

Volodymyr Vasyutynskyy
Send-on-Delta-Abtastung in PID-Regelungen

Beiträge aus der Informationstechnik

Volodymyr Vasyutynskyy

Send-on-Delta-Abtastung in PID-Regelungen

 VOGT

Dresden 2009

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie;
detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2009

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Send-on-Delta-Abtastung in PID-Regelungen“
von Volodymyr Vasyutynskyy überein.

© Jörg Vogt Verlag 2009
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor
Printed in Germany

ISBN 978-3-938860-28-1

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Send-on-Delta-Abtastung in PID-Regelungen

von der Fakultät Informatik
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

eingereicht von

Dipl.- Softwaretech. Volodymyr Vasyutynskyy
geboren am 24.03.1976 in Kiew, Ukraine

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Kabitzsch, Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner, Universität Stuttgart

Tag der Einreichung: 17. April 2009
Tag der Verteidigung: 8. Oktober 2009

Dresden, im Oktober 2009

Kurzfassung

Moderne Regelungssysteme wie in Gebäude- und Fabrikautomation werden als vernetzte digitale Systeme realisiert, die aus verteilten ereignisgesteuerten Knoten bestehen und sehr häufig PID-Regelungen (*proportional-integral-derivative controller*) beinhalten. Die große Anzahl von Ereignissen in diesen Systemen kann zu einer Reihe von Überlastproblemen führen, welche die Regelungsqualität verringern und in zusätzlichen Anschaffungs- und Betriebskosten resultieren. Diese Anzahl kann durch Send-on-Delta-Abtastung (SOD-Abtastung) reduziert werden, bei der die Ereignisse nicht äquidistant und nur bei wesentlichen Änderungen getriggert werden. Allerdings machen die entstehenden nicht-äquidistanten Abtastwerte die Anwendung der SOD-Abtastung in PID-Regelungen ohne Anpassung von Regelalgorithmen nicht möglich und erschweren die Analyse solcher Regelungen.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Eigenschaften der SOD-Abtastung und spezifische Probleme bei ihrer Anwendung in PID-Regelungen untersucht. Einige Heuristiken zur Analyse dieser Regelungen wurden entwickelt. Auf der Basis der Ergebnisse dieser Analyse wurden drei Regelalgorithmen für PID-Regelungen mit SOD vorgeschlagen und anhand von Simulationen untersucht. Es wurde gezeigt, dass durch den Einsatz der entwickelten Regelalgorithmen die Anzahl der Ereignisse im Vergleich zu periodischen Systemen bei vergleichbarer Regelungsqualität bedeutend (um Faktor zwei bis vier) reduziert werden kann. Dadurch kann eine bessere Nutzung der Systemressourcen bzw. eine Vermeidung der Überlast erreicht werden.

Abstract

Modern control systems like that of building or factory automation are realized as networked digital system, which consist of distributed event-driven nodes and often contain PID controls. A large number of events in these systems may lead to several overload problems, which deteriorate the quality of control and result in additional purchase and maintenance costs. This number can be reduced with the help of send-on-delta sampling (SOD sampling), using which the events are triggered not equidistantly, but only at significant changes. The resulting not-equidistant samples disable the application of SOD sampling without adjusting of control algorithms and aggravate the analysis of such controls.

The present work investigates the properties of SOD sampling and specific problems appearing in PID controls with this sampling. Some heuristics for analysis of these controls were developed. Based on the results of this analysis, three control algorithms for PID controls with SOD were proposed and examined with the help of simulations. It was shown that the application of proposed control algorithms allows a significant reduction of the number of events (up to two – four times) retaining the similar quality of control compared to the periodic systems. This allows a better utilization of system resources and avoids the overload.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Technische Informationssysteme an der Technischen Universität Dresden. Daher möchte ich vor allem Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Kabitzsch für die Freiheit, neue Ideen vorzuschlagen, und die Möglichkeit, diese zu realisieren, sowie für zahlreiche Diskussionen, Ratschläge und Anregungen danken. Ferner möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wollschlaeger und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner für ihre Bereitschaft, das Koreferat zu übernehmen, bedanken.

Mein herzlicher Dank gilt weiterhin allen Kollegen am Lehrstuhl für Technische Informationssysteme für das angenehme Arbeitsklima und ständige Hilfsbereitschaft. Besonders hervorzuheben möchte ich an dieser Stelle die Herren Dr.-Ing. Jörn Plönnigs, Jens Naake und Denis Stein, die beim Lesen meiner Arbeit zahlreiche wertvolle Kritiken und Ratschläge geliefert haben. Den Kollegen Michael Knittel, Anja Brauny, Uwe Schumann, Kerstin Baldauf und Isa Barthel möchte ich für eine gute technische und organisatorische Unterstützung danken. Zahlreiche Gespräche und Diskussionen mit Dr.-Ing. habil. Andriy Luntovskyy, Henrik Dibowski, Cemal Özlük, Uwe Ryssel, Alexander Dementjev, Dr.-Ing. Hellmuth Kubin, Dr.-Ing. Heinz-Dieter Ribbecke haben die Arbeit ebenfalls sehr begünstigt.

Herzlich danke ich zuletzt meiner Familie, die eine ständige Unterstützung und Motivation für meine Arbeit war und bleibt.

Dresden, im Oktober 2009
Volodymyr Vasyutynskyy

Inhaltsverzeichnis

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	1
<u>1 EINLEITUNG</u>	5
<u>2 VERNETZTE REGELKREISE: PROBLEME UND LÖSUNGEN</u>	9
2.1 VERNETZTE REGELKREISE	9
2.1.1 STRUKTUR VON VERNETZTEN REGELKREISEN	9
2.1.2 PROBLEME IN VERNETZTEN REGELKREISEN	11
2.2 METHODEN ZUR BEHANDLUNG VON ÜBERLASTPROBLEMEN IN VERNETZTEN REGELKREISEN	15
2.2.1 INSTALLATION ZUSÄTZLICHER HARDWARE	16
2.2.2 NETZWERKMANAGEMENT UND SCHEDULING DER REGULUNGS-AUFGABEN	16
2.2.3 ADAPTIVE REGELUNG	17
2.2.4 ADAPTIVE ABTASTUNG	18
2.3 SOD-ABTASTUNG	19
2.3.1 EINFÜHRUNG IN DIE SOD-ABTASTUNG	19
2.3.2 PROBLEME DER SOD-ABTASTUNG IN GESCHLOSSENEN KETTEN	22
2.3.3 STAND DER WISSENSCHAFT BEI DER SOD-ABTASTUNG	25
2.3.4 WEITERE EREIGNISBASIERTE SYSTEME	27
2.4 GENERISCHES MODELL EREIGNISBASIERTER REGELKREISE	30
2.4.1 ABTASTKONFIGURATIONEN DER EREIGNISBASIERTEN REGELKREISE	30
2.4.2 ZUORDNUNG DER REGULUNGSELEMENTE ZU DEN KNOTEN	36
2.4.3 NOTATION FÜR VERSCHIEDENE ABTASTKONFIGURATIONEN	38
2.5 ZUSAMMENFASSUNG, ANNAHMEN UND INHALTSÜBERSICHT	39
<u>3 EIGENSCHAFTEN DER SOD-ABTASTUNG IN OFFENER KETTE</u>	41
3.1 KRITERIEN FÜR DIE EFFIZIENZ DER ABTASTUNG	42
3.2 ZWISCHENZEITEN UND EREIGNISRATEN	42
3.3 REKONSTRUKTION DES SIGNALS UND APPROXIMATIONSFEHLER	47
3.3.1 APPROXIMATION MIT EINEM HALTEGLIED NULLTER ORDNUNG	47
3.3.2 WEITERE METHODEN DER REKONSTRUKTION	50
3.4 EIGENSCHAFTEN VON SOD FÜR AUSGEWÄHLTE SIGNALTYPEN	52
3.4.1 BESCHREIBUNG IM ZUSTANDSRAUM	52
3.4.2 SPRUNGANTWORT DES VERZÖGERUNGSGLIEDES 1. ORDNUNG	53
3.4.3 SPRUNGANTWORT DES VERZÖGERUNGSGLIEDES 2. ORDNUNG	55

3.4.4	MESSRAUSCHEN	57
3.5	ABSOLUTES INTEGRALES SOD	58
3.6	ZUSAMMENFASSUNG	60
4	<u>EIGENSCHAFTEN DER SOD-ABTASTUNG IN REGELKREISEN</u>	62
4.1	ANALYSE DER REGELKREISE MIT SOD	63
4.1.1	ALLGEMEINE BESCHREIBUNG	63
4.1.2	PROPORTIONALER REGLER	64
4.1.3	VEREINFACHTE ANALYSE DES ÜBERGANGZUSTANDS	70
4.2	APPROXIMATION DER NICHTPERIODISCHEN ZEITINTERVALLE	76
4.2.1	APPROXIMATION DES I-TEILS	76
4.2.2	APPROXIMATION DES D-TEILS	82
4.2.3	GEMEINSAME WIRKUNG DER APPROXIMATIONSFEHLER	86
4.2.4	LÖSUNGEN DES PROBLEMS DER APPROXIMATIONSFEHLER FÜR GROBE ZWISCHENZEITEN	87
4.3	AUSLÖSEN UND TIMING VON EREIGNISSEN	88
4.3.1	EREIGNISTYPEN IN EINEM SOD-REGLER	88
4.3.2	FESTSTECKEN DES REGELKREISES	91
4.4	GRENZZYKLEN	101
4.4.1	GRENZZYKLEN IN SOD-REGELKREISEN	101
4.4.2	ANALYSE VON KLEINEN GRENZZYKLEN IN SOD-REGELKREISEN	104
4.4.3	KLEINE GRENZZYKLEN IN REGELKREISEN MIT P-REGLER UND STRECKE 1. ORDNUNG	106
4.4.4	KLEINE GRENZZYKLEN IN REGELKREISEN MIT PI-REGLER UND STRECKE 1. ORDNUNG	108
4.4.5	WEITERE ASPEKTE DER GRENZZYKLEN	112
4.5	GÜTEMABE DER EFFIZIENZ DER ABTASTUNG	112
4.5.1	STABILITÄT VON SOD-REGELKREISEN	113
4.5.2	GÜTEMABE FÜR DIE REGELGÜTE	116
4.5.3	GÜTEMABE FÜR DIE ANZAHL DER PRODUZIERTEN EREIGNISSE	119
4.5.4	GÜTEMABE FÜR UNTERSCHIEDLICHE ZUSTÄNDE DES REGELKREISES	120
4.5.5	CPU-LAST	121
4.5.6	EINFLUSS VON SOLLWERTÄNDERUNGEN	123
4.5.7	KOMPLEXE KRITERIEN	124
4.6	ZUSAMMENFASSUNG	125
5	<u>REGELALGORITHMEN FÜR PID-REGELKREISE MIT SOD</u>	127
5.1	ALGORITHMUS MIT ZEITBESCHRÄNKUNGEN	127
5.1.1	BEGRENZUNG DER APPROXIMATIONSFEHLER	128
5.1.2	VEREINFACHTE ANALYSE DES APPROXIMATIONSFEHLERS IM I-TEIL	130
5.1.3	BEGRENZUNG DES FESTSTECKENS	133

5.1.4	BEGRENZUNG VON GRENZZYKLEN	136
5.1.5	FESTLEGUNG DER ZEITBESCHRÄNKUNGEN	139
5.2	ALGORITHMUS MIT BEOBACHTER	142
5.2.1	BEOBACHTER ZUR WIEDERHERSTELLUNG DES SIGNALVERLAUFS	142
5.2.2	VARIANTEN DES ALGORITHMUS MIT BEOBACHTER	147
5.2.3	VERGLEICH DER VARIANTEN DES ALGORITHMUS MIT BEOBACHTER	150
5.2.4	KOMMUNIKATIONSLOGIK IM REGLER	152
5.3	HEURISTISCHER ALGORITHMUS	154
5.3.1	BEGRENZUNG DER APPROXIMATIONSFEHLER	154
5.3.2	VERMEIDUNG DES FESTSTECKENS	157
5.3.3	VERMEIDUNG VON GRENZZYKLEN	164
5.3.4	EIGENSCHAFTEN HEURISTISCHER ALGORITHMEN	168
5.4	ZUSAMMENFASSUNG	169
6	<u>EVALUIERUNG DER SOD-REGELALGORITHMEN</u>	170
6.1	AUFBAU DER SIMULATION	170
6.2	ORGANISATION DER EXPERIMENTE	172
6.2.1	ERMITTELTE GÜTEMABE	172
6.2.2	SOLLWERTSIGNAL	173
6.3	EIGENSCHAFTEN UND KOMBINATIONEN DER ABTASTELEMENTE	174
6.4	VERGLEICH DER ABTASTKONFIGURATIONEN	176
6.4.1	ABHÄNGIGKEIT VOM SENSOR-SCHWELLWERT Δ_s	179
6.4.2	ABHÄNGIGKEIT VON DER NACHSTELLZEIT DES REGLERS T_I	181
6.4.3	ABHÄNGIGKEIT VON DER ZEITBESCHRÄNKUNG IM SENSOR T_{MAX}	185
6.4.4	ABHÄNGIGKEITEN VOM SCHWELLWERT AUF DIE STELLWERTE Δ_c	185
6.4.5	ABHÄNGIGKEIT VOM MESSRAUSCHEN IM SENSOR	186
6.4.6	ABHÄNGIGKEIT VON DER MODELLUNSICHERHEIT	187
6.4.7	ABHÄNGIGKEITEN VON DEN QUANTISIERUNGSSCHRITTEN	188
6.4.8	ERGEBNISSE FÜR DIE REGELSTRECKE 2. ORDNUNG	189
6.4.9	ZUSAMMENFASSUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE	191
6.5	WEITERE ASPEKTE	192
6.6	ZUSAMMENFASSUNG	193
7	<u>ENTWURF VON SOD-REGELUNGEN</u>	194
7.1	ALGORITHMUS ZUM ENTWURF VON SOD-REGELUNGEN	194
7.2	WAHL DER ABTASTMODI	196
7.2.1	WAHL DER ABTASTMETHODE	196
7.2.2	WAHL DER ABTASTKONFIGURATION	197
7.3	EINSTELLUNG DER ABTASTPARAMETER FÜR SOD-REGELALGORITHMEN	198
7.3.1	EINSTELLUNG DER SPEZIFISCHEN PARAMETER VON SOD-ALGORITHMEN	200
7.3.2	ZUSAMMENFASSUNG DER EINSTELLREGELN	201

7.3.3	EINSTELLUNG MIT HILFE VON SIMULATIONEN	203
7.4	MONITORINGMETHODEN	203
7.4.1	ZIELSTELLUNG BEIM MONITORING	203
7.4.2	ANPASSUNG DER MONITORINGMETHODEN AUF SOD	204
7.4.3	IMPLEMENTIERUNG DES MONITORINGS	205
7.5	ZUSAMMENFASSUNG	206
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	207
8.1	ZUSAMMENFASSUNG	207
8.2	AUSBLICK	208
ANHANG		213
A	IMPLEMENTIERUNG DER ABTASTELEMENTE	213
A.1	CODE DES SENSORS MIT ABSOLUTEM SOD	213
A.2	CODE DES SENSORS MIT INTEGRALEM SOD	213
A.3	PERIODISCHER REGELALGORITHMUS	214
A.4	REGELALGORITHMUS OHNE ANPASSUNG AUF SOD	215
A.5	SOD-ALGORITHMUS MIT BEOBACHTER MIT VEREINFACHTEM MODELL	216
A.6	HEURISTISCHER SOD-ALGORITHMUS	217
B	BERECHNUNGSaufWAND FÜR REGELALGORITHMEN	218
	VERZEICHNIS DER FORMELZEICHEN	219
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	223
	LITERATURVERZEICHNIS	225

1 Einleitung

Die Regelung hat sich im Laufe ihrer Geschichte immer mehr in Richtung Digitalisierung und ereignisbasierte Bearbeitung entwickelt. Angefangen mit der kontinuierlichen Regelung wurden mit dem Fortschritt der Elektronik die Regelungen immer häufiger unter Nutzung der periodischen Abtastung realisiert. Bei dieser Art der Abtastung werden die Regelungsereignisse (z. B. Sensorwerte) zeitbasiert, in festen Zeitintervallen erzeugt. Gleichzeitig wurden die Regelalgorithmen immer komplexer und verteilten sich auf getrennte Mikroprozessoren, die oft als intelligente Knoten bezeichnet werden.

Der nächste Schritt der Entwicklung setzte in den 1980-er Jahren mit dem Einsatz von Netzwerken (Feldbussen) zur Kommunikation von intelligenten Knoten untereinander ein, sodass Regelungssysteme heutzutage häufig als vernetzte digitale Systeme (*networked control systems* [LGGG08], [WL08], [HL05]) realisiert werden. Beispiele solcher Systeme sind Gebäudeautomations- [KNSN05] und Fabrikautomationssysteme [Lia01]. Neben den offensichtlichen Vorteilen, wie einfachere Realisierung, Robustheit und geringere Kosten, bringt der Einsatz vernetzter digitaler Systeme auch neue Probleme mit sich, welche teilweise durch die Begrenzung der Systemressourcen verursacht werden. Wenn sich nämlich die Regelungsaufgaben gemeinsame Ressourcen (CPU-Rechenzeit, Netzwerkbandbreite usw.) teilen müssen, kann es bei einer großen Anzahl von Ereignissen zu Performanceeinbußen kommen, wenn das System nicht alle Regelungsereignisse rechtzeitig abarbeiten kann. Dadurch greift die Regelung später als notwendig oder gar nicht ein, sodass das Regelungssystem solche wichtige Anforderungen wie Verfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit (Kann die Regelung ihre Aufgabe rechtzeitig erfüllen?) sowie Regelgüte (Wie gut wird das Regelungsziel erreicht?) nicht mehr erfüllen kann. Deshalb gehört die Performanceanalyse und –optimierung neben dem eigentlichen Reglerentwurf zu den wichtigsten Aufgaben der Projektierung von Regelungssystemen ([BS99], [Cer03], [LVM08]). Ferner kann die hohe Anzahl von Ereignissen zur Verringerung der Lebensdauer der Komponenten von Regelungen führen, beispielsweise zur beschleunigten Abnutzung von Stellgliedern oder der Verkürzung der Lebensdauer von Batterien.

Mit *Send-On-Delta* (SOD), einer Art adaptiver Abtastung, ist es möglich, die Anzahl der produzierten Ereignisse in Regelungssystemen zu reduzieren, indem die Ereignisse erst dann getriggert werden, wenn sich eine Größe bzw. der Systemzustand um mehr als einen vorgegebenen Schwellwert (Delta) geändert hat. SOD wurde bisher überwiegend bei der Abtastung von Sensorgrößen eingesetzt ([Mis03], [Plo07]).

Der Einsatz von SOD in geschlossenen Regelkreisen ist allerdings problematisch. Die Versuche einer Realisierung von SOD-Regelkreisen ([VK06], Abschnitt 2.3.2) zeigten, dass der Einsatz von SOD ohne entsprechende Anpassung der Regelalgorithmen im Allgemeinen nicht möglich ist. Große Approximationsfehler im Regelalgorithmus infolge der nicht-periodischen Abtastwerte, fehlende Ereignisse und die begrenzte Genauigkeit der mit SOD abgetasteten Signale führten zu einer dramatischen Verschlechterung der Regelgüte. Dies ist die Ursache dafür, dass bisher

überwiegend die periodische Abtastung verwendet wird. Dabei fehlen lediglich entsprechende Algorithmen und das Verständnis der Eigenschaften der SOD-Abtastung, um den Weg für eine breitere Verwendung der SOD-Abtastung in der Praxis frei zu machen. Besonders interessant ist dabei die SOD-Abtastung in PID-Regelungen, die dank ihrer Einfachheit sehr verbreitet sind und mit einem Anteil von bis zu 97% der Anzahl aller Regler [DM01] eine wichtige Rolle in der industriellen Praxis einnehmen. Trotz einiger Arbeiten (z. B. [TB66], [Arz99], [OMT02], [San06], [NS07]) fehlen noch immer Regelalgorithmen, die speziell auf die SOD-Abtastung in PID-Regelkreisen angepasst sind.

Die Anwendung von SOD führt dazu, dass in einem Regelkreis mit SOD neben den gewöhnlichen Reglereinstellungen auch weitere Parameter gesetzt werden müssen, wie z. B. die Größe des Schwellwertes. Es fehlen jedoch immer noch praktische Verfahren zur Einstellung dieser Parameter, weil die existierenden Reglerentwurfsverfahren eine periodische Abtastung voraussetzen und nicht ohne weiteres auf die nicht-periodische Abtastung übertragbar sind. Das SOD-Prinzip kann nicht nur auf Sensorwerte (Ausgangsgröße der Strecke), sondern z. B. auch auf die Stellwerte des Regelkreises angewendet werden. Die Frage, an welcher Stelle das SOD-Prinzip angewendet werden sollte, wurde bisher noch nicht beantwortet.

Die verschiedenen Möglichkeiten der Realisierung der Regelkreise mit SOD und die Wahl der Parameter wurden bisher nur unzureichend untersucht. Auch fehlt der Gesamtüberblick über die Eigenschaften der SOD-Arten sowie eine Richtlinie zur Verwendung von SOD in bestimmten praktischen Fällen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, diese Lücken zu schließen und die folgenden grundlegenden Fragen zu beantworten:

- *Ist es möglich, eine PID-Regelung mit SOD-Abtastung zu realisieren?*
- *Wenn ja, wie muss der Regelalgorithmus für SOD angepasst werden?*
- *Wie sollten die Regler- und Abtastparameter bei SOD eingestellt werden?*

Die vorliegende Arbeit widmet sich diesen Fragen. Es wurden die folgenden wichtigsten Ergebnisse erzielt:

- Eine Übersicht von Problemen, die durch eine hohe Anzahl von Ereignissen und begrenzte Ressourcen in vernetzten Regelungen verursacht werden können, wurde in Kapitel 2 zusammengestellt. Der Stand der Wissenschaft auf dem Gebiet der SOD-Abtastung sowie mögliche Lösungen zu Überlastproblemen wurden umrissen.
- Zur Beschreibung der Regelkreise mit SOD-Abtastung wurde ein generisches Modell vorgeschlagen (Abschnitt 2.4). Dieses Modell erlaubt eine einheitliche Beschreibung der Varianten der Realisierung von SOD-Regelkreisen als Kombination verschiedener Abtastelemente.
- Die Eigenschaften von SOD in der offenen Kette, wie z. B. die Anzahl der getriggerten Ereignisse und der Approximationsfehler, wurden untersucht (Kapitel 3).
- Die durch SOD entstehenden Probleme der Regelung im geschlossenen Kreis wurden bestimmt. Zu diesen zählen die Approximation von nichtperiodischen Zeitintervallen zwischen den Abtastwerten, das Auslösen und das Timing von

Ereignissen sowie die Grenzyklen. Die theoretische Analyse dieser Probleme wurde durchgeführt und eine Verbindung zu anderen ereignisbasierten und kontinuierlichen Systemen aufgezeigt. Dabei wurde ein periodischer PID-Regelkreis mit identischen Reglerparametern für die gleiche Regelstrecke als Referenz verwendet. Durch den Vergleich der SOD-Regelkreise mit dieser Referenz konnte die Analyse vereinfacht werden, da lediglich die Differenz zwischen beiden Regelkreisen untersucht werden musste. Für die Analyse von periodischen Regelkreisen konnte so auf bereits gut entwickelte Theorie [FPW98] zurückgegriffen werden. Der Vergleich mit einer Referenz soll auch den praktischen Einsatz der Regelalgorithmen für SOD begünstigen, weil der Praktiker die ihm vertrauten Einstellregeln für periodische PID-Regelungen benutzen kann. Ferner wurde eine vereinfachte Analyse der Probleme mit SOD mit Hilfe einiger Heuristiken durchgeführt (Abschnitte 4.2 bis 4.4).

- Zur Auswertung und zum Vergleich verschiedener Varianten der Realisierung wurden Performancemetriken vorgeschlagen, die sowohl die Regelgüte als auch die Anzahl der getriggerten Ereignisse berücksichtigen (Abschnitt 4.5).
- Zur Anpassung auf SOD wurden drei Regelalgorithmen vorgeschlagen (Kapitel 5), die exemplarisch verschiedene Ansätze zur Behandlung der Probleme in SOD-Regelkreisen präsentieren. Der Algorithmus mit Zeitbeschränkungen begrenzt die Zwischenzeiten so, dass die negativen Folgen der SOD-Probleme gering bleiben. Der zweite Algorithmus verwendet einen Beobachter im Regler, um den Verlauf der Ausgangsgröße zwischen den Abtastwerten zu rekonstruieren. Der heuristische Algorithmus nutzt eine Kombination von zeitlichen und räumlichen Beschränkungen, wodurch im Vergleich zum Algorithmus mit Zeitbeschränkungen eine bessere Regelgüte erreicht wird. Die Algorithmen erfordern verschiedenes Vorgehen bei ihrem Entwurf, besitzen verschiedene Eigenschaften und sind in verschiedenen Situationen anwendbar.
- Auf Basis von TrueTime/Simulink ([HCA02], [CHL⁺03]) wurde ein Simulator zur Untersuchung der Eigenschaften von SOD-Regelkreisen entwickelt (Abschnitt 6.1). Zur Auswertung der Simulationsergebnisse und Erstellung von den für SOD-Regelkreise spezifischen Performancemetriken wurden entsprechende Funktionen implementiert.
- Die Eigenschaften von SOD-Regelkreisen, wie die Regelgüte und die Anzahl von produzierten Ereignissen, wurden für verschiedene Regelalgorithmen mit Hilfe des in Abschnitt 6.1 entwickelten Simulators untersucht und miteinander verglichen. Der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Qualität der Regelung wurde analysiert. Die Eignung der SOD-Abtastung zum Einsatz in der Gebäudeautomation wurde gezeigt (Abschnitte 6.3 bis 6.5).
- Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen wurden die Handlungsempfehlungen zur Auswahl der Abtastungsart und zur Einstellung der Abtastparameter vorgeschlagen (Abschnitte 7.1 bis 7.3).

- Weitere praktische Aspekte des Einsatzes von SOD in PID-Regelkreisen, wie Monitoring, Modellidentifikation von Strecken und Performanceanalyse von Regelkreisen, wurden untersucht (Abschnitt 7.4).

Die Ergebnisse der Arbeit wurden auf einschlägigen wissenschaftlichen Konferenzen und in Fachzeitschriften dargestellt.