besteht demnach aus den folgenden drei Dimensionen (siehe Abbildung 2.2), weshalb es auch als 3D-Modell bezeichnet wird:

- **Effizienz (1. Dimension)** – Die Effizienz des Diagnoseverfahrens wird, wie zuvor erwähnt, vorwiegend am erforderlichen Verfahrensaufwand gemessen; d.h., je geringer der Aufwand, desto höher die Effizienz. Bezogen auf die Symptome bedeutet dies, dass je komplexer die Symptomgenerierung abläuft, desto geringer fällt die zu erwartende Effizienz des Diagnoseverfahrens aus. Die Effizienz wird demnach durch die Granularität der Verfahren zur Symptomgenerierung (siehe Abschnitt 2.2.1) impliziert.

1. Dimension: **Granularität der Verfahren zur Symptomentgenerierung** → Effizienz⁷

Absolut	Einfach	Komplex	Wissensbasiert
← hoch (4/4 ≙ 100%)	<i>Effizienz</i> ⁴		gering → (1/4 ≙ 25%)
	(3/4 ≙ 75%)	(2/4 ≙ 50%)	

2. Dimension: **Granularität des Wertebereiches** → Robustheit

Nominal	Ordinal	Kardinal	
← hoch (3/3 ≙ 100%)	<i>Robustheit</i>		gering → (1/3 ≙ 33%)
	(2/3 ≙ 66%)		

3. Dimension: **Granularität der Zeit** → Generalisierbarkeit

Allgemein gültig	Mode spezifisch	Betriebszenario spezifisch	Festes Zeitintervall
← hoch (4/4 ≙ 100%)	<i>Generalisierbarkeit</i>		gering → (1/4 ≙ 25%)
	(3/4 ≙ 75%)	(2/4 ≙ 50%)	

Abbildung 2.1: 3D-Modell zur Evaluierung von Diagnoseverfahren.

- **Robustheit (2. Dimension)** – Aufgrund der Ungenauigkeit der Symptomwerte, die darin zu begründen ist, dass sowohl die gemessenen als auch simulierten Messwerte i.d.R. Abweichungen von den realen Werten aufweisen, ist es erforderlich, den Symptomwertebereich jedes Messgeräts zu partitionieren, um dadurch die Robustheit des Diagnoseverfahrens entscheidend zu stärken. Die Robustheit des Diagnoseverfahrens wird demzufolge aus der Granularität des Symptomwertebereichs heraus impliziert.
- **Generalisierbarkeit (3. Dimension)** – Je weniger Einschränkungen für den Einsatz bzw. die Anwendbarkeit der Symptome gelten, desto höher fällt die Generalisierbarkeit des Diagnoseverfahrens aus. Die Generalisierbarkeit wird demnach durch die Granularität der Zeit bzw. des Interpretationsspielraums der Symptome impliziert.

⁷ Gemessen am Aufwand.

Anwendung des Evaluierungsmodells in der Praxis

- Kapitel 3 -

In diesem Kapitel wird das in Abschnitt 2.2 entwickelte Evaluierungsmodell nun an realen und in der Praxis bereits erfolgreich eingesetzten Diagnoseverfahren angewandt und getestet. Alle drei Dimensionen (Effizienz, Robustheit, Generalisierbarkeit) des Modells erhalten hierfür die gleiche Priorisierung (bzw. Gewichtung). Die darauf aufbauende Gesamtdiagnosequalität wird anschließend einer von insgesamt drei möglichen Qualitätsklassen zugeordnet, um dadurch die Vergleichbarkeit der Verfahren zu erhöhen.

Aufbau des Kapitels: Bevor in Abschnitt 3.2 detailliert auf die Ergebnisse des Evaluierungsmodells eingegangen wird, werden in Abschnitt 3.1 zunächst die hierfür verwendeten Diagnoseverfahren sowie deren Eigenschaften näher vorgestellt.

3.1 Verfahren aus der Literatur

Im Rahmen dieser Arbeit werden insgesamt sechs unterschiedliche Diagnoseverfahren, die sich teilweise erheblich voneinander unterscheiden und die allesamt bereits erfolgreich in der Praxis eingesetzt wurden, vorgestellt und anschließend miteinander verglichen (siehe Tabelle 3.1). Dabei wird insbesondere auf die Art der Symptomgenerierung sowie der charakteristischen Eigenschaften der daraus resultierenden Symptome (Wertebereich, Interpretationsspielraum) näher eingegangen.

- **[SNB06]** – Bei diesem Ansatz erfolgt die Symptomgenerierung anhand einer einfachen Differenzenbildung. Eine Partitionierung des reellwertigen Symptombereichs findet dabei nicht statt. Zudem stehen die Symptome in direkter Abhängigkeit zu den getesteten Betriebsszenarien.
- **[Hus01]** – Auch hier wird auf eine einfache Differenzbildung, bei der der standardmäßige Differenzoperator \ominus zum Einsatz kommt, zurückgegriffen. Um jedoch die Fehleranfälligkeit des Verfahrens zu verringern und dessen Robustheit zu stärken, erfolgt in diesem Zusammenhang eine Diskretisierung des Symptomwertebereichs in eine abgeschlossene Menge disjunkter Intervalle. Im Vergleich zum vorherigen Verfahren, sind die Symptome in diesem Fall für alle Betriebsszenarien gültig, insofern der Zustand, in dem sich das System gegenwärtig befindet, konstant bleibt und sich nicht verändert.
- **[Spa08]** – Anhand einer Kombination aus einfacher Differenzenbildung und temporärer Stationarisierung erfolgt die Berechnung der einzelnen Symptomreihen. Trotz erhöhtem Aufwand bei der Generierung der Symptome, verbleibt deren Wertebereich in diesem Fall jedoch unpartitioniert. Darüber hinaus beschränkt sich die Anwendbarkeit der Symptome lediglich auf die zuvor im Rahmen der Symptomentwicklung getesteten Betriebsszenarien.
- **[NSBS08]** – Durch den Einsatz wissensbasierter Verfahren zur Symptomgenerierung, entsteht in diesem Fall ein hoher Berechnungsaufwand, wodurch die Effizienz des Verfahrens automatisch verringert wird. Darüber hinaus wird zudem auf eine Diskretisierung des Symptomwertebereichs verzichtet. Die Symptome stehen hierbei in direkter Abhängigkeit zu den einzelnen Betriebsphasen des Systems.
- **[CPD03]** – Die Symptomgenerierung erfolgt hier durch Verwendung einfacher Verrechnungsverfahren. Im Vergleich zum vorherigen Fall wird hierbei jedoch nicht auf eine Partitionierung des Symptomwertebereichs verzichtet. Die Anwendbarkeit der Symptome ist allerdings stark eingeschränkt, da diese lediglich innerhalb eines festen Zeitintervalls gültig sind.
- **[Ise04]** – In diesem Fall werden die Symptome anhand von komplexen Verrechnungsverfahren, wie z.B. Parameterschätz- oder Modellreferenzmethoden, generiert. Anschließend erfolgt eine Diskretisierung des Symptomwertebereichs. Die Anwendbarkeit der Symptome beschränkt sich hierbei lediglich auf die zuvor im Rahmen der Symptomentwicklung eingesetzten Betriebsszenarien.

Referenz	Art der Granularität (bezogen auf die Symptomgenerierung)		
	Verfahren (.)*	Wertebereich (.)*	Zeit (.)*
[SNB06]	Einfach (3)	Kardinal (1)	Betriebsszenario spezifisch (2)
[Hus01]	Einfach (3)	Ordinal (2)	Mode spezifisch (3)
[Spa08]	Komplex (2)	Kardinal (1)	Betriebsszenario spezifisch (2)
[NSBS08]	Wissensbasiert (1)	Kardinal (1)	Mode spezifisch (3)
[CPD03]	Einfach (3)	Ordinal (2)	Festes Zeitintervall (1)
[Ise04]	Komplex (2)	Ordinal (2)	Betriebsszenario spezifisch (2)

Tabelle 3.1: Verfahrensübersicht (inkl. *Kategoriezuordnung; siehe Abb. 2.1).

3.2 Evaluierungsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse, die durch die Anwendung des Evaluierungsmodells auf den Diagnoseverfahren aus Abschnitt 3.1 hervorgerufen wurden, ausführlich dargestellt. Alle drei Dimensionen (Effizienz, Robustheit, Generalisierbarkeit) des Modells erhalten hierfür die gleiche Priorisierung (bzw. Gewichtung); d.h., der Anteil jeder Dimension an der Gesamtdiagnosequalität (100%) beträgt somit genau ein Drittel (ca. 33%). Zur Bestimmung der Diagnosequalität eines der zuvor aufgeführten Verfahren werden dazu die Prozentzahlen aus den einzelnen Dimensionen miteinander aufsummiert. Darüber hinaus werden drei Güteklassen definiert⁸: Klasse I (0 – 33%), Klasse II (33 – 66%) und Klasse III (66 – 100%); d.h., je höher die Güteklasse, desto besser ist auch die Qualität des jeweiligen Diagnoseverfahrens.

Gesamtergebnis: Wie in Abbildung 3.1 zu erkennen ist, gehören bis auf [Hus01] (Güteklasse III) alle der hier betrachteten Verfahren der Güteklasse II an. Die durchschnittliche Qualität der Diagnoseverfahren liegt dabei bei ungefähr 54%. Die geringste Diagnosequalität in diesem Zusammenhang weisen [Spa08] und [NSBS08] auf, die jeweils nur auf 44% kommen. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass in beiden Fällen auf sehr komplexe Verrechnungsverfahren im Zusammenhang mit der Symptomgenerierung zurückgegriffen wird. Darüber hinaus wird zusätzlich auf eine Diskretisierung des Symptomwertebereichs verzichtet. All dies führt schließlich dazu, dass sowohl die Effizienz als auch Robustheit dieser Verfahren um einiges geringer ausfällt, als dies bei den anderen Verfahren der Fall ist.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Gesamtdiagnosequalität eines Verfahrens keinerlei Rückschlüsse auf die Strukturen innerhalb der jeweiligen Diagnosedimensionen zulässt: Obwohl die Verfahren [CPD03] und [Ise04], beispielsweise, die gleiche Diagnosequalität aufweisen, so unterscheiden sich doch erheblichen in den einzelnen Merkmalsbereichen, wie z.B. der Generali-

⁸ Anmerkung: Der Gütegrad wird hierbei direkt am prozentualen Anteil der Gesamtdiagnosequalität gemessen.

sierbarkeit. Gleiches trifft wiederum auch auf die Verfahren [Spa08] und [NSBS08] zu, die sich vor allem im Bereich der Effizienz erheblich voneinander unterscheiden. Aus diesem Grund wird im Folgenden nun genauer auf jede der drei Diagnosedimensionen eingegangen, um so weitere Qualitätsaspekte der Verfahren zu hervorzuheben.

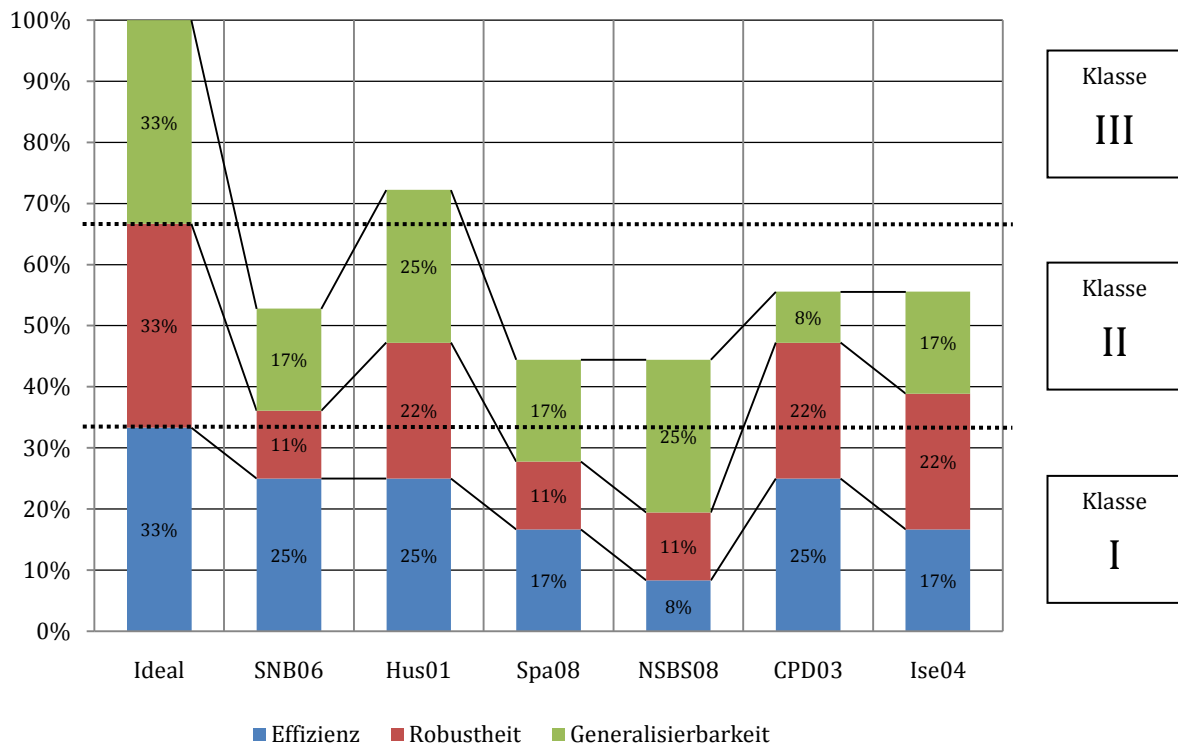


Abbildung 3.1: Gesamtergebnisse der Evaluierung der einzelnen Diagnoseverfahren (inkl. Klassenzuweisung).

Dimensionsabhängige Teilergebnisse: Jede der drei Dimensionen besitzt, wie bereits zuvor erwähnt, einen Wertebereich zwischen 0% - 33%. Besonders interessant dabei ist jedoch, dass sich die Durchschnittswerte pro Dimension bei den hier betrachteten Verfahren in etwa gleich verhalten; sie betragen ca. 18%. Ausgehend von diesen Werten wird im Folgenden nun untersucht, wie weit die jeweiligen Verfahren von ihnen abweichen; ein Wert von 0% bedeutet, dass das Verfahren identisch zum Durchschnittswert ist.

Wie in Abbildung 3.2 zu erkennen ist, besitzen die Verfahren [SNB06], [Hus01] und [CPD03] einen überdurchschnittlich hohen Effizienzgrad, der um fast 30% höher ausfällt, als der Durchschnitt. [NSBS08] dagegen liegt mit fast 60% unterhalb dieses Durchschnitts und weist somit die geringste Effizienz aller der hier untersuchten Verfahren auf. Dies liegt darin begründet, dass in diesem Fall besonders komplexe Verrechnungsverfahren zum Einsatz kommen.

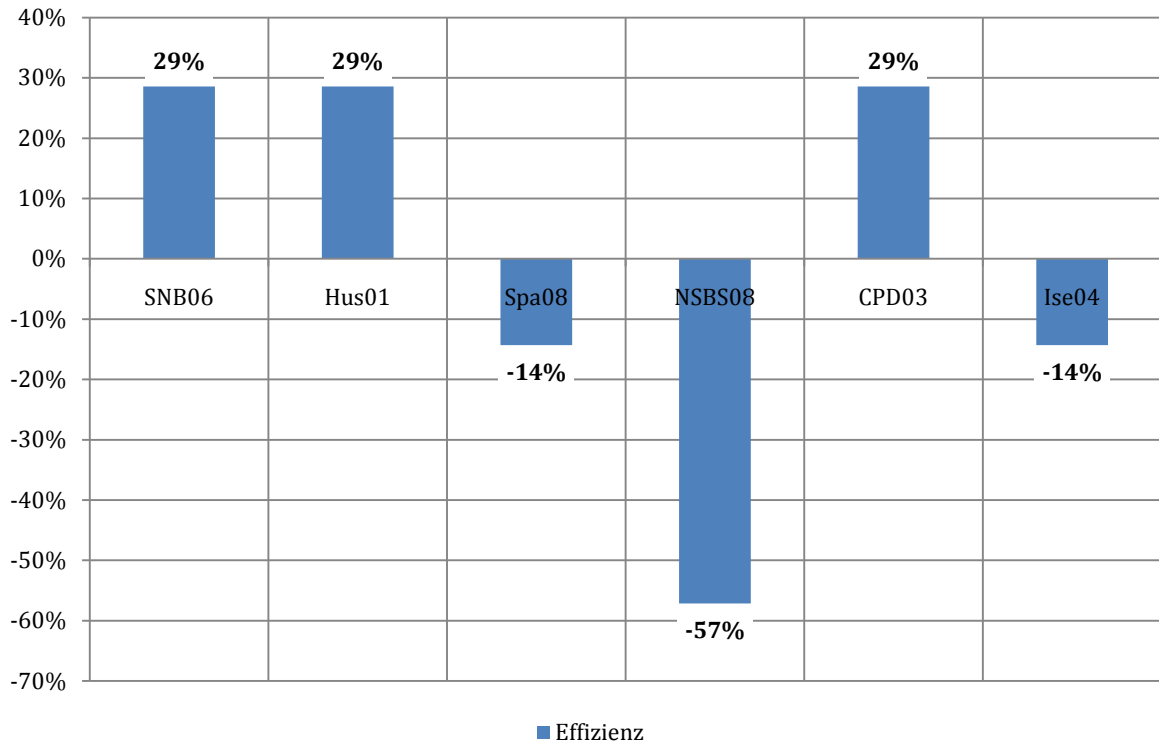


Abbildung 3.2: Übersicht über die prozentuale Durchschnittsabweichung im Bereich der Effizienz (1. Dimension)

Im Vergleich zur Effizienz liegen die Verfahren im Bereich der Robustheit entweder um ein Drittel (ca. 33%) über oder unter dem Durchschnittswert (siehe Abbildung 3.3). Zu den besonders robusten Verfahren zählen dabei [Hus01], [CPD03] und [Ise04].

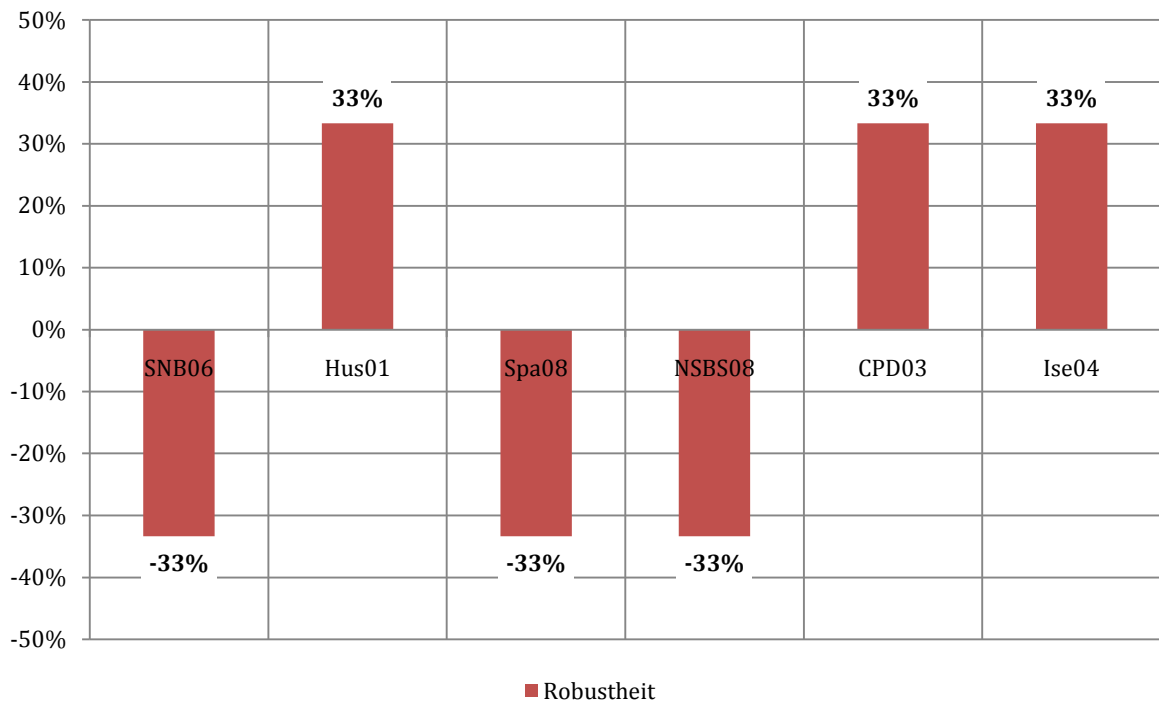


Abbildung 3.3: Übersicht über die prozentuale Durchschnittsabweichung im Bereich der Robustheit (2. Dimension)

Zu den Verfahren mit der höchsten Generalisierbarkeit zählen, wie in Abbildung 3.4 zu erkennen ist, sowohl [Hus01] als auch [NSBS08]. Beide Verfahren liegen um ungefähr 40% über dem Durchschnitt. [CPD03] dagegen weist in diesem Fall die geringste Generalisierbarkeit auf und liegt mit über 50% unterhalb des Durchschnitts. Der Grund hierfür ist der äußerst eingeschränkte Interpretationsspielraum der Symptome.

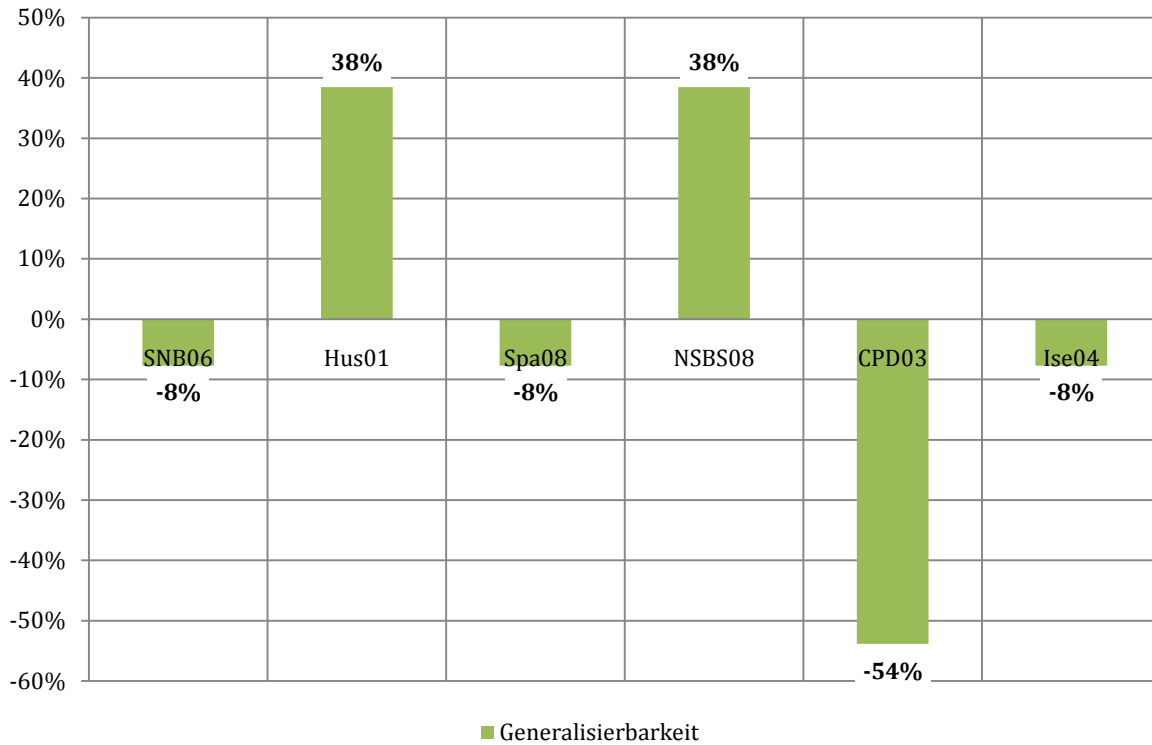


Abbildung 3.4: Übersicht über die prozentuale Durchschnittsabweichung im Bereich der Generalisierbarkeit (3. Dimension)

Fazit: Abschließend werden nun noch einmal die wichtigsten Ergebnisse der Evaluierungsphase zusammengefasst. Die qualitativen Aussagen treffen dabei allein auf die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Diagnoseverfahren zu.

- Die durchschnittliche Diagnosequalität der Verfahren liegt bei ungefähr 54% und setzt sich zu gleichen Teilen aus allen drei Diagnosedimensionen (Effizienz, Robustheit, Generalisierbarkeit) zusammen.
- Die Gesamtdiagnosequalität lässt im Normalfall keine direkten Rückschlüsse auf die Merkmalsausprägungen innerhalb der Diagnosedimensionen zu; d.h., mehrere Verfahren können zwar die gleiche Diagnosequalität aufweisen, sich aber dennoch erheblich in den einzelnen Merkmalsbereichen unterscheiden.

- Mit insgesamt 72% ist [Hus01] das Verfahren mit der höchsten Diagnosequalität. Darüber hinaus gehört es als einziges der hier vorgestellten Verfahren der Güteklasse III an.
- Alle Verfahren, bis auf [Hus01], gehören der Güteklasse II an.
- Zu dem Verfahren mit der geringsten Effizienz zählt [NSBS08]. Es liegt mit fast 60% unter dem Durchschnittswert. Gleiches gilt für [CPD03] im Bereich der Generalisierbarkeit (-54%).
- Zu den Verfahren mit der höchsten Effizienz zählen [SNB06], [Hus01] sowie [CPD03].
- Mit fast 40% sind [Hus01] und [NSBS08] die Verfahren mit der höchsten Generalisierbarkeit.
- Die höchste Robustheit besitzen [Hus01], [CPD03] und [Ise04].

Zusammenfassung und Ausblick

- Kapitel 4 -

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein völlig neuartiges Konzept bzw. Modells zur Evaluierung von Diagnoseverfahren entworfen und vorgestellt, welches auf den durch die Merkmalsextraktion gewonnenen Symptomen beruht. Untersucht wurden in diesem Zusammenhang neben der Art des Verfahrens, welches für die Symptomgenerierung eingesetzt wurde, auch die charakteristischen Eigenschaften (Wertebereich, Interpretationsspielraum) der daraus resultierenden Symptome. Darüber hinaus wurde geprüft und untersucht, welche Anforderungen im Allgemeinen an eine Fehlerdiagnose gestellt werden und wie diese in Bezug zu den Symptomen stehen. Herausgekommen ist ein dreidimensionales Modell, welches die folgenden Bereiche umfasst: Effizienz, Robustheit und Generalisierbarkeit.

In einer Fallstudie wurde dieses Modell anschließend auf verschiedenen Diagnoseverfahren, die bereits erfolgreich in der Praxis eingesetzt wurden, angewandt. Für jedes der Verfahren wurde dabei neben der Gesamtdiagnosequalität auch deren qualitative Eigenschaften in den drei Teilbereichen (Effizienz, Robustheit, Generalisierbarkeit) näher untersucht und ausgewertet.

Die in der Evaluierungsphase erzielten Ergebnisse zeigen, dass das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Modell sich im Allgemeinen gut für die Bewertung von Diagnoseverfahren eignet. Es bietet zudem neue Vergleichsmöglichkeiten sowie ausreichend Potential für weitere Modifikationen.

Ausblick: Für weiterführende Arbeiten sind u.a. die folgenden Punkte denkbar:

- *Hinzunahme weiterer Dimensionen* – Um die Aussagekraft des Modells zu erhöhen, ist es sinnvoll, dieses um zusätzliche Dimensionen zu erweitern.
- *Priorisierung der einzelnen Dimensionen* – Nicht alle Dimensionen nehmen den gleichen Einfluss auf die Diagnoseleistung. Aus diesem Grund ist es zweckmäßig eine Priorisierung bzw. Gewichtung der einzelnen Dimensionen vorzunehmen; insbesondere dann, wenn das Modell um zusätzliche Dimensionen erweitert wurde.
- *Ausweitung auf weitere Diagnoseverfahren* – Bisher wurde das Modell nur auf einer verhältnismäßig kleinen Stichprobenmenge getestet. Es wäre daher vorstellbar, diese weiter zu erhöhen, um zu schauen, ob sich die bisherigen Ergebnisse dann auch noch bestätigen lassen.
- *Steigerung der Granularität* – Um die Genauigkeit des Evaluierungsmodells zu steigern, ist es zweckmäßig, die bisher möglichen Granularitäten innerhalb der einzelnen Dimensionen zu erweitern.

Literaturverzeichnis

- [CPD03] L. Console, C. Picardi, D. Dupré: *Temporal Decision Trees: Model-based Diagnosis of Dynamic Systems On-Board*. Journal of Artificial Intelligence Research, pp. 469 – 512, 2003.
- [Hus01] U. Husemeyer: *Heuristische Diagnose mit Assoziationsregeln*. Dissertation, Fachbereich Mathematik und Informatik, Universität Paderborn, 2001.
- [SNB06] B. Stein, O. Niggemann, H. Balzer: *Diagnosis on Automotive Applications – A Case Study with the Model Compilation Approach*. In Franz Wotawa, editor, 3rd Monet-Workshop on Model-Based Systems (MBS 06), pp. 34 – 40. University of Trento, Italy, 2006.
- [Spa08] T. Spanuth: *Anwendung des Modellkompilationsansatzes zur Diagnose an einem zu erstellenden Fahrerassistenzsystem-Modell*. Diplomarbeit, Institut für Informatik - Fachgebiet Wissensbasierte Systeme, Universität Paderborn, 2008.
- [NSBS08] O. Niggemann, B. Stein, H. Balzer, T. Spanuth: *Symptom Identification for Dynamic System Diagnosis – A Case Study in Automotive Engineering*. Paper, 2008.
- [Reu01] M. Reuber: *Prozessüberwachung beim Schlichtfräsen von Freiformflächen*. Dissertation, Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 03/2001. Shaker Verlag. Aachen, 2001.

- [Hir06] J. Hirschmann: *Ein Beitrag zur Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose von elektromagnetischen Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Stuttgart, 2006.
- [Ise04] R. Isermann: *Model-based fault detection and diagnosis – status and applications*. 16th Symposium on Automatic Control in Aerospace. St. Petersburg, Russland, 2004.