

Ein Erdbebenfrühwarnsystem für Istanbul

Earthquake Early Warning System for Istanbul

Prof. Dr. Joachim Fischer, Informatik, Humboldt-Universität, Berlin, Deutschland, fischer@informatik.hu-berlin.de
 Prof. Dr. Jens-Peter Redlich, Informatik, Humboldt-Universität, Berlin, Deutschland, jpr@informatik.hu-berlin.de
 Prof. Dr. Jochen Zschau, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Deutschland, zschau@gfz-potsdam.de
 Dr. Claus Milkereit, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Deutschland, online@gfz-potsdam.de
 Dr. Matteo Picozzi, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Deutschland, picoz@gfz-potsdam.de
 Dr. Kevin Fleming, Curtin University, Dept of Spatial Sciences, Australien, k.fleming@curtin.edu.au
 Dipl.-Inf. Björn Lichtblau, Informatik, Humboldt-Universität, Berlin, Deutschland, lichtbla@informatik.hu-berlin.de
 Dipl.-Inf. Frank Kühnlenz, Informatik, Humboldt-Universität, Berlin, Deutschland, kuehnlenz@informatik.hu-berlin.de
 Dipl.-Inf. Ingmar Eveslage, Informatik, Humboldt-Universität, Berlin, Deutschland, eveslage@informatik.hu-berlin.de
 Dipl.-Inf. Mihai Brumbull, Informatik, Humboldt-Universität, Berlin, Deutschland, brumbull@informatik.hu-berlin.de

Kurzfassung

Die Software-Entwicklung für drahtlos kommunizierende Ad-hoc Netze stellt insbesondere bei der Berücksichtigung von Informationen, die über Sensorik in Echtzeit erfasst und bewertet werden eine große Herausforderung dar. Mit dem hier vorgestellten Prototyp eines mit preiswerten Seismometern bestückten Maschennetzwerkes wird gezeigt, wie einerseits die kooperative Bewertung seismischer Erschütterungen in einem dichten geographischen Raster Erdbebenfrühwarnung und Rapid-Response innerhalb einer Metropole ermöglicht und andererseits wie durch Austausch der Sensorik eine von Infrastruktur unabhängige, dichte Messung von alternativen Umweltparametern realisiert werden kann. Neben der prototypischen Hardware/Software-Lösung werden das bereitgestellte Entwicklungsparadigma und die dafür entwickelte Werkzeugsammlung näher vorgestellt.

Abstract

Software development for wireless meshed ad-hoc networks is a challenging task, especially when real-time sensor data collection and evaluation are taken into account. The presented prototype of a wireless meshed network, equipped with low-cost seismic sensors, shows how cooperative analysis of seismic waves in a dense geographic grid could realize seismic early warning and rapid response in a urban area. By exchanging the sensors a self-organized, dense measurement of various environmental parameters could be realized, totally independent from existing infrastructure. In addition to the hardware/software prototype the provided development paradigm and the developed toolchain are presented.

1 Einführung

Seit August 2008 befindet sich in Istanbul ein Prototyp eines neuartigen Erdbebenfrühwarnsystems in einem Erprobungsstadium. Dieses System mit dem Namen SOSEWIN (Self-Organizing Seismic Early Warning Information Network) [1] ist das weltweit erste drahtlose seismische Maschennetzwerk, das mit preiswerter Sensorik ausgestattet ist und deren Defizite durch eine kooperativen Signalanalyse kompensiert werden.

SOSEWIN ist das Ergebnis einer mehrjährigen interdisziplinären Zusammenarbeit von Geo-Wissenschaftlern des Deutschen GeoForschungsZentrums (GFZ Potsdam) und Informatikern der Humboldt-Universität zu Berlin auf verschiedenen Ebenen. Begonnen hat die Kooperation im Rahmen des von der DFG geförderten Graduiertenkollegs METRIK (Modellbasierte Entwicklung von Technologien für selbstorganisierende dezentrale Informationssysteme im Katastrophenmanagement) [2], begleitet einerseits vom EU-Projekt SAFER (Seismic Early Warning for Europe) [3] und andererseits vom BMBF-Projekt EDIM [4] (modellgetriebener Entwurf, Implementierung und Test einer Infrastruktur preiswerter, selbstorganisierender Sen-

sorsysteme für die schnelle Erdbebeninformation und Frühwarnung).

Der Beitrag skizziert die allgemeinen Herausforderungen bei der Konzeption seismischer Infrastrukturen und beschreibt die dafür genutzte Hardware-Lösung (bei Nutzung handelsüblicher Komponenten) sowie die Architektur eines dafür entwickelten verteilten Softwaresystems. Zur Reduktion des Aufwandes zur Entwicklung solcher und ähnlicher Systeme wurde eine Entwicklungs- und Administrationsumgebung als integrierte Werkzeugsammlung bereitgestellt, die hier ebenfalls vorgestellt wird.

2 Die Herausforderung

Die Ursache aller schweren Erdbeben ist der langsame Aufbau und die plötzliche Freisetzung von Spannungen an der Grenze tektonischer Platten, die sich aneinander vorbei oder untereinander schieben. Auch Europa ist von dieser Art heftigster Kräftefreisetzungen nicht verschont. So bewegt sich beispielsweise an der Nordanatolischen Verwerfung in der Türkei die nördlich gelegene Eurasische Platte relativ zur südlichen Anatolischen Platte um

durchschnittlich zwei bis drei Zentimeter pro Jahr nach Osten. Wird diese Spannung nun stärker als die Reibung, verschieben sich die Gesteinspakete auf beiden Seiten der Verwerfung in einem jähem Ruck gewaltsam gegeneinander. Die dabei freigesetzte Energie wird in Form seismischer Wellen in alle Richtungen übertragen, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten.

Am 1. August 2006 wurde in Japan das erste landesweite Frühwarnsystem in Betrieb genommen, das über Beben ab einer Stärke von 3,5 alarmiert.

Erdbeben kündigen sich jedoch nicht an. Alle bisherigen Theorien zur präzisen zeitlichen Vorhersage von Erdbebenereignissen erwiesen sich als nicht haltbar. Bislang bleibt damit nur eine Alternative: Wenn die Erde, beginnend im jeweiligen Ereignisursprung (Hypozentrum¹) anfängt zu „wackeln“, könnten eventuell weiter entfernte Regionen vor den nahenden Bodenwellen gewarnt werden, wenn man sich die unterschiedlichen Laufzeiten der seismischen Wellen zu Nutze macht.

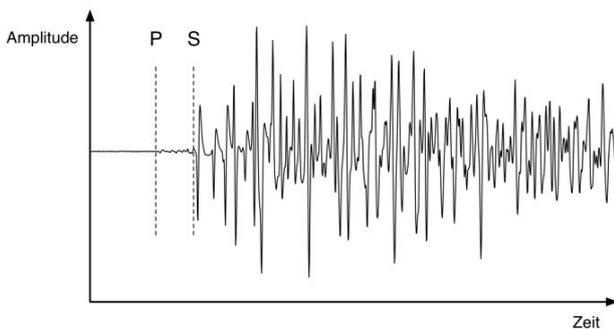


Bild 1 Von einem Seismometer erfasste Erdbeschleunigung einer P- und nachfolgender S-Welle

Interessanterweise sind dabei die schnellsten Wellen mit ~ 5 km/s (Primär oder kurz P-Wellen) energieärmer als die langsameren zerstörerischen Sekundärwellen (S-Wellen) mit ~ 3 km/s. Primärwellen sind demnach als Ankündigungen der gefährlichen S-Wellen bestens geeignet. Sie zu erkennen, um herannahende S-Wellen auch quantitativ zu prognostizieren, ist die zentrale Aufgabe eines Frühwarnsystems. In der Praxis bleiben dafür (in Abhängigkeit der Entfernung vom Hypozentrum) nur wenige bis 100 Sekunden nach Erkennung der P-Wellenfront. Die Entwicklung derartiger Frühwarnsysteme steckt jedoch noch in den Anfängen.

Im Einsatz befindliche Systeme sind lokal begrenzt und zudem nur in einfacher Form ausgelegt, z.B. in Taiwan, Türkei, Mexiko, Kalifornien und Rumänien. I.d.R. werden hier die Signale einzelner Seismometerstationen an eine Zentrale weitergeleitet oder direkt vor Ort ausgewertet.

Dabei werden nur wenige Bebenparameter aus den Rohdaten extrahiert. Schwellenüberschreitungen dienen dabei als Alarmierungskriterium. Üblicherweise werden hochempfindliche Seismometer nur dort installiert, wo Erschütterungen durch Verkehr, Baumaßnahmen u.ä. ausge-

¹ Das Epizentrum ist die Projektion der Hypozentrumlokalisierung auf die Erdoberfläche.

schlossen werden können. Welche Möglichkeiten bleiben aber, wenn potentielle Erdbebenherde in der Nähe einer Metropole liegen, wie beispielsweise in Istanbul (Bild 2)?

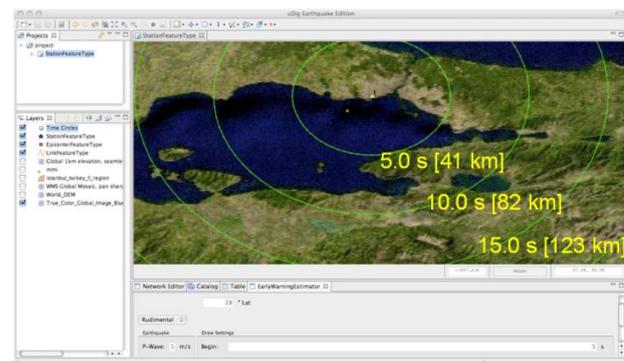


Bild 2 Frühwarnzeiten für Istanbul in Abhängigkeit der Lage der Epizentren

3 Frühwarnung und Rapid-Response

Trotz geringer Vorwarnzeiten sind jedoch eine Reihe möglicher Maßnahmen denkbar, die katastrophale Nachfolgeereignisse wie Gasexplosionen, Brände usw. stark reduzieren könnten, wenn sich mit Hilfe eines Frühwarnsystems Strom- und Gasleitungen abschalten ließen oder technische Anlagen steuernd beeinflusst werden könnten. In Japan werden beispielsweise Hochgeschwindigkeitszüge abgebremst und Brücken geschlossen. Bei allen bestehenden Frühwarnsystemen gibt es jedoch drei Hauptprobleme:

- *Erstens* wird unberechtigt davon ausgegangen, dass die Infrastruktur zur Mess- und Informationsübertragung durch ein schweres Beben nicht wirklich beeinträchtigt wird.
- *Zweitens* schreckt man häufig vor einer Alarmierung der Öffentlichkeit zurück, weil die Auslösung von Panik unter der Bevölkerung in ihrer Auswirkung schwer zu kalkulieren ist und im Fall von Fehlalarmen die Frage der Übernahme entstandener Kosten bislang nicht geregelt werden konnte.
- *Drittens* ist der Aufbau einer entsprechenden technischen und logistischen Infrastruktur äußerst kostspielig, so dass viele Länder in den von Erdbeben bedrohten Zonen entsprechende Finanzierungen nicht realisieren können.

Mit der Installation eines Frühwarnsystems lassen sich also lediglich die Auswirkungen von Erdbeben mildern. Nach einem schweren Beben kommt es somit immer darauf an, dass es Einsatzkräften schnellstens gelingt, ein hinreichend zuverlässiges Bild über die Lage (Zerstörungen, Tote, Verletzte usw.) zu erhalten, auch wenn die üblichen Kommunikationsinfrastrukturen zusammengebrochen sein sollten. Katastrophenexperten gehen davon aus, dass sie erste brauchbare quantitative Angaben durch eine Hochrechnung erhalten könnten, wenn denn die Spitzen der Erdbewegungen in einem Raster von 1 km für die

betroffenen Regionen vorliegen würden.

Diese zentrale Aufgabe eines sogenannten Rapid-Response-Systems ist wiederum mit drei Problemen verbunden:

- *Erstens* ist unklar, wie in belebten Regionen eine zuverlässige Signalanalyse betrieben werden kann.
- *Zweitens* muss der Zugang zu den Informationen der Seismometer-Stationen auch nach der Katastrophe möglich sein.
- *Drittens* ist der Kostenfaktor angesichts der notwendigen Anzahl solcher Stationen enorm.

4 SOSEWIN – Prototyp eines drahtlosen Maschennetzwerkes mit Sensorik

Das installierte System SOSEWIN ist nicht nur das weltweit erste drahtlose seismische Maschennetzwerk, sondern kann bei weiterem Ausbau das erste Erdbeben-Rapid-Response-System werden, das in einer dicht besiedelten Metropole mit Messtechnik vor Ort zum Einsatz kommt. Grundlage der Erdbebenfrühwarnung ist die bereits beschriebene Ausnutzung der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen, kombiniert mit einer kooperativen Signalanalyse, an der sich mehrere Seismometerknoten beteiligen.

Seit August 2008 läuft das System SOSEWIN in einer Konfiguration von 20 Knoten stabil und steht für verschiedene Studien zur Verfügung. Das Netz, im Stadtbezirk Ataköy auf Dächern 10-stöckiger Häuser mit Sichtkontakt installiert, ist per Internet mit dem Kandilli Observatorium in Istanbul, mit dem Deutschen GeoForschungszentrum Potsdam und dem Institut für Informatik in Berlin verbunden.

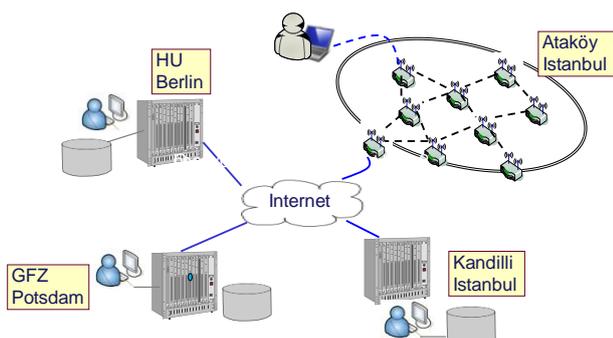


Bild 3 Erdbebenfrühwarn- und Rapid-Response-System für Istanbul

Seismometerbeobachtungen, inklusive permanent erfasseter Seismometerrohdaten sowie beliebige Statusinformationen der einzelnen Knoten und ihrer Verbindungen lassen sich von den entfernten Standorten abfragen.

Ebenso wird (zumindest in bestimmtem Rahmen) ein entfernter Softwarekomponentenaustausch unterstützt. Die Einbindung des Systems in die bestehende Frühwarninfrastruktur vor Ort steht jedoch noch aus. Nach Bereitstel-

lung eines Synthesizers für synthetische Erdbebendaten wurde des weiteren begonnen, systematisch die Reaktion des Systems szenariorientiert zu untersuchen. Weitere Erfahrungen mit der SOSEWIN-Technologie konnten durch die Anwendung unserer Netztechnik zur Gebäudeüberwachung im Zuge der intensiven Serie von Nachbeben des L'Aquila-Erdbebens in Italien (April 2009) [5] durch die GFZ-TaskForce Erdbeben gesammelt werden.

5 SOSEWIN – Technische Details

Die eingesetzte Hardware ist dabei mit kostengünstigen drahtlosen Routern vergleichbar, die heutzutage in vielen Haushalten zu finden sind.

Bild 4 gibt einen Überblick über die einzelnen Hardware-Komponenten. Die zentrale Komponente ist ein Embedded PC. In der ersten Version wurde hierfür das WRAP-Board (Wireless Router Applications Platform) der Firma PC Engines verwendet. Ausgestattet wurde das WRAP-Board ursprünglich mit einem AMD Geode Prozessor (x86er-Befehlssatz) mit einer Taktung von 266 MHz und 128 MB Arbeitsspeicher. Inzwischen kommen die leistungsfähigeren ALIX-Boards (500 MHz, 256 MB Arbeitsspeicher) derselben Firma zum Einsatz.

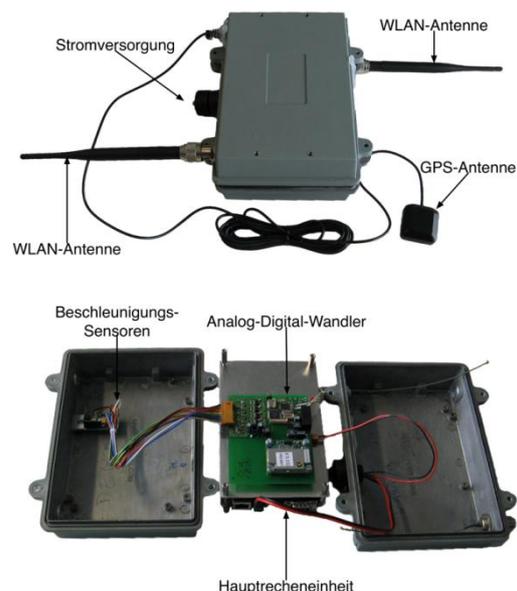


Bild 4 Ein SOSEWIN-Knoten

Hieran sind über die Mini-PCI-Schnittstelle zwei 802.11 WLAN-Karten angeschlossen. Die normale Konfiguration sieht den Betrieb des Maschennetzwerkes über eine WLAN-Schnittstelle vor, während die zweite Karte Benutzern erlaubt, sich mit einem Knoten über seinen Laptop wie mit einem handelsüblichen Access Point zu verbinden, und so auf den Netzwerkknoten oder das gesamte Netzwerk zuzugreifen. Aber auch andere Konfigurationen sind möglich, beispielsweise können beide Karten den Verkehr des Maschennetzwerkes weiterleiten falls mehr Bandbreite benötigt wird. Außerdem können die Karten

auch auf das 5 GHz-Band umgestellt werden, um Interferenzen mit anderen Netzwerken zu vermeiden.

Eine CompactFlash-Karte dient als Massenspeicher für die Software und der Archivierung der anfallenden Messwerte in einem dafür angelegten Ringspeicher. Über die USB-Schnittstelle ist ein eigen entwickeltes Digitizer-Board angeschlossen, das drei Beschleunigungssensoren (MEMS-Accelerometers) die orthogonal in X-, Y- und Z-Richtung orientiert sind mit einem Analog-Digital-Wandler misst und mit GPS-Daten (Zeit und Ort) verknüpft. Diese werden dann per USB dem PC bereitgestellt. Das modulare Design des Digitizer-Boards erlaubt aber auch den Anschluss fast beliebiger anderer analoger Sensoren. Die gesamte Hardware findet in einem DIN A5-großen und 4 cm dicken wetterfesten Metallgehäuse Platz. Weiterhin existiert ein Ethernet-Anschluss, über den als Gateways fungierende Knoten mit dem Internet verbunden werden können, und so auf ein SOSEWIN-Netzwerk weltweit zugegriffen werden kann. Dies ist notwendig um das in Istanbul installierte Netzwerk administrieren oder in bestehende IT-Infrastrukturen integrieren zu können.

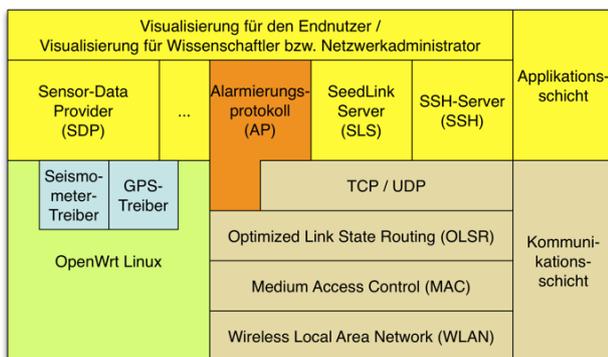


Bild 5 Die SOSEWIN-Software-Architektur

Die Software der SOSEWIN-Knoten besteht aus einer mehrschichtigen Software-Architektur (s. Bild 5). Das Betriebssystem der SOSEWIN-Knoten, OpenWrt [6], ist eine spezielle für eingebettete Systeme entwickelte Linux-Distribution, die die üblichen und für die Funktion als Maschennetzwerk nötigen Softwarekomponenten integriert, wie z.B. das TCP/IP-Kommunikationsprotokoll und den SSH-Server-Dienst.

Für die Wegewahl im Maschennetzwerk wird das selbstorganisierende Routingprotokoll OLSR (Optimized Link State Routing) [7] eingesetzt, das sich in offenen Netzwerken wie dem Freifunk-Netzwerk in Berlin für hunderte von Knoten bewährt hat. Auf Anwendungsebene sind die wichtigsten Komponenten der Seedlink-Server und das Alarming Protocol. Ersterer archiviert und stellt die anfallenden Rohdaten bereit, während das Alarming Protocol die Logik für eine kooperative Entscheidung über ein möglicherweise gerade stattfindendes Erdbeben und die Alarmierung in diesem Fall realisiert.

6 SOSEWIN – Software-Entwicklung

Bei der Entwicklung der für die Anwendung benötigten IT-Infrastruktur kam ein modellgetriebenes Entwicklungsparadigma zum Einsatz, das eine Konzeptüberprüfung und Fehleranalyse in der Design-Phase der Systementwicklung zum Ziel hat.

Unterstützt wird dieses Paradigma durch ein bereitgestelltes GIS-basiertes Framework, welches in Form einer integrierten Umgebung Werkzeuge sowohl zur modellgetriebenen Entwicklung als auch zur Administration derartiger realer Netzwerke bereitstellt. Als eingesetzte Modellbeschreibungsmechanismen kommen bewährte und standardisierte Modellierungssprachen zum Einsatz, ähnliches gilt für die eingesetzten Basistechnologien.

Kern für die Integration der Werkzeuge ist ein Experiment-Managementsystem.

Das Entwicklungsparadigma, die integrierte Werkzeugsammlung und das Experiment-Managementsystem werden im Folgenden genauer betrachtet.

Bei der Darstellung wird deutlich werden, dass die im Zusammenhang mit der SOSEWIN-Entwicklung entstandene werkzeugunterstützte Methodik allgemeingültiger ist und insbesondere für die Einsatzvorbereitung unterschiedlicher Maschennetze mit austauschbarer Sensorik, austauschbarer kooperativer Signalanalyse und austauschbarer Alarmierungssoftware o.ä. angepasst werden kann.

6.1 SOSEWIN-Paradigma einer modellgetriebenen Software-Entwicklung

Das SOSEWIN-Entwicklungsparadigma [8] geht von der Bereitstellung von Struktur- und Verhaltensmodellen des zu erstellenden verteilten Systems zur Beobachtung und Bewertung seismischer Signale aus. Dabei werden die

- statische und dynamische Semantik des SOSEWIN-Systems beschrieben,
 - simulative Verhaltensanalysen bei Variation bzw. Modifikation von
 - angenommenen Erdbebenereignissen,
 - Signalanalyseverfahren,
 - betroffenen geografischen Regionen,
 - aufgebauten Netztopologien,
 - alternativen Softwarearchitekturen und verwendeten Protokollen
- durchgeführt und
- letztendlich die automatische Codegenerierung für die spezifische SOSEWIN-Applikationssoftware realisiert.

Kern dieses Paradigmas ist also die geeignete Modelldarstellung, ihre Interpretation sowie die Transformation und das alles selbstverständlich werkzeugunterstützt.

Typisch für die Anwendung des Paradigmas ist die Durchführung einer Vielzahl systematischer simulativer Tests, die sowohl funktionale als auch nichtfunktionale Eigenschaften untersuchen und bewerten bevor der Zielcode erzeugt wird. Ohne die Bereitstellung eines geeigneten

ten Experiment-Managementsystems mit Datenbankanbindung wäre auch diese Aufgabe nicht zu bewältigen gewesen.

Von besonderem Gewicht ist die Tatsache, dass die validierte Verhaltensmodellierung drahtlos kommunizierender Systeme gegenwärtig noch einen Forschungsbedarf aufweist, wo Fortschritte ohne Vergleiche von realem und modelliertem Verhalten undenkbar wären. Die Nutzung des für SOSEWIN entwickelten Experiment-Managementsystems zur Erfassung geloggtter Ereignisse im realen Netzwerk (in Istanbul oder anderswo) und des Vergleiches mit Simulationsergebnissen ist damit ein weiterer wichtiger Aspekt des SOSEWIN-Entwicklungsparadigmas.

Da es sowohl für den Test des realen Systems als auch seiner Simulationsmodelle wiederum bereitgestellter Datensätze verschiedener angenommener Erdbebenereignisse bedarf, die für reale oder gedachte geographische Knotenpositionen vorliegen müssen, ist die synthetisierte Rohdatenbereitstellung eine weitere Anforderung für die Umsetzung des SOSEWIN-Entwicklungsparadigmas.

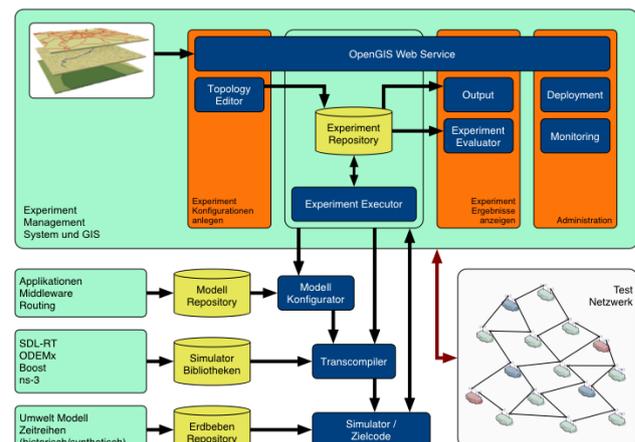
6.2 Architektur der SOSEWIN-Entwicklungs- und Administrationsumgebung

Die Entwicklung eines selbstorganisierenden Erdbeben-Frühwarn- und Rapid-Response-Systems mit Signalanalyse, verteiltem Alarmierungsprotokoll und Routing-Protokollen stellt eine komplexe Aufgabe dar. Die Umsetzung des SOSEWIN-Paradigmas geht davon aus, dass der Implementation und Installation auf der Zielplattform umfangreiche Modelluntersuchungen vorausgehen. Dabei kommen verschiedene Beschreibungssprachen für die unterschiedlichen Modelle zur Beschreibung von Funktionalität, nichtfunktionaler Leistungsparameter und Umgebungseinflüssen zum Einsatz. Die Untersuchung der durch die Modelle beschriebenen Systeme auf Leistungsfähigkeit und Korrektheit erfolgt jeweils durch Simulation der dynamischen Verhaltensmodelle. Die Erstellung von Simulatoren aus den Modellen ist ein mehrstufiger Transformationsprozess, wobei Transcompiler-Technologien zur Abbildung unterschiedlicher Modellierungssprachen nach C++ zum Einsatz kommen. Danach erfolgt die Kompilation der erzeugten C++-Dateien und das Linken mit Bibliotheken der in C++ implementierten Simulationswerkzeuge, woraus ausführbare Simulatoren entstehen. Diese können dann unter Verwendung einer geeigneten Last für die Analyse verwendet werden.

Die Editoren zur Erstellung unterschiedlicher Modelle, die Repositories zur Speicherung dieser Modelle, die Kompilations- und Transformationswerkzeuge, der Synthesizer von Erdbebenendaten, die Simulationsbibliotheken und die jeweils erzeugten Simulatoren bilden zusammen mit dem Experiment-Managementsystem die SOSEWIN-Entwicklungs- und Administrationsumgebung. Bild 6 zeigt überblicksmäßig die Architektur dieser Umgebung. Das Experiment-Managementsystem ist die zentrale Komponente. Es unterstützt mit einem Topologie-Editor

die Planung, Konfiguration und automatische Ausführung von Experimenten unter Verwendung von Modellen und Simulatoren eines Sensornetzes. Darüber hinaus wird auch der experimentelle Test des realen Systems bei vorherigem automatischen Softwarekomponentenaustausch und entfernter Umstellung der Sensordatenerfassung auf die Entgegennahme von Umgebungsdaten aus eingespielten Dateien unterstützt. Zusätzlich wird die Speicherung, Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse unterstützt.

Bild 6 Architektur der SOSEWIN-Entwicklungs- und Administrationsumgebung



Der graphische Topologie-Editor basiert auf einem Geographischen Informationssystem (GIS), welches wiederum auf der OpenGIS Web Service Architektur des Open Geospatial Consortium (OGC) [9] aufsetzt. So lassen sich beispielsweise leicht mit dem OGC-Standard Web Feature Service (WFS) [10] Knoten in eine bestehende Netztopologie einfügen, ändern und entfernen.

Die vom Managementsystem benutzten Modellrepositories dienen der Verwaltung von Zustandsautomatenmodellen der Anwendungsprotokolle für die kooperative Signalanalyse und Alarmierung in unterschiedlichen Stufen (Knotenalarm, Gruppenalarm, Systemalarm). Unterstützt werden Modelle in den Sprachen SDL(-RT) [11] [12], UML [13], ASN.1 [14] und C++ für die Verhaltensdarstellung von Softwarekomponenten der Anwendungs-, Middleware- oder Routing-Protokollebene.

Der Modell-Konfigurator kennt die Zielplattform von SOSEWIN, kann dementsprechend plattformspezifische Software-Artefakte einsetzen um den finalen Cross-Compilationsprozess vorzubereiten. Weiterhin legt er spezifische Eingabeparameter, wie z.B. Schwellwerte für das P-Wellen-Detektionsverfahren und für die Auslösung unterschiedlicher Alarmierungsstufen fest und speichert die Gesamtheit der Konfigurationseinstellung.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit SOSEWIN als Prototyp eines mit Sensorik ausgestatteten, drahtlos kommunizierenden Maschennetzwerkes ist es insbesondere gelungen, den zentralen Anspruch zu un-

termauern, dass selbstorganisierende Systeme in Gestalt derartiger Netztypen durch die Miniaturisierung ihrer Knoten, durch autonome Adaptionsfähigkeit und durch niedrige Kosten völlig neue Möglichkeiten eröffnen, komplexe Umweltprozesse zu messen und in Echtzeit kooperativ zu analysieren.

Mehrere Aspekte kamen hier gleichzeitig vorteilhaft zum Tragen.

Der geringe Knotenpreis von ca. 600,-€ (im Wesentlichen durch die Güte der verwendeten Low-Cost-Seismometer bestimmt) erlaubt eine wesentlich höhere Knotendichte eines Seismometernetzes, die sich in der Qualität einer flächendeckenden Beobachtung von Erschütterungsspitzen niederschlägt.

Selbstorganisation hilft den eventuellen Ausfall von Knoten (zumindest in gewissen Grenzen) durch das Netz zu kompensieren. Die Kooperation der Knoten bei der Analyse seismischer Wellen ermöglicht die Kompensation von Fehlinterpretationen einzelner Knoten bei der punktuellen Analyse des Umweltphänomens und gestattet den Einsatz in einer belebten Metropole (hier mit der praktikablen Einschränkung, nur Ereignisse ab der Erdbebenstärke 5 zu erkennen).

Das für SOSEWIN genutzte modellgetriebene und über eine integrierte Werkzeugsammlung unterstützte Entwicklungsparadigma erwies sich als äußerst qualitätsverbessernd und zeit- und ressourcensparend und kann für die Entwicklung anderer flächendeckender Umweltprozessanalyseverfahren angepasst werden.

Die Entwicklung von SOSEWIN profitierte von der Entwicklung von Basistechnologien des interdisziplinären DFG-Graduiertenkollegs METRIK, das ab Oktober 2010 in einer zweiten Förderphase fortgesetzt wird. Ab September 2010 wird über einen vom BMBF geförderten Technologietransfer in die Wirtschaft, die Serienproduktion von SOSEWIN-Knoten ermöglicht, zunächst für Forschungszwecke, später für den realen Einsatz, um tatsächlich große, flächendeckende Netzwerke studieren und einsetzen zu können.

8 Literatur

- [1] Fleming, K.; Picozzi, M.; Milkereit, C.; Kühnlenz, F.; Lichtblau, B.; Fischer, J.; Zulfikar, C.; Özel, O.; SAFER and EDIM working groups: The Self-organizing Seismic Early Warning Information Network (SOSEWIN). *Seismological Research Letters*, 80, 5, 2009, S. 755-771
- [2] Model-based Development of Technologies for Self-organizing Systems, <http://www.gk-metrik.de>
- [3] SAFER – Seismic eArly warning For EuRope, <http://www.saferproject.de>
- [4] Erdik, M.; Fahjan, Y.; Özel, O.; Alcik, H.; Mert, A.; Gul, M.: Istanbul Earthquake Rapid Response and the Early Warning System. *Bulletin of Earthquake Engineering* 1, 157-163 (2003)
- [5] Picozzi, M.; Ditommaso, R.; Parolai, S.; Mucciarelli, M.; Milkereit, C.; Sobiesiak, M.; Di Giacomo, D.;

- Gallipoli, M. R.; Pilz, M.; Vona, M.; Zschau, J. (2010): Real time monitoring of structures in task force missions: the example of the Mw=6.3 Central Italy Earthquake, April 6, 2009, *Natural Hazards*, 52, 2, 253-256.
- [6] OpenWrt. <http://www.openwrt.org>
- [7] OLSR, RFC 3626. <http://tools.ietf.org/html/rfc3626>
- [8] Ahrens, K.; Eveslage, I.; Fischer, J.; Kühnlenz, F.; Weber, D.; The challenges of using SDL for the development of wireless sensor networks. *Proceedings 14th System Design Languages Forum*, Bochum
- [9] Open Geospatial Consortium (OGC). <http://www.opengeospatial.org>
- [10] OGC: OpenGIS Web Feature Service (WFS) Implementation Specification. <http://www.opengeospatial.org/standards/wfs>
- [11] ITU-T: Z.100: Specification and Description Language (SDL).
- [12] SDL-RT. <http://www.sdl-rt.org>
- [13] OMG: Unified Modeling Language. <http://www.omg.org/spec/UML/>
- [14] ITU-T: X.690 ASN.1 Encoding Rules: Specification of Basic Encoding Rules (BER).