
Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung und erzielte Ergebnisse	3
1.3 Gliederung	6
2 Peer-to-Peer, strukturierte Overlay-Netze und Key-based Routing	9
2.1 Peer-to-Peer und Overlay-Netze	9
2.2 Unstrukturierte Overlay-Netze	11
2.3 Strukturierte Overlay-Netze	11
2.3.1 KBR: Begriffsdefinitionen	12
2.4 Die Common API für strukturierte Overlay-Netze	13
2.4.1 Verteilte Hash-Tabellen	14
2.5 Anforderungen und Randbedingungen	14
2.5.1 Sicherheit	15
2.5.2 Knotenfluktuation	17
2.6 Topologieadaption in strukturierten Overlay-Netzen	17
2.7 Etablierte strukturierte Overlay-Protokolle	19
2.7.1 Chord	19
2.7.2 Pastry	21
2.7.3 Bamboo	24
2.7.4 Kademlia	25
2.7.5 Weitere strukturierte Overlay-Protokolle	27
2.8 Eigenschaften strukturierter Overlay-Protokolle	28
2.8.1 Overlay-Struktur	28
2.8.1.1 Overlay-Struktur – Verwandte Arbeiten	30
2.8.2 Redundanz in den Routing-Tabellen	30
2.8.3 Metriken für Routing und Schlüsselverantwortlichkeit	31
2.8.4 Stabilisierungsprotokolle in Overlay-Netzen	33

2.8.4.1	Beitrittsverfahren zum Overlay-Netz	33
2.8.4.2	Kennenlernen anderer Overlay-Knoten	33
2.8.4.3	Optimierung und Wartung der Routing-Tabellen .	34
2.9	Evaluierungsmethodik für strukturierte Overlay-Netze	35
2.9.1	Das Performance vs. Cost Evaluation Framework	37
2.10	Zusammenfassung	38
3	Netzwerk-Koordinatensysteme	39
3.1	Grundkonzept	39
3.2	Landmark-basierte Systeme	41
3.3	Dezentrale Systeme	43
3.3.1	Stand der Forschung und neue Entwicklungen	45
3.4	Alternativen zu Netzwerk-Koordinatensystemen	45
3.4.1	Aktive Latenzmessungen	46
3.4.2	IP-basierte Geolokation	46
3.5	Evaluierungsmethodik für Netzwerk-Koordinatensysteme	47
3.6	Zusammenfassung	48
4	OverSim – Das Overlay-Simulations-Framework	49
4.1	Das Simulations-Framework	50
4.1.1	Anforderungen an OverSim	50
4.1.2	OMNeT++	52
4.1.3	Architektur	53
4.1.4	Simulationsablauf	53
4.1.4.1	Austauschbare Underlay-Abstraktion	55
4.1.4.2	Austauschbare Churn-Generatoren	57
4.1.4.3	Basisklassen und Schnittstellen	58
4.1.4.4	Globale Instanzen	61
4.1.5	Anbindung an reale Netzwerke	62
4.2	Eigene Beiträge als Erweiterungen von OverSim	63
4.2.1	Realistische simulierte Paketverzögerungen	63
4.2.2	Verfälschung der koordinatenbasierten Latenzen	64
4.2.2.1	Gemessene Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Schätzfehler	65
4.2.2.2	Nachbildung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen .	66
4.2.2.3	Herleitung der Umkehrfunktionen	67
4.2.2.4	Resultierende Latenzen	69
4.2.2.5	Einsatzszenario der Fehlermodellierung	69
4.2.3	Zentrales Modul zur Verwaltung von Latenzinformationen .	70
4.2.3.1	Generische Discovery Phase	71
4.2.3.2	Integration von GNP/NPS	71

4.2.3.3	Integration von (S)Vivaldi	72
4.2.3.4	Pseudo-Netzwerk-Koordinatensystem mit realistischer Fehlerverteilung	72
4.3	Evaluierung mit OverSim	73
4.3.1	Simulationsparameter	74
4.4	Zusammenfassung	76
5	R/Kademlia – Rekursives Kademlia	77
5.1	Analyse: Knotenfluktuation	77
5.1.1	Mathematische Modellierung von Knotenfluktuation	78
5.1.2	Analyse verschiedener Routing-Modi bei Knotenfluktuation	82
5.1.2.1	Rekursives Routing und rekursiver Lookup	82
5.1.2.2	Iteratives Routing und iterativer Lookup	85
5.1.2.3	Vergleich der Routing-Modi	86
5.2	Topologieadaption: Existierende Ansätze	94
5.2.1	Proximity Routing	94
5.2.2	Proximity Neighbor Selection	98
5.3	Motivation	102
5.4	Gegenüberstellung: Bamboo und Kademlia	104
5.5	Rekursives Kademlia (R/Kademlia)	104
5.5.1	Routing	105
5.5.2	Wartung der k -Buckets	106
5.5.2.1	Direkte Signalisierung	107
5.5.2.2	Signalisierung per Source-Routing	108
5.5.2.3	Vergleich der Signalisierungsmodi	110
5.5.2.4	Auffrischen von k -Buckets	111
5.5.3	Topologieadaption in R/Kademlia	111
5.5.3.1	PR in R/Kademlia	112
5.5.3.2	PNS in R/Kademlia	112
5.5.4	Aktive Latenzmessungen	112
5.6	Implementierung	114
5.6.1	Erweiterung der Kademlia-Implementierung	115
5.7	Validierung der Analyse	116
5.8	Evaluierung	118
5.8.1	Szenarien und Parameter	118
5.8.2	Simulationsergebnisse	119
5.9	Zusammenfassung	124
6	CBR – Coordinate-based Routing	127
6.1	Analyse: Topology-based NodId Assignment	128
6.1.1	Existierende Ansätze und Stand der Forschung	129

6.1.2	Probleme bisheriger TbNA-Ansätze	130
6.1.3	Kombination verschiedener Topologieadoptionsmechanismen	131
6.2	Motivation	132
6.3	Grundkonzept	133
6.3.1	Partitionierung ungleichverteilter Koordinaten	135
6.3.2	Festlegung der NodeId	139
6.3.3	Zusammenspiel der Parameter	141
6.4	Güte der Netzwerk-Koordinaten	142
6.5	Landmark-basierte Variante	142
6.5.1	Vor- und Nachteile von LM-CBR	146
6.6	Decentralized Coordinate-based Routing (dCBR)	146
6.6.1	Funktionsweise	147
6.6.1.1	Verwendung dezentraler Netzwerk-Koordinatensysteme	147
6.6.1.2	Monitoring der Netzwerk-Koordinaten	148
6.6.1.3	Aggregation & Kompression der Koordinaten	149
6.6.2	Gesamtablauf	150
6.7	Gegenüberstellung: LM-CBR und dCBR	153
6.8	CBR-basierte Replikation	153
6.9	Implementierung in OverSim	155
6.9.1	Partitionierung des Koordinatenraums	155
6.9.2	NodeId-Berechnung für CBR	155
6.9.3	Monitoring-Overlay und Koordinatenaggregation	156
6.9.4	DHT-Modul mit CBR-Replikation	157
6.10	Evaluierung	157
6.10.1	Landmark-basiertes CBR	158
6.10.2	dCBR	161
6.10.3	CBR-basierte Replikation	167
6.11	Zusammenfassung	169
7	PAIL – Proximity-aware Iterative Lookup	171
7.1	Analyse: Iterative Lookups in strukturierten Overlay-Netzen	171
7.1.1	Parallele Lookup-RPCs	173
7.1.2	Stand der Forschung	176
7.2	Motivation	177
7.3	Beschleunigte Lookups durch Netzwerk-Koordinatensysteme	177
7.3.1	Individuelle RPC-Timeout-Berechnung	178
7.3.2	Nutzung von Netzwerk-Koordinatensystemen zur Sortierung der Next-Hop-Kandidaten	180
7.3.3	Ablaufvarianten	181
7.3.4	Metriken zur Sortierung des Ergebnisvektors	182

7.4	Implementierung	183
7.4.1	Berechnung individueller Timeout-Intervalle in OverSim	183
7.4.2	Erweiterung der von OverSim bereitgestellten Lookup-Klasse	185
7.5	Evaluierung	185
7.5.1	Individuelle Berechnung des Timeout-Intervalls	186
7.5.2	Kombinationen unterschiedlicher Sortievorschriften	187
7.6	Zusammenfassung	191
8	Zusammenfassung und Ausblick	193
8.1	Ergebnisse dieser Arbeit	194
8.2	Ausblick auf weiterführende Forschungen	196
A	OverSim - Implementierungsdetails	199
A.1	Interne Datenstruktur des NeighborCache	199
A.2	Schnittstelle zu Latenzinformationen	200
B	R/Kademlia - Weitere Ergebnisse	203
C	CBR - Weitere Ergebnisse	207
D	PAIL - Weitere Ergebnisse	211
Literaturverzeichnis		213
Glossar		227
Abkürzungsverzeichnis		233
Symbol- und Variablenverzeichnis		235