

## Kapitel 56

### Energieeffiziente Städte - Herausforderungen und Lösungen aus Sicht des Software Engineerings

Timo Greifenberg, Markus Look, Claas Pinkernell, Bernhard Rumpe

**Zusammenfassung:** Circa 40% der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich auf Gebäude und deren Betrieb zurückführen, weshalb deren energieeffizienter Betrieb eine wichtige Größe im Kampf gegen den Klimawandel darstellt. Die Beurteilung der Energieeffizienz setzt dabei adäquate Sensorik, gute Spezifikationstechniken für Zielvorgaben und Möglichkeiten zur aktiven Einflussnahme voraus. Durch die Umsetzung dieser Anforderungen werden moderne Gebäude zu komplexen, cyberphysischen Systemen und durch die zusätzliche Nutzung erneuerbarer Energien steht die Smart City von morgen vor völlig neuen Herausforderungen. Komplexe Erzeuger- und Verbrauchersituationen zwischen einzelnen Gebäuden aber auch ganzen Stadtquartieren führen zu einer Dezentralisierung des Energiemarktes und zu einem stark vernetzten IT Ökosystem. Dieser Beitrag beschreibt die Herausforderungen an diese Entwicklungen aus Sicht des Software Engineerings. Der Fokus liegt hierbei auf Konzepten, Methoden und Lösungen des Software Engineerings, die es erlauben die komplexen Vernetzungssituationen effizient und mit dem notwendigen Abstraktionsgrad zu beschreiben.

#### 56.1 Einleitung

Gebäude tragen heute mit ca. 40% der weltweiten Kohlenstoffdioxidemissionen maßgeblich zur globalen Erwärmung bei [1]. Getrieben durch die Klimaziele der Bundesregierung [2] stehen Städteplaner, Kommunen, Liegenschaftsbetreiber, aber auch private Bauherren vor neuen Herausforderungen. Für die Erreichung von

---

Timo Greifenberg  
RWTH Aachen,  
Software Engineering  
E-Mail: greifenberg@se-rwth.de

Markus Look  
RWTH Aachen,  
Software Engineering  
E-Mail: look@se-rwth.de

Claas Pinkernell  
RWTH Aachen,  
Software Engineering  
E-Mail: pinkernell@se-rwth.de

Bernhard Rumpe  
RWTH Aachen,  
Software Engineering  
E-Mail: rumpe@se-rwth.de



[GLPR15] T. Greifenberg, M. Look, C. Pinkernell, B. Rumpe:  
Energieeffiziente Städte - Herausforderungen und Lösungen aus Sicht des Software Engineerings.  
In: C. Linnhoff-Popien, M. Zaddach, A. Grahl (Hrsg.), Marktplätze im Umbruch:  
Digitale Strategien für Services im Mobilen Internet, Springer Berlin Heidelberg, 2015.  
[www.se-rwth.de/publications](http://www.se-rwth.de/publications)

Einsparungen in Höhe von 20% im Gebäudebestand bis 2020 und einen nahezu klimaneutralen Bestand bis 2050 ist mindestens eine Verdoppelung der Sanierungsrate von einem auf zwei Prozent jährlich notwendig.

Durch den Einsatz erneuerbarer Energien sind bereits heute Plusenergiehäuser [3] realisierbar. Häufig sind moderne Gebäudekonzepte dabei stark technisiert und können als cyberphysische Systeme betrachtet werden. Die Interaktion zwischen einzelnen Erzeuger- und Verbrauchersystemen sowie der Einbezug von Benutzer und Umwelt, lassen die Komplexität heutiger Gebäudeautomationssysteme drastisch steigen. Die Automation eines Gebäudes endet zwar oftmals noch an der Gebäudehülle, jedoch ist der Trend zu gebäudeübergreifenden Funktionen heute schon deutlich zu beobachten.

Die strukturelle Verdichtung von Stadtquartieren durch hocheffiziente Plusenergiehäuser stellt eine mögliche Lösung für die Erreichung der Klimaziele dar. Der Einsatz von Blockheizkraftwerken, Windenergieanlagen, Erdwärmesystemen, Solarthermie und Photovoltaik macht die Nachbarschaft von morgen zu einem effizienten Energieverbund. Durch die Vernetzung der Gebäude untereinander entsteht ein neues Konzept der Energieversorgung.

Die ehemals stark zentralisierten Versorgungsinfrastrukturen könnten durch ein feingranulares Versorgungsnetzwerk abgelöst werden. Es entstehen neue Märkte für den Energiehandel. Ein Großteil der Energie könnte zukünftig aus der direkten Nachbarschaft statt vom zentralen Energieversorger kommen. Für das gebäudeübergreifende Management ist eine Vielzahl technischer Infrastrukturen notwendig. Die Kommunikation der Systeme untereinander, bedarfsorientierte Versorgung, effiziente Nutzung und Speicherung der Energie sowie Einbeziehung der Nutzer stellen heutige IT-Infrastrukturen vor große Herausforderungen.

Der Austausch von Informationen, die Lösung von Schnittstellenproblemen, der automatisierte Handel von Energie, Datenschutz und Netzsicherheit sind nur einige der Aspekte, die es durch den Einsatz von Hard- und Software in Zukunft zu lösen gilt. Insbesondere die Softwaresysteme von morgen können maßgeblich zur Lösung dieser Probleme beitragen.

Nachfolgend sollen die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen an das Software Engineering am Beispiel energieeffizienter Städte betrachtet werden. Hierzu werden zunächst der Wandel des Energiemarktes und einige Szenarien beschrieben sowie die technologischen Treiber identifiziert. Im Anschluss werden die wichtigsten Aspekte und Herausforderungen an das Software Engineering beschrieben und mögliche Technologien, aktuelle Trends und exemplarische Forschungsarbeiten zur Begegnung dieser Herausforderungen vorgestellt.

## **56.2 Neue Märkte in Smart Cities**

Drei Viertel aller Europäer leben heutzutage in Städten und verbrauchen 70% der in der EU benötigten Energie [4]. Daher ist es gerade in Städten von besonderem Interesse eine hohe Energieeffizienz zu erreichen. Die energieeffiziente Stadt von

morgen ist eine hochtechnisierte Stadt. Dabei führen Visionen einer Smart City, wie sie in der Forschung [5, 6, 7] und von großen Unternehmen [8, 9, 10, 11] gesehen werden, weiter, als ICT für eine bessere Ressourcennutzung zu verwenden [12]. Sie zielen vielmehr darauf hin, auch eine stärkere Vernetzung zu erreichen. Gebäude, sowie die Bewohner der Stadt werden untereinander vernetzt, wodurch diese Zugang zu aktuellen Daten, Informationen und Verhaltenshinweisen bekommen und ihr persönliches Energiesparpotential nutzen können. Alleine dadurch lassen sich Einsparungen von bis zu 20% erreichen [13].

Im Folgenden werden potentielle Auswirkungen einer solche Smart City auf bestehende Märkte, sowie die mögliche Entstehung gänzlich neuer Märkte diskutiert. Dabei werden die wohl offensichtlichsten Marktänderungen am Energiemarkt zu finden sein. Die Motivation zur Umsetzung der Smart City ist die Schaffung einer möglichst energieneutralen oder sogar energiepositiven Gebäude-landschaft. Zum Erreichen dieser Ziele sollen zum einen ältere Gebäude saniert und zum anderen neue Plusenergiegebäude [3] erschaffen werden. Diese modernen Gebäude verfügen neben sehr guten Verbrauchswerten auch über die Möglichkeit Energie zu erzeugen und zu speichern. Beispiele dafür sind Photovoltaikanlagen mit deren Strom tagsüber Wärmespeicher aufgeladen werden, um nachts warmes Wasser zu erhalten. In diesem Beispiel sind Energieproduzent und Verbraucher dasselbe Gebäude. Denkbar ist jedoch auch, dass es sich bei Produzent und Verbraucher um verschiedene Gebäude handelt. So können Plusenergiegebäude andere Gebäude auf direktem Wege mitversorgen, was letztendlich zu energieneutralen Stadtquartieren führt. Im Unterschied zum klassischen Energiemarkt kommen zusätzliche Anbieter in Form der Plusenergiegebäude hinzu, was einen Wandel am Energiemarkt darstellt.

Neben der Möglichkeit andere Gebäude in ihrer direkten Nachbarschaft mitzuversorgen, besteht für die neuen Produzenten auch die Möglichkeit ihre überschüssige Energie in das zentrale Energienetz einzuspeisen. Welche dieser Varianten gewählt wird, hängt dabei in erster Linie von der zur Verfügung stehenden Infrastruktur und der zu handelnden Energieart ab. So ist es möglich Strom über eine wesentlich größere Distanz zu transportieren, als beispielsweise Wärme. Zudem kann das bestehende Stromnetz dazu genutzt werden, neuen Anbietern Zugang zum Strommarkt zu gewähren, während für den Wärmehandel im Allgemeinen nicht auf vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen werden kann, so dass neue Versorgungsleitungen zwischen den Handelnden verlegt werden müssten. Daher ist zu erwarten, dass beim Wärmehandel eher langfristige Verträge geschlossen werden, um trotz der initialen Kosten durch den Leitungsbau einen lukrativen Handel zu ermöglichen. Beim Stromhandel andererseits ist durch die bestehende Infrastruktur zu erwarten, dass auch Verträge über sehr kurze Zeiträume und sogar Spontankäufe möglich sind.

Somit sind zwei verschiedene Marktmodelle denkbar: die Stromverbraucher könnten weiterhin nur die Möglichkeit bekommen bei den großen Stromanbietern zu kaufen, welche dann zusätzlich als Zwischenhändler für den von den neuen Anbietern eingespeisten Strom dienen, oder neue Anbieter könnten bei Verwendung

des zentralen Stromnetzes durch Verrichtung einer Nutzungsgebühr an den Netzbetreiber direkt mit den Verbrauchern handeln. Dies wird durch das Vorhandensein von Angebots- und Verbrauchsinformationen ermöglicht. Darüber hinaus ist natürlich auch die Variante des eigenen Stromnetzes zwischen lokalen Anbietern und Verbrauchern denkbar, welches dann die gleichen Auswirkungen auf die Vertragsdauer der Handelnden hätte, wie bei der beschriebenen Situation des Wärmehandels.

Neben Informationen zu Angebot und Nachfrage sind abseits des Energiemarktes andere marktspezifische Änderungen im Bereich des Datenhandels zu erwarten. Die elektronische Datenerfassung von Gebäudedaten lässt neue Märkte für den Handel dieser Informationen entstehen. Durch Analyse der am Markt gehandelten Smart City Daten, entstehen durch eine auf den Teilnehmer zugeschnittene Verwendung der Daten neue Wertschöpfungsketten. Beispiele hierfür sind die Bereiche Smart Homes, e-Health oder kontextsensitive Services.

Weiterhin sind Veränderungen im Bereich des App-Marktes zu erwarten. Durch die Verfügbarkeit der Smart City Daten sind eine ganze Reihe neuer Apps für Privatpersonen denkbar, welche thematisch von der Statusanzeige des Energieverbrauchs, über die Erkennung von Energieoptimierungspotentialen bis hin zur Steuerung der eigener Verbrauchersysteme variieren. Die Voraussetzung dafür ist wiederum die Verfügbarkeit der Smart City Daten. Im Gegensatz zum Datenhandel müssen die App-Entwickler die Daten jedoch nicht zwangsläufig einkaufen, sondern können durch die neue Infrastruktur der Smart City Gebäude davon profitieren, dass Endbenutzer die Apps mit ihren eigenen Sensoren und Verbrauchersystemen selbstständig verbinden können.

Die starke Vernetzung in der Smart City bildet die Grundlage für den intensiven Austausch und Handel von Energie und Daten. Die dadurch hervorgerufenen Veränderungen an den verschiedenen Märkten bringen diverse Herausforderungen mit sich. Die bevorstehenden Herausforderungen an das Software Engineering werden im folgenden Abschnitt ausführlich erläutert.

### **56.3 Herausforderungen und Entwicklungen**

Herausforderungen aus Sicht des Software Engineerings für energieeffiziente Städte und die resultierenden neuen Märkte sind vielschichtig. Aus dieser Vielzahl wird hier auf benötigte Infrastrukturen zur Ermöglichung und zum Betrieb energieeffizienter Städte fokussiert. Im Wesentlichen zeichnen sich folgende Themenfelder ab, die heute mit Smart Grids, Bürgerbeteiligung, Bedienerfreundlichkeit, Stadtplanung, Systemsicherheit, Verkehrsleitsysteme, Integration von Elektromobilität und intelligent vernetzte Gebäude für Smart Cities bezeichnet werden. All diese Themengebiete stellen Szenarien und Herausforderungen, die in einer energieeffizienten Stadt behandelt und gelöst werden müssen, dar. Gleichzeitig haben diese Themenfelder aus Sicht des Software Engineerings gemein, dass sie auf der Interaktion heterogener Systeme und der Handhabung heterogener Daten basieren.

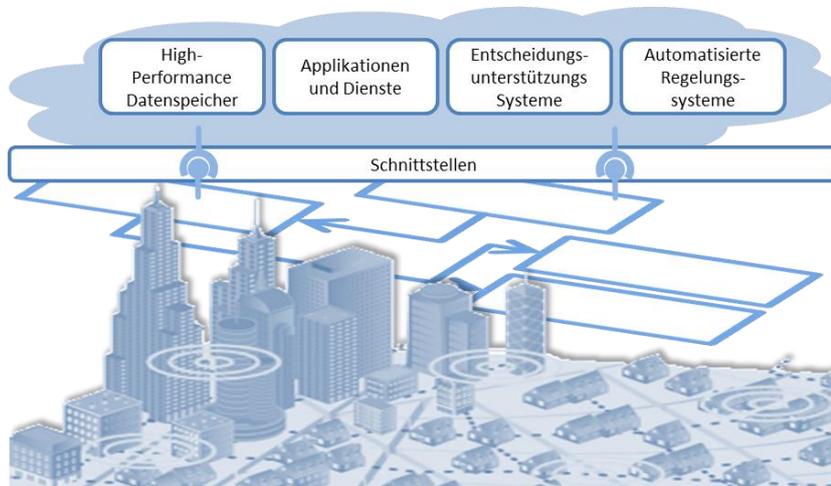


Abb. 1 Schematische Darstellung einer Smart City

In Abbildung 1 sind eine energieeffiziente, intelligente Stadt und einige wichtige Herausforderungen aus Sicht des Software Engineerings schematisch dargestellt. Durch aktuelle Cloud Computing Lösungen lassen sich die Anforderungen an Performanz, Skalierbarkeit und Ausfallsicherheit der eingesetzten Systeme erfüllen. Dennoch bleiben die Herausforderungen im Bereich Smart Data, wie ein gemeinsames Konzept zur Datenmodellierung und die Definition einheitlicher Schnittstellen ein aktuelles Forschungsfeld. Zudem entstehen durch die heterogene Servicelandschaft weitere Herausforderungen an High Level Infrastrukturen. Eine solche Servicelandschaft umfasst kontextsensitive und nutzerorientierte Dienste, aber auch entscheidungsunterstützende Systeme und automatische Regelungssysteme, die sich primär an Energieexperten richten.

Nachfolgend werden drei Themenfelder exemplarisch ausgewählt und vorgestellt. Das erste Themenfeld beschäftigt sich mit Smart Data Infrastrukturen. Das zweite Themenfeld befasst sich mit Infrastrukturen für eine Servicelandschaft, die Dienste zur Steuerung und Optimierung der energieeffizienten Stadt ermöglichen, während das letzte Themenfeld Entwicklungsparadigmen für solch hochkomplexe Systeme umfasst.

#### 56.4 Smart Data Infrastrukturen

In einer Smart City fallen viele heterogene Daten aus unterschiedlichsten Datenquellen an. Auch die Struktur dieser Daten stellt sich sehr heterogen dar. Hierbei spielen vor allem die Big Data Eigenschaften Volumen, Geschwindigkeit, Vielfalt, Variabilität und Komplexität eine große Rolle. Herausfordernd sind dabei eine effiziente Speicherung, eine effiziente Abfrage, sowie eine effiziente Analysemöglichkeit für die Massendaten. Die vielfältigen Datenquellen, wie z.B. Sensordaten

und Standortinformationen werden durch Integration und mit Hilfe geeigneter Analyseverfahren zu Smart Data.

Die Kompatibilität unterschiedlicher Daten ist für die Auswertung und Analyse besonders wichtig. Als besondere Herausforderung ist hierbei die effiziente und erweiterbare Definition von Transformationen zwischen den unterschiedlichen Datenmodellen zu nennen. Im Forschungsprojekt COOPERaTE [14] werden dazu beispielsweise domänenspezifische Sprachen zur Integration verschiedener Building Information Models zu einem City Information Model, welches die Ergebnisse des Forschungsprojekts SEMANCO [15] erweitert, verwendet. Auch in den Forschungsprojekten DIMMER [16], ALMANAC [17] und HESMOS [18] wird die Integration verschiedener Datenmodelle untersucht.

Die Grundlage für die Aufbereitung und Verarbeitung anfallender Daten stellt ein gemeinsames, erweiterbares Metamodell für Gebäude und Städte dar. Die besondere Herausforderung hierbei ist, dass dieses Metamodell alle anfallenden Informationen abbilden können muss. Zukünftige Erweiterungen durch neuartige Services müssen dabei ermöglicht werden.

### **56.5 High Level Management Infrastrukturen**

Nachdem bislang die Herausforderungen an das Software Engineering im Bereich Smart Data Infrastrukturen diskutiert wurden, werden nun einige Herausforderungen an Infrastrukturen einer heterogenen Servicelandschaft erläutert.

Eine wichtige Herausforderung an das Software Engineering stellen die Schnittstellen zwischen den verschiedenen Systemen dar. Ein Service für den optimierten Energieeinkauf muss, um die aktuellen Preise zu erhalten, mit den Systemen aller in Frage kommenden Energieanbieter kommunizieren können. Außerdem ist es denkbar, dass ein solcher Service auf verschiedene Gebäude oder Gebäudekomplexe anwendbar sein soll, was wiederum eine Kommunikationsmöglichkeit mit den zugehörigen Gebäudemanagementsystemen erforderlich macht.

Als Beispiel eines Services wird ein Demand / Response System betrachtet. Es ist heutzutage schwierig und kostspielig, die Energieproduktion an die Schwankungen des Energiebedarfs der Verbraucher anzupassen oder überschüssige Energie zwischenspeichern. Daher sollen die Verbraucher durch einen über den Tag variierenden Strompreis zu einem möglichst gleichmäßigen Verbrauch angeregt werden. Ist der Gesamtenergiebedarf hoch, so werden Verbraucher dazu angeregt Strom zu sparen und umgekehrt. Die Grundlage eines solchen Systems ist, dass aus dem aktuellen Energieverbrauch unmittelbar ein angepasster Energiepreis für die Verbraucher errechnet wird und dieser Preis auch unmittelbar an die Verbraucher weitergegeben wird. Damit beschäftigt sich beispielsweise die aktuellen, internationalen Forschungsprojekte WATTALYST [19] und CASSANDRA [20]. Hier werden der Stromverbrauch der Verbraucherseite auf feingranularer Ebene erfasst, betriebswirtschaftliche Anreize für die Verbraucher geschaffen und die zur Informationsbereitstellung benötigten Schnittstellen zur Verfügung gestellt. Herausfordernd ist dabei die Interaktion der Services zur Berechnung des aktuellen

Strompreises und denen zur verbraucherseitigen Preisabfrage und Benachrichtigung.

Für Gebäude mit Energiespeicher sind weitere intelligente Services denkbar, die bei günstigen Preisen den Einkauf zusätzlicher Energie und die Zwischenspeicherung in lokale Speicher des Gebäudes steuern, so dass diese bei einem hohen Preisniveau verbraucht werden kann. Um solche Services umsetzen zu können, könnte ein Condition / Action Ansatz verwendet werden. Im Gegensatz zu der klassischen, eher hardwarenahen, Gebäudeautomation, kann hier durch externe Softwaresysteme auf einer höheren Abstraktionsebene auf bestimmte äußere Einflüsse (Conditions) reagiert werden, wodurch dann optimierte Steuerungssignale (Actions) für die einzelnen Anlagen berechnet werden können.

Aus Software Engineering Sicht stellt zudem die Verteilung von Automatisierungs- bzw. Optimierungslogik eine Herausforderung dar. Grundsätzlich können zwei verschiedene Ansätze verfolgt werden: dezentrale Agenten, die für einen einzelnen Aufgabenbereich selbstständige Entscheidungen auf Basis der ihnen zugänglichen äußeren Parameter treffen oder zentrale Regelungsstrategien, welche die Gesamtsituation erfassen und auf dieser Basis optimierte Entscheidungen für mehrere Bereiche treffen können. Agenten bieten den Vorteil, dass sie durch den eingeschränkten Aufgabenbereich wenige Abhängigkeiten zu anderen Systemen aufweisen und somit leichter auf andere Gebäude übertragbar sind. Demgegenüber liefern zentrale Regelungen, die meistens für einzigartige Situationen konfiguriert sind, durch die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Gebäudekomponenten ein besseres Ergebnis. In dem Forschungsprojekt TRACE [21] werden solche Entscheidungsunterstützenden Systeme untersucht und umgesetzt. Dennoch bleibt die richtige Wahl des Ansatzes eine bislang ungeklärte Frage.

Zusätzlich entstehen durch nach außen sichtbare Schnittstellen von Gebäudemanagementsystemen Sicherheitsrisiken, die ebenfalls eine Herausforderung an das Software Engineering darstellen. So muss garantiert werden können, dass die Schnittstellen, die externen Services zur Verfügung gestellt werden, sicher sind. Services dürfen weder die Möglichkeit haben schädliche Aktionen durchzuführen, noch dürfen die Schnittstellen durch nicht berechtigte Services genutzt werden.

## **56.6 Entwicklungsparadigmen für Qualität und Effizienz**

Der technologische Fortschritt bei der Vernetzung von Gebäuden und Anlagen geht mit einem drastischen Anstieg der Komplexität einher. Die Anforderungen an die Automationssysteme und Regelungstechnik steigen, da immer mehr Kontextinformationen in die Regelstrategien einbezogen und die Regelkreise umfangreicher werden. Jedoch sind die heutigen Programmierparadigmen für solche Systeme, wie zum Beispiel Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS), Matlab/Simulink oder C, nur bedingt für die neuen Anforderungen geeignet.

Wichtige Mechanismen wie Abstraktion, Modularität und Kapselung, Wiederverwendbarkeit oder Hierarchisierung werden dabei nur unzureichend unterstützt oder fehlen sogar gänzlich.

Zudem sind fast dreiviertel aller Gebäudeautomationssysteme falsch installiert [22]. Ursache ist die drastisch steigende Komplexität moderner Anlagen und Systeme sowie ungeeignete Prozesse zur Umsetzung. In [23, 24] wird die mangelhafte Kopplung zwischen Spezifikation und Implementierung der Anlagen als eine wichtige Ursache identifiziert. Die Autoren haben den Prozess der *Aktiven Funktionsbeschreibung* eingeführt, um die Lücke zwischen Planung (Soll) und der Umsetzung (Ist) zu schließen. Hierfür wird eine formalisierte Beschreibung der Anlagenfunktionen durch eine an die Object Constraint Language (OCL) [25] angelehnte domänenspezifische Sprache genutzt, um im späteren Gebäudebetrieb die Einhaltung der Spezifikation anhand der Sensordaten des Betriebs automatisiert zu überprüfen. Als Softwareplattform zur Umsetzung der Methodik wurde der *energie navigator* [26] entwickelt.

Neben der Kopplung von Anforderungen und Umsetzung stellt auch die Implementierung der Systeme selbst eine Herausforderung dar. Werden heute noch eine Vielzahl der Systeme als SPS oder in C programmiert, könnte der Einsatz domänenspezifischer Beschreibungssprachen sowie geeigneter Codegeneratoren die Komplexität an dieser Stelle beherrschbar machen. Cyberphysische Systeme lassen sich beispielsweise auf Basis von Funktionsnetzen beschreiben [27], so dass von der eigentlichen Implementierung durch Verhaltensmodelle, zum Beispiel Zustandsautomaten, und geeignete Codegeneratoren abstrahiert werden kann. Ziel der generativen Entwicklung ist neben der Beherrschung der Komplexität durch den Einsatz geeigneter Modellierungssprachen, die Steigerung der Entwicklungseffizienz bei gleichzeitigem Anstieg der Softwarequalität.

Infrastrukturen zur Modellierung können einen wichtigen Beitrag im Umschwung der Programmierparadigmen leisten. Statt der Einführung neuer Programmiersprachen und Kommunikationsinfrastrukturen (Middleware, Protokolle etc.), kann die Entwicklung neuer Modellierungssprachen und Codegeneratoren einer Vielzahl der Probleme begegnen. Die dafür notwendigen Werkzeuge existieren schon heute [28, 29]. Die Entwicklung und Standardisierung konkreter Sprachen und Codegeneratoren sowie der Aufbau von Modellbibliotheken ist jedoch weiterhin ein aktuelles Thema.

### 56.7 Zusammenfassung

Die Entwicklung zu energieeffizienten - vielleicht sogar energieneutralen - Städten hat bereits begonnen. Die energieeffiziente Stadt von Morgen schafft neue Märkte und bietet Raum für neue Wertschöpfungskonzepte. Im Zentrum steht der lokal optimierte Energiehandel, der vermutlich mit einem drastischen Anstieg der Regelungskomplexität innerhalb, aber auch zwischen den Gebäuden, verbunden

sein wird. Hierdurch stellen sich viele neue Anforderungen an Gebäudeautomatonsysteme, City Management Infrastrukturen und Versorgungsinfrastrukturen. Um diesen gerecht zu werden, müssen Softwaresysteme einen wichtigen und zuverlässig nutzbaren Beitrag leisten. Das Software Engineering im Bereich komplexer cyberphysischer Systeme stellt bereits heute gute Lösungsansätze, Prozesse und Werkzeuge bereit. Mit den kommenden Systemanforderungen wachsen jedoch auch die Herausforderungen zur Weiterentwicklung softwaretechnischer Methoden und Infrastrukturen. Einige wichtige Aspekte und Konzepte, wie zum Beispiel Smart Data, Schnittstelleninteroperabilität und die effiziente und qualitätsgesicherte Entwicklung solcher Systeme wurden in diesem Beitrag vorgestellt.

### Literaturverzeichnis

- [1] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, „CO2-Gebäudesanierung – energieeffizient Bauen und Sanieren,“. <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/3-EnergieSparen/2012-04-18-co2-gebäude-sanierung-energieeffizient-bauen-und-sanieren.html>.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 Eckpunkte des BMUB,“ [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutz\\_2020\\_aktionsprogramm\\_eckpunkte\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutz_2020_aktionsprogramm_eckpunkte_bf.pdf).
- [3] M. N. Fisch, T. Wilken und C. Stähr, EnergyPLUS: Buildings and districts as renewable energy sources, Leonberg: Univ. Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch, 2012.
- [4] Europäische Kommission, „Commission launches innovation partnership for Smart Cities and Communities,“ [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-12-760\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-760_en.htm).
- [5] T. Mäkeläinen, K. Klobut, M. Hannus, M. Sepponen, T. Fernando, M. Bassanino, J. Masiar, F. Fouchal, T. Hassan und S. Firth, „A new methodology for designing energy efficient buildings in neighbourhoods,“ *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, pp. 871-878, 17-19 September 2014.
- [6] PLEEC - Planning for Energy Efficient Cities, 2013. <http://www.pleecproject.eu/>.
- [7] CONCERTO - Energy solutions for smart cities and communities, 2012. <http://concerto.eu>.
- [8] IBM Corporation, „Smarter Planet,“. <http://www.ibm.com/smarterplanet/>.
- [9] Schneider Electric, „Smart Cities,“. Available: [http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/solutions/sustainable\\_solutions/smart-](http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/solutions/sustainable_solutions/smart-)

cities.page.

- [10] Siemens AG, „Smart City,“ <http://www.siemens.de/branchensoftware-und-informationstechnik/smart-city.html>.
- [11] Hitachi, Ltd., „Smart City Infrastructure,“ <http://www.hitachi.com/products/smartcity/smart-infrastructure/>.
- [12] H. Chourabi, N. Taewoo, S. Walker, J. Gil-Garcia, S. Mellouli, K. Nahon, T. Pardo und H. J. Scholl, „Understanding Smart Cities: An Integrative Framework,“ *45th Hawaii International Conference on System Science (HICSS)*, January 2012.
- [13] Europäische Kommission, „Horizon 2020 Work Programme 2014 - 2015 10. Secure, clean and efficient energy Revised,“ [http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014\\_2015/main/h2020-wp1415-energy\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/main/h2020-wp1415-energy_en.pdf).
- [14] COOPERaTE <http://www.cooperate-fp7.eu/>.
- [15] L. Madrazo, A. Sicilia und G. Gamboa, „SEMANCO: Semantic Tools for Carbon Reduction in Urban Planning,“ *Proceedings of the 9th European Conference on Product and Process Modelling*, Reykjavik, 25-27 July 2012.
- [16] M. Del Giudice, A. Osello und E. Patti, „BIM and GIS for district modeling,“ *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, pp. 851-854, 17-19 September 2014.
- [17] ALMANAC - Reliable Smart Secure Internet Of Things For Smart Cities, 2013. <http://www.almanac-project.eu/>.
- [18] Hesmos Project, 2012. <http://hesmos.eu/>.
- [19] WATTALYST <http://www.wattalyst.org>.
- [20] G. Andreou, A. Symeonidis, C. Diou, P. Mitkas und D. Labridis, „A framework for the implementation of large scale Demand Response,“ *International Conference on Smart Grid Technology, Economics and Policies (SG-TEP)*, pp. 1-4, December 2012.
- [21] ESMAP - Energy Sector Management Assistance Program, „TRACE | Tool for Rapid Assessment of City Energy,“ 2013. [http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/ESMAP\\_EECI\\_TRACE\\_Brochure\\_2013.pdf](http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/ESMAP_EECI_TRACE_Brochure_2013.pdf).
- [22] P. Waide, J. Ure, N. Karagianni, G. Smith und B. Bordass, „The scope for energy and CO2 savings in the EU through the use of building automation technology,“ Report for the European Copper Institute. Waide Strategic Efficiency Limited, 2013.
- [23] C. Pinkernell, Energie Navigator: Software-gestützte Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden und technischen Anlagen, Shaker, Dissertation, 2014.

- [24] S. Plesser, Aktive Funktionsbeschreibungen, Institut für Gebäude- und Solartechnik, Dissertation, 2013.
- [25] Object Management Group, „Object Constraint Language - Version 2.4,“ 2014.
- [26] M. Fisch, M. Look, S. Plesser, C. Pinkernell und B. Rumpe, „Der Energie-Navigator - Performance-Controlling für Gebäude und Anlagen,“ *Technik am Bau (TAB) - Fachzeitschrift für Technische Gebäudeausrüstung*, April 2011.
- [27] J. O. Ringert, B. Rumpe und A. Wortmann, „MontiArcAutomaton: Modeling Architecture and Behavior of Robotic Systems,“ in *Workshops and Tutorials Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, 2013.
- [28] H. Krahn, B. Rumpe und S. Völkel, „MontiCore: a Framework for Compositional Development of Domain Specific Languages,“ *International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)*, Bd. 12, Nr. 5, 2010.
- [29] „Xtext,“ <http://www.eclipse.org/Xtext/>.