

# Zeitsynchrones Interaktives Übertragungssystem basierend auf Embedded Linux

Leo Petrak<sup>1</sup>, Falko Dressler<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universität Tübingen, Rechnernetze und Internet, Auf der Morgenstelle 10C, 72076 Tübingen

<sup>2</sup>Universität Erlangen, Informatik 7, Martensstr. 3, 91058 Erlangen

<sup>1</sup>petrak@informatik.uni-tuebingen.de, <sup>2</sup>dressler@informatik.uni-erlangen.de

**Zusammenfassung.** In dieser Arbeit wird ein Übertragungssystem für Bildinhalte z.B. von Powerpoint-Präsentationen vorgestellt, welches eine zeitsynchrone und interaktive Arbeitsweise erlaubt. Ziel ist es, eine neue Technologie zu entwerfen, die besonderen Wert auf eine integrierte Interaktivität legt und dabei für multimediale Echtzeitkommunikation geeignet ist. Neben der Systemarchitektur werden Referenzmessungen einer prototypischen Implementierung vorgestellt. Diese zeigen, daß es gelungen ist, einen Regelkreis aufzubauen, der adaptiv auf sich verändernde Verhältnisse im Netzwerk reagiert. Darauf aufbauend kann über das erstellte systemunabhängige Interface unterschiedliche Multimediaübertragungen implementiert werden, die nicht nur adaptiv auf die Dienstgüte der Datenübertragung, sondern auch auf die Dienstgüte des Rückkanals für interaktive Steuerungen reagieren.

## 1 Einleitung

Viele Szenarien erfordern eine räumlich getrennte Aufstellung von PC-basierten Rechnersystemen und der dazugehörigen Präsentationstechnik. Die bekanntesten Beispiele sind ein rechnergestützter Powerpoint-Vortrag und eine Fernnutzung von Server- oder Arbeitsplatzrechnern. Als Lösung dieser Problemstellung bietet sich die Übertragung der interaktiven Ein-/Ausgabe über Rechnernetze an. Gerade in der heutigen Zeit, in der funkgestützte Übertragungstechnologien nahezu überall und vor allem preiswert verfügbar sind, kann dadurch eine hohe Beweglichkeit z.B. im Vortragsraum erreicht werden und damit verbunden eine Erhöhung der Arbeitsqualität.

Motiviert wurde diese Arbeit durch einen c't-Artikel [1] über eine Funklan-basierte Anbindung von Projektoren an Laptops, um Powerpoint-Präsentationen kabellos in großen Seminar- bzw. Vortragsräumen durchführen zu können [7]. Diese Anwendung kennzeichnet sich leider durch ihre sehr proprietären Schnittstellen. So kann zum einen nur Powerpoint als Anwendung genutzt werden und zum anderen nur Funklan als Übertragungstechnik. Außerdem ist der Grad der Interaktivität durch mangelnde Dienstgüteunterstützung eingeschränkt.

Das Ziel der hier präsentierten Arbeit ist es, eine allgemeine IP-basierte Lösung für dieses Problem vorzustellen. Dabei stehen folgende Schwerpunkte im Vordergrund

des Ansatzes, die als primäre Anforderungen für die Systemarchitektur und eine folgende Implementierung dienen:

- hoher Grad der Interaktivität
- Betriebssystem- und Anwendungsunabhängigkeit
- Möglichkeit der Interaktion zwischen Remote-Standort und Hostsystem
- Echtzeitfähigkeit der Bilddarstellung bzw. des Rückkanals
- handliche Ausprägung des Empfängers in Form eines PC104 embedded Linux-Systems
- Unabhängigkeit vom verwendeten Medium (Funk, Kabel)

Im Rahmen einer aktuellen Arbeit am Lehrstuhl für Rechnernetze und Internet der Universität Tübingen wird eine Anwendung implementiert, die es erlaubt, Bildinformationen von verschiedenen Hostsystemen (im Moment Windows und Linux) abzugreifen, zielgerecht zu verpacken und über IP-basierte Netze zu einem Empfänger zu transportieren. Der Empfänger, vorzugsweise ein kompaktes PC104-basiertes embedded Linux-System, hat die Aufgabe, die Daten zu dekodieren und zeitsynchron auf einer Präsentationsfläche darzustellen. Weiterhin sollten Tastatureingaben (Maus, Zeiger,..) für interaktive Steuerungen aufgenommen und an den Sender transportiert werden. Wir versprechen uns von diesem Projekt ein universell einsetzbares System, welches sowohl für Präsentationsszenarien als auch für den Betrieb von schwer zugänglichen Rechensystemen eingesetzt werden kann. Die in der Zielstellung formulierte Medien- und Betriebssystemunabhängigkeit hilft, eine plattformübergreifende Lösung zu realisieren.

Schwerpunkt der hier präsentierten Untersuchungen ist die Analyse der benötigten Dienstgüte [5] für die multimediale Datenübertragung [3] als auch für eine echte Interaktivität. Basierend auf kontinuierlichen Dienstgütemessungen soll so ein Regelkreis entstehen, der adaptiv auf sich verändernde Netzverhältnisse reagieren kann und die Datenrate und die Paketgröße, welche die primären Kriterien für die Qualität der Datenübertragung darstellen, entsprechend anpassen kann.

Wichtig ist dabei die Tatsache, daß als Übertragungsprotokoll IP genutzt wird. Dies ermöglicht eine Adaption an verschiedenste Übertragungsmedien wie z.B. Bluetooth, Funklan oder kabelbasierte Medien.

Durch eine geeignete Dimensionierung der Warteschlangen und der genutzten Protokolle wird es erlaubt, Echtzeitkommunikation auch in verlustbehafteten Medien wie Funklans erfolgreich einsetzen zu können [2, 6]. Möglich wird dies durch spezielle Synchronisationsmechanismen zwischen den kommunizierenden Einheiten, welche z.T. auf einer Zeitsynchronisation basieren [4]. Gemeint ist damit ein künstlich erzeugter Takt, der über das Protokoll generiert und übertragen wird. Dieser kann auch gleichzeitig für den interaktiven Rückkanal, sprich z.B. die Übertragung von Tastaturinformationen, genutzt werden.

Die anvisierte Zielplattform für den Empfänger ist ein kleines, handliches PC104-basiertes System, welches z.B. an Projektoren installiert werden kann. Als Betriebssystem am Empfänger ist Linux vorgesehen. Dabei soll vorrangig embedded Linux genutzt werden.

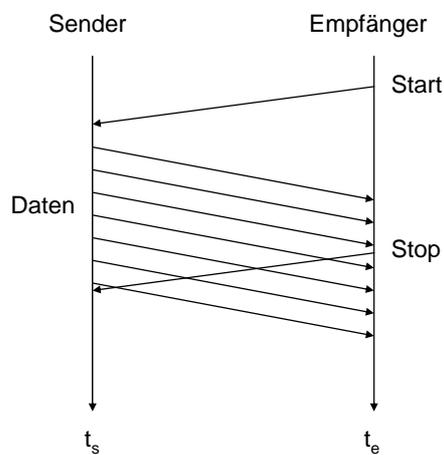
Die folgenden Abschnitte sind wie folgt organisiert. In Abschnitt 2 werden die Anforderungen an die interaktive Steuerung beschrieben. Diese, zusammen mit den

Ergebnissen aus Abschnitt 4, zeigen die Funktionalität und Anwendbarkeit des entwickelten Reglers. In Abschnitt 3 ist die Systemarchitektur der kompletten Anwendung skizziert ebenso wie die Architektur des Regelkreises. Abschnitt 4 beschreibt den Versuchsaufbau für die experimentellen Untersuchungen und diskutiert die Meßergebnisse. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick in Abschnitt 5 beschließen die Arbeit.

## 2 Interaktive Steuerung

Besonderer Wert liegt auf der Interaktivität der Kommunikationspartner. Die Reaktion des Senders, d.h. der Beginn der Datenübertragung bzw. die Beendigung der Übertragung, soll einem menschlichen Nutzer angenehm erscheinen und, vor allem, sich adaptiv den Umgebungseigenschaften anpassen. Subjektive Messungen können einen Anhaltspunkt für optimale, d.h. maximale Start- / Stopverzögerungen aufzeigen. Der Fokus dieser Arbeit liegt allerdings in der Entwicklung eines Regelkreises für eine optimale Adaption an die zugrundeliegenden Verhältnisse im Datennetz. Dies scheint vor allem bei Funk-gesteuerten Datenübertragungen sinnvoll, da es hier zu starken Schwankungen der Dienstgüte und der Übertragungskapazität kommen kann.

In Abbildung 1 ist die genutzte Definition der Start- bzw. Stopverzögerung gezeigt. Nach dem Verschicken einer Start-Nachricht dauert es exakte eine Round-Trip Time (RTT) zzgl. Verwaltungsaufwand auf Sender- und Empfängerseite, bis die ersten Datenpakete empfangen, verarbeitet und angezeigt werden können.



**Abbildung 1** Start- / Stopverzögerung. Die Zeitspanne zwischen verschicktem Start-Signal und dem ersten komplett empfangenen Datenpaket ist ein Maß für die Qualität der Interaktivität

Die Verzögerung ist auch abhängig von der gewählten Paketgröße. Zum einen muß der Sender eine entsprechende Datenmenge puffern (was je nach Bitrate der Anwendungsschicht unterschiedlich lange dauern kann) und dann muß das

entsprechend große Datenpaket verschickt und empfangen werden, was mit wachsender Paketgröße erheblich länger dauern kann.

Die Stopverzögerung unterliegt noch weiteren Faktoren. So ist hier die Paketrade das wichtigste Kriterium für die Stopverzögerung. Werden nur wenige Pakete pro Sekunde verschickt, kann es sein, daß „negative“ Stopverzögerungen erzeugt werden, d.h. das Stop wurde nach dem letzten zu übertragenen Datenpaket verschickt und es wird auch kein weiteres Datenpaket mehr erzeugt. Bei kleinen Paketen und großen Paketraten ist die Stopverzögerung ein wichtiges Dienstgütekriterium.

### 3 Systemarchitektur

Die grundsätzliche Systemarchitektur ist in Abbildung 2 zu sehen. Vom Bildspeicher des Hostsystems werden über ein geeignetes Interface Datenpakete generiert. Dabei beschreibt das Interface eine grundsätzlich systemunabhängige Schnittstelle, die z.B. unter Windows dem Frame Buffer ansprechen kann oder unter Linux das X11 Grafiksystem. Die gewonnenen Bildinformationen sollen über an das Interface angeschlossene Kodierbibliotheken komprimiert und für die Datenübertragung vorbereitet werden. Primär steht der Einsatz einer MPEG-Kodierung im Vordergrund, grundsätzlich können aber über eine generische Schnittstelle nahezu beliebige Filter- bzw. Kodieralgorithmen eingesetzt werden.

In Abbildung 2 durch den roten bzw. helleren Pfeil angedeutet, stehen dem Interface Statusinformationen über die Qualität der Datenübertragung zur Verfügung. Ebenfalls genutzt wird dieser Kanal für die Übermittlung der Interaktionsbefehle. Diese Statusinformationen können für eine Adaption der Kodierung (Auslassen von weniger Bild-relevanten Datenpaketen in Abhängigkeit von der Übertragungsqualität) genutzt werden, so daß das Gesamtsystem auf die aktuellen Zustände der Datenübertragung reagieren kann.

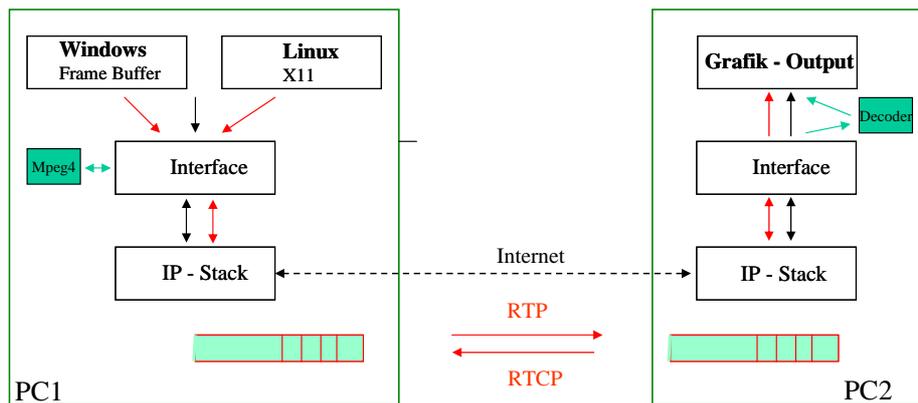


Abbildung 2 Schematische Darstellung der Architektur des Zielsystems

Die im Interface erstellten Datenpakete werden mittels des Real-time Transportprotokolls (RTP) [8] über einen Standard-IP-Stack an das Zielsystem, den

embedded Linux-PC, verschickt. Das dabei benutzte RTP-Protokoll eignet sich im allgemeinen für die Übermittlung von Echtzeit-Multimedia-Daten. Im Kopf eines jeden Paketes werden Sequenznummern und Zeitstempel gespeichert, so daß der Empfänger anhand dieser Daten Rückschlüsse auf die aktuelle Dienstgüte der Datenübertragung ziehen kann. Die wesentlichen Parameter sind die Paketverlustrate und der Jitter, also die Variation der Verzögerung. Mittels eines Rückkanals, basierend auf dem RTP Control Protokoll (RTCP) [8], kann der Sender die Datenübertragung adaptiv auf die Kanalqualität anpassen.

Die Vorteile dieser Systemarchitektur sind offensichtlich. Basierend auf dem Grundkonzept werden folgende Anforderungen des Gesamtsystems erreicht:

- hoher Grad der Interaktivität durch echtzeitfähigen Rückkanal
- Betriebssystem- und Anwendungsunabhängigkeit durch Implementierung eines anwendungsneutralen Interfaces
- Möglichkeit der Interaktion zwischen Remote-Standort und Hostsystem über den RTCP-Rückkanal
- Echtzeitfähigkeit der Bilddarstellung bzw. des Rückkanals durch geeignete Dienstgütemechanismen und Programmiermodelle (nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit)
- handliche Ausprägung des Empfängers in Form eines PC104 embedded Linux-Systems; dies ist die anvisierte Zielplattform; die Messungen in Abschnitt 4 wurden mit einem solchen System erstellt
- Unabhängigkeit vom verwendeten Medium (Funk, Kabel) dank der Standard-IP-Technologie, die für nahezu alle Medien verfügbar ist

Die hier vorgestellte Systemarchitektur wurde für erste Referenzmessungen und den Nachweis der Funktionalität der Interaktivität des Ansatzes prototypisch implementiert und getestet.

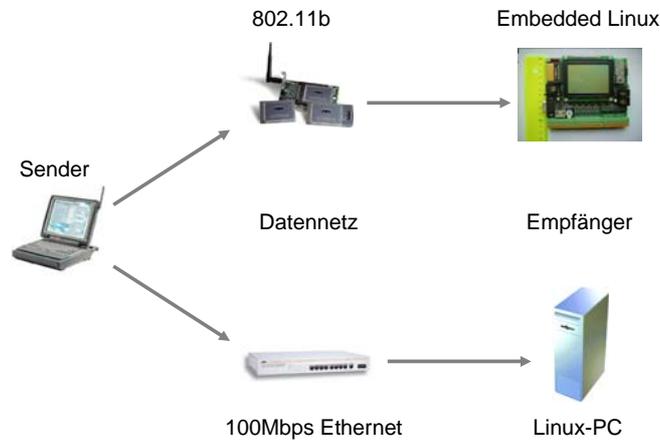
## **4 Versuchsaufbau und Messungen**

In diesem Abschnitt werden die prototypische Implementierung und der für die Messungen genutzte Versuchsaufbau beschrieben. Weiterhin werden die Meßergebnisse vorgestellt, die im Rahmen der Studie gewonnen wurden.

### **4.1 Versuchsaufbau**

Für die qualitative Analyse des Systemkonzepts wurde eine prototypische Implementierung erstellt, die es erlaubt, Echtzeitdaten über RTP an ein Zielsystem zu verschicken und über einen Rückkanal diesen Datentransfer interaktiv zu steuern. Dabei werden basierend auf den Informationen im Kopf der RTP-Pakete Dienstgütemessungen durchgeführt. Für die Bestimmung der Qualität der interaktiven Steuerung wird die Zeitspanne zwischen einem verschickten Start-Signal und dem ersten vollständig empfangenen Datenpaket gemessen.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 zu sehen. Ein Sender (Standard-PC) verschickt RTP Pakete über ein Funklan an ein embedded Linux System bzw. über 100Mbps Ethernet an einen Linux-PC.



**Abbildung 3** Versuchsaufbau für die Dienstgütemessungen. Via Funklan IEEE 802.11b an ein embedded Linux-System (oben), via 100Mbps Ethernet an einen Standard-PC (unten)

Für die Bestimmung der Dienstgüte der Datenübertragung und der Qualität der Interaktivität wurden Messungen mit unterschiedlichen Datenraten und Paketgrößen durchgeführt. Diese dienen als Referenz für den Einsatz eines adaptiven Reglers. Die Parameter für die einzelnen Messungen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Nummer der Messung	Datenrate [kBit/s]	Paketgröße [Byte]
1	64	64
2		429
3		1500
4	768	64
5		429
6		1500
7	1500	64
8		429
9		1500
10	8000	64
11		429
12		1500

**Tabelle 1** Parameter für die Dienstgütemessungen

#### 4.2 Dienstgüte der Datenübertragung

Als Referenzmessungen wurden der Jitter, also die Variation der Verzögerung bei der multimedialen RTP-basierten Datenübertragung und die Paketverlustrate bestimmt. Die Meßergebnisse sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 zu sehen.

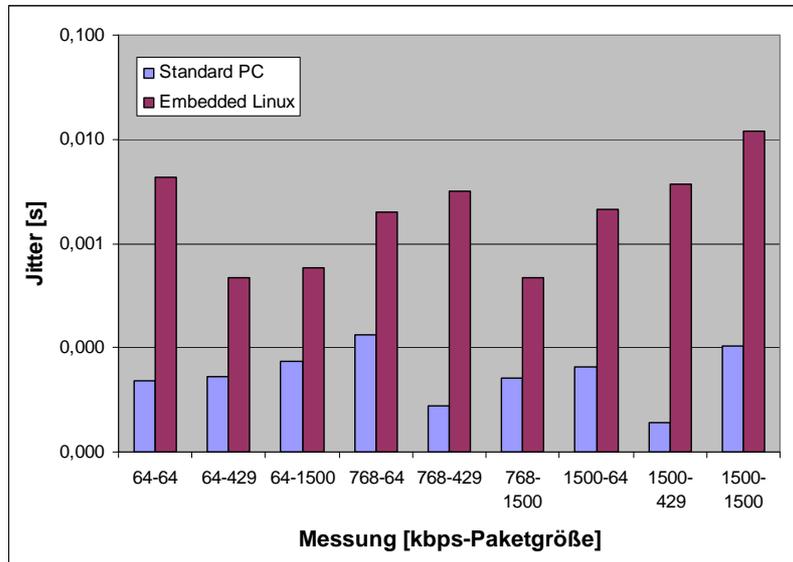


Abbildung 4 Messung des Jitters der Datenübertragung

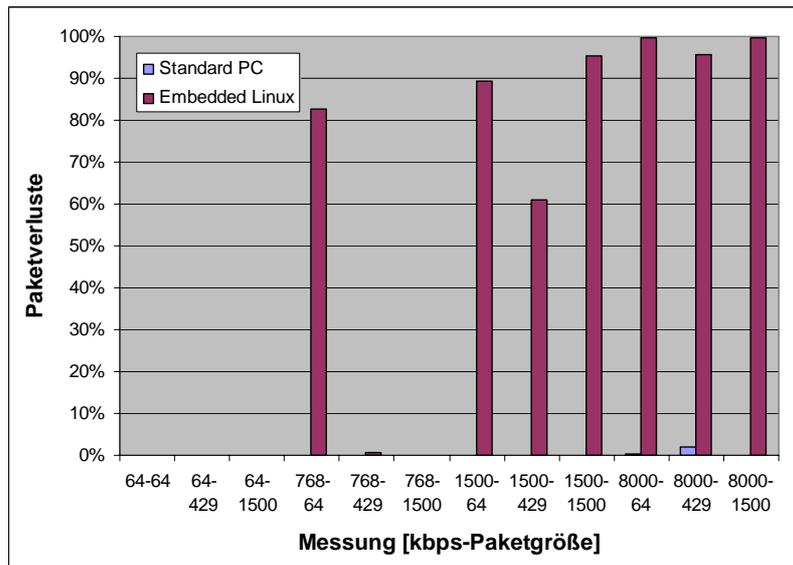


Abbildung 5 Messung der Paketverlustrate der Datenübertragung

Abbildung 4 zeigt den Jitter bei der Echtzeitkommunikation. Dieser ist bei der Nutzung des kabelbundenen 100Mbps Ethernets deutlich kleiner als bei einer Funkübertragung zu einem embedded Linux-System. Die Paketverlustrate (Abbildung 5) ist im Fall des Ethernets und des Standard-PCs nahezu Null. Anders sieht es beim Einsatz des embedded Linux-Systems aus. Hier stellt sich nicht nur die

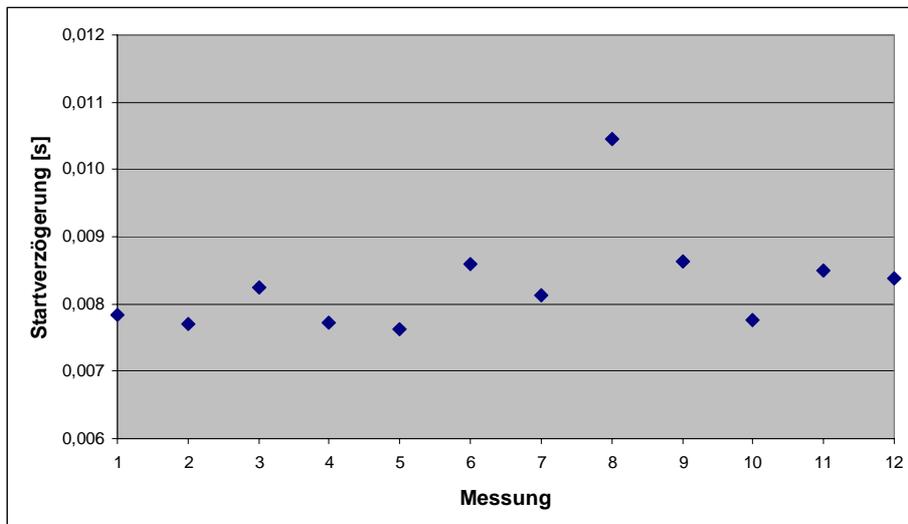
Qualität des Übertragungsmediums als kritisch heraus, sondern auch die Leistungsfähigkeit des Zielsystems, welches bei der Verarbeitung kleiner Pakete schnell an seine Leistungsgrenzen stößt.

Der adaptive Ausgleich der Übertragungs- und Verarbeitungsgeschwindigkeit ist die Aufgabe des Regelkreises, der die durch die Applikation erzeugte Datenrate regulieren soll. Bei den anvisierten Bildübertragungen mit mittlerer bzw. hoher Datenrate sind offensichtlich große Pakete ideal für eine maximale Dienstgüte.

### 4.3 Dienstgüte der Interaktivität

Schwerpunkt der vorgestellten Arbeit ist die Interaktivität der Anwendung. Die erreichbare Qualität der Interaktivität bei unterschiedlichen Zielsystemen (Standard-PC, embedded Linux-System) und unterschiedlichen Netzverbindungen (100Mbps Ethernet, Funklan) wurde untersucht. In der Darstellung der folgenden Abbildungen entspricht die Nummer der Messung der Nummer in Tabelle 1. Anhand dieser können Parameter wie Datenrate und Paketgröße abgelesen werden.

In Abbildung 6 ist die gemessene Startverzögerung bei einem Standard-PC und einem 100Mbps Ethernet zu sehen. Die Werte liegen konstant bei ca. 8ms. Es sind kaum Schwankungen basierend auf den Übertragungsparametern zu erkennen.

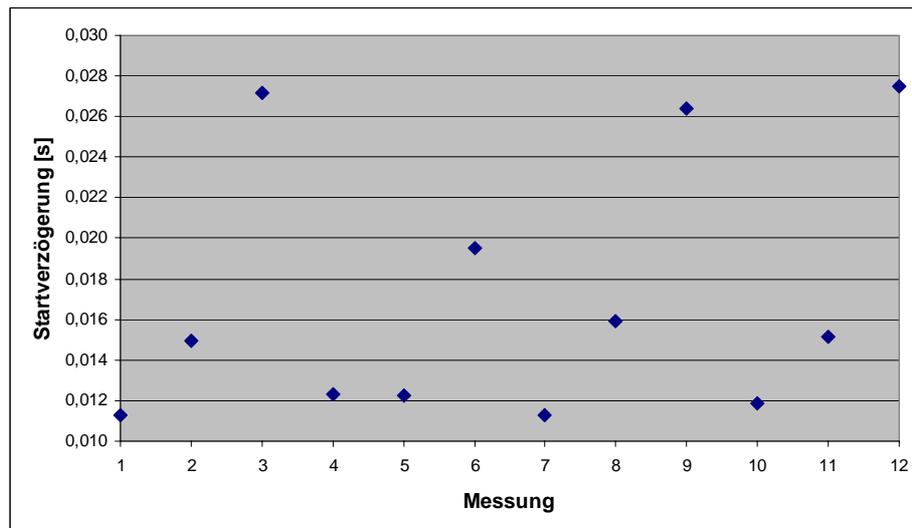


**Abbildung 6** Startverzögerung bei einem Standard-PC und einem 100Mbps Ethernet als Datennetz

Komplett andere Ergebnisse zeigen sich bei den Messungen mit dem embedd Linux-System und einem IEEE 802.11b Funklan. Die Resultate, gezeigt in Abbildung 7, lassen folgende Rückschlüsse für die angestrebte Interaktivität zu:

- es sind grundsätzliche Unterschiede zwischen den Einzelmessungen zu sehen
- die Startverzögerung wird kaum durch die Datenrate beeinflusst

- die minimale Startverzögerung beim Einsatz von Funklan-Technologie und einem embedded Linux-System liegt nur minimal höher im Vergleich zu einem Standard-PC und 100Mbps Ethernet
- wichtigster Parameter ist die Paketgröße, die die Startverzögerung enorm beeinflusst



**Abbildung 7** Startverzögerung bei einem embedded Linux-System und einem Funklan als Datennetz

Zusammenfassend kann man sagen, daß eine minimale Paketgröße die Qualität der Interaktivität erhöht. Dies steht im Gegensatz zu der Erkenntnis, daß eine maximale Paketgröße für eine effiziente Datenübertragung mit hoher Dienstgüte zu benutzen ist. Die Lösung dieses Widerspruches liegt in der Adaptivität des Regelkreises. Zu Beginn einer Übertragung sollte eine minimale Paketgröße gewählt werden, die während der Übertragung zu steigern ist. Dafür ist die Paketverlustrate der entscheidende Faktor.

## 5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Konzept für ein zeitsynchrones interaktives Übertragungssystem basierend auf Embedded Linux vorgestellt. Die Neuartigkeit des Ansatzes liegt in der sich durch eine hohe Dienstgüte auszeichnenden Interaktivität der Architektur. Das dazu nötige Regelsystem optimiert sowohl die Qualität der Datenübertragung als auch die der interaktiven Steuerung. Funktional wird dieser Regelkreis über ein systemunabhängiges Interface zur Verfügung gestellt.

In den mit einer prototypischen Implementierung der Architektur durchgeführten Referenzmessungen zeigte sich, daß die Qualität der Datenübertragung wie erwartet sowohl von dem Übertragungsmedium als auch von der Verarbeitungs-

geschwindigkeit des Zielsystems abhängt. Die Güte der interaktiven Steuerung hängt dagegen im wesentlichen nur von der Parametrierung der Übertragungsstrecke, sprich der gewählten Paketgröße ab. Diese kann über den Regler effizient den Bedürfnissen der Umgebung angepaßt werden.

## 5.1 Offene Fragen

Im Moment stellen sich uns noch folgende offene Fragen:

### a) Sicherheit des Gesamtsystems

Das vorgeschlagene Protokoll enthält bisher noch keine expliziten Sicherheitsmechanismen. Dies ist aufgrund der Tatsache, daß es u.a. für kritische Fernwartungsprozesse genutzt werden könnte besonders fraglich. Ein intuitiver Lösungsansatz ist die Nutzung von IPSec als Übertragungsprotokoll. Dies ist aufgrund des modularen Aufbaus des Systems einfach zu realisieren. Dennoch ist zu prüfen, in wie weit die Echtzeitfähigkeit davon beeinflusst wird.

### b) Multiuser Interaktion

Ein interessanter Aspekt ist die Möglichkeit, mehrere Nutzer gleichzeitig interagieren zu lassen. Dies ist sowohl in Richtung Präsentation als auch für den Rückkanal denkbar. Möglich werden so z.B. kollaborative Szenarien.

### c) Einsatz von intelligenten Kodierern

Ein weiterer lohnenswerter Aspekt ist der Einsatz von intelligenten Kodierern. Dies könnte dazu führen, dass in Abhängigkeit von der Qualität und Auslastung des Übertragungskanal die Anzahl der zu übertragenden Frames beeinflusst werden könnte. Auf diesem Wege lässt sich die zeitsynchrone Übertragung auf Kosten der Bildqualität realisieren. Dieser Prozess könnte auch adaptiv ablaufen.

## 6 Literatur

1. "Bildfunk," in *c't*, vol. 25, (2003) 64
2. C.-T. Chou and K. G. Shin, "Analysis of Adaptive Bandwidth Allocation in Wireless Networks with Multilevel Degradable Quality of Service," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3 (2004) 5-17
3. F. Dressler, "Considerations on Selection Criteria for Sources of Multimedia Traffic," Proceedings of 7th World Multiconference on Systematics, Cybernetics and Informatics (SCI 2003), vol. III, Orlando, Florida, USA (2003) 34-38
4. J. Elson and D. Estrin, "Time Synchronization for Wireless Sensor Networks," Proceedings of 2001 International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), San Francisco, CA, USA (2001)
5. U. Hilgers and F. Dressler, "Echtzeit-Datenverkehr über IP-basierte Datennetze," Proceedings of Echtzeitkommunikation und Ethernet/Internet: Fachtagung der GI-Fachgruppe 4.4.2 Echtzeitprogrammierung (PEARL 2001), Boppard, Germany (2001) 29-39
6. V. Huang and W. Zhuang, "QoS-Oriented Packet Scheduling for Wireless Multimedia CDMA Communication," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3 (2004) 73-85
7. OTC Wireless, "WiJET Wireless Projector/Monitor Adaptor," [http://www.otcwireless.com/802/WiJET\\_V.htm](http://www.otcwireless.com/802/WiJET_V.htm) (2003)
8. H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications," RFC 3550 (2003)