

LiveShift: A Time-Shifted P2P Multimedia Streaming Approach

DOCTORAL THESIS

For the Degree of
Doctor of Informatics

AT THE FACULTY OF ECONOMICS,
BUSINESS ADMINISTRATION AND
INFORMATION TECHNOLOGY
OF THE
UNIVERSITY OF ZURICH

by
FABIO VICTORA HECHT
from
Brazil

Accepted on the recommendation of
PROF. DR. BURKHARD STILLER
DR. TOBIAS HOSSFELD

2013

The Faculty of Economics, Business Administration and Information Technology of the University of Zurich herewith permits the publication of the aforementioned dissertation without expressing any opinion on the views contained therein.

Zurich, January 23, 2013

The Vice Dean of the Academic Program in Informatics: Prof. Dr. Harald C. Gall

Berichte aus der Informatik

Fabio Victora Hecht

**LiveShift: A Time-Shifted P2P
Multimedia Streaming Approach**

Shaker Verlag
Aachen 2013

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Zürich, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2013

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2378-7

ISSN 0945-0807

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

INTEREST IN multimedia streaming – download and immediate playback of audio and video content – on the Internet has grown immensely in the last decade. Traditional client/server (C/S) and content distribution network (CDN) architectures, though technically simpler, are expensive, since they require infrastructure to grow according to the number of simultaneous clients. This results in the existence of only a few large content providers, thus support for transmission of events without great commercial appeal is restricted. The peer-to-peer (P2P) architecture, on the contrary, allows low-cost and scalable distribution of multimedia content by users themselves, without requiring large infrastructure investments.

Multimedia streaming is essentially classified into three categories, concerning its distribution and consumption. Live streaming targets live events, such as sports, news, and ceremonies, with the following important technical characteristics: no defined start or ending, generation on-the-fly, limited buffering ability, quick expiration of content, and lack of video-cassette recorder (VCR) functions, e.g., pausing and rewinding. Video-on-Demand (VoD), commonly used for pre-recorded content, including movies and shows, assumes that users start playback from the beginning of the file, content has a known duration, maximum download rate is not limited by content generation rate, and sometimes allows VCR operations, depending on the particular implementation. Finally, time shifting (TS) is a relatively newer category that bridges the gap between live streaming and VoD by enabling users to conveniently record live streams and watch them at a future time, at their convenience, thus enabling VCR functions on the live stream. Though P2P-based live streaming and VoD systems have gained significant attention of the research community, with commercial implementations already released to the general public, a single P2P system capable of both live streaming and time shifting did not exist.

The seamless integration of live, TS, and VoD in a single system originates several new challenges. First, the ability of users to switch both channels and time positions and the asymmetry of interest inherent in such sce-

nario require the definition of a novel, suitable, unified protocol, as well as the investigation and definition of policies that drive its behavior. A rather understudied policy is the playback policy, applied when content is not downloaded quickly enough to be played – shall peers stall playback, waiting for content to be found and downloaded, or skip missing parts? Finally, P2P system architectures demand distributed components, e.g. P2P trackers, that improve both efficiency and load balancing.

Hence, this thesis investigates several aspects that make the combination and seamless unification of P2P live streaming and time shifting functionality under a single system, protocol, and policies possible. This is accomplished by building a system – called LiveShift – that allows peers to record parts of the stream they receive and in order to serve them to other peers at a future time when necessary. In practice, this allows users to conveniently watch any program at any time, without preparing recordings in advance, and scaling bandwidth and storage with the number of users in the system.

This thesis makes four main contributions in the field of time-shifted P2P multimedia streaming. First, a single, fully-distributed P2P protocol that is capable of locating and distributing both live and time-shifted streams quickly and in an integrated manner, is described and evaluated in detail. Second, a complete client implementation of LiveShift was built, in order to allow realistic experiments and demonstrations. Third, playback policies that define whether the system stalls playback or skips blocks when content is unavailable in the system are examined, compared, and classified regarding user experience, for both live and on-demand scenarios. Finally, a novel, fully-distributed P2P tracker – named B-Tracker – is introduced, improving efficiency and load balancing in comparison with other existing distributed P2P trackers.

LiveShift has been evaluated by means of a full software implementation with the ultimate goal of validating its protocol and default policies in a realistic environment, by examining objective Quality-of-Experience metrics, namely playback lag and share of skipped blocks. Evaluations include realistic heterogeneous P2P environments with channel switching and churn in a research testbed. Moreover, a wide range of playback policies was implemented to show how they effect the defined Quality-of-Experience metrics. Finally, experiments with B-Tracker have revealed its ability to improve both efficiency and load balancing in relation to other widely used P2P trackers.

Kurzfassung

DAS INTERESSE an Multimedia-Übertragungen – zum Herunterladen wie auch zur unmittelbaren Wiedergabe von Audio- und Video-Inhalten – im Internet ist im Laufe des letzten Jahrzehnts stark gewachsen. Traditionelle Client/Server (C/S) und Content Distribution Network (CDN) Architekturen sind teuer, auch wenn sie technisch einfacher sind, weil ihre IT-Infrastruktur mit der Anzahl gleichzeitig zu bedienender Clients mitwachsen muss. Aus diesem Grund gibt es nur einige wenige grosse Inhalteanbieter, was wiederum dazu führt, dass die Möglichkeiten zur Übertragung von Veranstaltungen ohne grosses kommerzielles Potential stark eingeschränkt sind. Die Peer-to-Peer (P2P) Architektur ermöglicht hingegen die kostengünstige und skalierbare Verbreitung von Multimedia-Inhalten durch die Nutzer selbst und ohne grosse Infrastrukturinvestitionen.

Multimedia-Übertragungen werden anhand der beiden Kriterien Verbreitung und Konsum im Wesentlichen in drei Kategorien unterteilt. Direktübertragungen zielen auf Anlässe von aktuellem Belang ab, zum Beispiel Sportveranstaltungen, Nachrichten und Feierlichkeiten. Sie zeigen die wichtigen technischen Eigenschaften eines nicht vorbestimmten Anfangs oder Endes, der unterbrechungsfreien Generierung, begrenzter Möglichkeiten zur Pufferung, des schnellen Veraltens der Inhalte und der Abwesenheit von gängigen Videorekorder-Funktionen, beispielsweise dem Pausieren und Zurückspulen. Video auf Abruf (Video-on-Demand, VoD), welches als zweite Kategorie üblicherweise Anwendung auf bereits aufgenommene Inhalte findet (einschliesslich Filme und Fernsehsendungen) basiert auf der Annahme, dass Nutzer die Wiedergabe am Anfang einer Datei starten, dass die Inhalte eine vorgängig bekannte Dauer haben, dass die maximale Download-Rate nicht von der Rate begrenzt wird, mit der Inhalte generiert wurden, und dass in Abhängigkeit von der spezifischen Umsetzung zuweilen Videorekorder-Funktionen unterstützt werden. Schliesslich bezeichnet die zeitversetzte Übertragung (Time Shift-

ing, TS) die dritte und im Vergleich jüngere Kategorie, die die Lücke zwischen Direktübertragungen und VoD füllt, indem sie es Nutzern erlauben bequem Direktübertragungen aufzunehmen, um sie zu einem späteren und passenderen Zeitpunkt wiederzugeben, womit zeitversetzte Übertragungen Videorekorder-Funktionen bei Direktübertragungen ermöglichen. Obwohl P2P-basierte Direktübertragungs- und VoD-Systeme den Gegenstand von beträchtlichen Forschungsvorhaben darstellen, wobei einige kommerzielle Lösungen bereits der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurden, gab es zu Beginn der vorliegenden Dissertation kein einziges P2P-System, das sowohl für Direktübertragungen als auch für TS geeignet gewesen wäre.

Die nahtlose Integration von Direktübertragungen, TS und VoD in einem einzigen System resultiert in mehreren neuen Herausforderungen. Dass Nutzer sowohl Kanäle wie auch Wiedergabe-Zeitpunkte wechseln können und die einem solchen Szenario inhärente Informationsasymmetrie bedingen die Definition eines neuen, geeigneten und einheitlichen Protokolls sowie die Untersuchung und Definition von Regeln, die erwünschtes Verhalten fördern. Ein bis anhin kaum erforschter Bereich stellt dabei ein Satz an Regeln für die Wiedergabe von Inhalten dar, die sogenannte Playback Policy, die Peer-Verhalten definiert für den Fall, dass Inhalte nicht schnell genug heruntergeladen werden, um problemlos abgespielt zu werden – sollen Peers in dieser Situation die Wiedergabe pausieren und warten, bis die fehlenden Inhalte gefunden und heruntergeladen wurden, oder ist es besser, fehlende Teile zu überspringen? Und schliesslich bedingen P2P Systemarchitekturen verteilte Komponenten, zum Beispiel P2P-Tracker, die für Verbesserungen in Bezug auf Effizienz und Lastverteilung sorgen.

Daher untersucht diese Dissertation mehrere Aspekte, die die Kombination und nahtlose Vereinigung von direkter und zeitversetzter Übertragung in einem einzigen P2P-System unter Verwendung eines einheitlichen Protokolls und einheitlicher Regeln ermöglichen. Dies wird durch die Umsetzung eines neuen Systems erreicht – LiveShift genannt –, das es Peers erlaubt, Teile einer empfangenen Übertragung aufzuzeichnen, um diese Aufzeichnungen zu einem späteren Zeitpunkt bei Bedarf anderen Peers anbieten zu können. In der Anwendung bedeutet dies für die Nutzer, dass sie jederzeit bequem auf alle Programme zugreifen können, ohne dass sie

im Voraus Aufnahmen programmieren müssen, wobei Bandbreite und Speicherplatz mit der Anzahl der Nutzer im System skalieren.

Die Dissertation leistet damit vier zentrale Beiträge im Bereich zeitversetzter P2P-basierter Multimedia-Übertragungen. Erstens beschreibt und evaluiert sie detailliert ein einziges, vollständig verteiltes P2P-Protokoll, das gleichermassen direkte wie zeitversetzte Übertragungen schnell lokalisieren und verteilen kann. Zweitens erfolgte die komplette Umsetzung einer LiveShift-Anwendung für Nutzer des Systems, was realitätsnahe Experimente und Vorführungen ermöglichte. Drittens untersucht, vergleicht und klassifiziert die Dissertation Playback Policies, die festlegen, ob das System die Wiedergabe anhält oder ob es Teile überspringt, wenn Inhalte nicht verfügbar sind, auf ihre Auswirkungen auf das Nutzererlebnis für die beiden Szenarien einer Direktübertragung und einer Übertragung auf Abruf. Schliesslich führt sie einen neuartigen, voll verteilten P2P-Tracker – benannt B-Tracker – ein, der Effizienz und Lastverteilung im Vergleich zu anderen existierenden verteilten P2P-Trackern verbessert.

LiveShift wurde mittels einer vollständigen Umsetzung der Software evaluiert zwecks Validierung seines Protokolls und der Standard-Policies in einer realitätsnahen Umgebung unter Verwendung objektiver Metriken zur Messung des Nutzererlebnisses, nämlich der Wartezeit bis zum Start der Wiedergabe (Playback Lag) und dem Anteil übersprungener Blöcke. Die Evaluation wurde in einer Forschungs-Testumgebung durchgeführt und spiegelt realitätsnahe heterogene P2P-Umgebungen wider mit entsprechend modellierten Kanalwechsellern und Churn (Peers, die das System verlassen). Darüber hinaus wurde ein breites Spektrum von Playback Policies umgesetzt, um ihren Einfluss auf die betrachteten Metriken zur Messung des Nutzererlebnisses zu zeigen. Schliesslich bestätigten Experimente mit B-Tracker die angenommene Effizienzsteigerung und verbesserte Lastverteilung gegenüber anderer verbreiteter eingesetzter P2P-Tracker.

Contents

ABSTRACT	iii
KURZFASSUNG	v
1 INTRODUCTION	1
1.1 Multimedia Content Distribution	1
1.2 Basic Terminology	6
1.3 Integrated Live and Time-Shifting P2P Streaming Protocol and Application	7
1.4 Playback Policies	9
1.5 Fully-distributed P2P Tracker	10
1.6 Thesis Contributions	11
1.7 Thesis Outline	12
2 RELATED WORK	15
2.1 Content Distribution Architectures	15
2.2 P2P File Sharing Systems and Protocols	17
2.3 P2P Multimedia Streaming Systems and Protocols	20
2.4 Quality-of-Service and Quality-of-Experience	29
2.5 Playback Policies	30
2.6 Distributed Tracker Approaches	32
2.7 Contribution Opportunities	35
3 LIVESHIFT ARCHITECTURE, PROTOCOL, AND POLICIES	37
3.1 Design Objectives	38
3.2 Main Components	39
3.3 Protocol Overview	42
3.4 Current Policies	48
3.5 Evaluation	54
3.6 Chapter Summary	63
4 PLAYBACK POLICIES FOR LIVE AND ON-DEMAND P2P VIDEO STREAMING	65

4.1	Background and Terminology	66
4.2	Playback Policies	69
4.3	Evaluation	71
4.4	Chapter Summary	83
5	B-TRACKER: IMPROVING LOAD BALANCING AND EFFICIENCY IN DISTRIBUTED P2P TRACKERS	85
5.1	B-Tracker Design	86
5.2	Evaluation	91
5.3	Chapter Summary	99
6	LIVESHIFT APPLICATION	101
6.1	LiveShift's Graphical User Interface	102
6.2	Implementation of Playback Policies	107
6.3	Implementation of B-Tracker	108
6.4	Chapter Summary	109
7	CONCLUSIONS	111
7.1	LiveShift Architecture, Protocol, and Policies	112
7.2	Playback Policies	112
7.3	B-Tracker	114
7.4	Evaluation of Design Objectives	114
7.5	Future Work	115
	REFERENCES	117
	OTHER AUTHOR PUBLICATIONS	131
	APPENDIX A	135
	A.1 LiveShift Message Specification	135
	APPENDIX B	141
	B.1 Complete Playback Policies CDF Plots	141
	LISTING OF FIGURES	153
	LISTING OF TABLES	155
	ACKNOWLEDGMENTS	157
	CURRICULUM VITAE	159