

Modellbasierte Energiekostenanalyse automatisierter Systeme

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Andreas Volker Beck
aus Stuttgart

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour

Tag der Einreichung:	18.09.2014
Tag der mündlichen Prüfung:	06.05.2015

Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik
der Universität Stuttgart

2015

IAS-Forschungsberichte

Band 1/2015

Andreas Volker Beck

**Modellbasierte Energiekostenanalyse
automatisierter Systeme**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3689-3

ISSN 1610-4781

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik (IAS) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner, für die Anregungen und die fortwährende Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Hauptberichts.

Frau Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Bedanken möchte ich mich zudem bei allen Kolleginnen und Kollegen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen für die gemeinsame Zeit am IAS, die konstruktiven Diskussionen und die motivierende Zusammenarbeit. Besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing Nasser Jazdi für die inhaltlichen Impulse, die motivierenden Gespräche und die Durchsicht des Manuskripts.

Dank gebührt auch den Studierenden, die mit Ihren Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten wertvolle Beiträge zur Realisierung und Evaluation des Konzepts leisteten.

Schließlich möchte ich meiner Familie und meinen Freunden danken, die mich während meiner gesamten Ausbildungszeit begleitet und motiviert haben und mir auch Anlass zum Innehalten gegeben haben, um neue Kraft zu sammeln. Besonders möchte ich Anke, Jonas und Christian für Ihr Verständnis, Ihren Rückhalt und Ihre Geduld über die vielen Jahre danken, ohne die ein Gelingen der Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Stuttgart, im Mai 2015

Andreas Beck

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis.....	vii
Abkürzungsverzeichnis.....	viii
Begriffsverzeichnis	ix
Zusammenfassung.....	xii
Abstract	xiii
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Bedeutung der Energiekostenanalyse.....	1
1.2 Abgrenzung zu ähnlichen Themenstellungen.....	2
1.3 Problematik der Energiekostenanalyse.....	3
1.4 Ziel der Energiekostenanalyse automatisierter Systeme	4
1.5 Gliederung der Arbeit.....	5
2 Grundlagen der Energiekostenanalyse automatisierter Systeme.....	7
2.1 Entstehung der elektrischen Energiekosten.....	7
2.1.1 Zusammenhänge in automatisierten Systemen.....	7
2.1.2 Zusammenhänge im Umfeld automatisierter Systeme	11
2.1.3 Zusammenhänge in unterschiedlichen Anwendungsdomänen	14
2.2 Energiekostenanalyse	18
2.2.1 Begriffsdefinition.....	18
2.2.2 Ablauf einer Energiekostenanalyse	18
2.2.3 Anwendbarkeit der Resultate einer Energiekostenanalyse	20
2.3 Anforderungen an eine Energiekostenanalyse automatisierter Systeme	23
3 Bestehende Ansätze zur Energiekostenanalyse	26
3.1 Prinzipielle Möglichkeiten zur Energiekostenanalyse.....	26
3.2 Kennzahlenbasierte Energiekostenanalyse.....	28
3.3 Wissensbasierte Energiekostenanalyse.....	30
3.4 Ressourcenbasierte Energiekostenanalyse.....	32
3.5 Simulationsbasierte Energiekostenanalyse	34
3.6 Zusammenfassende Bewertung und Folgerung.....	36
4 Modelle für das Wissen zur Energiekostenanalyse automatisierter Systeme	39
4.1 Wissen für die Energiekostenanalyse	40
4.1.1 Gliederung des Wissens.....	40
4.1.2 Situationsabhängiges Wissen.....	42
4.1.3 Situationsunabhängiges Wissen.....	44
4.2 Grundprinzip der Modelle für die Energiekostenanalyse	45

4.3	Modelle für die Energiekostenanalyse.....	47
4.3.1	Modelle für das situationsunabhängige Wissen.....	47
4.3.2	Modelle für das situationsabhängige Wissen.....	51
5	Konzept der modellbasierten Energiekostenanalyse automatisierter Systeme.....	56
5.1	Ermittlung des energetischen Ist-Zustands.....	57
5.1.1	Situationsunabhängige Modellierung.....	57
5.1.2	Modellierung der Situation im Ist-Zustand.....	59
5.2	Generierung von Optimierungsvorschlägen.....	60
5.2.1	Grundprinzip der Generierung.....	60
5.2.2	Basisalgorithmus.....	65
5.2.3	Iterativer Algorithmus in einzelnen Zeitschritten.....	67
5.2.4	Algorithmus auf Basis genetischer Algorithmen.....	69
5.3	Anwendung von Optimierungsvorschlägen.....	73
5.4	Gesamtablauf der modellbasierten Analyse.....	73
5.5	Stufenkonzept.....	75
6	Analyse einzelner automatisierter Systeme.....	77
6.1	Modelle zur Analyse einzelner automatisierter Systeme.....	77
6.1.1	Modell des automatisierten Systems.....	77
6.1.2	Modell der Energieversorgung.....	80
6.2	Auswahl und Verknüpfung der Modelle.....	82
6.3	Analyseablauf und Interpretation der Ergebnisse.....	83
7	Individualisierung der Analyse.....	85
7.1	Modellelemente für die Individualisierung.....	85
7.2	Eingabe der Nutzungsanforderungen und Eigenschaften.....	86
7.3	Analyseablauf und Interpretation der Ergebnisse.....	87
8	Analyse gekoppelter automatisierter Systeme.....	88
8.1	Modelle für die Interaktion automatisierter Systeme.....	88
8.1.1	Modell für Leitungen.....	88
8.1.2	Modell für die Umwelt.....	90
8.2	Auswahl, Verknüpfung und Anpassung der Modelle.....	93
8.3	Analyseablauf und Interpretation der Ergebnisse.....	95
9	Realisierung des Analysekonzepts.....	96
9.1	Software für die situationsunabhängige Modellierung.....	97
9.2	Software für die situationsabhängige Modellierung.....	100
9.3	Software für die Durchführung der Analyse.....	103
10	Anwendung des Analysekonzepts.....	105
10.1	Anwendungsbereich Smart Home.....	105
10.2	Aufbau der Beispielsituation Kaffeeautomat mit Therme.....	106
10.2.1	Der Kaffeeautomat.....	107
10.2.2	Die Therme.....	109

10.2.3 Die Wasserleitung	110
10.2.4 Der intelligente Stromzähler	110
10.2.5 Der Analyserechner mit Analysesoftware	111
10.3 Modellbasierte Analyse der Beispielsituation	111
10.3.1 Modellierung der Beispielsituation.....	111
10.3.2 Durchführung der Analyse.....	114
10.4 Erfahrungen und Ergebnisse.....	118
10.4.1 Erfahrungen aus der Anwendung des Konzepts	118
10.4.2 Evaluierung der Erfüllung der gestellten Anforderungen.....	119
10.4.3 Erzielte Ergebnisse	122
11 Zusammenfassung und Ausblick	123
11.1 Zusammenfassung des entwickelten Konzepts	123
11.2 Vorteile und Grenzen des Konzepts	124
11.3 Ausblick auf zukünftige Arbeiten.....	126
Literaturverzeichnis.....	128
Anhang A: Situationsmodell für den Demonstrator.....	135

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Grundlegende Zielstellung.....	5
Abbildung 2.1:	Zusammenhänge anhand eines beispielhaften automatisierten Systems.....	8
Abbildung 2.2:	Zusammenhänge aus Sicht der Systemschnittstelle.....	9
Abbildung 2.3:	Wissen über ein ATS als Grundlage der Energiekostenanalyse.....	10
Abbildung 2.4:	Nutzung von automatisierten Systemen.....	11
Abbildung 2.5:	Versorgung von automatisierten Systemen.....	11
Abbildung 2.6:	Funktionale Interaktion von automatisierten Systemen.....	12
Abbildung 2.7:	Umwelt von automatisierten Systemen.....	12
Abbildung 2.8:	Zusammenhänge im Umfeld von automatisierten Systemen.....	13
Abbildung 2.9:	Grundlegendes Wissen für die Energiekostenanalyse.....	13
Abbildung 2.10:	Beispielszenario „Industrielle Produktionsanlage“.....	14
Abbildung 2.11:	Beispielszenario „Elektro-Auto“.....	15
Abbildung 2.12:	Beispielszenario „Einkaufszentrum“.....	16
Abbildung 2.13:	Beispielszenario „Privatwohnung“.....	17
Abbildung 2.14:	Ablauf der Energiekostenanalyse.....	19
Abbildung 2.15:	Ist-Zustand in einer beispielhaften Situation.....	19
Abbildung 2.16:	Anwendung von Optimierungsmaßnahmen.....	23
Abbildung 3.1:	Beispiel Key-Performance-Indikatoren nach [Gorp05].....	29
Abbildung 3.2:	Beispiel Unterstützung der Energieberatung nach [Schm04].....	31
Abbildung 3.3:	Beispiel Energiemanagementsystem nach [Matu06].....	33
Abbildung 3.4:	Beispiel Modulrechenprogramm nach [Kuhn01].....	34
Abbildung 4.1:	Deklaratives Wissen über eine Situation anhand einer Beispielsituation.....	40
Abbildung 4.2:	Operatives Wissen am Beispiel automatisierter Systeme.....	41
Abbildung 4.3:	Gliederung des Wissens anhand eines Beispiels.....	42
Abbildung 4.4:	Kategorisierung des situationsabhängige Wissens.....	43
Abbildung 4.5:	Kategorisierung des situationsunabhängigen Wissens.....	44
Abbildung 4.6:	Grundprinzip der Meta-Modellierung.....	46
Abbildung 4.7:	Modelle für das Wissen über automatisierte Systeme.....	47
Abbildung 4.8:	Meta-Modell für automatisierte Systeme.....	48
Abbildung 4.9:	Beispiel für die Modellierung eines Kaffeeautomaten.....	48
Abbildung 4.10:	Modelle für das Wissen über Elemente in der Umgebung.....	49
Abbildung 4.11:	Meta-Modell für Elemente in der Umgebung.....	50
Abbildung 4.12:	Beispiel für die Modellierung eines Energieversorgungsvertrags.....	51
Abbildung 4.13:	Modelle für das Wissen über Installationen und Anforderungen.....	52
Abbildung 4.14:	Meta-Modell für Installationen und Anforderungen.....	52
Abbildung 4.15:	Beispiel für die Modellierung einer Situation.....	53
Abbildung 4.16:	Modelle für das Wissen über konkrete Werteverläufe.....	54
Abbildung 4.17:	Meta-Modell für Werteverläufe.....	54
Abbildung 4.18:	Beispiel für die Modellierung der Werteverläufe in einer Situation.....	55
Abbildung 5.1:	Modellbasierte Energiekostenanalyse automatisierter Systeme.....	56
Abbildung 5.2:	Situationsunabhängige Modellierung.....	57
Abbildung 5.3:	Modellierung der Situation im Ist-Zustand.....	59
Abbildung 5.4:	Grundprinzip der Generierung von Optimierungsvorschlägen.....	61
Abbildung 5.5:	Abstraktes Beispiel zur Verdeutlichung des Generierungsvorgangs.....	61
Abbildung 5.6:	Basisalgorithmus.....	65
Abbildung 5.7:	Verfeinerung des Basisalgorithmus.....	66
Abbildung 5.8:	Algorithmus in einzelnen Zeitschritten.....	67

Abbildung 5.9:	Verfeinerung des Algorithmus in einzelnen Zeitschritten.....	68
Abbildung 5.10:	Algorithmus auf Basis genetischer Algorithmen.....	70
Abbildung 5.11:	Verfeinerung des Algorithmus auf Basis genetischer Algorithmen	71
Abbildung 5.12:	Evolutionsvorgang des Algorithmus auf Basis genetischer Algorithmen	72
Abbildung 5.13:	Anwendung eines Optimierungsvorschlags.....	73
Abbildung 5.14:	Gesamtablauf der modellbasierten Analyse	74
Abbildung 5.15:	Stufenkonzept für die modellbasierte Energiekostenanalyse	76
Abbildung 6.1:	Verfeinertes Meta-Modell für automatisierte Systeme.....	77
Abbildung 6.2:	Verfeinertes Meta-Modell für Schnittstellen automatisierter Systeme.....	78
Abbildung 6.3:	Verfeinertes Meta-Modell für variable Größen automatisierter Systeme	78
Abbildung 6.4:	Verfeinertes Meta-Modell für das Verhalten automatisierter Systeme	79
Abbildung 6.5:	Verfeinertes Meta-Modell für Versorgungen	80
Abbildung 6.6:	Verfeinertes Meta-Modell für Schnittstellen von Versorgungen	80
Abbildung 6.7:	Verfeinertes Meta-Modell für variable Größen von Versorgungen	81
Abbildung 6.8:	Verfeinertes Meta-Modell für das Verhalten von Versorgungen	81
Abbildung 6.9:	Verfeinertes Meta-Modell für Installationen und Anforderungen.....	82
Abbildung 6.10:	Meta-Modell für Verbindungen zwischen ATS und Versorgungen.....	82
Abbildung 6.11:	Verfeinertes Meta-Modell für Werteverläufe	83
Abbildung 7.1:	Ergänzt Meta-Modell für Installationen und Anforderungen.....	85
Abbildung 7.2:	Verfeinertes Meta-Modell für Nutzungsanforderungen	85
Abbildung 7.3:	Verfeinertes Meta-Modell für Eigenschaften	86
Abbildung 8.1:	Verfeinertes Meta-Modell für Leitungen.....	88
Abbildung 8.2:	Verfeinertes Meta-Modell für Leitungsschnittstellen.....	89
Abbildung 8.3:	Verfeinertes Meta-Modell für variable Größen von Leitungen.....	89
Abbildung 8.4:	Verfeinertes Meta-Modell für das Verhalten von Leitungen.....	90
Abbildung 8.5:	Verfeinertes Meta-Modell für eine Umwelt	91
Abbildung 8.6:	Verfeinertes Meta-Modell für die Schnittstellen einer Umwelt	91
Abbildung 8.7:	Verfeinertes Meta-Modell für variable Größen einer Umwelt	92
Abbildung 8.8:	Verfeinertes Meta-Modell für das Verhalten einer Umwelt	92
Abbildung 8.9:	Ergänzungen im Meta-Modell für Installationen und Anforderungen	93
Abbildung 8.10:	Verfeinertes Meta-Modell für Verbindungen von ATS und Leitungen	93
Abbildung 8.11:	Verfeinertes Meta-Modell für Verbindungen von ATS und Umwelt.....	94
Abbildung 8.12:	Ergänzte Meta-Modelle für Nutzungsanforderungen und Eigenschaften	95
Abbildung 9.1:	Aufbau der Software zur modellbasierten Energiekostenanalyse	96
Abbildung 9.2:	Unterstützung bei der situationsunabhängigen Modellierung	97
Abbildung 9.3:	Eingabemaske zur Erstellung eines neuen Modells eines ATS.....	98
Abbildung 9.4:	Eingabemaske zur Modellierung einer Systemleistung.....	98
Abbildung 9.5:	Eingabemaske zur Modellierung eines Systemverhaltens.....	99
Abbildung 9.6:	Unterstützung bei der Modellierung der Situation im Ist-Zustand	100
Abbildung 9.7:	Eingabemaske zur Systemauswahl	101
Abbildung 9.8:	Eingabemaske für Verbindungen.....	101
Abbildung 9.9:	Beispielhafte Eingabemaske für Nutzungsanforderungen.....	102
Abbildung 9.10:	Unterstützung bei der Durchführung der Analyse.....	103
Abbildung 9.11:	Grafische Benutzungsoberfläche zur Steuerung der Analyse.....	103
Abbildung 9.12:	Beispielhafte grafische Benutzungsoberfläche für Optimierungshinweise ...	104
Abbildung 10.1:	Aufbau der Beispielsituation	106
Abbildung 10.2:	Kaffeeautomat und Prototyp für WLAN-Anbindung.....	107
Abbildung 10.3:	Beispielhafter Werteverlauf für die Bedienung	107
Abbildung 10.4:	Beispielhafte Werteverläufe für Energieverbrauch und Zulufttemperatur ...	108
Abbildung 10.5:	Abhängigkeit zwischen Leistung und Zulufttemperatur [Puntl 1]	108
Abbildung 10.6:	Regelbare Therme mit Display und Prototyp für WLAN-Anbindung	109

Abbildung 10.7: Beispielhafter Werteverlauf zur Veranschaulichung des Heizverhaltens.....	109
Abbildung 10.8: Stromzähler und Prototyp für WLAN-Anbindung	110
Abbildung 10.9: Angenommener Werteverlauf für die Energiekosten	110
Abbildung 10.10:Modell des Kaffeeautomaten	111
Abbildung 10.11:Modell der regelbaren Therme	112
Abbildung 10.12:Modell der Wasserleitung	113
Abbildung 10.13:Modell des intelligenten Stromzählers	113
Abbildung 10.14:Modell der Installationen und Anforderungen in der Beispielsituation	114
Abbildung 10.15:Ausgangssituation in der Beispielsituation.....	115
Abbildung 10.16:Resultat auf der ersten Analysestufe.....	116
Abbildung 10.17:Resultat auf der zweiten Analysestufe.....	117
Abbildung 10.18:Resultat auf der dritten Analysestufe.....	117
Abbildung A.1: Situationsmodell der Beispielsituation	135

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Vergleich existierender Ansätze zur Energiekostenanalyse	36
Tabelle 5.1:	Werteverläufe der Eingangsparameter aus dem Beispiel im Ist-Zustand.....	62
Tabelle 5.2:	Variation der zeitlichen Werteverläufe der Eingangsparameter im Beispiel ..	63
Tabelle 5.3:	Bildung erlaubter Werteverlaufskombinationen für das Beispiel.....	63
Tabelle 5.4:	Berechnung und Auswertung der gültigen Vorschläge für das Beispiel	64

Abkürzungsverzeichnis

°C	Temperatureinheit Grad Celsius
ATS	Automatisiertes System
CAN	Controller Area Network – Bussystem zur Kommunikation zwischen Steuergeräten im Automobil
E(t)	Formelzeichen für die Energie (engl. energy) in Abhängigkeit der Zeit
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistung
h	Zeiteinheit für Stunden (engl. hour)
KNX	Konnex – Bussystem zur Kommunikation für die Hausautomation
KPI	Key-Performance-Indikator
kW	Leistungseinheit Kilowatt
kWh	Energieeinheit Kilowattstunden
LCD	Flüssigkristallanzeige (engl. liquid crystal display)
MOST	Media Oriented Systems Transport - Bussystem im Automobil zur Audio- und Videoübertragung
P(t)	Formelzeichen für die Leistung (engl. power) in Abhängigkeit der Zeit
S	Bezeichnung eines konkreten Modells eines Systems (teilweise mit Index)
SQMA	Situationsbasierte Qualitative Modellbildung und Analyse
t	Formelzeichen für die Zeit (engl. time)
U	Bezeichnung eines konkreten Modells eines Elements in der Umgebung eines automatisierten Systems (teilweise mit Index)
U _L	Bezeichnung eines konkreten Modells einer Leitung (teilweise mit Index)
U _U	Bezeichnung eines konkreten Modells einer Umwelt (teilweise mit Index)
U _V	Bezeichnung eines konkreten Modells einer Versorgung
W	Leistungseinheit Watt
WLAN	Wireless Local Area Network – Kommunikationsstandard zur drahtlosen Datenübertragung
WZM	Werkzeugmaschine

Begriffsverzeichnis

Ausgangsparameter: Parameter an einer Schnittstelle eines automatisierten Systems oder eines Elements in der Umgebung, dessen zeitlicher Werteverlauf sich über das Verhalten aus den zeitlichen Werteverläufen der Eingangsparameter und der Zustandsvariablen und den Werten der Eigenschaften bestimmt.

Automatisiertes System: System bestehend aus einem technischen Prozess, der in einem technischen System abläuft, das alle zur Automatisierung des technischen Prozesses notwendigen technischen Einrichtungen enthält, und dem Prozess- und Bedienpersonal.

Eigenschaft: Variable Größe eines Elements in der Umgebung, deren Wert erst in einer konkreten Situation feststeht (z. B. Länge einer Leitung, Maße eines Raums).

Eingangsparameter: Parameter an einer Schnittstelle eines automatisierten Systems oder eines Elements in der Umgebung, dessen zeitlicher Werteverlauf sich über das Verhalten auf die zeitlichen Werteverläufe der Ausgangsparameter, der Zustandsvariablen und der Leistungen auswirkt.

Energiekostenanalyse: Systematische Untersuchung der Bestandteile, Zusammenhänge und Faktoren in einer konkreten Situation, durch die die Energiekosten entstehen, und Ermittlung und Bewertung von Optimierungsmaßnahmen.

Energieverbrauch: Zeitliche Verteilung der Energiemenge, die ein automatisiertes System zur Bereitstellung seiner Leistungen benötigt und für die dem Nutzer Energiekosten entstehen.

Identifikationsmerkmal: Merkmal, das eine eindeutige Unterscheidung automatisierter Systeme und Elemente in der Umgebung ermöglicht.

Leistung: Im Kontext von Energieverbrauch und Energiekosten: elektrische Leistung; im Kontext der Leistungsfähigkeit eines automatisierten Systems oder Elements in der Umgebung: Zustand, Ausgangsparameter oder eine Kombination aus solchen, die eine für Nutzer relevante Leistung charakterisieren (z. B. Produktionsmenge, Raumtemperatur).

Leitung: Element in der Umgebung, das zwei automatisierte Systeme miteinander verbindet und über das Materie, Information oder Energie ausgetauscht wird.

Meta-Modell: Modell, in dem die abstrakte Grundstruktur eines konkreten Modells abgebildet ist („Modell eines Modells“).

Modell: Ein Abbild der Wirklichkeit [Stac73] und eine „vereinfachte Darstellung [...], die eine Untersuchung erleichtert od. erst möglich macht“ [Dude07a].

Modellbasierte Analyse: Analyse, die anhand eines Modells durchgeführt wird.

Nutzungsanforderung: Von einem Nutzer gewünschter Wertebereich einer Leistung eines automatisierten Systems oder eines Elements in der Umgebung.

Oberflächenmerkmal: Merkmal, das Form und Beschaffenheit der Oberfläche einer Umweltschnittstelle charakterisiert.

Optimierung: „Optimale Festlegung von Größen, Eigenschaften, zeitlichen Abläufen u. a. eines Systems unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Nebenbedingungen“ [Dude07b].

Optimierungsmaßnahme: Veränderung des aktuellen Zustands unter bestimmten Nebenbedingungen, um eine Verbesserung hinsichtlich eines Optimierungsziels zu erreichen.

Optimierungsvorschlag: Gültige Werteverlaufskombination, die zur Reduktion der Energiekosten führt bei gleichzeitiger Erfüllung aller Nutzungsanforderungen.

Position: Position eines automatisierten Systems in der räumlichen Umwelt.

Position in Umwelt: Position eines automatisierten Systems in einer Umwelt-Geometrie.

Räumliche Umwelt: Konkrete räumliche Gegebenheiten in einer Situation im kartesischen Referenz-Koordinatensystem.

Schnittstelle: Bestandteil eines automatisierten Systems oder Elements in der Umgebung, der zur Verbindung dient und über den die Ein- und Ausgangsparameter ausgetauscht werden.

Situation: Konkrete Kombination aus automatisierten Systemen in einer realen Umgebung, die analysiert wird.

Situationsabhängiges Wissen: Wissen über die Zusammenhänge automatisierter Systeme und Elemente in der Umgebung und die Gegebenheiten in einer konkreten Situation.

Situationsmodell: Modell, in dem die situationsunabhängigen Modelle durch Abbildung des situationsabhängigen Wissens miteinander verknüpft sind und das dadurch die energetischen Zusammenhänge in einer konkreten Situation abbildet.

Situationsunabhängiges Modell: Modell, in dem das situationsunabhängige Wissen über ein automatisiertes System oder Element in der Umgebung abgebildet ist.

Situationsunabhängiges Wissen: Wissen über automatisierte Systeme und Elemente in deren Umgebung, das in jeder Situation unverändert gültig ist. Dazu zählen die Wertebereiche der Ein- und Ausgangsparameter, der Zustandsvariablen, der Leistungen und der Eigenschaften und das Verhalten, das die internen Zusammenhänge zwischen konkreten zeitlichen Werteverläufen dieser Größen bildet.

Umgebung: Leitungen, Versorgungen und Umwelt.

Umwelt: Räumliches Element in der Umgebung, in dem sich automatisierte Systeme befinden und über das Materie, Information oder Energie ausgetauscht wird.

Umwelt-Geometrie: Enthält das Koordinatensystem für die räumlichen Berechnungen in einer Umwelt und Transformationsfunktionen zwischen kartesischen und Umwelt-Koordinaten.

Umwelt-Koordinatensystem: Koordinatensystem, das zur Berechnung der Zusammenhänge in einem Modell einer Umwelt genutzt wird.

Umwelt-Koordinate: Koordinate in einem Umwelt-Koordinatensystem.

Verbindung: Verknüpfung zwischen zwei Schnittstellen.

Verhalten: Zusammenhänge zwischen konkreten zeitlichen Werteverläufen der Ein- und Ausgangsparameter, der Zustandsvariablen, der Leistungen und der Eigenschaften automatisierter Systeme oder Elemente in der Umgebung.

Verknüpfungsmerkmal: Merkmal, das eine Leitungs- oder Versorgungsschnittstelle charakterisiert.

Versorgung: Technische Einrichtung oder Unternehmen, das elektrische Energie bereitstellt.

Werteverlaufskombination: Kombination aus je einem konkreten zeitlichen Werteverlauf für jeden Eingangsparameter an nicht verbundenen Schnittstellen automatisierter Systeme.

Zustandsvariable: Variable, deren Wert einen inneren Zustand eines automatisierten Systems oder eines Elements in der Umgebung charakterisiert.

Zusammenfassung

Der technische Fortschritt führt zu einer zunehmenden Automatisierung in allen Lebensbereichen der Menschen. Dabei werden technische Prozesse in technischen Systemen und manuelle Tätigkeiten durch Automatisierungssysteme unterstützt. Diese automatisierten Systeme erleichtern den Nutzern ihre Aufgaben oder ermöglichen erst deren Durchführung. Die Anwendungen reichen von einfachen Haushaltsgeräten bis hin zu komplexen Industrieanlagen. Der Betrieb der automatisierten Systeme erfordert elektrische Energie. Aufgrund der Verknappung der Energieressourcen, des stetig wachsenden Energiebedarfs und der energiepolitischen Veränderungen der vergangenen Jahre setzt sich der Trend der Energiekostensteigerung weiter fort. Die Energiekosten sind daher einer der entscheidenden Faktoren in unserer Gesellschaft, der analysiert und optimiert werden muss. Das Problem, das sich hierbei für eine Analyse ergibt, ist die hohe Komplexität der automatisierten Systeme und deren Nutzung unter unterschiedlichsten Einsatzbedingungen. Eine Energiekostenanalyse erfordert ein hohes Maß an Fachwissen und ausgeprägte analytische Fähigkeiten und muss für eine Vielzahl von spezifischen Anwendungssituationen eingesetzt werden können.

Zur Lösung dieses Problems und der Herausforderungen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Konzept für die Energiekostenanalyse entwickelt. Ausgehend von der Untersuchung der Entstehung der Energiekosten wird das für die Energiekostenanalyse erforderliche Wissen abgeleitet. Das Wissen wird kategorisiert und dessen Modellierung durch geeignete Mittel strukturiert und unterstützt. Es wird zwischen in verschiedenen Anwendungssituationen wiederverwendbarem Wissen und Wissen über die konkrete Anwendungssituation unterschieden. Auf diese Weise wird der Aufwand für die Energiekostenanalyse verteilt und für eine konkrete Situation deutlich reduziert. Die Modellierung ermöglicht eine rechnerbasierte Auswertung des Wissens. Hierzu definiert das Konzept verschiedene Algorithmen zur Ermittlung von Optimierungsvorschlägen und deren Umsetzung. Das Konzept definiert zudem unterschiedliche Stufen für die Analyse, die eine weitere Anpassung des Aufwands an die konkrete Anwendungssituation erlauben und hierdurch den Anwender des Konzepts bei der Durchführung der Energiekostenanalyse zusätzlich unterstützen.

Anhand eines Demonstrators wird die Realisierbarkeit und die Anwendbarkeit des Konzepts gezeigt. An einer Beispielanwendung eines Kaffeeautomaten und einer Therme wird die Modellierung, die Durchführung der Analyse und eine mögliche Unterstützung durch Softwarewerkzeuge dargestellt. Abschließend wird das Konzept gegenüber den Anforderungen an eine Energiekostenanalyse automatisierter Systeme evaluiert.

Abstract

Technical innovations and improvements involve an increasing automation in every area of life of people. Technical processes in technical systems and manual activities are supported by installations for automation. These industrial automation systems alleviate tasks for their users or enable the users performing formerly impossible tasks. Applications of industrial automation systems range from simple white goods like washing machines to complex production facilities. The operation of industrial automation systems requires electrical energy. As a result of shortage in energy resources, steadily raising energy demand and changes in energy politics the trend of increasing energy costs continues. Hence, energy costs are a decisive factor of our economy, that must be analyzed and optimized. The major problem in this case are the high complexity of industrial automation systems and their usage in very different operation conditions. By this fact, an energy cost analysis requires a large amount of expert knowledge and distinct analytical abilities and must be applicable for a variety of specific application scenarios.

To solve this problem and the challenges, a concept for energy cost analysis is developed in this work. Based on the examination of the emergence of energy costs, the required knowledge for energy cost analysis is derived. The knowledge is categorized and modelling of knowledge is structured and supported by appropriate instruments. The required knowledge is divided in knowledge that is re-usable in different application scenarios and knowledge that is specific to a concrete scenario. This division reduces the effort for energy cost analysis in a concrete situation. In addition, the use of models allows a computer-based analysis of the knowledge. For this purpose, the concept defines different algorithms for generation and application of optimization proposals. Furthermore, the concept provides different analysis levels that allow adaptation of analysis effort in a concrete application scenario and additionally supports the user of the concept in performing an energy cost analysis.

Feasibility and applicability of the concept are shown on the basis of a demonstrator. Modelling, performing the analysis and a possible software tool support are demonstrated in an example scenario consisting of an industrial coffee machine and a regulated water heater. Concluding, the concept is evaluated against the requirements for an energy cost analysis of industrial automation systems.