

Sascha Berger

Simultane Downlink und Uplink Selbstorganisation der
Antennenneigungswinkel zur Verbesserung von
Datendurchsatz und Netzabdeckung

Beiträge aus der Informationstechnik

Mobile Nachrichtenübertragung

Nr. 79

Sascha Berger

**Simultane Downlink und Uplink
Selbstorganisation der
Antennenneigungswinkel zur
Verbesserung von Datendurchsatz und
Netzabdeckung**

 VOGT

Dresden 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.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the
Internet at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2015

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Simultane Downlink und Uplink Selbstorganisation der
Antennenneigungswinkel zur Verbesserung von Datendurchsatz und
Netzabdeckung“ von Sascha Berger überein.

© Jörg Vogt Verlag 2015
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-97-7

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Technische Universität Dresden

**Simultane Downlink und Uplink
Selbstorganisation der
Antennenneigungswinkel zur
Verbesserung von Datendurchsatz und
Netzabdeckung**

Sascha Berger

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Frank Fitzek
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard P. Fettweis
Prof. Dr.-Ing. Andreas Mitschele-Thiel

Tag der Einreichung: 06. Juli 2015
Tag der Verteidigung: 22. September 2015

Kurzfassung

Aufgrund des steigenden Datenbedarfs und der zunehmenden Komplexität in aktuellen Mobilfunknetzen suchen Forscher nicht nur nach Ansätzen für neue Technologien sondern betrachten die Erhöhung der Effizienz bestehender Technologien bzw. bereits installierter Infrastruktur ebenfalls als einen vielversprechenden Ansatz um die Mobilfunknetze auf die Herausforderungen der Zukunft vorzubereiten. In diesem Hinblick fokussiert sich diese Arbeit auf das Forschungsfeld der Selbstorganisation der Mobilfunknetze.

Im ersten Teil der Arbeit präsentieren wir ein allgemeines Konzept zur simultanen Selbstorganisation mehrerer Leistungskennzahlen unter der Bedingung, dass nur wenig Wissen über das Mobilfunknetz vorhanden ist. Wir stufen das vorhandene Wissen als gering ein, sobald es nicht möglich ist die betrachteten Leistungskennzahlen für eine bestimmte Einstellung der Netzparameter mittels der Modellierung des Systems in einer Simulation vorherzusagen. Für die Betreiber der Mobilfunknetze sind Algorithmen, welche nur ein geringes Wissen über das Mobilfunknetz erfordern, von Interesse, da die Beschaffung des nötigen Systemwissens oftmals hohe technische und finanzielle Aufwendungen mit sich bringt. Wie in der Arbeit erörtert wird, bedarf die Selbstorganisation unter geringem Systemwissen jedoch speziellen Lösungen, deren Anforderungen das vorgeschlagene Konzept gerecht wird.

Im zweiten Teil dieser Arbeit verwenden wir das vorgeschlagene Konzept, um Algorithmen für den Anwendungsfall der simultanen Selbstorganisation der Netzabdeckung und des Datendurchsatzes vorzuschlagen. Dabei betrachten wir die Aufwärts- und Abwärtsübertragungstrecke gleichzeitig, was aufgrund der steigenden Wichtigkeit der Aufwärtsübertragungstrecke von praktischen belangen ist. Wir untersuchen die Leistungsfähigkeit der Algorithmen in einer Simulation eines innerstädtischen Long-Term Evolution Mobilfunknetzes mit realen Basisstationslokalitäten und diskutieren Aspekte der praktischen Anwendbarkeit der Algorithmen. Weiterhin vergleichen wir die Ergebnisse mit Algorithmen, welche ausschließlich die Aufwärts- oder Abwärtsübertragungstrecke bedenken, und mit Algorithmen, welche zur

Ausführung ein hohes Maß an Systemwissen erfordern.

Im dritten Teil der Arbeit adressieren wir das Problem eines großen Dynamikbereichs der Empfangsleistungen an den Basisstationen des Long-Term Evolution Systems. Wir legen dar, warum ein großer Dynamikbereich der Empfangsleistungen an den Basisstationen die Netzgüte der Aufwärtsübertragungstrecke am Zellrand verschlechtert und schätzen den maximal möglichen Dynamikbereich der Empfangsleistungen ab, bei welcher die Netzgüte am Zellrand noch nicht in Mitleidenschaft gezogen wird. Wir schlagen vor, den Dynamikbereich der Empfangsleistungen an den Basisstationen mittels der Sendeleistungsregelung der Aufwärtsübertragungstrecke zu limitieren. Dafür leiten wir einen mathematischen Zusammenhang zwischen dem Dynamikbereich der Empfangsleistungen und Parametern der Sendeleistungsregelung her und verwenden diesen, um die zuvor vorgeschlagenen Algorithmen um den Aspekt zu erweitern, dass sie den Dynamikbereich der Empfangsleistungen an den Basisstationen unter einem gewissen Maximum halten.

Abstract

Driven by an increasing traffic demand and a growing complexity in nowadays cellular networks, researchers are not only seeking approaches for new technologies but are also trying to increase the efficiency of the infrastructure that is already deployed. In this regard, this work focuses on the self-organization of cellular networks.

In the first part of this work, we are presenting a general concept for the simultaneous self-organization of multiple key performance indicators under the condition that there is only sparse system knowledge available. We consider the available knowledge to be sparse if we are not able to predict the key performance indicators for a given configuration of the network parameters by modelling the network in a simulation. From an operator's perspective, algorithms which are working under sparse system knowledge conditions are desirable as the collection of knowledge about the network state can be a great technical and financial effort. However, self-organizing the network under sparse system knowledge conditions requires tailored solutions which are addressed by the concept proposed.

Second, we are applying the aforementioned approach for solving the use case of the simultaneous self-organization of coverage and capacity. In this regard, we are proposing algorithms which consider the downlink and uplink transmission simultaneously. Considering the downlink and uplink simultaneously is crucial as the uplink transmission is becoming more and more important. We are investigating the performance of the algorithms proposed in a dense urban scenario with real Long-Term Evolution base station locations and discuss aspects of the practical implementation. Furthermore, we compare the results obtained with the performance of algorithms which consider the uplink or downlink solely and to algorithms which require extensive system knowledge.

In the third part of this thesis, we elaborate on the problem of large uplink dynamic receive power ranges for the Long-Term Evolution system. We explain why a large uplink dynamic receive power range causes a quality of service degradation for cell edge users in the uplink and estimate the maximal uplink dynamic receive power range at which there is just no degradation. We propose using the uplink transmit power control in order to upper limit

the uplink dynamic receive power range. For this purpose, we derive a mathematical relationship between the uplink dynamic receive power range and parameters of the uplink transmit power control and use this relationship to expand the abilities of the previously presented algorithms by the capability of limiting the uplink dynamic receive power range.

Danksagung

Während der Erarbeitung der Inhalte dieser Arbeit sowie im Laufe deren Erstellung konnte ich mich auf die Unterstützung von einigen Personen verlassen, welchen ich hiermit meine Dankbarkeit zum Ausdruck bringen möchte. Besonders dankbar bin ich gegenüber meinem Doktorvater Gerhard Fettweis. Ich möchte mich dafür bedanken, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, mich in seinem Team neuen Herausforderungen zu stellen, durch deren Bewältigung ich mich nicht nur auf beruflicher sondern auch auf menschlicher Ebene weiterentwickeln konnte. Vielen Dank auch für die beständige wissenschaftliche Unterstützung, welche unerlässlich für diese Arbeit war.

Weiterhin gilt besonderer Dank meinen Gruppenleitern Albrecht Fehske und Meryem Simsek für deren wertvolle akademische Ratschläge und die ehrlichen, zielführenden Diskussionen. Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Kollegen und Freunden - Alexandros, Armin, Björn, Böhmi, Daniel, David, Henrik, Jens, Maciej, Martin und Vinay - für deren Unterstützung auf fachlicher sowie privater Ebene herzlich bedanken.

Eine herausragende Stellung in jeglicher Hinsicht nimmt meine Familie ein, die mir in allen Phasen dieser Arbeit Beistand geleitet hat und ein wertvoller Rückhalt war. Sie haben mir jederzeit mit wertvollem Rat zur Seite gestanden und es geschafft mich auch in schwierigen Zeiten zu motivieren. Ihnen gilt mein tiefer Dank.

Dresden, Juni 2015

Sascha Berger

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract	iii
Danksagung	vii
Inhalt	ix
1 Einleitung	1
1.1 Einführung in Selbstorganisierende Mobilfunknetzwerke . . .	1
1.2 Heutige Ansätze	4
1.3 Beschränkungen Heutiger Ansätze	7
1.4 Wesentliche Beiträge dieser Dissertation	8
2 Stand der Technik und Motivation	11
2.1 Eigenschaften von Selbstorganisierten Netzen	11
2.2 Operationsmodi im Feld der Neigungs-basierten SND	21
2.3 Motivation dieser Dissertation	24
2.4 Referenzansatz für diese Dissertation	25
3 Ein Konzept zur Selbstorganisation mehrerer Leistungskennzahlen bei geringem Systemwissen	27
3.1 Verfügbare Informationen und nötige Fähigkeiten	28
3.2 Methoden zur Selbstorganisation	29
3.3 Kostenfunktionen	30
3.4 Zusammenfassung und Wesentliche Beiträge Jenseits des Stands der Technik	32
4 Simultane Downlink und Uplink Selbstorganisation der Netzabdeckung und des Datendurchsatzes	35
4.1 System Model	35
4.2 Problemstellung	39
4.3 Algorithmen	40
4.4 Simulation und Ergebnisse	48

4.5	Anwendbarkeit in der Praxis	80
4.6	Wesentliche Beiträge Jenseits des Stands der Technik	86
5	Berücksichtigung des Dynamikbereichs der Uplink Empfangsleistungen	89
5.1	Einfluss des Uplink Dynamikbereichs auf die Leistung des Empfängers	90
5.2	Herleitung einer Lösung für den Uplink Dynamikbereich . . .	93
5.3	Operationsbereich für die Parameter der Uplink Sendeleistungsregelung	98
5.4	Algorithmen unter Berücksichtigung des Uplink Dynamikbereichs	100
5.5	Simulation und Ergebnisse	102
5.6	Wesentliche Beiträge Jenseits des Stands der Technik	106
6	Fazit	107
A	Anhang	109
A.1	Herleitung einer Lösung für den Uplink Dynamikbereich . . .	109
	Abkürzungsverzeichnis	111
	Abbildungsverzeichnis	113
	Tabellenverzeichnis	117
	Literaturverzeichnis	119
	Veröffentlichungen	129
	Lebenslauf	131

1.1 Einführung in Selbstorganisierende Mobilfunknetzwerke

Ein wesentliches Problem für heutige und zukünftige Mobilfunknetzwerke (Netze) ist, dass der zu deckende Datenverkehr stark inhomogen verteilt ist. Oftmals ist ein großer Teil der Nutzer in relativ kleinen Gebieten, wie zentralen Plätzen oder Straßenzügen, konzentriert (siehe z.B. [Don+14; Lou+14]). Solche Nutzerkonzentrationen, genannt Hot Spots (HSs), können leicht zu lokaler Überlast im Netz führen, was die Dienstgüte der betroffenen Nutzer verringert. Weiterhin unterliegen die Netze starken Dynamiken, welche z.B. durch die sich ändernden Lokalitäten der Nutzer, durch sich ändernde Signalausbreitungsbedingungen (z.B. durch Bebauung) oder durch Ausfälle von Basisstationen (BSs) verursacht werden (siehe z.B. [PSJ03] für sich ändernde Nutzerlokalitäten und [FH11; MVM02] für Statistiken zu Ausfällen von BSs). Die Kombination aus den stark inhomogenen Nutzerverteilungen und den erwähnten Dynamiken führt dazu, dass aktuelle Netze sehr ineffizient sind¹. Ein weiteres wesentliches Problem heutiger und zukünftiger Netze ist deren steigende Komplexität. Ein Anstieg der Komplexität ist zu verzeichnen, da (i) die Netzbetreiber bzw. Operatoren immer mehr verschiedene Technologien (z.B. GSM (Global System for Mobile Communications), UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) und LTE (Long Term Evolution)) in Ihre Netze integrieren und weil (ii) sie die Netze in mehreren Schichten aufbauen (z.B. Makro- und Mikroschicht)[Qua11; Eri14].

Ein vielversprechender Lösungsansatz zur Erhöhung der Effizienz und zur Beherrschung der hohen Komplexität der Netze ist deren Selbstorganisation. Ein selbstorganisiertes Netz (SON) passt seine Netzparameter automatisch den derzeitigen oder sich ändernden Gegebenheiten, wie z.B. der Nutzerverteilung, an, um die Dienstgüte zu erhalten oder zu verbessern. Aufgrund der Automatisierung der Anpassung der Netzparameter kann ein SON ebenfalls operative Kosten und Anlagekosten verringern [BG08]. Basierend auf einer

¹Ineffizient in dem Sinne, dass mit der gegebenen Infrastruktur bei bestmöglicher Konfiguration eine wesentlich bessere Dienstgüte erreicht werden könnte.

Studie, welche die Auswirkungen eines SON in einem realen Netz über eine Zeitdauer von fünf Jahren modelliert, kann man von der Selbstorganisation eines LTE Netzes eine Kostenersparnis von 26 % erwarten, welche sich durch Einsparungen um 34 % in den operativen Kosten und 21 % in den Anlagekosten ergibt [Gab+11]. Ein SON wurde zur Lösung der oben genannten Probleme zuerst von der Next Generation Mobile Networks (NGMN) Allianz in einer Reihe von Dokumenten vorgeschlagen [NGM07; NGM08; NGM10]. Diese Dokumente konnten erfolgreich Einfluss auf das Konsortium des 3rd Generation Partnership Programm (3GPP) nehmen, so dass die Selbstorganisation in [3GP14e; 3GP14f; 3GP14b; 3GP11] für LTE standardisiert wurde. SON Ansätze können im generellen in vier Kategorien eingeteilt werden [NGM07; RH12]². In der Kategorie der *Selbst-Planung* (engl. self-planning) werden die Eigenschaften neuer BSs bestimmt, was z.B. die Bestimmung der Lokalität und die Spezifikation der Hardwarekonfiguration neuer BSs umfassen kann. Die Kategorie *Selbst-Ausbau* (engl. self-deployment) umfasst die automatisierte Einstellung, Installation und Authentifikation neuer BSs, so dass diese mit minimalen Aufwand in Betrieb genommen werden können. In der Kategorie der *Selbstheilung* (engl. self-healing [RH12] oder self-maintenance [NGM07]) werden Probleme im Netz automatisch erkannt und behoben sowie Routinemaßnahmen zur Erhaltung der Funktionsfähigkeit des Netzes durchgeführt. Ein typischer Anwendungsfall dieser Kategorie ist die Detektion und Kompensation von Basisstationsausfällen. In der Kategorie der *Selbstoptimierung* (engl. self-optimization) werden Messungen von den Endgeräten und den BSs dazu verwendet das Netz mittels Anpassung von Netzparametern automatisch optimal zu betreiben. Anwendungsfälle in diesem Gebiet sind z.B. die gemeinsame Netzabdeckungs- und Datendurchsatzoptimierung, die Energieeffizienzoptimierung und die Optimierung der Mobilitätsstabilität (engl. mobility robustness optimization). Abgesehen von den erwähnten Kategorien der Anwendung kann ein SON weiterhin durch

- die Wahl des betrachteten Anwendungsfalls bzw. durch die Wahl der betrachteten Leistungskennzahlen (LKZs, engl. key performance indicators),
- die Wahl der veränderlichen Netzparameter,
- der verwendeten Architektur,

²Wir möchten darauf hinweisen, dass entgegen der hier zitierten Arbeiten [Ber+08] nur die drei Kategorien Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration und Selbstheilung definiert.

- der verwendeten Methode zum Finden neuer Einstellungen der Netzparameter, sowie durch
- den verwendeten Operationsmodus

charakterisiert werden. Um diese Einleitung kurz und übersichtlich zu halten führen wir diese Eigenschaften von SONs erst genauer im Kapitel 2 ein.

Abgesehen von den Algorithmen selbst, die es zu erforschen gilt, gibt es jedoch noch weitere Herausforderungen, welche zu meistern sind, um ein SON einzuführen. Dies sind unter Anderem (i) ein fehlender Anreiz für die Hersteller der BSs ihre Produkte für SON Funktionen Dritter zu öffnen, (ii) eine nötige Standardisierung für Herstellerübergreifende SON Funktionalitäten, und (iii) der zu findende Kompromiss zwischen einer Steigerung der Netzqualität und des Datenschutzes der Nutzer [GD10].

In den letzten Jahren spielte das Forschungsthema SON eine zentrale Rolle in Forschungs- und Entwicklungsprojekten der Europäischen Union (EU). Die Projekte Gandalf, E³, SOCRATES, 4WARD, FUTON, UniverSelf und andere trugen wesentlich zum Verständnis von SONs bei und erforschten bereits spezielle Lösungen für einige Anwendungsfälle. Erste SON Funktionalitäten sind bereits öffentlich verfügbar. Ein Beispiel dafür ist der für LTE standardisierte Anwendungsfall „Automatic Neighbour Relations“ (ANR). Im Hinblick darauf, was die Industrie von einem SON erwartet sind diese Ergebnisse jedoch eher als vielversprechende Konzeptnachweise zu sehen und können nicht als Anzeichen einer schnellen Erforschung und Implementierung umfassender SON Funktionalitäten angesehen werden.

Diese Arbeit fokussiert sich auf den SON Anwendungsfall der simultanen Optimierung der Netzabdeckung und des Datendurchsatzes (OND, engl. coverage and capacity optimization, CCO), welcher der Kategorie der Selbstoptimierung angehört. Gründe dafür sind, dass (i) diese LKZs typischerweise eine sehr hohe Priorität bei Netzbetreibern haben und dass (ii) beide LKZs einander konträr sind (siehe z.B. [Ham+03] für UMTS), was es schwierig macht einen optimalen Kompromiss zwischen beiden LKZs zu erzielen. Für die OND passen wir die Antennenneigungswinkel an, da sich dieser Parameter einerseits in bisherigen Veröffentlichungen als effizient erwiesen hat [Kif+; AJ10] und sich andererseits mittels aktueller Antennentechnologie verhältnismäßig einfach verändern lässt [KG00]. Der Einfachheit halber werden wir den Antennenneigungswinkel im Folgenden nur noch kurz als Neigung oder Antennenneigung bezeichnen. Aufgrund der hohen Komplexität der Netze ist eine OND im Sinne einer optimalen Neigungseinstellung nicht möglich.

Bereits in einem Szenario mit 50 Antennen und 10 möglichen Neigungen pro Antenne ergeben sich 10^{50} mögliche Einstellungen, was in etwa der Anzahl der Atome auf der Erde entspricht [Wei14]. Daher verfolgen wir in dieser Arbeit das Ziel für beide LKZs operatorspezifische minimale Werte zu erreichen und nicht das globale Optimum zu finden. Dementsprechend werden wir im Folgenden die OND als Selbstorganisation der Netzabdeckung und des Datendurchsatzes (SND) bezeichnen, da der Begriff der Optimierung nicht exakt zutreffend ist.

Im Folgenden geben wir einen Überblick auf bisherige Arbeiten zum Feld der SND.

1.2 Heutige Ansätze

Da das Forschungsfeld SON in den letzten Jahren ein Fokus der Forschung in Industrie und Wissenschaft war, ist die Zahl der Veröffentlichungen in diesem Feld groß. Aus diesem Grund beschränken wir uns darauf einen Überblick über den Stand der Technik in der neigungsbasierten SND zu geben. Bisherige Beiträge können im wesentlichen in drei Kategorien eingeteilt werden. Eine erste Kategorie bilden die Veröffentlichungen [IMT12a; IMT12b; RKC10; Tha+12]³, welche Methoden des bestärkenden Lernens (engl. reinforcement learning) verwenden. Die ersten drei Publikationen verwenden einen Q-Learning Ansatz des bestärkenden Lernens, während Thampi et al. einen sparse sampling Zugang verwenden. Das Ziel beider Ansätze ist es schrittweise zu erlernen, was die beste Maßnahme für einen bestimmten Systemzustand ist. Dafür müssen dem lernenden System, welcher Agent genannt wird, Maßnahmen und Systemzustände klar definiert sein. Vorteil des bestärkenden Lernens ist, dass im allgemeinen keine Vorkenntnisse über das Verhalten des Netzes bei Veränderung der betrachteten Netzparameter bekannt sein müssen. Nachteil dieser Methode ist, dass die Konvergenz zu einem finalen Zustand oft nicht gewährleistet werden kann, wenn mehrere Agenten zugleich lernen sollen. Weiterhin müssen die Parametereinstellungen typischerweise sehr genau vorgenommen werden und sind applikationsabhängig. Dies bedeutet, dass die Parametereinstellungen für jede Anwendung neu gefunden werden müssen.

³In [Tha+12] handelt es sich nur um eine Netzabdeckungsoptimierung.

Die Beiträge [Eng+13; Kar+13a; Kle+12; SVY06; Kar+13c; Ger+04]⁴ können zu einer weiteren Kategorie zusammengefasst werden. Diese Kategorie verwendet entweder klassische Optimierungsmethoden oder regelbasierte Methoden, um die Netzabdeckung und den Datendurchsatz gleichzeitig zu optimieren. Beispielsweise verwenden Engels et al. in [Eng+13] unter anderem einen verkehrsamplbasierten Regelansatz oder Karvounas et al. in [Kar+13a] die Optimierungsmethode Simulated Annealing. Weiterhin haben Beiträge dieser Kategorie die Gemeinsamkeit, dass sie davon ausgehen, dass die vorgeschlagenen Methoden zur Suche neuer Einstellungen der Neigungen in einer *offline* Simulation durchgeführt werden. Das heißt, dass die Veränderung der Neigungen während der Durchführung der jeweiligen Methoden zunächst nicht im realen Netz von statten gehen, sondern in einer Simulation des Netzes. Nur die Einstellung der Neigungen, welche in der Simulation das Ergebnis war, wird danach im realen Netz angewandt. Dieser Ansatz ist sehr effizient, erfordert jedoch eine exakte Simulation des realen Netzes. Damit dies möglich ist, benötigt der Netzbetreiber ein exaktes Systemmodell, welches wiederum Wissen über das zu modellierende Netz erfordert. So sind beispielsweise die Standorte aller Nutzer als auch deren Empfangsleistungen für sämtliche zu betrachtende Antennen und Neigungen benötigt (siehe z.B. die folgenden Modelle für Simulationen auf Netzebene: [VDL09; VLS10; FF12]). Sind diese Informationen, welche wir als umfangreich einschätzen, nicht verfügbar, so können die vorgeschlagenen SON Funktionalitäten nicht verwendet werden, da die offline Simulation nicht durchgeführt werden kann. Mehr Details zur offline Selbstorganisation werden in Kapitel 2 dargestellt und können in [Ber+14a] gefunden werden.

Eine weitere Kategorie kann durch Beiträge geformt werden, deren SON Funktionalitäten das betrachtete Netz nicht in einer Simulation abbilden müssen und gleichzeitig keine Lernmethoden, wie das bestärkende Lernen, verwenden. Da das Netz nicht in einer Simulation abgebildet werden muss, können solche SON Funktionalitäten oftmals mit wenig Wissen über das Netz arbeiten; z.B. ist es nicht nötig die Standorte der Nutzer oder deren Empfangsleistungen für sämtliche zu betrachtende Antennen und Neigungen zu kennen. Solche SON Funktionalitäten wenden jede ihrer vorgeschlagenen Einstellungen der Neigungen im realen Netz an und bestimmen daraufhin die Werte der betrachteten LKZs über Messungen. Nötig sind daher nur grund-

⁴[Kle+12; SVY06] optimieren die Netzabdeckung und die Zelllasten; [Kar+13c] bedenkt neben der Netzabdeckung und dem Datendurchsatz auch noch den Energiebedarf des Netzes.

legende Informationen und Fähigkeiten, wie (i) eine Liste der BSs, die sich selbstorganisieren sollen, (ii) deren mögliche Neigungen und (iii) die Fähigkeit die betrachteten LKZs direkt oder indirekt zu Messen⁵. Diesen Ansatz der SND bezeichnen wir als *online* Selbstorganisation. Abgesehen von unseren bisherigen Beiträgen [Ber+14a; Ber+14d; Ber+13a; Ber+15] konnten wir nur zwei weitere Veröffentlichungen in dieser Kategorie finden: [EKG11; Rev12]. Beide Veröffentlichungen schlagen SON Funktionalitäten vor, welche keine Simulation des Netzes benötigen. Daher suchen beide Beiträge nach neuen Einstellungen für die Neigungen in der Nähe der aktuellen Einstellung, da sie keine dramatischen Verschlechterungen der LKZs in diesem Bereich erwarten. Die letztere Veröffentlichung schlägt eine regelbasierte Selbstorganisation vor, während der erstere Beitrag einen „Coordinate Ascent“ Ansatz verwendet. Nachteil des Beitrags von Eckhardt et al. [EKG11] ist, dass die Netzabdeckung nicht explizit betrachtet und Anstelle des Datendurchsatzes die spektrale Effizienz optimiert wird. Ein weiterer Nachteil beider Beiträge ist, dass sie nicht analysieren inwiefern die vorgeschlagenen SON Funktionalitäten für eine online Selbstorganisation angemessen sind. Zudem lässt [Rev12] weite Teile der vorgeschlagenen Suchmethode unerklärt. Allgemeiner Vorteil dieser Kategorie der SND ist, dass wenige Informationen über das Netz verfügbar sein müssen. Zu beachten ist, dass das Sammeln von Informationen über das Netz, wie die Standorte der Nutzer oder deren Empfangsleistungen von allen betrachteten Antennen und für alle Neigungen, zumeist hoher technischer und / oder finanzieller Aufwendungen bedarf, da dafür typischerweise spezielle Messsysteme entweder auf Seite der Endgeräte oder der Seite des Netzes verwendet werden müssen. Daher haben SON Funktionalitäten dieser Kategorie eine hohe Anwendbarkeit und vergleichbar geringe technische und finanzielle Voraussetzungen. Nachteile entstehen durch die online Selbstorganisation. Da jede Einstellung der Neigungen im realen Netz angewandt wird, kann es zeitweilig zur Verschlechterung der LKZs kommen. Weiterhin dauert die Selbstorganisation länger, da nach einer Veränderung der Einstellung der Neigungen die neuen LKZs zunächst über Messungen bestimmt werden müssen. Oszillationen oder Instabilitäten können im allgemeinen bei allen drei erwähnten Kategorien auftreten. Im folgenden Abschnitt fassen wir die Beschränkungen des Stands der Technik zusammen und leiten daraus den Fokus dieser Dissertation ab.

⁵Wir setzen voraus, dass die BSs wie in Abb. 2.1 dargestellt, miteinander als auch mit dem zentralen Bereichs- und Netzwerkmanagement kommunizieren können.

1.3 Beschränkungen Heutiger Ansätze

Abgesehen von unseren eigenen Beiträgen ([Ber+14a; Ber+14d; Ber+13a; Ber+15]) gibt es bisher wenige Veröffentlichungen welche SON Funktionalitäten zur SND vorschlagen, die weder eine Simulation des betrachteten Netzes verwenden noch auf Lernmethoden basieren (dritte Kategorie in Abschnitt 1.2). Jedoch sind Beiträge in diesem Feld von starkem Interesse, da, wie bereits erwähnt, der Verzicht auf eine Simulation des Netzes damit einhergeht, dass den SON Funktionalitäten nur wenige Informationen über das Netz zur Verfügung stehen müssen, damit sie verwendet werden können. Dies wiederum hat zur Folge, dass solche SON Funktionalitäten mit einem vergleichbar geringem finanziellen und technischen Aufwand realisiert werden können, was ihre Erforschung attraktiv macht.

Wir betrachten existierende Arbeiten im Feld der neigungsbasierten SND, welche weder eine Simulation des betrachteten Netzes verwenden noch auf Lernmethoden basieren, als gute Ansätze, jedoch fokussieren sie sich nicht direkt auf die neigungsbasierte SND und / oder sind ihre Methoden nicht klar dargestellt. Zudem untersuchen bestehende Beiträge ihre vorgeschlagenen Suchmethoden nicht auf die Tauglichkeit für eine online Selbstorganisation. Weiterhin sind die nötigen Messungen nicht diskutiert, zeitliche Granularitäten nicht bestimmt und die teils unterschiedlichen Prioritäten der Operatoren an die LKZs nicht berücksichtigt.

Außerdem ist festzustellen, dass alle zitierten Veröffentlichungen ausschließlich die Abwärtsübertragung (DL, da engl. downlink) betrachten. Nach unserem besten Wissen, gibt es keinerlei veröffentlichte Arbeiten, welche eine SND gemeinsam im DL und in der Aufwärtsübertragung (UL, da engl. uplink) durchführen. Grund für dieses Ungleichgewicht ist, dass bis dato der DL als wichtiger angesehen wird, weil dessen Verkehrsbedarf wesentlich höher war und ist als der im UL [Nok13; Ele14]. Allerdings ist es zu erwarten, dass der UL in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. Der Grund dafür sind neue Applikationen und Dienstleistungen wie Videotelefonie, Sensornetzwerke, soziale Onlinedienste und Cloud-Speichernetzwerke, welche entweder eine DL/UL Parität oder sogar mehr Datenverkehr im UL als im DL erfordern. Daher sollten bei einer SND der DL als auch der UL betrachtet werden.

Aufgrund dieser Beschränkungen des Stands der Technik fokussiert sich diese Dissertation auf die neigungsbasierte simultane DL und UL SND unter der

Bedingung, dass das Netz nicht simuliert werden kann⁶.

Im Folgenden umreißen wir die wesentlichen Beiträge dieser Dissertation.

1.4 Wesentliche Beiträge dieser Dissertation

Ein wesentlicher Beitrag dieser Dissertation ist ein Konzept zur simultanen Selbstorganisation von mehreren Leistungskennzahlen (siehe Kapitel 3) unter der Bedingung, dass das Verhalten des Netzes nicht simuliert werden kann, d.h. dass die LKZs nicht mittels eines Systemmodells berechnet werden können. Das vorgeschlagene Konzept ist allgemeingültig in dem Sinne, dass es nicht spezifisch für bestimmte LKZs oder Netzparameter ist. Die essentiellen Eigenschaften des Konzepts sind die folgenden:

- Das SON wird online betrieben, d.h., dass jede von der verwendeten Suchmethode vorgeschlagene Einstellung der Netzparameter im realen Netz angewandt wird. Bevor das SON die nächste Einstellung der Netzparameter vorschlägt, werden die neuen Werte der LKZs über Messungen bestimmt.
- Das SON verwendet LKZ-spezifische Kostenfunktionen, welche die Selbstorganisationsziele des Operators darstellen. Dadurch können jeder LKZ Kosten zugeordnet werden, welche den Bedarf einer Verbesserung des Wertes dieser LKZ repräsentieren. Durch das Aufsummieren aller Kosten wird ein Leistungsmaß erstellt, welche sämtliche betrachtete LKZs bedenkt.
- Dieses ganzheitliche Leistungsmaß wird mittels der „Coordinate Descent“ (CD) Methode verringert. Da die CD Methode nur einen Netzparameter pro Iteration verändert und wir nur kleine Schritte zulassen werden, ist sichergestellt, dass die Methode adäquat für eine online Selbstorganisation ist.

Ein weiterer wesentlicher Beitrag dieser Arbeit ist, dass wir auf Grundlage des zuvor erwähnten Konzepts erstmalig Algorithmen zur simultanen DL und UL neigungs-basierten SND vorschlagen und untersuchen (siehe Kapitel 4). Wir betrachten den DL und UL simultan, da beide Übertragungstrecken von

⁶Das heißt, dass die LKZs für eine beliebige Einstellung der Neigungen nicht mittels eines Systemmodells berechnet bzw. vorausgesagt werden können.

hoher Wichtigkeit sind und eine Verbesserung der LKZs im DL nicht zwangsweise zu einer Verbesserung der LKZs im UL führen muss. Diese Dissertation präsentiert die zu erforschenden Algorithmen, evaluiert deren Leistungsfähigkeit in einer Simulation eines realen städtischen LTE-Netzes und diskutiert deren praktische Anwendbarkeit, mögliche zeitliche Granularitäten, sowie deren Eignung als online Selbstorganisation. Weiterhin vergleicht diese Arbeit die vorgeschlagenen Algorithmen mit dem Stand der Technik. Dafür wird ein offline Algorithmus, welcher die probabilistische Methode „Simulated Annealing“ (SA) benutzt, verwendet. Wir möchten darauf hinweisen, dass sich diese Dissertation eher auf SON Funktionalitäten fokussiert, welche eine hohe Anwendbarkeit in der Praxis aufweisen, als auf SON Funktionalitäten, welche zwar nahezu das globale Optimum erreichen, jedoch nur unter hohen Anforderungen (z.B. müssen oftmals die Positionen der Nutzer und dessen Empfangsleistungen bekannt sein) in der Praxis zu realisieren sind.

Durch die Veränderung der Neigung verändert sich ebenfalls der Dynamikbereich der UL Empfangsleistungen (im Folgenden kurz UL Dynamikbereich) an der BS. Aufgrund dieses Zusammenhangs bearbeitet diese Dissertation auch das Thema des UL Dynamikbereiches. Die essentiellen Beiträge zu diesem Feld sind, dass wir das Problem eines zu hohen UL Dynamikbereiches erörtern, eine obere Schranke für den UL Dynamikbereich abschätzen und eine mathematische Gleichung für den UL Dynamikbereich einer BS als Funktion der Parameter der LTE Sendeleistungsregelung herleiten. Auf Grundlage dieser Gleichung können wir einen geschlossenen Operationsbereich für die Parameter der LTE Sendeleistungsregelung ableiten und die zuvor erforschten Algorithmen um eine Funktion erweitern, welche den UL Dynamikbereich der BSs nach oben beschränkt.

Um Missverständnissen vorzubeugen weisen wir bereits an dieser Stelle darauf hin, dass die SON Algorithmen, welche in dieser Arbeit vorgeschlagen werden (siehe Kapitel 4), besonders dafür geeignet sind auf langfristige Änderungen im Netz, welche über Wochen oder Monate entstehen, zu reagieren. Kurzfristige Änderungen im Verlauf eines Tages, wie z.B. ein zeitlich beschränkter, jedoch starker Anstieg des Datenverkehrs aufgrund einer Sportveranstaltung, können von den in Kapitel 4 vorgeschlagenen Algorithmen nur kompensiert werden, wenn deren minimal mögliche zeitliche Granularität deutlich unter einer Stunde liegt.

Stand der Technik und Motivation

In diesem Kapitel möchten wir zunächst genauer auf die Eigenschaften von SONs eingehen (Abschnitt 2.1) und danach einen Überblick über die Operationsmodi der Algorithmen im Feld der neigungsbasierten SND (Abschnitt 2.2) geben. Vor diesem Hintergrund möchten wir diese Arbeit noch einmal klar motivieren (Abschnitt 2.3) und darstellen, welche Algorithmen wir aus dem Stand der Technik als Referenz für diese Arbeit auswählen (Abschnitt 2.4).

2.1 Eigenschaften von Selbstorganisierten Netzen

In diesem Abschnitt geben wir einen Überblick über wichtige Eigenschaften von SONs. Dabei betrachten wir jede Eigenschaft zunächst unabhängig vom Anwendungsfall und gehen danach jeweils genauer auf den Anwendungsfall der neigungsbasierten SND ein.

2.1.1 Betrachteter Anwendungsfall

Wie in Kapitel 1 bereits erwähnt, können die Anwendungsfälle (engl. use cases) für SONs in die Kategorien

- Selbst-Planung,
(Anwendungsfälle: Planung der Lokalität einer neuen BS, Planung neuer Transportparameter für eine neue BS, etc.)
- Selbst-Ausbau / Selbst-Einrichtung,
(Anwendungsfälle: Automatische Nachbarschaftslisten, Netzwerkauthentifikation und initiale Konfiguration, Selbsttest, etc.)
- Selbst-Wartung / Selbst-Heilung und
(Anwendungsfälle: Software Aktualisierung, Störungserkennung, Störungsbeseitigung, etc.)

- Selbst-Optimierung
(Anwendungsfälle: SND, Energieeinsparung, Lastenausgleich, Minimierung der Fehlerrate, Interferenzminimierung, Optimierung der Nachbarschaftslisten, etc.)

eingeteilt werden [NGM07; RH12]. In jede Kategorie fallen eine Vielzahl von Anwendungsfälle, von welchen wir einige oben auflisten. In dieser Dissertation werden wir uns in der Kategorie der Selbst-Optimierung auf den Anwendungsfall der SND fokussieren. Wie bereits erwähnt, stellt die SND einen wichtigen Anwendungsfall dar, da die LKZs Netzabdeckung und Datendurchsatz typischerweise eine hohe Priorität bei Netzbetreibern haben, es jedoch herausfordernd ist beide LKZs simultan zu optimieren, da sie einander konträr sind [Ham+03]. Ein weiterer wichtiger Anwendungsfall innerhalb der Selbst-Optimierung ist die Energieeinsparung. In diesem Anwendungsfall minimieren die Netzbetreiber den Energieverbrauch ihrer Netze unter der Bedingung, dass bestimmte Mindestanforderungen an das Netz, wie z.B. das Vermeiden hoher Zelllasten, erfüllt werden (siehe z.B. [Feh+14]). Ein weiterer wichtiger Anwendungsfall ist der Lastenausgleich. Die Last einer Mobilfunkzelle ist eine wichtige LKZ, da sie ein Maß dafür ist, wie groß der Bruchteil der in der Zelle verwendeten Ressourcen ist. Ist die Last einer Zelle hoch, d.h. wenn die Zelle nur noch wenige freie Ressourcen hat, so können neuen oder bereits vorhandenen Nutzern ggf. nicht genügend Ressourcen zugewiesen werden, um ihnen eine adäquate Servicequalität zu gewährleisten. Daher ist es wichtig, die Lasten der Zellen untereinander zu balancieren und hohe Lasten zu vermeiden (siehe z.B. [Kle+12]). Der Anwendungsfall der Interferenzminimierung (oder auch oft als Interferenzkoordination bezeichnet) ist besonders für urbane Netze mit viel Interferenz zwischen den Basisstationen wichtig (siehe z.B. [Deb+14]) während eine Optimierung der Nachbarschaftslisten die Übergabe der Nutzer zwischen Zellen optimieren kann (siehe z.B. [Hua+09]).

Je nach betrachteten Anwendungsfall eignen sich verschiedene Netzparameter für die Selbstorganisation [Sch+08a]. Einen Überblick über typische Netzparameter geben wir im nächsten Abschnitt.

2.1.2 Verwendete Netzparameter

Für die Selbstorganisation von Netzen können eine Vielzahl von Netzparametern verwendet werden, wobei, wie zuvor erwähnt, die Wahl der ver-

änderlichen Netzparameter von den betrachteten Leistungskennzahlen abhängig gemacht werden sollte, um optimale Ergebnisse zu erzielen. In der Literatur gibt es bereits mehrere Veröffentlichungen, welche für verschiedene Anwendungsfälle spezifische Netzparameter vorschlagen (siehe z.B. [Sch+08a; 3GP11; Ber+08; FS08]). Im Bereich der Selbstoptimierung sind die folgenden Netzparameter typisch: Antennenneigung, Antennenazimut, Sendeleistungseinstellungen (inklusive Piloten-, Kontroll- und Datenkanäle), Zellnachbarschaftslisten, zellindividueller Offset, Handover Parameter, Scheduler Parameter oder das An- und Ausschalten von BSs, etc.

Im Feld der SND wird zumeist die Neigung der Antennen als variabler Netzparameter verwendet (siehe Referenzen aus Abschnitt 1.2), da sich die Antennenneigung besonders gut für diesen Anwendungsfall eignet [Kif+; AJ10]. Alternativ zur Antennenneigung wurden bereits der zellindividuelle Offset (siehe z.B. [Kle+12]) oder die Sendeleistung verwendet [Kar+13b; Eng+13]. Wir möchten darauf hinweisen, dass wir im Kapitel 5 dieser Arbeit den Dynamikbereich der UL Empfangsleistungen an den BSs begrenzen, indem wir zwei Netzparameter der LTE UL Sendeleistungsregelung [3GP14a] anpassen. Wir führen die UL Sendeleistungsregelung sowie die veränderten Netzparameter genauer in Kapitel 5 ein.

2.1.3 Architektur

Ein SON kann in einer zentralisierten, dezentralisierten oder hybriden Architektur betrieben werden [FS08]. Wie in Abb. 2.1 dargestellt, befinden sich die Funktionalitäten im Falle eines zentralisierten SONs im Bereichs- und Netzwerkmanagement. Dies können z.B. Algorithmen oder andere Automatismen sein. Im dezentralisierten Fall sind die SON Funktionalitäten lokal in den BSs installiert. Sind dezentralisierte und zentralisierte SON Funktionalitäten vorhanden, so handelt es sich um eine hybride SON Architektur. Vorteil einer dezentralisierten Architektur ist, dass die Zeitskalen für die Operation des SONs (im Folgenden bezeichnet als die zeitliche Granularität des SONs) kleiner sind als es in einer zentralisierten Architektur der Fall ist. Grund ist, dass die Kommunikation über das X2 Interface stattfinden kann, welches zwei BSs direkt miteinander verbindet. Diese direkte Kommunikation arbeitet wesentlich schneller als das vergleichbar langsam arbeitende Bereichs- oder Netzwerkmanagement. Typischerweise liegt die geringst mögliche zeitliche Granularität bei zirka 15 min für ein zentralisiertes System und im Bereich

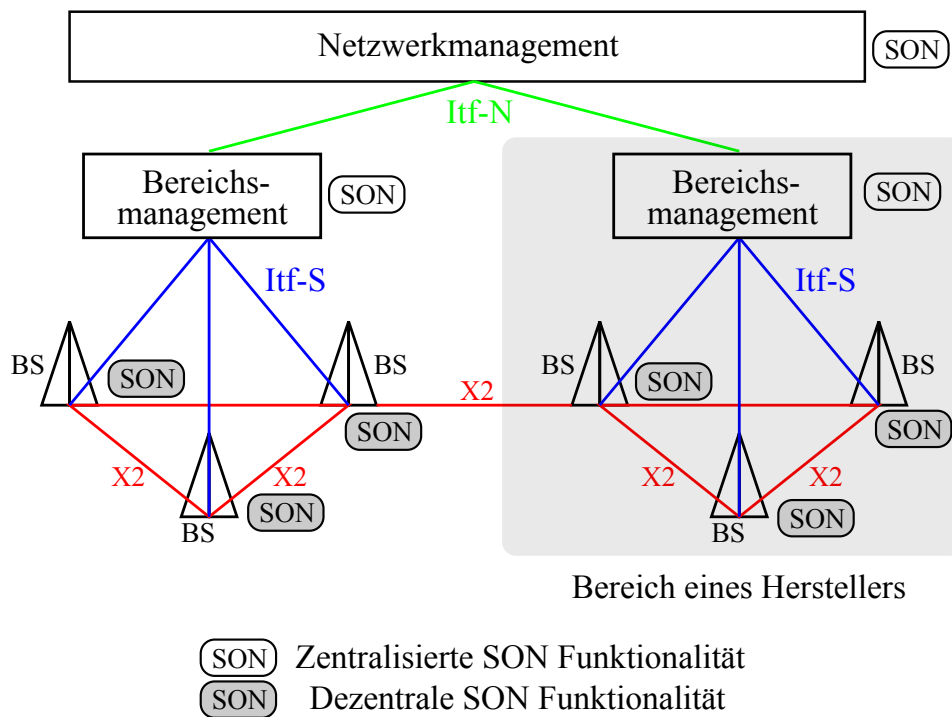


Abb. 2.1. Verschiedene SON Architekturen. Ein Herstellerspezifisches Bereichsmanagement administriert mehrere BSs. Verschiedene Herstellerbereiche werden im zentralen Netzwerkmanagement organisiert. Die BSs sind mittels des Interface Nord (Itf-N) und Interface Süd (Itf-S) mit dem Bereichsmanagement und Netzwerkmanagement verbunden. BSs können untereinander über das X2 Interface kommunizieren.

von Sekunden bis Minuten für den dezentralisierten Fall [sG12]. Ein anderer Vorteil des dezentralisierten SONs ist, dass der Kommunikationsaufwand typischerweise geringer ist als bei zentralisierten SONs. Andererseits sind Probleme, welche durch die bedingte Kompatibilität verschiedener Hersteller der BSs miteinander entstehen, leichter in zentralisierten SONs zu lösen. Außerdem hat eine zentralisierte Architektur den Vorteil, dass Informationen, wie z.B. Messungen, aus einem viel größeren Bereich und in größerer Menge gesammelt werden können. So ist es dem zentralisierten SON besser möglich große Bereiche des Netzes zu optimieren. Weiterhin ist die Qualität der Lösungen eines zentralisierten SONs typischerweise besser als die eines dezentralisierten SONs, da Ersteres mehr Informationen verfügbar hat [sG12; FS08]. Wie bereits erwähnt, ist jedoch die geringst mögliche zeitliche Granularität von zirka 15 min ein Nachteil der zentralisierten Architektur.

Wir möchten darauf hinweisen, dass in [PB05] und den darin referenzierten Quellen ein System als selbstorganisiert definiert wird, wenn es ohne externe oder zentrale Einheit organisiert ist. Mit anderen Worten müssen die individuellen Teilnehmer des SONs direkt miteinander in einer dezentralisierten Weise miteinander interagieren. Dies widerspricht der hier präsentierten

zentralisierten Architektur von SONs. Nichtsdestotrotz folgen wir der Aufteilung in dezentralisierte, hybride und zentralisierte Architektur da diese Definitionen von 3GPP (siehe [FS08]) für LTE so eingeführt wurden.

Im Feld der neigungs-basierten SND verwenden die meisten Veröffentlichungen eine zentralisierte Architektur (siehe z.B. [Eng+13; Kle+12])¹, da es, wie oben erwähnt, in dieser Architektur leichter möglich ist Messungen bzw. Informationen über einen größeren Bereich des Netzes zu sammeln.

2.1.4 Verwendete Methode

Eine weitere Eigenschaft eines SONs ist die verwendete Methode zur Findung neuer Einstellungen der Netzparameter. Beschränken wir uns nicht nur auf den Anwendungsfall der neigungs-basierten SND, so können wir feststellen, dass in der Literatur eine Vielzahl von Methoden zur Selbstorganisation von Mobilfunknetzen verwendet werden.

Einerseits werden biologisch inspirierte Methoden verwendet, welche unter anderem vom Verhalten von Bienen oder Ameisen abgeleitet sind [Zha+14]. Es werden z.B. die Prinzipien der Schwarmintelligenz [Goy+10; Gha+07; DDCG05], der künstlichen neuronalen Netze [DB05] und der Immunsysteme [LBS04] sowie der Evolutionstheorie [DBR06] angewandt, um eine Vielzahl von Anwendungsfällen der Selbstorganisation zu lösen. Weiterhin werden oftmals Methoden des maschinellen Lernens sowie Spieltheorie angewandt. Im ersteren Feld werden zumeist Ansätze des bestärkenden Lernens verwendet, siehe z.B. [SBC12; SC12; IMT12a; IMT12b; RKC10; Tha+12]. Beiträge, welche Spieltheorie für die Selbstorganisation im Feld der mobilen Kommunikation verwenden, sind z.B. [Hua+14; She+14]. Häufig werden auch klassische Optimierungsmethoden wie z.B. Coordinate Ascent / Descent [EKG11; Rev12], Simulated Annealing [Kar+13a; KGL12; SVY06; Bul+13] oder Nelder-Mead [Sos+15a] verwendet. Ebenso werden regelbasierte Methoden verwendet [Ger+04; Ami+11]. SONs, welche dem letzteren Ansatz folgen, arbeiten auf Grundlage von festen Regeln, welche zumeist aus existierender Erfahrung der Netzbetreiber abgeleitet sind.

Beschränken wir uns auf den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall der neigungs-basierten SND, so können wir feststellen, dass häufig die Methode Simulated Annealing (siehe z.B. [Kar+13a; Eng+13; SVY06]) oder

¹Viele Veröffentlichungen bestimmen die verwendete Architektur nicht. Jedoch kann aus dem Kontext oftmals darauf geschlossen werden, dass eine zentralisierte Architektur verwendet wird.

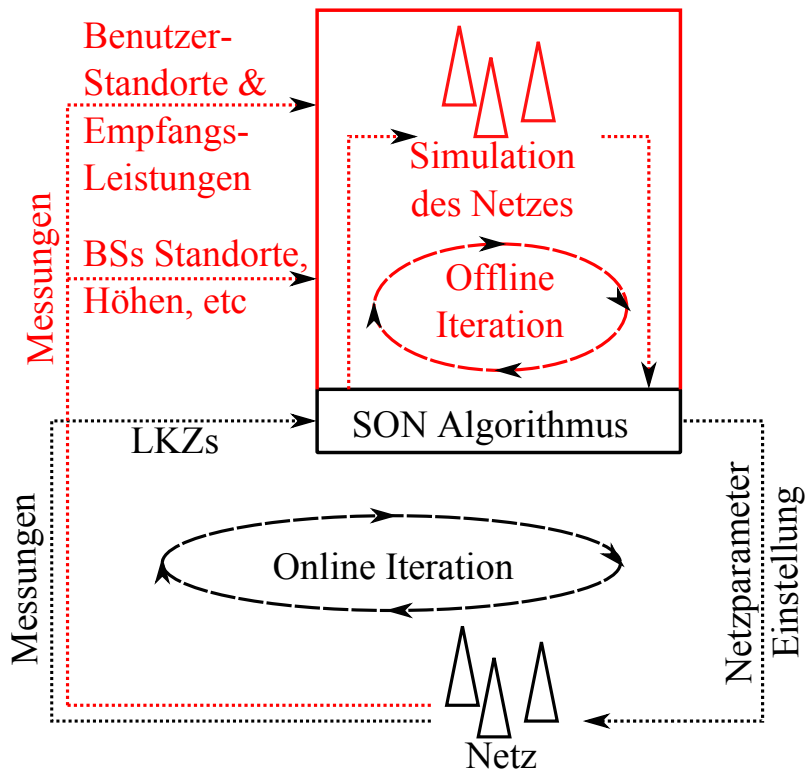


Abb. 2.2. Die Prinzipien der online und offline Selbstorganisation. In schwarz ist die online Selbstorganisation dargestellt. Die Kombination von schwarzen und roten Zeichnungen ergibt ein offline SON [Ber+14a].

Methoden des bestärkenden Lernens (siehe z.B. [IMT12a; IMT12b; RKC10; Tha+12]) verwendet werden. Simulated Annealing (SA) ist eine metaheuristische Optimierungsmethode [KGJV83], welche die langsame Abkühlung eines Festkörpers nachahmt. Wichtiges Merkmal der SA Methode ist, dass neue Parameterkonfigurationen auch akzeptiert werden können, wenn sie schlechter sind als die vorherige Parameterkonfiguration. Da wir in dieser Arbeit ebenfalls Algorithmen verwenden, welche die SA Methode anwenden, führen wir die besagte Methode im Abschnitt 4.3.1 im Detail ein. Wie schon in der Einleitung erklärt, kann die Methode des bestärkenden Lernens schrittweise erlernen, welches die beste Maßnahme für einen bestimmten Systemzustand ist. Da wir in dieser Arbeit keine Algorithmen verwenden, welche die Methode des bestärkenden Lernens verwenden, führen wir diese Methode nicht im Detail ein und verweisen daher auf die oben zitierten Anwendungen dieser Methode und auf [SB98].

2.1.5 Operationsmodus

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, kann ein SON online oder offline arbeiten. Abgesehen von unseren eigenen Beiträgen [Ber+14a; Ber+14d; Ber+15] wurde eine Einteilung des Operationsmodus in online und offline bisher noch nicht in der Literatur erwähnt. Wie wir jedoch darlegen werden, ist der Aspekt, ob ein SON online oder offline operiert, von zentraler Bedeutung für diese Arbeit.

Ein SON, welches online arbeitet, durchläuft die folgende Schleife² (siehe Abb. 2.2): Zuerst werden die Werte der LKZs entweder direkt oder indirekt über Messungen bestimmt³. Basierend auf den Werten der LKZs schlägt der verwendete SON Algorithmus eine neue Einstellung der Netzparameter vor. Diese neue Einstellung der Netzparameter wird danach direkt im Netz angewandt, die neuen LKZs werden wieder gemessen und die Schleife beginnt von neuem.

Ein SON, welches offline arbeitet, verwendet eine Simulation des betrachteten Netzes. Das SON misst nicht nur die betrachteten LKZs sondern verwendet weitere Informationen, welche nötig sind, um das der Simulation zugrundeliegende Modell ausführen zu können. Mithilfe dieser Simulation des Netzes ist es dem offline SON möglich die Suche nach einer neuen Einstellung der Netzparameter offline, d.h. nur in der Simulation, durchzuführen (siehe Abb. 2.2 roter Kasten). Erst das Ergebnis dieser offline Simulation, d.h. die resultierende Einstellung der Netzparameter, wird im realen Netz angewandt. Eine solche Vorgehensweise zur Selbstorganisation wurde bereits in [IZ14] vorgeschlagen.

Größter Vorteil eines online SONs ist, dass keine Simulation des betrachteten Netzes verwendet wird, da alle vom SON vorgeschlagenen Einstellungen der Neigungen im realen Netz angewandt werden und die resultierenden LKZs gemessen und nicht simuliert werden. Der Verzicht auf die Verwendung einer Simulation des betrachteten Netzes hat den Vorteil, dass das SON ohne zusätzliche Informationen, welche für die Simulation des Netzes von Nöten gewesen wären, operieren kann. Je nach Anwendungsfall des SONs bzw. je nach verwendetem Modell können dies verschiedene Eingangsgrößen sein. Betrachten wir Modelle, welche die Netzabdeckung und den Datendurchsatz

²Wir möchten darauf hinweisen, dass diese Schleife mit der in [Sch+08a] veröffentlichten Rückkopplungsschleife identisch ist.

³Zum Beispiel könnte die Netzabdeckung indirekt über die Anzahl der gesammelten unterbrochenen Verbindungen (engl. dropped calls) bestimmt werden.

im Netz modellieren können (siehe z.B. [VDL09; VLS10; FF12]), so sind die Lokalitäten der Nutzer sowie deren Empfangsleistungen für alle Einstellungen der Netzparameter und alle betrachteten BSs nötige Eingangsgrößen⁴. Solche Informationen sind jedoch oftmals nur mit großem technischen und / oder finanziellen Aufwand zu erlangen, da es spezifische Aufzeichnungsinstrumente auf der Netz- oder Benutzerseite erfordert, um diese Informationen akkurat sammeln zu können (entweder müssen Minimization-of-Drive-Tests Messungen [3GP14d] oder noch aufwendigere Drive-Tests [Gha] durchgeführt und ausgewertet werden). Daher ist der Verzicht auf eine Simulation des betrachteten Netzes ein Vorteil des online SONs, weil das SON somit geringere finanzielle und technische Voraussetzungen zur Anwendung hat. Weiterhin erwarten wir, dass ein online SON robuster ist als ein offline SON, da es ausschließlich auf Messungen beruht und nicht auf ein möglicherweise ungenaues Modell angewiesen ist.

Allerdings ergeben sich durch die online Selbstorganisation auch Nachteile. Da in der online Selbstorganisation jede Einstellung der Netzparameter im realen Netz angewandt wird, ergeben sich die folgenden Konsequenzen:

1. Die Anzahl der durchgeführten Iterationen ist von hoher Wichtigkeit. Jede Iteration benötigt eine gewisse Zeit, welche nicht kürzer sein kann, als die Zeit, welche benötigt wird, um die LKZs zu bestimmen. Dadurch kann die Selbstorganisation sehr lange dauern, was nach Möglichkeit zu vermeiden ist.
2. Die LKZs *aller* vorgeschlagenen Einstellungen der Netzparameter sind von hoher Wichtigkeit. Schlägt das SON eine sehr unvorteilhafte Einstellung der Netzparameter vor, so können sich die Werte der LKZs wesentlich verschlechtern. Dies ist ebenfalls zu vermeiden.

Aufgrund dieser Konsequenzen sind wir in einem online SON im Vergleich zum offline SON in der Wahl der verwendeten Methode zur Findung einer besseren Einstellung der Netzparameter stark eingeschränkt. Im folgenden Abschnitt sowie in Kapitel 3 werden wir mehr darauf eingehen, welche Methoden für eine online Selbstorganisation angemessen sind.

Größter Vorteil der offline Selbstorganisation ist, dass nahezu jede Methode zur Findung einer besseren Einstellung der Netzparameter verwendet werden

⁴Natürlich werden für die Modelle weitere Eingangsgrößen, wie z.B. eine Liste der betrachteten BSs, benötigt. Im Sinne der Beschaffungskosten sind diese Informationen jedoch nicht kritisch.

kann⁵, da die Anzahl der vorgeschlagenen Einstellungen der Netzparameter (Anzahl der Iterationen) nicht von hoher Relevanz ist und Einstellungen der Netzparameter, welche schlechte Werte der LKZs mit sich führen, nicht im realen Netz angewandt werden. Eine hohe Anzahl an Iterationen sowie schlechte Werte der LKZs können während der offline Optimierung toleriert werden, da die untersuchten Einstellungen der Netzparameter nicht im realen Netz angewandt werden. Nur das optimierte Ergebnis wird im realen Netz angewandt. Somit können z.B. mathematische Optimierungsmethoden wie SA und Nelder-Mead oder komplexe biologisch inspirierte Algorithmen verwendet werden. Aufgrund der hohen Anzahl an Iterationen sowie der erhöhten Wahrscheinlichkeit lokalen Optima zu entfliehen (welche sich aus der Möglichkeit ergibt, dass auch Einstellungen der Netzparameter gewählt werden können, welche schlechte Werte der LKZs zur Folge haben), erwarten wir von einer offline Selbstorganisation eine bessere Leistung im Sinne der Werte der LKZs als von einer online Selbstorganisation.

Nachteil einer offline Selbstorganisation ist, dass die zur Ausführung der Simulation nötigen Eingangsgrößen vorhanden sein müssen. Wie bereits oben erwähnt, kann das Ermitteln dieser Informationen (z.B. Empfangsleistungen für alle möglichen Konfigurationen der Netzparameter und Lokalitäten der Nutzer) jedoch einen hohen finanziellen und / oder technischen Aufwand mit sich führen. Wir möchten darauf hinweisen, dass die nötigen Eingangsgrößen der Simulation die aktuelle Situation im Netz beschreiben müssen, um eine zuverlässige Optimierung garantieren zu können. Das heißt, dass die Eingangsgrößen der Simulation entweder kontinuierlich ermittelt werden müssen oder dass deren Veränderungen durch Dynamiken im Netz modelliert werden müssen. Ein weiterer Nachteil ist, dass stets eine Diskrepanz zwischen dem in der Simulation verwendeten Modell und der Realität besteht, welche zur Verschlechterung der Leistung des SONs führen kann. Daher sollte die besagte Diskrepanz möglichst gering gehalten werden, was hohe Anforderungen an die oben erwähnte Modellierung der Eingangsgrößen der Simulation mit sich führt.

In den Tabellen 2.1 und 2.2 fassen wir die allgemeinen Vor- und Nachteile von on- und offline SONs zusammen [Ber+14a].

Wir möchten darauf hinweisen, dass die Wahl des Operationsmodus das SON nicht auf eine spezielle Architektur beschränkt.

⁵Einschränkung bei der Wahl der Methode entstehen lediglich dadurch, dass die benötigte Zeit zur Ausführung der Methode in einem für das SON angemessenen Rahmen liegen muss.

Tab. 2.1. Vor- und Nachteile der online Selbstorganisation

Online SON
Vorteile
<ul style="list-style-type: none">• Geringe technische und / oder finanzielle Voraussetzungen für die Anwendung in der Praxis, da<ul style="list-style-type: none">→ keine Simulation des betrachteten Netzes nötig→ keine Modellierung der Netzdynamiken nötig• Robuste Selbstorganisation, da<ul style="list-style-type: none">→ kein fehlerhaftes Systemmodell zum Einsatz kommt
Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Starke Einschränkungen in der Wahl der Optimierungsmethode, da<ul style="list-style-type: none">→ es wichtig ist die Anzahl der durchgeführten Iterationen zu beschränken→ die LKZs aller vorgeschlagenen Einstellungen der Netzparameter von hoher Wichtigkeit sind• Dauer der Selbstorganisation länger als beim offline SON, da<ul style="list-style-type: none">→ jede Einstellung der Netzparameter im realen Netz angewandt wird

Tab. 2.2. Vor- und Nachteile der offline Selbstorganisation

Offline SON
Vorteile
<ul style="list-style-type: none">• Komplexe Optimierungsmethoden können verwendet werden, da<ul style="list-style-type: none">→ die Anzahl der durchgeführten Iterationen innerhalb der offline Simulation groß sein kann→ die Werte der LKZs innerhalb der offline Simulation beliebig schlechte Werte annehmen können• Dauer der Selbstorganisation kürzer als beim online SON, da<ul style="list-style-type: none">→ nur die Einstellung der Netzparameter, welche Lösung der offline Optimierung ist, im Netz angewandt wird
Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Hohe technische und / oder finanzielle Voraussetzungen für Anwendung in der Praxis, da<ul style="list-style-type: none">→ nötige Eingangsgrößen für die Simulation vorhanden sein müssen→ Veränderungen in den Eingangsgrößen entweder stets erfasst oder modelliert werden müssen• Weniger robuste Selbstorganisation als bei einem online SON, da<ul style="list-style-type: none">→ fehlerhafte Systemmodelle verwendet werden

Wir möchten darauf hinweisen, dass ein SON noch in leicht anderen Varianten als in der hier präsentierten offline Simulation betrieben werden

kann, wenn genug Informationen über das Netz vorhanden sind, um es in einer Simulation modellieren zu können. Alternativ könnte man das Netz beispielsweise in mehreren parallelen Simulationen mit jeweils verschiedenen Einstellungen der Netzparameter in Echtzeit emulieren und im realen Netz die Parameter der besten Simulation anwenden. Solche Lösungen wurden jedoch noch nicht publiziert und unterscheiden sich in ihren qualitativen Vor- und Nachteilen nicht von dem hier präsentierten offline SON, da ebenfalls umfangreiches Systemwissen verwendet wird und die Leistung des SONs von der Genauigkeit der Systemmodelle abhängt.

Da, wie bereits erwähnt, der verwendete Operationsmodus des SONs für diese Arbeit von wesentlicher Bedeutung ist, diskutieren wir diese Eigenschaft für SON Algorithmen der neigungsbasierten SND ausführlich im nächsten Abschnitt.

2.2 Operationsmodi im Feld der Neigungsbasierten Selbstorganisation der Netzabdeckung und des Datendurchsatzes

In diesem Abschnitt stellen wir dar, welche Operationsmodi die bisherigen Veröffentlichungen im Feld der neigungsbasierten SND verwenden. Aus dem obigen Abschnitt wird klar, dass eine offline Simulation unabhängig von den Eigenschaften der verwendeten Methode der Selbstorganisation immer durchgeführt werden kann, sobald die nötigen Eingangsgrößen für die Simulation des betrachteten Netzes vorhanden sind. Im Gegensatz dazu kann nicht jeder SON Algorithmus zur online Selbstorganisation verwendet werden. Grund dafür ist, dass der Netzbetreiber einerseits Einstellungen, welche die Werte der LKZs verschlechtern, vermeiden möchte und andererseits die Zeitdauer, welche für eine Selbstorganisation nötig ist, begrenzen möchte (siehe Nachteile eines online SON in Tabelle 2.1). Daher sind Methoden, welche oftmals Einstellungen der Netzparameter vorschlagen, welche die Werte der LKZs verschlechtern und / oder sehr viele Iterationen für die Selbstorganisation benötigen, nicht für eine online Selbstorganisation geeignet. Wir möchten darauf hinweisen, dass die Grenze, ab der ein SON Algorithmus als nicht

mehr tauglich für eine online Selbstorganisation betrachtet wird, von den Anforderungen der Netzbetreiber abhängt. Diese können beispielsweise eine unterschiedliche Zeitdauer für die Selbstorganisation tolerieren, was zu einer unterschiedlichen Einteilung einer Methode in online und offline Operation führen kann. Auch bestimmt die Wahl der Methode zur Selbstorganisation noch nicht sofort den Operationsmodus, da die Methoden mittels inhärenter Parameter (wie z.B. Schrittlängenparameter) für den entsprechenden Operationsmodus angepasst werden können. Aus diesen Gründen ist die folgende Einteilung verschiedener SON Algorithmen in online und offline SONs nicht als festgeschrieben anzusehen.

Wie bereits erwähnt, findet der Operationsmodus in der bisherigen Literatur nur wenig Beachtung. Die meisten existierenden Veröffentlichungen stellen daher nicht dar, ob der vorgeschlagene SON Algorithmus online oder offline arbeiten soll. Anhand der Eigenschaften der vorgeschlagenen SON Algorithmen können wir jedoch oftmals schlussfolgern, ob der Algorithmus eher für ein online oder ein offline SON geeignet ist. Enthält der Algorithmus beispielsweise einen sehr großen zufälligen Anteil, welcher große Sprünge in der Einstellung der Netzparameter erlaubt oder wenn der Algorithmus beispielsweise eine sehr große Anzahl an Iterationen (z.B. mehr als 100) benötigt, so können wir davon ausgehen, dass nur eine offline Anwendung angemessen ist, da ein online SON in einem solchen Fall aufgrund der oben erwähnten Nachteile ungeeignet wäre. Wie bereits im Abschnitt 1.2 erwähnt, verwenden existierende SONs im Feld der neigungs-basierten SND zumeist mathematische Optimierungsmethoden, regelbasierte Methoden oder Methoden des bestärkenden Lernens.

Sehen wir zunächst einmal von den Ansätzen ab, welche ausschließlich regelbasiert arbeiten oder die Methode des bestärkenden Lernens verwenden, so können wir schlussfolgern, dass der Großteil dieser Beiträge einer offline Selbstorganisation folgt. Die Beiträge [Kar+13a; Kar+13c; SVY06; Eng+13] verwenden Simulated Annealing, Taguchi's Methode [Roy90] oder gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung nach [Ibm]⁶. Diese komplexen mathematischen Optimierungsmethoden eignen sich eher für eine offline Selbstorganisation, da sie, je nach Methode, eine große Anzahl an Iterationen durchführen und / oder die Einstellung der Netzparameter wesentlich ändern. Eine große Anzahl an Iterationen ist für eine online Selbstorganisation ungeeignet, da nach jeder Iteration die LKZs gemessen werden müssen. Da in einer online Selbstorganisation die Werte der LKZs zu jeder Iteration

⁶[Eng+13] verwendet zusätzlich noch einen verkehrsampelebasierten Regelansatz.

von Wichtigkeit sind, sind wesentliche Änderungen in der Einstellung der Netzparameter zu meiden ⁷. Nur die Algorithmen, welche in [EKG11; Rev12] vorgeschlagen werden, können unserer Einschätzung nach online arbeiten. Wie bereits erwähnt, betrachtet [EKG11] jedoch die Netzabdeckung nicht explizit und [Rev12] stellt die Funktionsweise des Algorithmus nicht vollständig dar. Zudem untersuchen beide Beiträge ihre Methode nicht auf die Tauglichkeit zur Anwendung als online SON.

Vorhandene Beiträge im Feld der neigungsbasierten SND, welche die Methode des bestärkenden Lernens verwenden (siehe [IMT12a; IMT12b; RKC10; Tha+12]), sind mittels der veröffentlichten Simulationsergebnisse nur schwer in online oder offline Operation einzuordnen. Der Grund dafür ist, dass die Tauglichkeit für eine online Selbstorganisation der zitierten lernenden SON Algorithmen sehr stark vom Verhältnis zwischen der Exploration neuer Einstellungen der Netzparameter und der Verwertung gefundener Einstellungen der Netzparameter abhängt. Wird die Exploration neuer Einstellungen der Netzparameter zu stark betrieben, so kann es sein, dass zu viele Einstellungen der Netzparameter vorgeschlagen werden, welche die Werte der LKZs wesentlich verschlechtern. Exploriert der Algorithmus hingegen zu wenig, so kann der Algorithmus möglicherweise keine guten Ergebnisse liefern oder die Selbstorganisation benötigt sehr viele Iterationen [SB98].

In regelbasierten SON Algorithmen, wie z.B. [Ger+04], sind die Aktionen des SONs auf Grundlage von Erfahrungen genau auf den betrachteten Anwendungsfall angepasst. Dadurch erwarten wir, dass eine online Selbstorganisation im Falle von regelbasierten SON Algorithmen möglich ist. Regelbasierte Ansätze haben jedoch den starken Nachteil, dass deren Entscheidungen nach festgelegten Verfahren getroffen werden. Verhält sich das Netz jedoch anders als erwartet, so sind die getroffenen Entscheidungen möglicherweise destruktiv und das SON erzielt schlechte Leistungen.

Im Folgenden stellen wir in einem gesonderten Abschnitt die Motivation dieser Arbeit dar.

Zusammenfassend können wir erkennen, dass es bisher nur wenige Beiträge im Feld der neigungsbasierten SND gibt, welche online operieren und weder regelbasiert arbeiten noch die Methode des bestärkenden Lernens verwenden.

⁷Hier nehmen wir an, dass eine wesentliche Änderungen der Einstellung der Netzparameter die Werte der LKZs wesentlich verbessern oder verschlechtern kann. Da wesentliche Verschlechterungen der Werte der LKZs zu vermeiden sind, müssen die besagten wesentlichen Änderungen der Einstellung der Netzparameter in einer online Selbstorganisation vermieden werden.

2.3 Motivation dieser Dissertation

Wesentliche Beiträge dieser Arbeit sind das Erstellen eines Konzeptes zur Selbstorganisation mehrerer LKZs bei geringem Systemwissen⁸ (siehe Kapitel 3) sowie das Erstellen und Untersuchen von online Algorithmen zur neigungsbasierten SND (siehe Kapitel 4 und 5). Im Folgenden möchten wir die einzelnen Aspekte dieser Beiträge motivieren.

Online Selbstorganisation

Diese Dissertation fokussiert sich auf SON Lösungen, welche online arbeiten. Die Motivation für diese Wahl ist, dass eine online Selbstorganisation gegenüber einer offline Selbstorganisation die wichtigen Vorteile hat, dass sie (siehe Abschnitt 2.1.5)

- geringe technische und / oder finanzielle Voraussetzungen für die Anwendbarkeit in der Praxis hat (beispielsweise ist es bei einer SND nicht nötig, dass die Lokalitäten der Benutzer und deren Empfangsleistungen für alle Einstellungen der Netzparameter bekannt sind) und
- sehr robust arbeitet (da keine fehlerhaften Systemmodelle zum Einsatz kommen).

Weiterhin gibt es, wie im Abschnitt 2.2 dargestellt, bisher nur wenige Arbeiten im Feld der online neigungsbasierten SND. Aufgrund der oben erwähnten Vorteile können online SON Algorithmen kostengünstige Alternativen zu offline Algorithmen sein. Daher ist die Erforschung von online Algorithmen sowie deren Vergleich mit offline Algorithmen von Interesse.

Anwendungsfall SND

Wir konzentrieren uns speziell auf den Anwendungsfall der SND, da die Netzabdeckung als auch der Datendurchsatz für die Netzbetreiber typischerweise LKZs mit hoher Priorität sind. Zudem ist eine gemeinsame Selbstorganisation dieser LKZs besonders herausfordernd, da beide LKZs einander konträr sind [Ham+03].

Netzparameter Neigung

Die Verwendung der Neigung als variablen Parameter des SONs, wird dadurch motiviert, dass sich dieser Parameter dank moderner Antennentechnologien

⁸Als geringes Systemwissen verstehen wir, dass nicht genügend Informationen über das betrachtete Netz verfügbar sind, um es mittels eines Modells in einer Simulation abbilden zu können. Somit ist eine online Selbstorganisation notwendig.

nologien einfach modifizieren lässt [KG00] und dass Änderungen in den Neigungen einen starken Einfluss auf die Netzabdeckung und den Datendurchsatz haben [Kif+; AJ10].

Simultane DL und UL Selbstorganisation

Diese Arbeit erstellt erstmalig Algorithmen zur neigungs-basierten SND, welche den DL und UL simultan betrachten. Dieser Aspekt wird dadurch motiviert, dass die Bedeutung der UL Übertragung derzeit stark an Bedeutung gewinnt. Der Grund dafür ist das Aufkommen neuer Anwendungen und Dienstleistungen, wie z.B. Sensornetzwerke, Videotelefonie oder Social Networking, welche eine Parität zwischen UL und DL Datenverkehr oder sogar mehr UL als DL Datenverkehr erfordern. Weiterhin können wir auf Grundlage einer adäquaten DL Leistung des Netzes nicht darauf schließen, dass die UL Leistung des Netzes für den Netzbetreiber zufriedenstellend ist, da sich die Interferenzsituation zwischen UL und DL grundlegend unterscheiden.

2.4 Referenzansatz für diese Dissertation

Um die Leistung der in dieser Dissertation erstellten online SON Algorithmen einzuordnen, würden wir deren Leistung im Idealfall mit

- einer online Lösung nach dem Stand der Technik,
- einer offline Lösung nach dem Stand der Technik, sowie
- mit der bestmöglichen zu erreichenden Leistung bzw. dem globalen Optimum

vergleichen. Wie wir jedoch bereits im Kapitel 1 erörtert haben, gibt es auf dem Feld der neigungs-basierten online SND keine adäquaten Beiträge, welche als Referenz geeignet sind⁹. Weiterhin ist es uns, wie ebenfalls im Kapitel 1 erörtert, nicht möglich in realistischen Simulationsszenarien das globale Optimum zu bestimmen, da es zu viele mögliche Einstellungen der Neigungen gibt. Daher verwendet diese Dissertation einen offline Algorithmus, um die Leistung der zu entwickelnden online Algorithmen zur SND zu bewerten. Jedoch gibt es nach dem Stand der Technik bisher keine offline SON Algorithmen, welche eine neigungs-basierte SND simultan im DL und UL durchführen. Daher werden wir in dieser Arbeit ebenfalls einen

⁹Algorithmen, welche Methoden des bestärkenden Lernens verwenden, kategorisieren wir als offline Ansätze.

Algorithmus zur neigungsbasierten, simultanen DL und UL SND einführen und untersuchen, welcher für eine offline Selbstorganisation vorgesehen ist. Da dieser Algorithmus eine offline Alternative zu den zu präsentierenden online Algorithmen darstellt, wird er als offline Referenzalgorithmus oder nur kurz als Referenzalgorithmus bezeichnet. Der Referenzalgorithmus wird einerseits auf Beiträgen dieser Arbeit aufbauen. So werden wir beispielsweise die im Kapitel 3 eingeführte Verwendung von Kostenfunktionen zur simultanen Selbstorganisation mehrerer LKZs verwenden. Andererseits werden wir Aspekte aus dem Stand der Technik aufgreifen. So wird dieser Referenzalgorithmus auf Basis der Methode Simulated Annealing arbeiten.

Wir wählen diese Methode, da (i) Simulated Annealing in bisherigen Veröffentlichungen im Feld der DL Selbstorganisation bereits rege Anwendung findet (siehe z.B. [Bul+13; Zha+10; Kar+13a; KGL12; SVY06]) und damit als Stand der Technik angesehen werden kann, (ii) die Methode aufgrund ihres stark probabilistischen Charakters und des Bedarfs an vielen Iterationen eher für eine offline Selbstorganisation geeignet, (iii) verhältnismäßig einfach zu implementieren ist und (iv) bei unbegrenzt langer Anwendung zum globalen Optimum führt [HJJ03].

Wie bereits oben erwähnt ist Simulated Annealing eine metaheuristische Optimierungsmethode [KGJV83], welche die langsame Abkühlung eines Festkörpers nachahmt. In jeder Iteration der Methode wird eine zufällige Einstellung, welche zur aktuellen Einstellung benachbart ist, gewählt. Verbessert sich die zu optimierende Funktion, so wird die neue Einstellung akzeptiert. Einstellungen, welche die zu optimierende Funktion verschlechtern, werden auf zufälliger Basis akzeptiert. Die Wahrscheinlichkeit für die Akzeptanz solch einer Einstellung steigt mit der vorherrschenden Temperatur (die Temperatur ist ein Parameter der Methode) und sinkt mit steigender Verschlechterung der zu optimierenden Funktion. Die Temperatur wird nach einem vorgegeben Verlauf mit jeder Iteration geringer, so dass die Optimierung langsam zum Stillstand gelangt. Im Abschnitt 4.3.1 werden wir Simulated Annealing genauer betrachten und im Abschnitt 4.3.4 werden wir den offline Referenzalgorithmus einführen.

Im folgenden Kapitel werden wir nun ein Konzept zur Erstellung von Algorithmen zur simultanen Selbstorganisation mehrerer LKZs ein. Dieses Konzept adressiert die Einschränkung, dass nur wenig Systemwissen vorhanden ist.