



# **Proaktives Bandbreitenmanagement in heterogenen Content Distribution Netzwerken.**

**Christoph Loeser**

## **C-LAB Report**

Vol. 7 (2008) No. 02

Cooperative Computing & Communication Laboratory

ISSN 1619-7879

C-LAB ist eine Kooperation  
der Universität Paderborn und der Siemens AG

[www.c-lab.de](http://www.c-lab.de)

[info@c-lab.de](mailto:info@c-lab.de)

# C-LAB Report

**Herausgegeben von  
Published by**

**Dr. Wolfgang Kern, Siemens AG  
Prof. Dr. Franz-Josef Rammig, Universität Paderborn**

Das C-LAB - Cooperative Computing & Communication Laboratory - leistet Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und gewährleistet deren Transfer an den Markt. Es wurde 1985 von den Partnern Nixdorf Computer AG (nun Siemens AG) und der Universität Paderborn im Einvernehmen mit dem Land Nordrhein-Westfalen gegründet.

Die Vision, die dem C-LAB zugrunde liegt, geht davon aus, dass die gewaltigen Herausforderungen beim Übergang in die kommende Informationsgesellschaft nur durch globale Kooperation und in tiefer Verzahnung von Theorie und Praxis gelöst werden können. Im C-LAB arbeiten deshalb Mitarbeiter von Hochschule und Industrie unter einem Dach in einer gemeinsamen Organisation an gemeinsamen Projekten mit internationalen Partnern eng zusammen.

C-LAB - the Cooperative Computing & Cooperation Laboratory - works in the area of research and development and safeguards its transfer into the market. It was founded in 1985 by Nixdorf Computer AG (now Siemens AG) and the University of Paderborn under the auspices of the State of North-Rhine Westphalia.

C-LAB's vision is based on the fundamental premise that the gargantuan challenges thrown up by the transition to a future information society can only be met through global cooperation and deep interworking of theory and practice. This is why, under one roof, staff from the university and from industry cooperate closely on joint projects within a common research and development organization together with international partners. In doing so, C-LAB concentrates on those innovative subject areas in which cooperation is expected to bear particular fruit for the partners and their general well-being.

**ISSN 1619-7879**

C-LAB  
Fürstenallee 11  
33102 Paderborn  
fon: +49 5251 60 60 60  
fax: +49 5251 60 60 66  
email: [info@c-lab.de](mailto:info@c-lab.de)  
Internet: [www.c-lab.de](http://www.c-lab.de)

© Siemens AG und Universität Paderborn 2008

Alle Rechte sind vorbehalten.

Insbesondere ist die Übernahme in maschinenlesbare Form sowie das Speichern in Informationssystemen, auch auszugsweise nur mit schriftlicher Genehmigung der Siemens AG und der Universität Paderborn gestattet.

All rights reserved.

In particular transfer of data into machine readable form as well as storage into information systems, (even extracts) is only permitted prior to written consent by Siemens AG and Universität Paderborn.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Annahmen über das Modell & Problemdefinition .....	5
2.1	Modellannahmen .....	5
2.2	Bandbreitenmanagement .....	6
3	Verwendung von hierarchischen Overlaystrukturen.....	7
4	Umsetzung der Popularitätsvorhersage .....	8
5	Ausgewählte Algorithmen.....	9
5.1	Algorithmus Bubble Popularity .....	11
5.2	Algorithmus Replica Bandwidth Gain .....	11
6	Ausgewählte Simulationsergebnisse.....	12
6.1	Konvergenzuntersuchung .....	12
6.2	Langzeituntersuchung .....	14
7	Zusammenfassung.....	16

## 1 Einleitung

*Lawrence G. Roberts: „Die Datenmenge im Internet verdreifacht sich pro Jahr.“*

Innerhalb der letzten Jahre haben sich immer mehr Netzwerktechniken auf dem Markt etabliert, um dem Endkunden den Internetzugang mit immer größeren Bandbreiten zu ermöglichen. Auf diesen Voraussetzungen basierend hat sich ein Markt entwickelt, dem Endkunden eine große Vielfalt an digitalen Inhalten anzubieten. Dabei handelt es sich u. a. um Filme, Musik, Spiele, Software, Patches etc. Bei Musik, aber insbesondere bei Filmen, gibt es unterschiedliche Qualitätsstufen, was sich natürlich im Speicherbedarf der Inhalte widerspiegelt.

Allen digitalen Inhalten gemein ist die Tatsache, dass sie variierenden Popularitätswerten unterliegen. So sind Filme anfangs in der Regel beliebt, wobei die Anfragehäufigkeiten über die Zeit (meist einige Wochen) abfallen. Ferner unterscheidet sich das Anfrageverhalten innerhalb eines Tages.

In wissenschaftlicher Hinsicht hat es in den letzten Jahren eine Vielzahl von Architekturvorschlägen gegeben, auf welche Weise und unter welchen technischen Voraussetzungen diese digitalen Inhalte von so genannten Content Providern ausgeliefert werden. Neben klassischen Client-Server Architekturen haben sich P2P-Tauschbörsen und P2P-Speichersysteme resp. Content Distribution Netzwerke als Verteilungsstrukturen etabliert. Auf jedem Knoten können Daten abgelegt werden, welche von dort an Anfragende ausgeliefert werden können. Ein Content Distribution Netzwerk erlaubt somit das gezielte Platzieren von Inhalten vor dem Ausliefern. Hier unterscheiden sich CDNs von P2P-Tauschbörsen, bei denen der Inhalt vom Endnutzer verwendet wird und nach Ende des Herunterladens (oft) nicht mehr angeboten wird.

Ein wesentliches Problem bei der Platzierung von Inhalten sind folgende heterogenen Eigenschaften:

- heterogener Speicherplatz, welcher von den Knoten angeboten wird
- heterogene Bandbreite zum Ausliefern der Daten
- heterogene Zugriffshäufigkeit

Durch diese Heterogenität stellen sich verschiedene Fragen:

- Wie können die Popularitätswerte berücksichtigt werden?
- Werden ganze Dokumente betrachtet, Segmentierungen oder kodierte Segmente?
- Wie hoch ist der redundante Datenanteil? Wie viele Replikate werden erstellt?
- Wohin sollen die Dokumente platziert werden?

Das **Problem** lässt sich somit als eine Verfügbarkeitsfrage formulieren: „Wie wird die Systembandbreite an die einzelnen Dokumente verteilt bzw. zugewiesen?“

Das **Ziel** der Arbeit ist es, eine Heuristik zur Bandbreitenzuweisung zu entwickeln, welche proaktiv die Änderungen der Popularitätswerte berücksichtigt.

## 2 Annahmen über das Modell & Problemdefinition

Innerhalb dieses Kapitels wird auf die Annahmen eingegangen, die dem Modell zugrunde liegen. Diese umfassen sowohl das Netzwerkmodell als auch das Datenmodell. Im Folgenden werden die zunächst zu platzierenden und später auszuliefernden Daten als **Dokumente** bezeichnet.

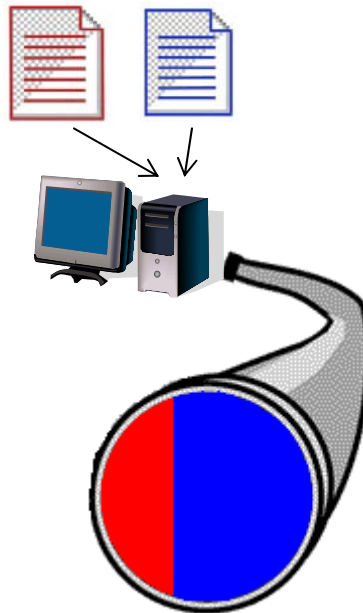


Abbildung 1 - Bandbreitenzuweisung an zwei simultan auszuliefernde Dokumente

### 2.1 Modellannahmen

Für jeden einzelnen Knoten im Netzwerk gilt:

- Jeder Knoten bietet Speicherplatz an.
- Jeder Knoten bietet Auslieferungsbandbreite an.
- Es besteht die Möglichkeit, die Auslieferungsbandbreite unter simultan auszuliefernden Dokumenten aufzuteilen. Unter der Annahme, dass auf Dokument blau doppelt so viele Anfragen fallen wie auf Dokument rot, wird die Gesamtbandbreite proportional zugewiesen (s. Abbildung 1).

Annahmen über die Dokumente:

- Dokumente werden über die Zeit dynamisch hinzugefügt und aus dem System (komplett) entfernt.
- Dokumente unterliegen verschiedenen Popularitätswerten. Diese teilen sich in Langzeit- und Kurzzeit-Popularitätswerte. Erstere Kategorie dauert meist mehrere Wochen und ist in der Regel abfallend. (Long-Term-Popularity). Die Short-Term-Popularity beschreibt die Abweichungen innerhalb eines 24 h Zyklus.
- Dokumente sind nicht homogen in der Größe. Jedoch werden an dieser Stelle „große“ Dokumente betrachtet. Bei den Algorithmen wird jedoch mit homogenen (!) Segmenten gearbeitet. Beispielsweise würde ein Dokument von 470 MB durch 5 Segmente à 100 MB repräsentiert. Durch die Verwendung von Erasure-Codes wird die Verfügbarkeit erhöht: Im Gegensatz zur einfachen Segmentierung sind zwei paarweise verschiedene kodierte Segmente gleichwertig.

## 2.2 Bandbreitenmanagement

An dieser Stelle gilt es ein Qualitätskriterium zu definieren, welches einer Beleg-/Auslieferungskonfiguration im System gerecht wird.

Ein Dokument  $x$  erwartet den proportionalen Anteil von der System-Gesamtbreite (d.h. Summe der Auslieferungsbandbreite über alle Knoten  $V$ ) die durch seinen Popularitätswert  $p(x)$  beschrieben wird:

Die erwartete Bandbreite ist demnach

$$b_E^\delta(x) = \left( \sum_{v=1}^{|\mathbf{V}|} bw(v) \right) \cdot \frac{p^\delta(x)}{\sum_{y \in \mathbf{X}} p^\delta(y)}$$

Für die Zuweisung der Bandbreite (s. Kap. 2) werden an dieser Stelle zwei Möglichkeiten vorgestellt. Ein Dokument  $x$ , welches auf einem Knoten abgelegt ist, erhält von der lokalen Auslieferungsbandbreite den popularitätsproportionalen Anteil. Die zugewiesene Gesamtbandbreite für  $x$  ist demnach die Summe über den Anteil auf den einzelnen Knoten.

Zugewiesene Bandbreite, Möglichkeit 1 (Popularitätsproportional)

$$b_r^\delta(x) = \sum_{v|x \in \mathbf{X}(v)} \left( bw(v) \cdot \frac{p^\delta(x)}{\sum_{y \in \mathbf{X}(v)} p^\delta(y)} \right)$$

Die zweite Möglichkeit betrachtet lokal alle abgelegten Dokumente als gleichwertig. Die Bandbreite wird daher durch die Anzahl der Dokumente geteilt. Demnach ist die zugewiesene Gesamtbandbreite die Summe über die Anteile:

Zugewiesene Bandbreite, Möglichkeit 2 (homogen)

$$b_r^\delta(x) = \sum_{v|x \in \mathbf{X}(v)} \left( \frac{bw(v)}{|v|} \right)$$

Ein Dokument  $x$  kann innerhalb des Systems zu viel oder zu wenig Bandbreite zugewiesen bekommen. Der Betrag der Differenz von erwarteter und zugewiesener Bandbreite beschreibt die Bandbreitendifferenz für ein Dokument. Ein Qualitätskriterium für das Gesamtsystem ist demnach die Summe über alle Dokumente. Dies wird im Folgenden als Bandbreitenunzufriedenheit benannt:

$$\sum_x |b_r^\delta(x) - b_E^\delta(x)|$$

### 3 Verwendung von hierarchischen Overlaystrukturen

Um die heterogenen Knoteneigenschaften Bandbreite und Speicherplatz effizient verwalten zu können, werden Overlaynetzwerke verwendet. Bei solchen Overlaystrukturen handelt es sich um logische Knotenverbindungen, bei denen von dem darunter liegenden Netzwerk abstrahiert wird.

Lediglich die Eigenschaften, die in diesem Szenario von Interesse sind, werden betrachtet: Daher werden hierarchische Overlaystrukturen verwendet. Sinngemäß bedeutet dies, dass leistungsfähigere Knoten in der Hierarchie weiter oben angesiedelt sind, leistungsschwächere in den unteren Ebenen.

Die Hierarchie wird durch die Metrik  $\frac{bw(v)}{|v|}$  aufgebaut. Die Bandbreite eines Knotens wird durch die Anzahl der möglichen zu platzierenden Dokumente beschrieben. Knoten mit hoher Auslieferungsbandbreite, die auf wenig platzierten Dokumenten (da wenig Speicherplatz) aufgeteilt wird, werden daher als sehr leistungsfähig klassifiziert.

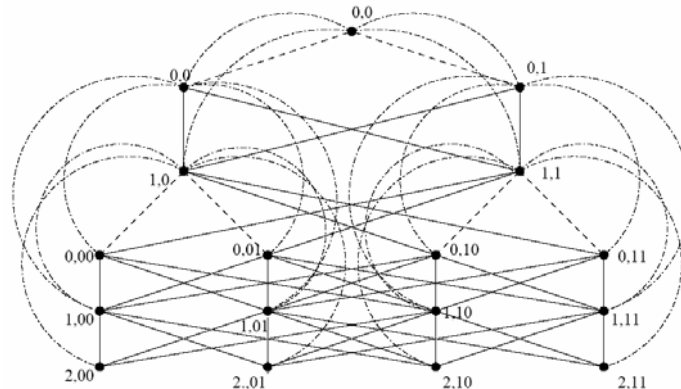


Abbildung 2 - Verwendung des Pagoda-Overlaynetzwerkes [Ref]

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Knoten hierarchisch anzuordnen. Folgende existierende Overlaynetzwerke kommen hier zum Einsatz:

- 2D-Kreuzgitternetzwerk
- Butterfly-Netzwerk
- Pagoda-Netzwerk (s. Abbildung 2)

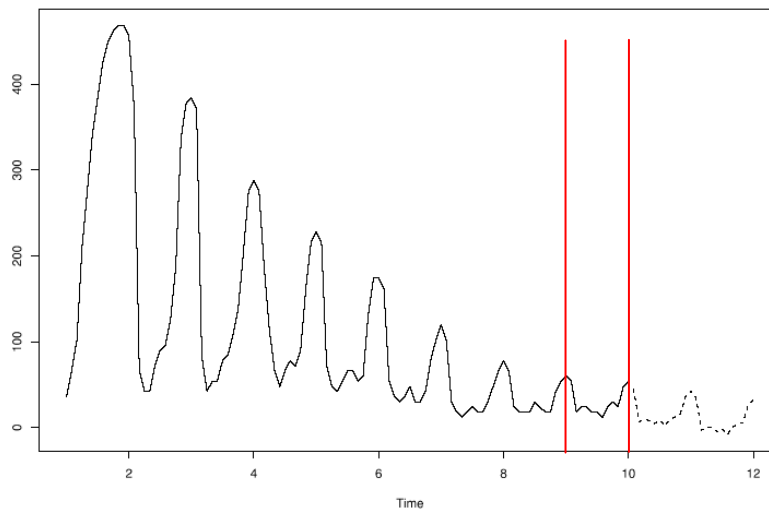
Für die Simulationen wurden identische Knotenmengen mit identischen Eigenschaften – Bandbreite, Speicherplatz – verwendet. Lediglich die logischen Verbindungen werden modifiziert.

Im vorherigen Kapitel wurde die Bandbreitenunzufriedenheit als Qualitätskriterium für das Gesamtsystem eingeführt. Von besonderem Interesse bei den Simulationen werden sowohl das Endergebnis als auch die Konvergenzgeschwindigkeit sein.

## 4 Umsetzung der Popularitätsvorhersage

Häufig wird das Anfrageverhalten von Endnutzern durch Poissonprozesse modelliert. Dabei werden jedoch Langzeit-Popularitätswerte und Kurzzeitschwankungen innerhalb eines Tages nicht ausreichend berücksichtigt. Eine realitätsnahe Modellierung des Anfrageverhaltens lässt sich durch das Produkt einer abfallenden Langzeitkomponente und einer inhaltspezifischen Kurzzeitkomponente realisieren. Die Langzeitkomponente wird am besten durch eine abfallende e-Funktion beschrieben. Die Kurzzeitkomponente wird durch einen Vektor realisiert, welcher das schwankende Anfrageverhalten innerhalb eines 24 h Zyklus beschreibt.





**Abbildung 3 - Zeitreihenvorhersage der Popularität eines Dokumentes**

Ein Beispiel ist in Abbildung 3 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sowohl die Anfragehäufigkeit über die neun Tage abfällt als auch das varierte Zugriffsverhalten innerhalb eines Tages. Ein 24 h Zyklus ist in Abbildung 3 durch die beiden roten vertikalen Linien illustriert.

Durch verteilte Hashfunktionen (DHT – distributed hash function) wird einem dedizierten Knoten die Verantwortlichkeit für ein oder mehrere Dokumente zugewiesen. Dieser Knoten hat Kenntnis über alle Replikate der kodierten Segmente. Ferner protokolliert der Knoten die Anfragen nach Dokumentsegmenten und führt eine Aggregation durch. Die Granularität der Aggregation ist ein parametrisierter Wert: Bei dem Aggregationsparameter 1 h erhält man 24 Popularitätswerte für einen Tag. Basierend auf den mitprotokollierten Vergangenheitswerten können mit Hilfe mathematischer Methoden Popularitätsvorhersagen für die Zukunft getroffen werden.

Mit Hilfe der Saisonalen Autoregressiven Integrierten Moving Average Prozesse (SARIMA) lassen sich Langzeit- und Kurzzeitpopularitätswerte berücksichtigen. Mit Hilfe verschiedener Statistik-Tools lassen sich diese Vorhersagen leicht durchführen. In Abbildung 3 wurde mit dem Tool „R-Project“ das Anfrageverhalten für die nächsten zwei Tage prognostiziert (gestrichelt).

## 5 Ausgewählte Algorithmen

An dieser Stelle werden lediglich zwei Algorithmen für eine Platzierung von Dokumenten vorgestellt. Der erste Algorithmus „Bubble Popularity“ soll lediglich die Funktionsweise der verteilten Platzierungstechniken demonstrieren. Darauf aufbauend wird der weiterentwickelte Algorithmus „Replica-Bandwidth-Gain“ vorgestellt.

Die Algorithmen haben folgende drei unterschiedliche Eigenschaften:

- 1) Anzahl der Replikate.
- 2) Bandbreitenzuweisung an ein Dokument (bzw. kodiertem Segment) auf einem Knoten.
- 3) Wahl der Tauschpartner.

Algorithmus	Replikatsanzahl	lokale Bandbreiten-Zuweisung
Popularity	$c_r$ homogen	$bw(v) \cdot \frac{p(x)}{\sum_{y \in X(v)} p(y)}$
Replica-Bandwidth-Gain	$c_r(x) \sim p(x)$	$\frac{bw(v)}{ v }$

**Tabelle 1 - Eigenschaften der Algorithmen "Popularity" und "Replica-Bandwidth-Gain"**

Es ist zu berücksichtigen, dass bei den Bubble-/Tauschvorgängen NICHT Dokumente transferiert werden. Es werden vielmehr vor der eigentlichen Platzierung lediglich Referenzen getauscht. Erst nach einem parametrisierten Wert an Bubble-Iterationen würde eine tatsächliche Platzierung erfolgen.

Es muss bereits an dieser Stelle geklärt werden, wie die Popularitätswerte in die Algorithmen bzgl. Replikatsanzahl und lokaler Bandbreitenzuweisung einfließen. Nach Tabelle 1 ist die Replikatsanzahl beim Algorithmus „Popularity“ konstant (+/- 1). Lediglich die lokale Bandbreitenzuweisung findet popularitätsproportional statt. Im Gegensatz dazu ist die Replikatsanzahl beim „Replica-Bandwidth-Gain“ proportional zur Popularität. Jedoch findet an dieser Stelle die lokale Bandbreitenzuweisung gleichgewichtet statt. An dieser Stelle sei bereits erwähnt, dass eine simultane Einbeziehung der Popularität bei Replikatsanzahl und lokaler Bandbreitenzuweisung zur vehementen Benachteiligung der unpopulären Dokumente führte.

In den folgenden beiden Unterabschnitten wird die dritte Eigenschaft, die Tauschkriterien, erläutert.

### 5.1 Algorithmus Bubble Popularity

Zur Erinnerung: In der Hierarchie sind leistungsstärkere Knoten weiter oben angesiedelt. Durchschnittlich gibt es dort mehr Bandbreite pro Dokument als in den unteren Ebenen. Zielsetzung dieser Technik ist es, pro Iteration die Referenz des lokal populärsten Dokuments gegen die Referenz des unpopulärsten Dokumentes aller adjazenten Dokumente zu tauschen.

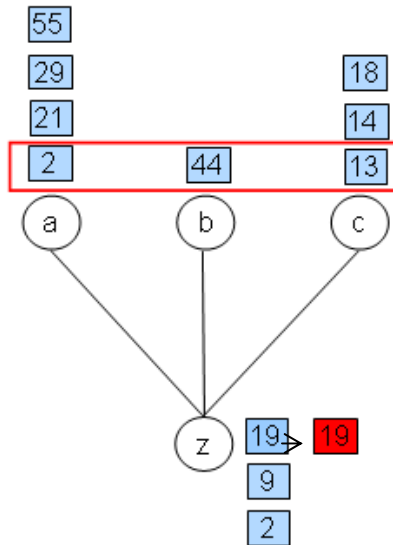


Abbildung 4 - Konzept des Algorithmus "Bubble Popularity"

Im ersten Schritt (s. Abbildung 4) wird auf Knoten z die populärste Dokumentreferenz als potentieller Tauschpartner identifiziert. Als Tauschpartner kommen alle Minima der Popularitätswerte der Dokumentenreferenzen aller nach oben adjazenten Knoten in Frage (in dem roten Rechteck). In diesem Fall werden die Dokumentenreferenz auf z mit der Popularität 19 gegen die Dokumentenreferenz mit der Popularität 2 auf Knoten a getauscht. Dieser Vorgang wird als „Bubble Iteration“ bezeichnet.

### 5.2 Algorithmus Replica Bandwidth Gain

Dieser Algorithmus berücksichtigt nicht nur die Popularität der Dokumente. Vielmehr wird die bereits zugewiesene Bandbreite bei der Wahl der Tauschpartner berücksichtigt.

Idealerweise kommen nach einem Tausch zwei Dokumente sehr nah an ihren SOLL-Wert (die erwartete Bandbreite) heran: D.h. Ein unpopuläres Dokument möchte einen oberen Knoten verlassen, da es zu viel Bandbreite zugewiesen bekommen hat. Gleichzeitig möchte ein sehr populäres Dokument genau auf diesen Platz, da es bis dato noch zu wenig Bandbreite erhalten hat. Diese wird als Win-Win-Situation beschrieben: Beide Dokumente gewinnen. Die

Summe dieser beiden Einzelgewinne beschreibt ein Gütekriterium für den Referenzentausch.

Es gilt, die beste Tauschoption zu identifizieren. Entweder die beste aller Win-Win-Möglichkeiten, oder, falls keine Win-Win-Option existiert, die beste Tauschoption mit Gütekriterium  $> 0$  (d.h. Win-Lose  $> 0$  oder Lose-Win  $> 0$ ). Nicht in Frage kommen Lose-Lose-Optionen, da der Bandbreitengewinn negativ ist.

## 6 Ausgewählte Simulationsergebnisse

Die an dieser Stelle (und weitere) Algorithmen wurden durch eine Simulationsumgebung analysiert. Unter Verwendung der LEDA-Bibliothek wurde eine Applikation erstellt, die es erlaubt, sowohl die Algorithmen als auch die verwendeten Overlaynetzwerke zu untersuchen. Dabei wurden die Konvergenzeigenschaften als auch Langzeitsimulationen betrachtet.

Das Simulationsszenario wird beschrieben durch:

- Speicherkapazität pro Knoten: 3 GByte - 25 GByte
- Bandbreitenkapazität pro Knoten: 1 MBit/s - 52 MBit/s
- Dokumentengröße: 800 MByte - 1200 MByte
- Knotenanzahl: 321

In den folgenden beiden Unterkapiteln werden die beiden Algorithmen in Abhängigkeit der zu platzierenden Dokumente bzgl. der Konvergenzgeschwindigkeit analysiert. Ferner wird eine zufällige Ausgangssituation der Verbesserung des „Replica-Bandwidth-Gain“ gegenübergestellt.

### 6.1 Konvergenzuntersuchung

Um die Verbesserungen des Referenzentausches zu illustrieren, wird in Abbildung 5 zu einer initial zufälligen Belegsituation der Tauschalgorithmus gestartet. Auf der X-Achse wird die Anzahl der Tauschoperationen aufgetragen. Auf der Y-Achse die bereits definierte Bandbreitenunzufriedenheit. Es ist deutlich zu beobachten, dass die Unzufriedenheit nach den ersten wenigen Tausend-Tauschoperationen abnimmt (ca. 2.300 bis 3.800), dann jedoch wieder zunimmt und sich z.T. bei dem ursprünglichen Wert einpendelt.

Der Grund für dieses Verhalten ist offensichtlich. Bei einer zufälligen Platzierung der Dokumente werden populärere Dokumentenreferenzen in die oberen Ebenen des Overlaynetzwerkes transferiert. Dies führt in Summe zu einer besseren Gesamtsituation, da populäre Dokumente auf leistungsstarken Knoten platziert werden würden. Bei einem Fortlaufen des Algorithmus erkennt man jedoch, dass **alle** populären Dokumente auf die leistungsstarken Knoten transferiert werden.

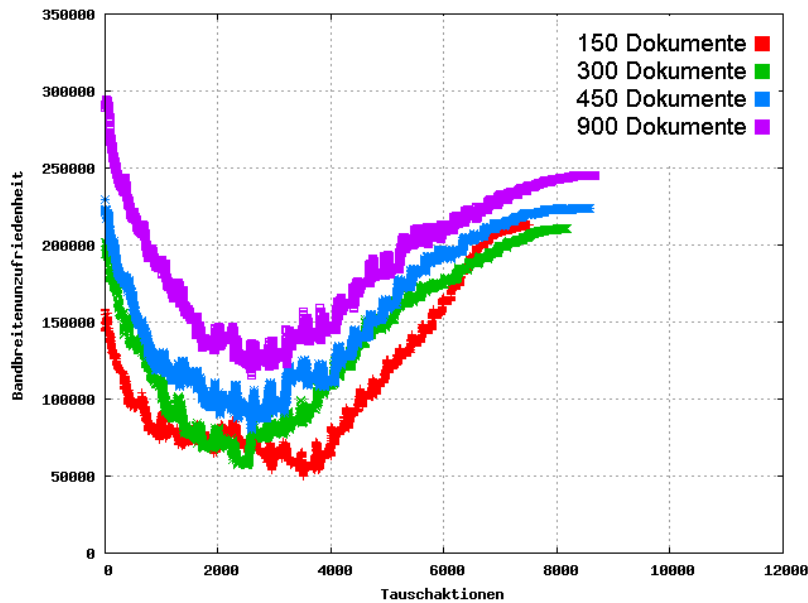


Abbildung 5 - Konvergenzverhalten des Algorithmus "Bubble Popularity"

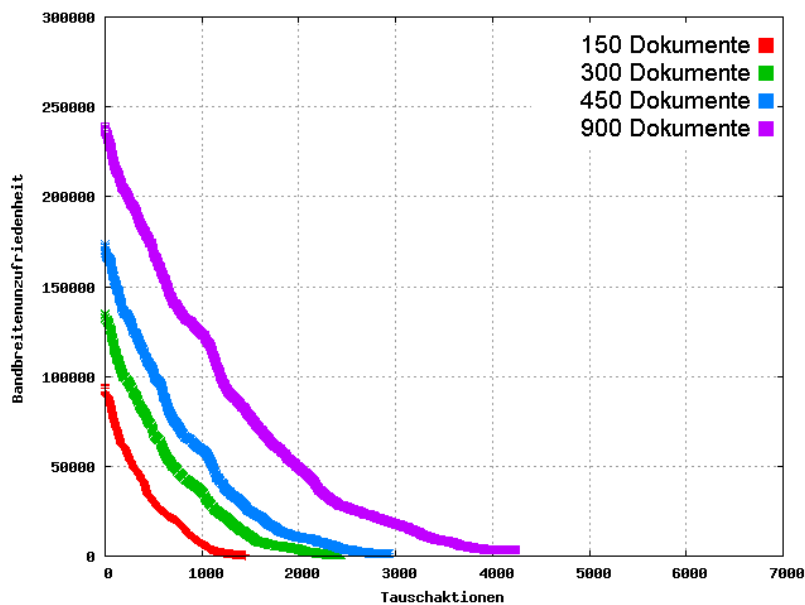


Abbildung 6 - Konvergenzverhalten des Algorithmus "Replica-Bandwidth Gain"

An dieser Stelle ergibt sich eine Wettbewerbssituation. Alle hochpopulären Dokumente müssen sich auf wenigen leistungsstarken Knoten die Bandbreite teilen.

Den Algorithmus, lässt man ihn laufen bis keine Tauschoptionen mehr zur Verfügung stehen, kann also genau das Gegenteil von dem Gewünschten (d.h. möglichst geringe Bandbreitenunzufriedenheit) erreichen.

Wie bereits erwähnt betrachtet der Algorithmus „Replica-Bandwidth-Gain“ die bereits zugewiesene Bandbreite. Daher ist er in einer Iteration bestrebt, möglichst nah an den SOLL-Wert zu gelangen. Die Bandbreitenunzufriedenheit ist demnach in Abbildung 6 streng monoton fallend: Durch Wahl **der** Tauschoption, die den besten Bandbreitengewinn erzielt, kann die Belegesituation lediglich besser werden. An dieser Stelle sei erwähnt, dass in Summe eine Win-Lose (resp. Lose-Win) Situation einer Win-Win Situation qualitativ überlegen sein kann.

## 6.2 Langzeituntersuchung

Ziel der Langzeituntersuchung ist es, wie sowohl die mittelfristige Bandbreitenunzufriedenheit reduziert werden kann, als auch wie die Schwankungen innerhalb eines 24 h Zyklus reduziert werden können.

In Abbildung 7 wird (in rot) die Ausgangssituation illustriert: Die Anzahl der Replikat bei initialer zufälliger Platzierung ist homogen (+/-1), genau wie die lokale Bandbreitenzuweisung. Ein 24 h Zyklus ist deutlich zu erkennen.

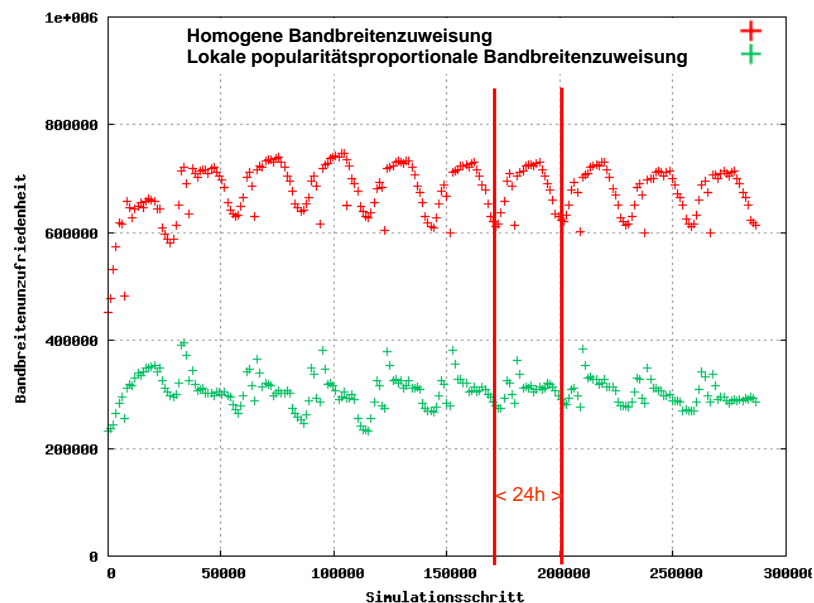
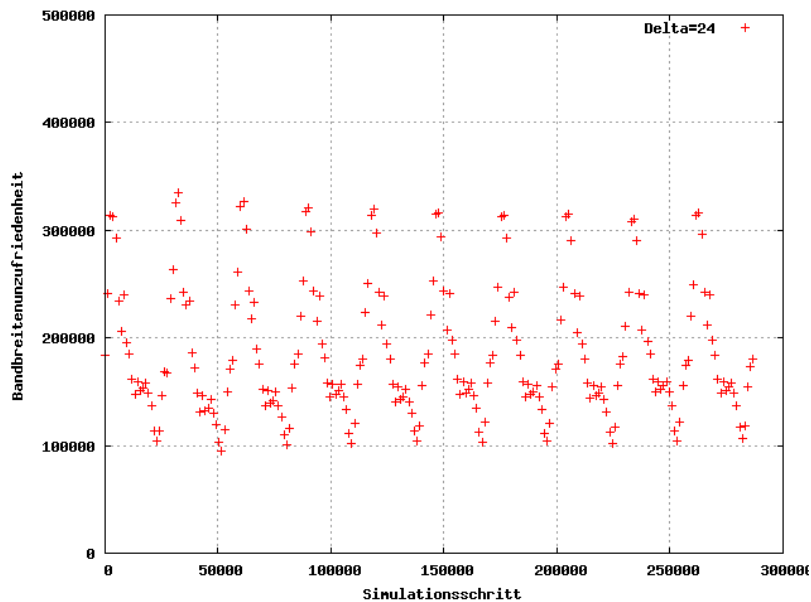


Abbildung 7 - Langzeituntersuchung bei initialer zufälliger Platzierung mit homogener und popularitätsproportionaler Bandbreitenzuweisung (keine Replatzierung)

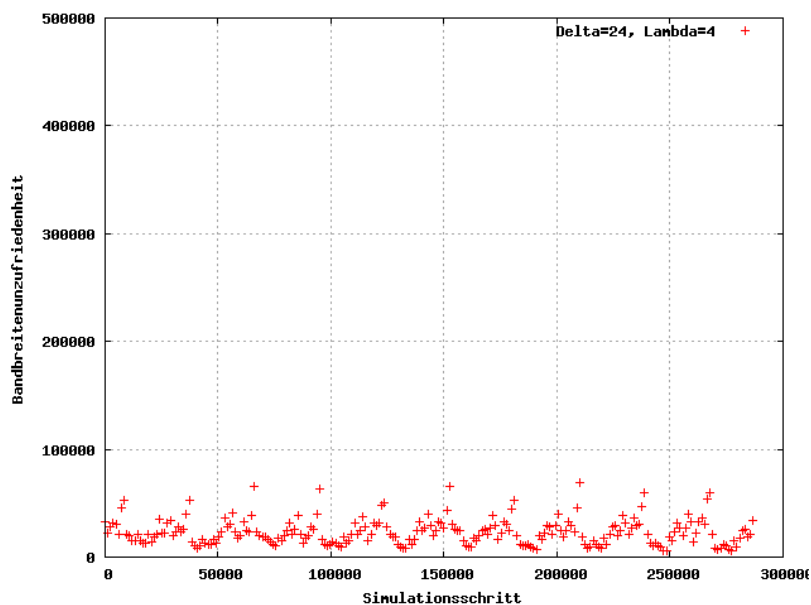
Bereits ohne Dokumentenmigration (und ohne Änderung der Replikatsanzahl), lediglich mit lokaler popularitäts-proportionaler Bandbreitenzuweisung kann die Situation erheblich verbessert werden (grün).

Abbildung 8 beschreibt den „laufenden Betrieb“. Es werden Dokumente, die einer gewissen Popularitätsschranke nicht mehr genügen gelöscht. Auf die freien Plätze werden Referenzen der neu zu platzierenden Dokumente abge-

legt. Durch den Algorithmus „Replica-Bandwidth-Gain“ werden die genauen Positionen der einzelnen Replika ausgehandelt. An dieser Stelle werden offensichtlich die Langzeit-Popularitätswerte berücksichtigt: Der Mittelwert der Bandbreitenunzufriedenheit sinkt auf unter 200.000 KByte/s.



**Abbildung 8 - "Der laufende Betrieb": Löschen von zu unpopulären und Einfügen von neuen Dokumenten mit Bandwidth-Gain Algorithmus (24 h Zyklus) bei Vernachlässigung der Kurzzeit-Popularitätswerte**



**Abbildung 9 - "Der laufende Betrieb": Löschen von zu unpopulären und Einfügen von neuen Dokumenten mit Bandwidth-Gain Algorithmus (24 h Zyklus) bei Berücksichtigung der Kurzzeit-Popularitätswerte (4 h Zyklus)**

Abbildung 9 verdeutlicht den Effekt der Betrachtung des Bandbreitentransfers. Es werden weder Replikate erzeugt, noch migrieren Dokumente. Jeder Knoten führt einen lokalen Bandbreitentransfer durch. Populäre Dokumente erhalten von unpopulären Dokumenten zugewiesene Bandbreite. Dieser Vorgang findet konsekutiv durch das Overlaynetzwerk statt. Auch hier können mehrere Iterationen durchgeführt werden.

## 7 Zusammenfassung

Innerhalb dieser Arbeit galt es, eine Menge von Dokumenten mit heterogenen Größen und dynamischen Popularitätswerten auf eine Menge von Knoten zu verteilen, deren Ressourcen Bandbreite und Speicherkapazität auch heterogenen Eigenschaften unterlagen.

Das ganze wurde vor dem Hintergrund eines gerechten Verfügbarkeitsmanagements durchgeführt. Diese Verfügbarkeit wird durch die Bandbreite beschrieben, die einem Dokument zur Verfügung steht. In diesem Zusammenhang wurde der Begriff der Bandbreitenunzufriedenheit eingeführt, die Summe der Abweichungswerte von IST- und SOLL-Werten, welche ein systemweites Qualitätskriterium beschreibt. Bevor zwei von acht Algorithmen exemplarisch vorgestellt wurden, wurden sowohl die Hierarchie des Overlaynetzwerkes als auch die SARIMA-Zeitreihenanalysetechnik beschrieben.

Zunächst wurde das Konvergenzverhalten der Algorithmen untersucht. „Bubble Popularity“ erzielte innerhalb der ersten Iterationen eine Verbesserung bzgl. der Bandbreitenunzufriedenheit, führte dann jedoch zu entgegengesetztem Resultat. Im Gegensatz dazu führte der Algorithmus „Replica-Bandwidth-Gain“ zu einem wesentlich besseren Ergebnis, da er als Tauschkandidaten diejenigen Referenzen in Betracht zieht, die tatsächlich eine echte Verbesserung bringen.

Bei den Langzeitsimulationen wurden in dedizierten Zeitabständen alte Dokumente gelöscht und neue kamen hinzu. Durch den lokalen Bandbreitentransfer war es zusätzlich möglich eine signifikant geringere Bandbreitenunzufriedenheit zu erzielen.