

Diss. ETH No. 13636

A framework for network-aware applications

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
(ETH ZÜRICH)

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Jürg Bolliger
Dipl. Informatik-Ing. ETH
born March 31, 1969
citizen of Gontenschwil, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Thomas Gross, examiner
Prof. Dr. Bernhard Plattner, co-examiner

2000

Abstract

Today's best-effort Internet infrastructure is well-known for its heterogeneity (both in end-system capabilities and connectivity) and the significant fluctuations in service quality that can be observed. These two properties are often problematic from the viewpoint of a networked application, because they often result in unpredictable application behavior. *Network-aware applications* provide an approach to mitigate these problems: they dynamically adapt their demands to match the varying supply of network resources, e.g., with the goal to achieve predictable response times. Such *network-aware* applications must often trade network resources for some *measure of quality* of the data delivered.

This dissertation puts forth the claim that dynamic adaptation is an attractive and often necessary means to achieve the goal on predictable service quality. Unfortunately, network-aware applications are notoriously difficult to construct and evaluate. Two recurring issues need to be addressed when constructing such applications: how to find out about network resource availability and dynamic changes thereof, and how to adapt application behavior (to such dynamic changes), so that a goal on the response time and the quality of the data delivered can be met. Addressing these questions the dissertation makes three main contributions.

First, the dissertation presents a reusable framework for network-aware applications. In contrast to other work, an integral view on the quality-response time tradeoff is adopted, which means that applications built on the framework try to be smart about how to reduce the quality of the data delivered, so that a user-specified time limit can be met, and so that the negative impact on the overall service quality is minimized. Applications are free to define their notion of quality. The dissertation shows that a framework-based approach to the construction of such network-aware applications allows for reuse of the core adaptation process and can therefore shield developers from many of the complexities in dealing with network dynamics. Reusability is achieved by factoring out three aspects of application-specific functionality: the data types handled by the application, the algorithms applicable to achieve quality reductions for a particular type, and the application's notion of quality.

Second, a systematic approach to the evaluation of the complex dynamic behavior of network-aware applications is presented. There are three questions to ask of such adaptive applications. Does adaptation work, and if so, what are the key factors that effect the application's ability to adapt to the network environment? Does network-aware delivery provide a benefit to the user? At what costs can such benefits be obtained? The evaluation establishes that adaptation is robust with respect to many of the parameters that influence adaptation decisions. We find that network-aware content delivery can provide predictable response times over a wide range of bandwidths and CPU powers, can be smart about how to tradeoff quality for network resources, and incurs only small overheads.

Third, the dissertation shows that the performance of network-aware applications depends on the accuracy and timeliness of information about network resource availability. Comparing different alternatives to the task of gathering information about network status, the dissertation demonstrates that the need for accurate and timely information about network resource availability can both effectively and efficiently be satisfied with transport-level monitoring. In addition, our evaluation indicates that the ability to predict bandwidth depends considerably on the transport protocol used. Our prototype monitoring system demonstrates that the implementation of such a monitoring scheme requires only minimal changes to existing protocol stacks and advocates a simple widening of the application programming interface.

Kurzfassung

Viele verteilte Anwendungen, die “best-effort” Netzwerke wie das heutige Internet als Transportmedium benutzen, leiden unter den zuweilen grossen Unterschieden und starken Schwankungen in der Netzwerk Service Qualität, insbesondere der verfügbaren Bandbreite. *Adaptive Applikationen* versuchen hier Abhilfe zu schaffen, indem sie ihr Verhalten dynamisch der Verfügbarkeit von Netzwerk-Ressourcen anpassen, um dem Benutzer eine tolerierbare Service Qualität zur Verfügung zu stellen—zum Beispiel durch Einhalten einer vom Benutzer festlegbaren Antwortzeit. Zu diesem Zweck müssen oft Abstriche in der *Qualität* der ausgelieferten Daten in Kauf genommen werden.

Diese Dissertation zeigt, dass dynamische Anpassung an die Gegebenheiten in Netzwerken ein attraktiver und häufig notwendiger Mechanismus darstellt, um vorgegebene Antwortzeiten einhalten zu können. Leider entpuppen sich sowohl die Konstruktion als auch die Evaluation von adaptiven Anwendungen als ausserordentlich schwierige Aufgaben. Bei der Entwicklung solcher Anwendungen gilt es im Wesentlichen zwei Aspekte zu berücksichtigen: wie erhält die Anwendung Informationen über die Verfügbarkeit von Netzwerk-Ressourcen, und wie kann die Applikation ihr Verhalten anpassen, so dass zum Beispiel eine vorgegebene Antwortzeit eingehalten werden kann. Diese Dissertation leistet die folgenden drei Beiträge.

Erstens stellt die Dissertation ein wiederverwendbares Framework für Anwendungen zur Verfügung, die sich an Veränderungen der verfügbaren Bandbreite anpassen wollen. Im Gegensatz zu verwandten Arbeiten wird versucht, die Qualität der ausgelieferten Daten so anzupassen, dass eine benutzer-definierte Zeitlimite eingehalten werden kann und die negativen Auswirkungen auf die Qualität minimiert werden können. Dabei ist es der Anwendung überlassen, den Begriff Qualität zu definieren. Die Dissertation zeigt, dass ein framework-basierter Entwicklungsansatz für adaptive Anwendungen geeignet ist, da die Kernprozesse der Anpassung wiederverwendet werden können. Die Entwicklung neuer Anwendungen wird somit vereinfacht, da sich die Entwickler nicht um die komplexen dynamischen Eigenschaften von Netzwerken kümmern müssen. Die Wiederverwendbarkeit des Frameworks wird erreicht durch Faktorisierung von anwendungs-spezifischer Funktionalität: die Anwendung definiert die verfügbaren Datentypen, die Algorithmen, welche Qualitätsreduktionen erwirken können, sowie den Begriff der Qualität der auszuliefernden Daten.

Zweitens wird ein systematisches Vorgehen zur Evaluation von adaptiven, verteilten Anwendungen vorgestellt, das es erlaubt, die drei wichtigsten Fragen, die an solche Systeme gestellt werden quantitativ zu beantworten. Können adaptive Anwendungen die vorgegebene Zeitlimite erfüllen, und falls ja, welches sind die Hauptfaktoren, welche die Anpassungsfähigkeit einer Anwendung beeinflussen? Sind adaptive Anwendungen in der Lage, einen für Benutzer messbaren Nutzen zu generieren? Was ist der Preis, der dafür bezahlt werden muss? Die Eva-

luation zeigt, dass dynamische Anpassung an die Netzwerkumgebung möglich ist und zudem robust ist gegenüber vielen der äusseren Einflüssen, die das Anpassungsverhalten bestimmen. Im weiteren lässt sich feststellen, dass vorgegebene Zeitlimiten recht gut eingehalten werden können, die Qualitätsanpassungen auf eine Art vorgenommen werden, welche die Präferenzen der Anwendung berücksichtigen und dass die Kosten (Rechenaufwand) bescheiden sind.

Drittens veranschaulicht die Dissertation, dass die Anpassungsfähigkeit von solchen Anwendungen von der Genauigkeit und der Aktualität der Informationen abhängt, die sie über die Verfügbarkeit von Netzwerk-Ressourcen erhalten. Der Vergleich von verschiedenen Ansätzen der dynamischen Bandbreitenmessung zeigt, dass die Anforderungen an Genauigkeit und Aktualität der Informationen mit sogenanntem "transport-level monitoring"—einer Kooperation von Transportprotokoll und Anwendung—effizient erfüllt werden können. Zudem zeigt sich, dass die Fähigkeit, die verfügbare Bandbreite abzuschätzen, stark von der Wahl des Transportprotokolls abhängt. Die Realisierung eines Prototypen demonstriert, dass sich ein solcher Ansatz mit lediglich kleinen Änderungen an existierenden Protokollimplementationen umsetzen lässt und dass es daher nützlich wäre, die Schnittstelle zum Betriebssystem um die entsprechende Funktionalität zu erweitern.