

Herausforderungen der verteilten Ereigniserkennung in drahtlosen Sensornetzen

Norman Dziengel, Marco Ziegert, Stephan Adler, Zakaria Kasmi, Jochen Schiller, Fachbereich Mathematik und Informatik, Freie Universität Berlin, Deutschland {dziengel, ziegert, adler, kasmi, schiller}@inf.fu-berlin.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag stellen wir die Integration einer verteilten Ereigniserkennung in einem realem Zaunüberwachungssystem mit den daran gekoppelten Herausforderungen vor. Die verteilte Ereigniserkennung vereint die lokale Intelligenz eines Sensorknotens mit dem verteilten Weitblick eines Sensornetzes, indem die Daten eines jeden Sensorknotens lokal vorverarbeitet werden und deren gemeinsame Bedeutung im Sensornetz evaluiert wird. Ereignisse können unterschiedlichster Ausprägung sein, angefangen von Fehlfunktionen in Fabriken bis hin zu Einbrüchen in gesperrte Areale. Die Umsetzung in die Zaunüberwachung fordert zudem eine eigenständige Hardware- und Gehäuseentwicklung, sowie ein geeignetes Energiemanagement.

1 Einleitung

Drahtlose Sensornetze bestehen aus mehreren Kleinstcomputern, die Umgebungsdaten mit integrierter Sensorik erfassen und verarbeiten können. Mittels eines Funktransceivers können Informationen im Netz ausgetauscht und verteilt werden. In der Forschung wird zunehmend versucht die Sensorknoten nicht mehr als reine Datensammler zu betrachten, sondern Verfahren zu entwickeln, die es erlauben, die Sensorknoten zusammenarbeiten zu lassen. Die Methode der verteilten Ereigniserkennung erlaubt es uns definierte und trainierte Ereignisse wie Naturkatastrophen, Maschinendefekte oder Einbrüche in gesperrte Areale mit mehreren Sensorknoten kooperativ zu erfassen, ohne die Rohdaten zunächst an eine Senke schicken zu müssen. Das Versenden von Rohdaten über Multi-Hop Routen und damit energetisch teure Funkstrecken wird durch eine dezentrale Datenauswertung verhindert. Das Ziel ist es ein optimales Verhältnis aus Energiebelastung und Präzision der Datenerfassung oder zeitnaher Datenübermittlung zu ermöglichen. Im konkreten Anwendungsfall wollen wir zeigen, welche Herausforderungen uns bei der Realisierung einer echten Implementierung begegnen, wenn die Sensorknoten inklusive Gehäuse und Energieversorgung, in einen Zaun zur kooperativen Überwachung integriert werden.

1.1 Verwandte Arbeiten

Ghasemzadeh et al. zeigen in [1] eine Bewegungserkennung innerhalb eines Wireless Body Area Network. Sie zerlegen dafür die Bewegung der Versuchsperson in Segmente und überführen diese in Buchstaben um einen Stringmatching-Ansatz einsetzen zu können. Ihre Implementierung wurde jedoch nicht auf echten Sensorknoten realisiert, sondern mit MATLAB simuliert. Typische Ansätze zur Ereigniserkennung, wie z.B. das Zaunüberwachungssystem in [2] nutzen eine Schwellwerterkennung um Umgebungsveränderungen wahrzunehmen. Konkrete Ereignisse werden jedoch nicht erkannt. Im Szenario einer Kohlenmienenüberwachung von Li et al. [3] zur Erkennung von Gaslecks, wurden die Rohdaten auf einer Basis-

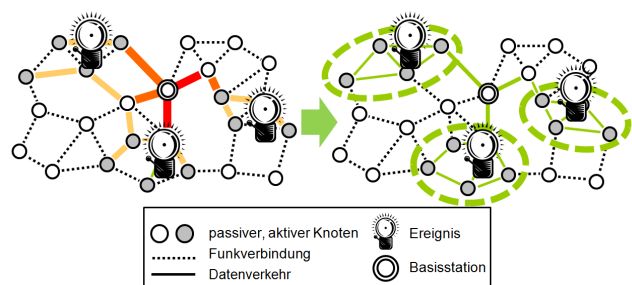


Bild 1 Zentralisierte Datenauswertung (links) wird durch dezentrale Datenauswertung (rechts) abgelöst

station gesammelt und ausgewertet. Zur Datenflussoptimierung wurden Plausibilitätsprüfungen im Sensornetz realisiert. Im Gegensatz zu den genannten Arbeiten stellen wir eine Herangehensweise vor, deren Datenauswertung auf komprimierten und charakterisierenden Merkmalen basiert, die im Sensornetz verteilt und ausgewertet werden. Die Implementierung findet auf den Sensorknoten statt und verwendet eigens dafür entwickelte Sensorknoten und Gehäuse, die eine vollständige Integration der Hardware in den Zaun ermöglichen. In unserem Fall werden klassische Bauzaunelemente (2m×3,5m) eingesetzt.

2 Verteilte Ereigniserkennung

Das Ziel der verteilten Ereigniserkennung ist eine netzinterne Datenauswertung, um eine zentralisierte Rohdatenauswertung zu vermeiden. Schematisch ist in Bild 1 (links) der herkömmlich Ansatz der zentralen Datenauswertung abgebildet. Hier werden alle Ereignisdaten immer zur Basisstation gesendet, wodurch Kommunikationsrouten nahe der Basisstation besonders oft verwendet werden. Die Folgen sind erheblicher Energieverbrauch durch den Einsatz des Transceivers zur Datenübertragung und der so verursachte frühzeitige Ausfall von Sensorknoten nahe der Basisstation. Das Ausfallen von Sensorknoten auf häufig verwendeten Routen schränkt die Lebensdauer und somit die Einsatzmöglichkeiten von drahtlosen Sensornetzen erheblich ein. In der rechten Darstellung von Bild 1 werden dagegen die Ereignisdaten bereits auf den Sensorknoten vorverarbeitet und charakteristische

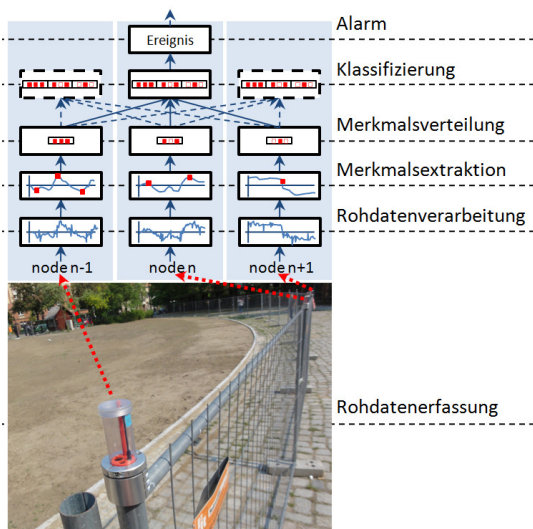


Bild 3 Von der Datenaufnahme bis hin zur Datenverarbeitung in der verteilten Ereigniserkennung

Fingerabdrücke des Ereignisses erzeugt. Diese Fingerabdrücke, in der Mustererkennung Merkmale genannt, werden in der 1-Hop-Nachbarschaft verteilt und evaluiert. Nur im Falle eines relevanten Ereignisses wird dieses Ergebnis an die Basisstation versendet, wodurch die Kommunikation minimiert wird.

Die Ereigniserkennung besteht aus zwei Modulen, dem Training und der Erkennung. In beiden Modulen kommen die folgenden Prozesse zum Einsatz: Rohdatenerfassung, Rohdatenverarbeitung, Merkmalsextraktion, Merkmalsverteilung, Klassifizierung und Alarm, siehe Bild 3.

Zunächst werden während des a priori durchgeführten, überwachten Trainings die zu erkennenden Ereignisse mit den Sensorknoten trainiert. Die dabei anfallenden Rohdaten werden zunächst vorverarbeitet. In der Vorverarbeitung werden Filterfunktionen eingesetzt, die die Rohdaten glätten, um Hintergrundrauschen zu entfernen. Die Segmentierung bestimmt mittels Hysterese den Ereignisanfang und das Ereignisende innerhalb der Rohdaten. Nachfolgend können die Daten applikationsabhängig wert- und/oder zeitnormalisiert werden. Auf den Sensorknoten werden im Training Merkmale erzeugt und für jede Klasse in Form eines Merkmalvektors an die Basisstation gesendet. Die Merkmalsbildung reduziert die hohe Dimensionalität der Daten, um gleichzeitig die Charakteristik der Ereignisse zu erhalten. Mittels einer klassischen Kreuzvalidierung werden geeignete Merkmalskombinationen bewertet. Die Bewertung findet mit dem im eingesetzten Prototyp-Klassifizierer verwendeten euklidischen Abstand statt. Zusätzlich können die Merkmalskombinationen wahlweise unter Berücksichtigung der Topologie gewichtet werden, wobei die Topologie die relative Lage der Sensorknoten zum Ereignis ausdrückt.

Im Detail wirkt sich die Gewichtung der relativen Sensorknotentopologie zum Ereignis auf zwei Kriterien aus. Das erste Kriterium wird durch die Häufigkeit bestimmt, mit der ein Merkmal für unterschiedliche Sensorknoten ausgewählt wurde. Ein oft genutztes Merkmal bei der Merkmalsauswahl wird besonders bevorzugt. Das zweite Krite-

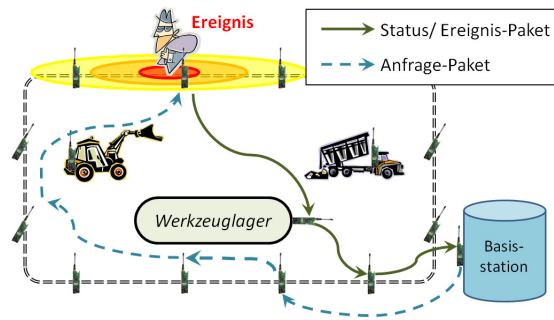


Bild 2 Verteilte Ereigniserkennung auf einer Baustelle

rium wird durch die Anzahl der Merkmale bestimmt die ein Sensorknoten bereits beigesteuert hat. Ist die Anzahl hoch, werden Merkmale für diesen Knoten bevorzugt ausgewählt [5]. Die aus den Trainingsdaten erzeugten Merkmalsvektoren werden Prototypen genannt. Das Training endet, nachdem die Prototypen auf die Sensorknoten übertragen wurden. Die auftretenden Varianzen in den Trainingsdaten werden genutzt, um einen Radius um die Prototypen zu definieren, die sogenannte Klassifizierungsregion. Innerhalb der Klassifizierungsregionen liegende Ereignisse können als gültig angesehen werden. Im Erkennungsmodus wird nahezu das gleiche Verfahren wie im Training auf den Sensorknoten angewendet, siehe Bild 3. Zunächst werden die Rohdaten vorverarbeitet und mit der anschließenden Merkmalsextraktion auf die zuvor festgelegten Merkmale reduziert. Während der Merkmalsverteilung senden die Sensorknoten ihre Merkmale mittels Broadcast an ihre 1-Hop-Umgebung. Die betroffenen Knoten fusionieren die Merkmale zu einem zunächst unklassifizierten Merkmalsvektor und vergleichen diesen im Prototyp-Klassifizierer über den euklidischen Abstand mit den zuvor trainierten Prototypen. Bei erfolgreicher Klassifizierung kann das Ereignis kontextbedingt als Alarm eingestuft und zur Basisstation gesendet werden. Liegt das Ereignis außerhalb aller Klassifizierungsregionen, wird es zurückgewiesen [6].

3 Anwendung

Auf Baustellen werden Zäune eingesetzt, um den Zugang zum Baugelände zu sichern. Da es im Baustellenbereich zu jährlichen Diebstahlschäden im mehrstelligen Millionenbereich kommt, ergibt sich daraus der Bedarf digitale Systeme zur Zaunüberwachung zu erforschen. Wir haben die verteilte Ereigniserkennung für die Anwendung einer Baustellenüberwachung realisiert, siehe Bild 2. Jedes Zaunelement wird derart mit Sensorknoten ausgestattet, dass ein möglichst präzises Abbild von Überwindungs- und Erschütterungsereignissen direkt am Zaun erstellt werden kann. Der Aspekt der verteilten Ereigniserkennung an Zäunen nutzt insbesondere die multiple Sicht auf ein Ereignis aus, die hier durch die Kopplung der Zaunelemente ermöglicht wird [6]. Eine Schwingung oder Erschütterung eines Zaunelementes wird innerhalb des Zaunes mechanisch übertragen. Wir betrachten zunächst vier unterschiedliche Ereignisse. Die Ereignisse des Schüt-

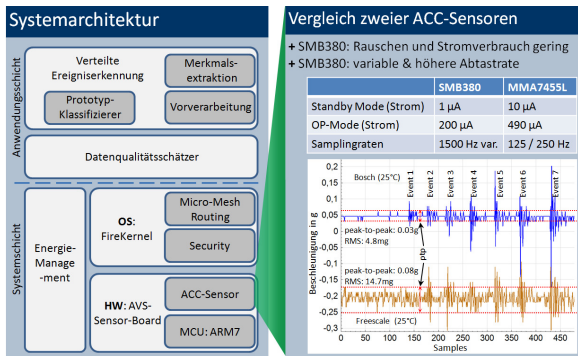


Bild 5 Systemdarstellung mit Evaluierung ACC-Sensor

telns, Lehnens, Treten und des Kletterns. Die Sensorknoten werden in dem das Baustellengebiet umfassenden Zaun eingebracht. Die Sensorknoten erfassen, wie in Kapitel 2 beschrieben, die Bewegung des Zauns, extrahieren Merkmale, fusionieren diese und senden das erkannte Ereignis über Multihop-Routen zu einer Basisstation. XML-basierte Anfragen in das Sensornetz ermöglichen es den Status der Sensorknoten abzufragen. Keep-Alive Nachrichten informieren im konfigurierbaren Minuten-Takt die Basisstation in welchem Zustand sich die Sensorknoten befinden. Dazu zählt unter anderem der Batteriestand, Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Grundsätzlich können Baufahrzeuge und Werkzeuge ebenfalls mit Sensorknoten ausgestattet werden, um Bewegungsereignisse speziell an diesen Geräten zu erfassen. Zudem wirken diese zusätzlichen Sensorknoten als optionale Routingstationen.

4 Systemdarstellung

Das gesamte System wird in zwei Schichten zerlegt vorgestellt, siehe Bild 5. Auf der Systemschicht stellt sich der AVS-Extrem Sensorknoten als Kernkomponente dar und wird in Kapitel 5 beschrieben. Zur Datenerfassung wird ein Beschleunigungssensor eingesetzt, dessen Eigenschaft insbesondere einen niedrigen Stromverbrauch vorweisen muss, da der Beschleunigungssensor nicht wie andere Komponenten abgeschaltet werden kann. Der Beschleunigungssensor löst bei Bewegung einen externen Interrupt aus, der für das System zwingend erforderlich ist und im Falle eines Ereignisses das schlafende System wecken kann. Wir setzen eine Weiterentwicklung des Betriebssystems FireKernel [4] ein, welches aufgrund seines prioritätsbasierten präemptiven Multitaskings, das die für das Szenario nötige Echtzeitfähigkeit für dedizierte Threads auf den Sensorknoten ermöglicht.

Die Route eines Anfragepaketes kann aufgrund schnell variierender Funkeigenschaften der Umgebung für den Rückweg bereits verfallen sein. Daher wird für die Kommunikation das Micro Mesh Routingprotokoll (MMR) eingesetzt [7]. MMR beinhaltet Konzepte aus AODV-, DSR- und dem DYMO-Routing und ist in der Lage auf Änderungen in der Netzwerktopologie zu reagieren, indem es Routen selbständig neu aufbaut. Um zusätzlich die kurzfristige Kommunikationsstörung mit einem Sensorknoten zu überbrücken, nutzen wir eine auf Bestätigungen

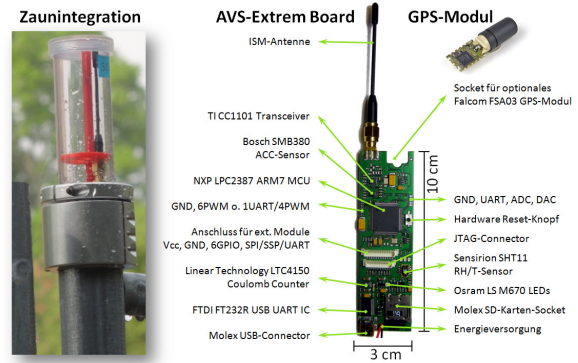


Bild 4 Zaunintegration der Hardware und Details zum AVS-Extrem-Sensorknoten

(ACKs) basierte Übertragung, die konfigurierbar viele Paketwiederholungen einsetzt. Das Energiemanagement bietet Schlafmodi, die sowohl den verwendeten Mikroprozessor ARM7 (MCU) als auch den Transceiver unterstützen. Die MCU kann in einen sogenannten IDLE-Modus gesetzt werden, bei dem nur der ARM7-Prozessorkern angehalten wird. Im Powerdown-Modus wird zusätzlich die interne Peripherie (PLL, SPI-Kommunikation, ADC, Timer) ausgeschaltet, so dass nur noch der Transceiver, die Real Time Clock und der Beschleunigungssensor das System wecken können. Für den Transceiver wurde Wake-On-Radio mit dynamischem Duty Cycle realisiert, um einen minimalen Energieverbrauch zu ermöglichen und dennoch eine hohe Kommunikationsfähigkeit zu garantieren. Zudem kommt ein vollständiges Sicherheitssystem mit symmetrischen Blockverschlüsselungsverfahren im CBC-Modus für die Vertraulichkeit, ein Message Authentication Code (MAC) für die Authentizität und Integrität, ein Counter für die Aktualität und ein Initialisierungsvektor für die semantische Sicherheit zum Einsatz.

Auf der Anwendungsschicht können die Daten mittels eines Datenqualitätsschätzers bewertet und auf Plausibilität geprüft werden. Die verteilte Ereigniserkennung stellt sich mit den Modulen der Vorverarbeitung, der Merkmalsextraktion und dem Prototyp-Klassifizierer als vollständige und verteilte Mustererkennung dar, wie in Kapitel 2 vorgestellt.

5 Sensorknoten mit Gehäuse

Das Sensorboard mit Gehäuse und Stromversorgung wird in den Zaunrohren eines Bauzauns integriert. Es sind im Schnitt nicht mehr als 38 mm Innendurchmesser verfügbar. Der erwünschte Einsatz von D-Zellen mit einem Durchmesser von 33 mm bildet die zweite Randbedingung für die Erstellung von Sensorknoten inkl. Gehäuse. Mit einer Platinenbreite von 30 mm stellt der Sensorknoten eine Bauform dar, die bei oben genannten Bedingungen ein Gehäuse mit 1 bis 2 mm Wandstärke zulässt. Die 30x100 mm kleine Platine basiert auf einem ARM7 NXP LPC2387 MCU mit 96KB RAM, 512KB ROM, sowie dem 868MHz Transceiver CC1101 von Texas Instruments. Für die Bewegungserkennung wurde der 3-Achsen Beschleunigungssensor SMB380 von Bosch eingesetzt da



Bild 6 Gehäuse für die Integration in das Zaunsegment

er, im Gegensatz zum Freescale-Sensor, einen geringeren Energieverbrauch, ein geringeres Rauschen, sowie eine flexibel einstellbare Abtastrate von bis zu 1500Hz zulässt (siehe Bild 5). Zudem sind Erschütterungen am Zaun mit einer Empfindlichkeit von bis zu 8g und einer Datenauflösung von bis zu 10 Bit erfassbar. Ein Sensirion SHT11 Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor ermöglicht die Überwachung des Gehäuseklimas. Ein Coulombzähler erlaubt das Überwachen des Energiestandes, während ein externer J-TAG-Anschluss Debugging erlaubt, siehe Bild 4. Die Sensordaten werden mit einer auf Interrupts basierten Architektur an einen internen Puffer im Systempeicher gesendet. Dadurch können mehrere Prozesse zeitversetzt die gleichen Daten nutzen. Zudem ist es möglich höher priorisierte Threads wie den Transceiver-Thread, während der Datenaufnahme eines Ereignisses zu nutzen. Der Einsatz von Zusatzmodulen wie GPS (FSA03) oder externen Module mit bis zu 12 Anschlusspins sind möglich, Details siehe Bild 4. Eine 2 GB SD-Karte erlaubt das Speichern von Trainingsdaten sowie das Loggen von Batterieständen.

Für den Einsatz im freien Gelände ist ein witterungsbeständiges und robustes Gehäuse nötig. Wie in Bild 6 dargestellt, wird ein Batteriefach aus Messing mit einer Kupferkupplung zur Kontaktbildung mit dem Sensorknoten eingesetzt. Die Makrolon®-Hülle umschließt den Sensorknoten und schützt das System vor externen Einflüssen. Im Batteriefach ist es möglich, vier 1,5V D-Zellen unterzubringen, wobei das Gehäuse als Masse wirkt. Der Sensorknoten selbst ist in einem Applikator verankert. Die Steckverbindung ist mit einem Verpolungsschutz versehen und ermöglicht zusammen mit dem Applikator das leichte Einsetzen des Sensorknotens in das Gehäuse.

6 Ergebnisse

Das Erkennungssystem leistet mit einer Erkennungsgenauigkeit von durchschnittlich 87% eine hohe Erkennungsrate. Voraussetzung ist ein homogener Zaufbau und die Vermeidung von Gegenständen die an den Zaun gelehnt sind oder dämpfende Eigenschaften haben, wie z.B. Sandberge [6]. Die Stromversorgung ermöglicht dem Sensorknoten mit insgesamt 18.000 mAh eine Lebensdauer von ca. 250 Tagen unter Annahme stabiler Routen und eines Extremfalls von fünf Ereignissen pro Stunde

und einer Keep-Alive Nachricht im 20-Minuten-Takt. Es konnte eine robuste und vollständig in den Bauzaun integrierte Hardware entwickelt werden. Die Installation besteht aus einem einfachen Stecksystem für den Sensorknoten und ein Schraubsystem zur Zaufsicherung, welches in Zukunft um Sicherheitsschrauben ergänzt werden kann. Das durchsichtige Makrolon® kann z.B. durch undurchsichtiges robusteres aber teureres Krüpax® ersetzt werden. In der Forschung ist es jedoch hilfreich durchsichtiges Material zu verwenden, da die Sichtbarkeit der LEDs eine wichtige Rolle in der Fehleranalyse spielt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte eine vollständige Umsetzung der verteilten Ereigniserkennung für drahtlose Sensornetze in ein Bauzaunzenario gezeigt werden. Mit einer hohen Lebensdauer von über einem halben Jahr und der Integration von Sensorknoten, Gehäuse und Energieversorgung in den Bauzaun, zeigen wir die Realisierbarkeit eines vollständigen Zaunüberwachungssystems. Orientierungs- und kraftbasierte Merkmale für eine optimierte Mustererkennung werden die Erkennung in Zukunft weiter verbessern können. Krüpax® kann das Batteriefach, als auch die Makrolon®-Hülle als robusten Werkstoff ersetzen.

8 Literatur

- [1] H. Ghasemzadeh, V. Loseu, and R. Jafari, "Collaborative signal processing for action recognition in body sensor networks: a distributed classification algorithm using motion transcripts," in Proc. of 9th ACM/IEEE Int. Conf. on IPSN, Stockholm, 2010.
- [2] Y. Kim, J. Kang, D. Kim, E. Kim, P. Chong, and S. Seo, "Design of a fence surveillance system based on wireless sensor networks," in Autonomics, A. Manzolini, Ed., 2008.
- [3] M. Li, Y. Liu, and L. Chen, "Non-threshold based event detection for 3d environment monitoring in sensor networks," in Proc. of the 27th Int. Conf. on Distributed Computing Systems, ser. ICDCS Washington: IEEE Computer Society, 2007.
- [4] H. Will, K. Schleiser, and J. Schiller, "A real-time kernel for wireless sensor networks employed in rescue scenarios," in Proc. of the 34th IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN), New York 2009.
- [5] G. Wittenburg, N. Dziengel, and C. Wartenburger, "Verfahren und Sensornetz zur Merkmalsauswahl für eine Ereigniserkennung," German patent DE 10 2009 006 560 B4 (WO 2010/086325 A1), 2011.
- [6] G. Wittenburg, N. Dziengel, C. Wartenburger, and J. Schiller, "A System for Distributed Event Detection in Wireless Sensor Networks," in Proc. of 9th ACM/IEEE Int. Conf. on IPSN, Stockholm, 2010.
- [7] T. Hillebrandt, "Untersuchung und Simulation des Zeit- und Energieverhaltens eines msb430-h Sensornetzwerkes," Master Thesis, Berlin, 2007.