

Konzeption und Implementierung eines virtuellen Kraftwerks mit BPMN-basierter Prozesssteuerung

Christian Hehn

Master-Thesis
Studiengang Informatik

Fakultät für Informatik
Hochschule Mannheim

30. April 2011

Betreuer: Prof. Dr. Michael Gröschel
Zweitkorrektor: M.Sc. Marco Blevins

Management Summary

Der geplante Ausstieg aus der Kernenergie und die Bestrebungen zur Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen erfordern einen Wandel in der Energieversorgung. Während bisher hauptsächlich leistungsstarke Atom- und Kohlekraftwerke für die Elektrizitätsversorgung verantwortlich waren, übernehmen zukünftig kleine, dezentrale Erzeuger auf Basis regenerativer Energieträger eine signifikante Rolle in der Energieversorgung.

Im Zuge der Integration der erneuerbaren Energieträger müssen vielfältige Herausforderungen bewältigt werden, da die Struktur unseres Versorgungssystems auf Großkraftwerke ausgelegt ist. Als ein wichtiges Hilfsmittel hierfür könnten sich virtuelle Kraftwerke erweisen, die viele kleine regenerative Kraftwerke zu einer größeren Einheit zusammenschließen.

Im Projekt AlpEnergy wird ein virtuelles Kraftwerk eingesetzt, um die Einspeisung regenerativer Kraftwerke sowie den Verbrauch von Kunden zu prognostizieren. Die dabei ermittelte Differenz zwischen Angebot und Nachfrage dient dem virtuellen Kraftwerk als Basis für die Berechnung des Endkundenpreises für elektrische Energie. Hierbei gilt, dass in Zeiten eines hohen Angebotes an Energie aus regenerativen Kraftwerken bei gleichzeitigem niedrigem Energiebedarf aufseiten der Endkunden Elektrizität verbilligt angeboten wird. Ziel dieses Ansatzes ist es, durch Interaktion mit dem Endverbraucher Last auf Zeiten zu verschieben, in denen durch günstige klimatische Bedingungen viel Elektrizität aus erneuerbaren Energieträgern zur Verfügung steht.

Äquivalent zu reellen Kraftwerken laufen auch in virtuellen Kraftwerken vielfältige Prozesse ab. Zur Modellierung und Ausführung der Prozesse nutzt das virtuelle Kraftwerk des AlpEnergy-Projekts die Modellierungsnotation Business Process Modelling Notation (BPMN). Durch die Verwendung von BPMN lassen sich die Prozesse im virtuellen Kraftwerk von Anwendern ohne Programmiererfahrung grafisch modellieren. Der Anwender hat hierbei die Möglichkeit neue Prozesse aus bereits vorhandenen Teilen existierender Prozesse zu erstellen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele dieser Arbeit	2
1.3	Abgrenzung	2
1.4	Kapitelübersicht	3
2	Grundlagen	5
2.1	Prozess	5
2.2	Energiewirtschaft	6
2.2.1	Terminologien	6
2.2.2	Virtuelles Kraftwerk	8
2.2.3	Smart Grid	9
2.2.4	Smart Meter	11
2.2.5	Meter Data Management	12
2.3	Projektspezifische Grundlagen	12
2.3.1	Energy4U GmbH	12
2.3.2	AlpEnergy	12
2.3.3	Das virtuelle Kraftwerk des AlpEnergy-Projekts	13
2.4	Informationstechnische Grundlagen	15
2.4.1	Business Process Modelling Notation und Business Process Management	15
2.4.2	Dependency Injection mit Spring	18
2.4.3	Patterns für moderne Software-Architekturen	19
2.4.4	Software Architecture Analysis Method	20
3	Situation und Problematik in der Energiewirtschaft	21
3.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen	21
3.2	Energieversorgungs-Infrastruktur	22
3.2.1	Gegenwärtige Situation	22
3.2.2	Zukünftige Entwicklungen	23
3.2.3	Entstehende Herausforderungen	25
4	Lösungsansätze mittels virtuellem Kraftwerk	30
4.1	Definition: Virtuelles Kraftwerk	30

4.1.1	Überblick über bestehende, virtuelle Kraftwerke	30
4.1.2	Anforderungen und Komponenten eines virtuellen Kraftwerks . . .	32
4.1.3	Prozesse in einem virtuellen Kraftwerk	34
4.2	Durch virtuelle Kraftwerke lösbare Probleme	35
4.3	Offene Probleme	37
5	Konzeption des virtuellen Kraftwerks AlpEnergy	39
5.1	Vorgehensbeschreibung	40
5.2	Aufbau des virtuellen Kraftwerks AlpEnergy	41
5.2.1	Bestandteile des VPSa	41
5.2.2	Anforderungen an VPSa	44
5.2.3	Abgrenzung zu bestehenden Systemen	47
5.2.4	Technisches Umfeld	48
5.3	Systemarchitektur	50
5.3.1	Basis-Architektur	50
5.3.2	Komponentenbildung durch eine serviceorientierte Architektur . . .	52
5.3.3	Architekturbewertung und Auswahl	55
5.4	Auswahl eines Business Process Management-Systems	55
5.4.1	Entscheidungskriterien	55
5.4.2	Produktvergleich und Auswahl	57
5.5	Prozessmodellierung und Ausführung	62
5.5.1	Gruppierungsregeln und Anforderungen für Service Tasks	62
5.5.2	Architektur der auszuführenden Prozesse	63
5.6	Datenmodell	64
5.7	Software-Architektur	68
5.7.1	Integration der Process Virtual Machine	68
5.7.2	Service-Task-Hierarchie	72
5.7.3	Integration der Datendienste	77
5.7.4	Einbindung der Fremdmodule	80
5.7.5	Bewertung der Software-Architektur mit der Software Architecture Analysis Method	81
6	Prototypische Implementierung des virtuellen Kraftwerks AlpEnergy	91
6.1	Prozess zur Berechnung der Preisvektoren	91
6.1.1	Beschreibung des Prozesses	91
6.1.2	Spezifikation im Business Process Modelling Notation-Metamodell .	95
6.1.3	Umsetzung der Aktivitätslogik	97
6.1.4	Zusammenspiel der beteiligten Technologien	98
6.1.5	Datentransfer im Prozess	100
7	Zusammenfassung	105

7.1	Bewertung der Business Process Modelling Notation im Virtual Power System AlpEnergy	105
7.1.1	Validierung der erhofften Vorteile durch die Business Process Modelling Notation	105
7.1.2	Aufgetretene Probleme	106
7.2	Zukünftige Entwicklung	108
8	Literatur	110
9	Abkürzungsverzeichnis	115
10	Abbildungsverzeichnis	117
11	Tabellenverzeichnis	119

8 Literatur

- [Alf11] ALFRESCO: *Activiti Homepage*. <http://www.activiti.org>, Januar 2011.
- [All09] ALLWEYER, THOMAS: *BPMN 2.0 Business Process Model and Notation - Einführung in den Standard für die Geschäftsprozessmodellierung*, 2. Auflage. Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2009.
- [alp10a] *Homepage des Projekts AlpEnergy*. <http://www.alpenergy.net/>, Dezember 2010.
- [alp10b] *Homepage des Projekts Alpine Space*. <http://www.alpine-space.eu>, Dezember 2010.
- [Arb11a] ARBEITSGEMEINSCHAFT DER ENERGIEDIENSTLEISTER IM ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE: *Pressemitteilung vom 6.4.2011 zum Thema: Ausbau von Qualität und Marktzugang*. http://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse/2010/Pr2011-046.pdf, April 2011. Pr-46/2011.
- [Arb11b] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZ: *Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2010 nach Energieträgern*. http://www.ag-energiebilanzen.de/component/download.php?filedata=1292581589.pdf&filename=BRD_Stromerzeugung1990-2010%2017Dez2010.pdf&mimetype=application/pdf, 01 2011.
- [BA09] BUNDESVERBAND ERNEUERBARE ENERGIE E.V. AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN E.V.: *Stromversorgung 2020 - Wege in eine moderne Energiewirtschaft*. http://www.fvee.de/fileadmin/politik/09.01_Branchenprognose2020_Langfassung.pdf, Januar 2009. Strom-Ausbauprognose der Erneuerbare-Energien-Branche.
- [BCK98] BASS, L., P. CLEMENTS R. KAZMAN: *Software Architecture in Practice*. Addison-Wesley, 1998.
- [Ber03] BERGSTEN, HANS: *JavaServer Pages*. O'Reilly Media, Inc, 2003.
- [Ber10] BERTLING, MARCUS: *Konzeption und Realisierung von Interventionsmodellen auf Grundlage von Erzeugungs- und Verbrauchsprognosen elektrischer Energie*. , Fachhochschule Osnabrück, 2010.

- [BMR⁺00] BUSCHMANN, FRANK, REGINE MEUNIER, HANS ROHNERT, PETER SOMMERLAD MICHAEL STAL: *Pattern-orientierte Softwarearchitektur*. Addison-Wesley, 2000.
- [Bor05] BORCHERS, HENNING: *Regel- und Ausgleichsenergie - Mythen und Fakten*. bne Kompass, 2 2005.
- [Bun10a] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung*. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_ee_zahlen_bf.pdf, Juni 2010.
- [Bun10b] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE: *Stromerzeugungskapazitäten und Bruttostromerzeugung nach Energieträgern*. <http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/Energiedaten/energietraeger10-stromerzeugungskapazitaeten-bruttostromerzeugung,property=blob,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.xls>, Februar 2010.
- [Bun11] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE: *Monitoring-Bericht des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie nach § 51 EnWG zur Versorgungssicherheit im Bereich der leitungsgebundenen Versorgung mit Elektrizität*. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/M-O/monitoringbericht-bmwi-versorgungssicherheit-bereich-leitungsgebundene-versorgung-elektrizitaet,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>, Januar 2011.
- [Deu10a] DEUTSCHE ENERGIEAGENTUR: *dena-Netzstudie II Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 2020 mit Ausblick 2025*. http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Studien__Umfragen/Ergebniszusammenfassung_dena-Netzstudie.pdf, Dezember 2010. Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse durch die Projektsteuerungsgruppe.
- [Deu10b] DEUTSCHE ENERGIEAGENTUR: *Analyse der Notwendigkeit des Ausbaus von Pumpspeicherwerken und anderen Stromspeichern zur Integration der erneuerbaren Energien*. http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Publikationen/ESD/Endbericht_PSW_-_Integration_EE_dena.pdf, Februar 2010. Abschlussbericht.
- [Deu10c] DEUTSCHE ENERGIEAGENTUR: *Endbericht Dena Netzstudie II*. http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Studien__Umfragen/Endbericht_dena-Netzstudie_II.PDF, Dezember 2010.

- [DFBK⁺09] DROSTE-FRANKE, B., H. BERG, A. KÖTTER, J. KRÜGER, K. MAUSE, J.-C. PIELOW, I. ROMÉY T. ZIESEMER: *Brennstoffzellen und virtuelle Kraftwerke*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [e4u10] <http://www.energy4u.org/energy4u/historie.html>, Dezember 2010.
- [een11] *E-Energy - Smart Grids made in Germany*. <http://www.e-energy.de/>, 2011.
- [Eur10] EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM. <http://www.smartgrids.eu>, Januar 2010.
- [FG08] FREUND, JAKOB KLAUS GÖTZER: *Vom Geschäftsprozess zum Workflow: Ein Leitfaden für die Praxis*. Carl Hanser Verlag München, 2008.
- [Gad10] GADATSCH, ANDREAS: *Grundkurs Geschäftsprozess-Management: Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis: Eine Einführung für Studenten und Praktiker*, 6. Auflage. Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2010.
- [GHJV94] GAMMA, ERICH, RICHARD HELM, RALPH JOHNSON JOHN VLISSIDES: *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Pearson Education, 1994.
- [GZ10] GERHARD WEISSMÜLLER ZOLTAN MESZAROS: *Virtuelle Kraftwerke braucht das Land*. Energy 2.0, Ausgabe 5:Seite 24 – 27, 2010.
- [HBS⁺09] HUNDT, MATTHIAS, RÜDIGER BARTH, NINGHONG SUN, STEFFEN WISSEL ALFRED VOSS: *Verträglichkeit von erneuerbaren Energien und Kernenergie im Erzeugungsportfolio*. , Universität Stuttgart - Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Oktober 2009.
- [HDTW10] HATZIARGYRIOU, NIKOS, ARIS DIMEAS, THOMAI TOMTSI ANKE WEIDLICH: *Energy-Efficient Computing and Networking*. Springer Verlag Heidelberg, 2010.
- [Heh09] HEHN, CHRISTIAN: *Konzeption und Implementierung einer Anwendung zum IT-Portfoliomanagement und -controlling im Kontext des J2EE-basierten Enterprise Java Programming Model (EJPM) von John Deere*. , Hochschule Mannheim - Fakultät für Informatik, 2009.
- [JBo11a] JBOSS: *Drools Homepage*. <http://www.jboss.org/drools/drools-flow.html>, Januar 2011.
- [JBo11b] JBOSS: *jBPM Homepage*. <http://www.jboss.org/jbpm>, Januar 2011.
- [Jen02] JENDRIAN, LARS: *Nutzungsentgelte elektrischer Energieverteilungsnetze*. Erich Schmidt Verlag GmbH Co., Berlin, 2002.

- [JFBM05] JOACHIM NITSCH, FRITHJOF STAISS, BERND WENZEL MANFRED FISCHEDICK: *Ausbau Erneuerbarer Energien im Stromsektor bis zum Jahr 2020*. http://www.wind-energie.de/fileadmin/dokumente/Themen_A-Z/PotenzialderEE/BMU_ausbau_ee.pdf, Dezember 2005. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- [kom11] <http://www.kombikraftwerk.de>, Januar 2011.
- [Kon08] KONSTANTIN, PANOS: *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung um liberalisierten Markt*, 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2008.
- [Kre10] KRENGEL, STEFAN: *Virtual Power System Allgäu Beitrag Institut für Hochspannungstechnik*. Modulbeschreibung des Steuerungsmodul, 2010.
- [KS09] KRÜGER, GUIDO THOMAS STARK: *Handbuch der Java-Programmierung*. Addison-Wesley, 2009.
- [lb10] *ZuhauseKraftwerk der Lichtblick AG*. <http://www.lichtblick.de>, Dezember 2010.
- [Leh10] LEHNHOFF, SEBASTIAN: *Dezentrales vernetztes Energiemanagement - Ein Ansatz auf Basis eines verteilten adaptiven Realzeit-Multiagentensystems*, 1. Auflage. Vieweg und Teubner Verlag, 2010.
- [Leu07] LEUSCHER, UDO: *Kurzschluss. Wie Unsere Energieversorgung teurer und schlechter wurde*. Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG Münster, 2007.
- [LR03] LEVI, PAUL ULRICH REMBOLD: *Einführung in die Informatik für Naturwissenschaftler und Ingenieure*, 4. Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien, 2003.
- [Nex11] NEXT KRAFTWERKE GMBH: *Homepage*. <http://www.next-kraftwerke.de/>, Februar 2011.
- [Obj10] OBJECT MODELLING GROUP: *Spezifikation BPMN 2.0*. <http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0>, Juni 2010.
- [Qua10] QUASCHNING, VOLKER: *Grundlastkraftwerke: Brücke oder Krücke für das regenerative Zeitalter?* Sonne Wind Wärme, Seite 10–15, Mai 2010.
- [Ras06] RASCHAUER, BERNHARD: *Handbuch Energierecht*. Springer Wien New York, 2006.
- [Ree04] REEKER, MARTIN: *Kostenentwicklung erneuerbarer Energien - Eine Erfahrungskurvenanalyse des Erneuerbare-Energien-Gesetzes*. Cuvillier Verlag Göttingen, 2004.

- [Sac09] SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN: *Weichenstellung für eine nachhaltige Stromversorgung*. http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/06_Hintergrundinformationen/2009_Thesen_Weichenstellungen_Stromversorgung_Hohmeyer.pdf, 5 2009.
- [Sac11] SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN: *Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung*. http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_Sondergutachten_100Prozent_Erneuerbare.pdf, Januar 2011.
- [Sch07] SCHUFFT, WOLFGANG: *Taschenbuch der elektrischen Energietechnik*. Carl Hanser verlag München, 2007.
- [SDvOG⁺09] SAINT-DRENAN, YVES-MARIE, AMANY VON OEHSEN, NORMAN GERHARDT, MICHAEL STERNER, STEFAN BOFINGER KURT ROHRIG: *Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche*. http://www.bee-ev.de/_downloads/publikationen/studien/2010/100119_BEE_IWES-Simulation_Stromversorgung2020_Endbericht.pdf, Dezember 2009.
- [Sie04] SIEDERSLEBEN, JOHANNES: *Moderne Softwarearchitektur*. dpunkt.verlag, 2004.
- [Sie11] SIEMENS AG: *Homepage Siemens DEMS*. <http://www.energy.siemens.com/hq/en/energy-topics/smart-grid/smart-distribution/dems.htm>, Februar 2011.
- [Tab06] TABELING, PETER: *Softwaresysteme und ihre Modellierung*. Springer, 2006.
- [vat11] *Virtuelles Kraftwerk der Vattenfall Europe AG*. <http://www.vattenfall.de/de/virtuelles-kraftwerk.htm>, Januar 2011.
- [VDE08] VDE: *Smart Distribution 2020 - virtuelle Kraftwerke in Verteilungsnetzen*. Verband der Elektronik Informationstechnik e.V., 2008.
- [Ver98] VEREINTE NATIONEN: *KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>, 1998.
- [Wol06] WOLFF, EBERHARD: *Spring*. dpunkt.verlag, 2006.