

Leistungsbewertung von Algorithmen zur dynamischen Ressourcenverwaltung in lokalen “Broadcast”-Netzen

Jürgen Wolf¹, Bernd E. Wolfinger¹, Gwendal Le Grand² und Pascal Anelli³

¹ Universität Hamburg, TKRN; {jwolf|wolfinger}@informatik.uni-hamburg.de

² ENST-INFRES, Paris; gwendal.legrand@enst.fr

³ LIP6, Université P. et M. Curie, Paris; Pascal.Anelli@lip6.fr

Zusammenfassung. Dienstgütegarantien in Kommunikationsnetzen, wie sie insbesondere bei Echtzeitkommunikation erforderlich sind, lassen sich durch Betriebsmittelreservierung beim Aufbau von Kommunikationsverbindungen realisieren. Durch dynamische Schwankungen des tatsächlichen Betriebsmittelbedarfs während der Verbindungsdauer können indes reservierte Betriebsmittel (z.B. Übertragungskapazität) ungenutzt bleiben. Eine effizientere Ressourcennutzung ist möglich durch ein temporäres Ausleihen unbenötigter Betriebsmittel, z.B. zwischen Stationen eines “Broadcast”-Netzes.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit zwei zentralen Problemen eines derartigen Ausleihverfahrens von Ressourcen: einerseits Abschätzung des Momentanbedarfs an Betriebsmitteln basierend auf Lastmessungen sowie andererseits Bereitstellung von Algorithmen zur dynamischen Weitergabe reservierter, jedoch temporär unbenötigter, Übertragungsressourcen. Für die vorgeschlagenen Algorithmen zur Lastcharakterisierung sowie zum Weiterreichen von Übertragungsbetriebsmitteln erfolgt eine detaillierte Bewertung ihrer Effizienz mittels elementarer mathematischer Modelle mit Fokus auf das Endsystemverhalten und unter Berücksichtigung von Echtzeitverkehren.

Schlagnote: Dienstgüte, Ressourcenmanagement, Verkehrsmanagement, Echtzeitkommunikation, Leistungsbewertung

1 Einleitung und Problemstellung

Das verstärkte Interesse an Audio-/Videoübertragung in Echtzeit betrifft in besonderem Maße lokale Rechnernetze, da in diesen Netzen Übertragungsressourcen relativ preisgünstig bereitgestellt werden können. Gleichwohl sind auch lokale Netze ohne Erweiterungen ihrer Netzarchitektur bzw. ihrer Protokolle in der Regel nicht in der Lage, die Kommunikationsdienste dauerhaft mit der für eine Echtzeitkommunikation erforderlichen Qualität zu erbringen. Eine Garantie von Dienstqualität/Dienstgüte (QoS) in lokalen Rechnernetzen kann indes durch Maßnahmen wie Betriebsmittelreservierungen, Verkehrspriorisierung oder aber einer absichtlichen Überdimensionierung der Netzressourcen erreicht werden.

Das Aufteilen von Bandbreite in konventionellen Kommunikationsnetzen ohne Echtzeitbedingungen ist bereits relativ gut verstanden [7]. Bei Kommunikationsnetzen mit zu garantierenden Maximalverzögerungen der zu übertragenden Dateneinheiten zwischen Endsystemen (“end-to-end delay”) sind dynamische Bandbreitevergabe-Algorithmen noch Gegenstand intensiver Forschung [1, 2, 6]. Dies gilt insbesondere für “Broadcast”-Netze, wie sie bei Mobilkommunikation typisch sind, die Dienstgütegarantien hinsichtlich maximaler Ende-zu-Ende-Verzögerungen zu erbringen haben [3].

In diesem Beitrag betrachten wir den Ansatz der Betriebsmittelreservierung (primär bezogen auf Übertragungskapazität) sowie seine Nutzung in (o.B.d.A. lokalen) “Broadcast”-Netzen. Insbesondere wollen wir untersuchen, auf welche Weise Betriebsmittel, die bereits reserviert und kommunizierenden Endbenutzern fest zugeordnet sind, zeitweise “verliehen” werden können. Das Verleihen erfolgt dabei in Phasen, zu denen der “Besitzer” der Betriebsmittel diese nicht benötigt. Selbstverständlich muss sichergestellt werden, dass der Besitzer im Bedarfsfall verliehene Betriebsmittel umgehend zurück erhält, um Echtzeitanforderungen bzw. QoS-Garantien nicht zu verletzen.

Die durch uns vorgeschlagenen Algorithmen zur dynamischen Ressourcenverwaltung gehen von der Voraussetzung aus, dass das Problem der Reservierung und statischen Betriebsmittelzuweisung bereits gelöst ist (vgl. [4]), und dass die Betriebsmittelreservierung für ein relativ großes Zeitintervall vorgenommen wird (z.B. für die Dauer eines Audio-/Videostroms, typischerweise im *min*-Bereich). In unserem Ansatz überprüft jeder Besitzer (B) von Betriebsmitteln periodisch, ob die lokal anstehende Kommunikationslast die fortgesetzte Reservierung sämtlicher Betriebsmittel rechtfertigt. Sofern eine hinreichend große Menge von Betriebsmitteln von B als temporär unbenötigt erachtet wird, so wird B diese an seine “Nachbarn” verleihen. Um die Echtzeitbedingungen für seine abzusendenden Daten zu respektieren, wird B die Ankünfte bezogen auf seine Übertragungswarteschlange beobachten und seine Betriebsmittel zurückholen, sobald die lokale Belastung wieder zunimmt. Diese Freigabe und Rückforderung von Betriebsmitteln könnte zu Oszillationen in der Ressourcenverwaltung führen. Daher verwenden wir bei der Ermittlung der Momentanbelastung und des daraus resultierenden Betriebsmittelbedarfs Schätzfunktionen, die eine Glättung für die in B generierte Last erzielen (vgl. hierzu auch [5, 8]). Überdies führen wir ein System von (Last-)Schwellwerten ein, welches das Versenden von Kontrollnachrichten beträchtlich reduziert, da diese nur noch beim Überqueren der Schwellwerte seitens des Lastschätzers verschickt werden.

Der Beitrag ist wie folgt strukturiert: Abschnitt 2 führt Schätzfunktionen zur Charakterisierung von Momentanbelastungen auf Basis von Lastmessungen und unter Nutzung verschiedenartiger Gewichtsfunktionen ein und bewertet diese bezüglich ihrer Eignung zur effizienten Realisierung einer dynamischen, bedarfsorientierten Betriebsmittelverwaltung. Der dritte Abschnitt führt Schwellwertensysteme mit unterschiedlicher Reaktionsfähigkeit auf Lastschwankungen ein, um das Versenden von Kontrollnachrichten zu steuern, und bewertet diese detailliert. Abschnitt 4 schließt mit einem Überblick über die bisherigen Erkenntnisse.

2 Schätzfunktionen für Momentanbelastungen und ihre Bewertung

2.1 Ein Modell für die leihweise Bereitstellung von Übertragungsressourcen

Wir stellen nunmehr das grundsätzliche Procedere vor, das wir in der Folge für die Reservierung und Umverteilung von Betriebsmitteln zwischen den Stationen eines lokalen “Broadcast”-Netzes annehmen:

- Betriebsmittel-(BM-)Reservierung:

Wir setzen voraus:

- $n + 1$ Stationen S_0, S_1, \dots, S_n , die über ein lokales Netz mit gemeinsamem Übertragungsmedium miteinander kommunizieren können (z.B. WLAN, Ethernet, Token Ring [9]); nota bene: die durch uns entwickelten Algorithmen lassen sich indes auch direkt auf irreguläre Netztopologien übertragen;
- eine Last in den Stationen, die aus zeitkritischen und nicht-zeitkritischen (“best effort”) Datenübertragungsaufträgen besteht, vgl. Warteschlangen RT-Q (real-time queue) und nRT-Q (non real-time queue) in Abb. 1;
- in jeder Station existieren ≥ 1 Besitzer von Betriebsmitteln, wobei die reservierte Datenrate (“Bandbreite”) das in der Folge exemplarisch betrachtete Betriebsmittel darstelle;
- die für zeitkritische Übertragungen einer Station S benötigten Betriebsmittel werden stets vor Beginn eines neuen (Video-)Stroms mit Echtzeitanforderungen reserviert und stehen dem Besitzer bis zum Abbau der Verbindung zur Verfügung; die reservierte Bandbreite ist dabei so, dass die QoS-Anforderungen auch dann noch erfüllt werden können, wenn die Quelle mit der maximal zulässigen Senderate Daten generiert.

- Temporäre Betriebsmittelumverteilung:

Wir setzen voraus, dass ein Besitzer von BM (hier Station S) eine Teil der reservierten Bandbreite temporär an andere Stationen weiterreichen kann. Dazu führen wir zwei Typen von Kontrollnachrichten ein:

- FREE_BW($S, \Delta d$), mit der S eine Bandbreite (bzw. Datenrate) von Δd bit/s an andere Stationen weiterreicht, und
- RECALL_BW($S, \Delta d$), um Bandbreite im Umfang von Δd zurückzufordern.

Die Art der Aufteilung der freien verliehenen Bandbreite unter den Nachbarstationen ist nicht Gegenstand dieses Beitrags (in Abb. 1 ist eine elementare Lösung gewählt). Bei Empfang einer RECALL_BW Nachricht muss der Empfänger sofort die Nutzung der rückgeforderten Bandbreite einstellen.

- Ansatz zur Schätzung des Niveaus der Momentanbelastung (durch zeitkritische Übertragungsaufträge):

Wir setzen periodische Lastmessungen (mit vernachlässigbaren Messfehlern) voraus zu Zeitpunkten $t_i \equiv t_0 + i \cdot \Delta t$, wobei die gemessenen Stichprobenwerte ρ_i die gesamte im Intervall $T_i \equiv [t_{i-1}, t_i)$ seitens der Quelle generierte Last

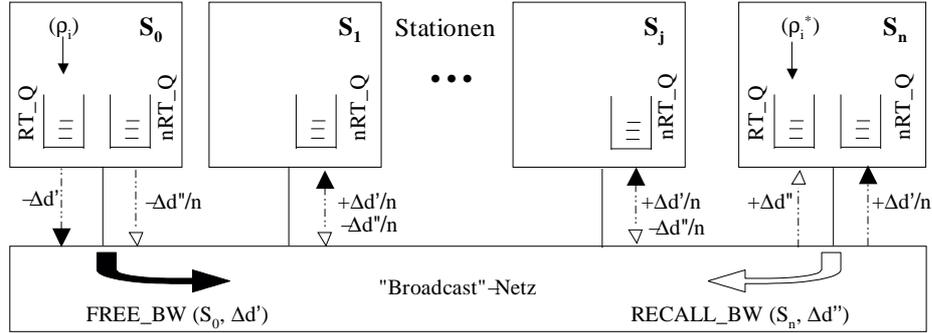


Abb. 1. Umverteilung von Bandbreite: Abgabe von $\Delta d'$ seitens Station S_0 und Rückforderung im Umfang von $\Delta d''$ seitens S_n

(nur zeitkritische Aufträge) charakterisiert. Offensichtlich ist $\rho_i = d_i / (r \cdot \Delta t)$, wobei d_i die Menge der während T_i generierten zeitkritischen Daten (in *bit*) bezeichnet und r die Datenrate (in *bit/s*), die beim Verbindungsaufbau reserviert und dem Besitzer fest zugewiesen wurde. Die Sequenz der Stichprobenwerte (ρ_i) wird zum Zeitpunkt t_i genutzt, um den Schätzer $\hat{\rho}(t_i)$ der Momentanbelastung zu berechnen. Somit ist $\hat{\rho}(t_i)$ eine Funktion von $\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_i$. Bei der Generierung der ρ_i handelt es sich um eine Sekundärlastmessung, im Sinne von [10], für eine Primärlast mit Echtzeitanforderungen.

Die generierte Echtzeitlast (z.B. durch Videoquelle) einer Station ist in ihrem Umfang dynamisch abzuschätzen, um die reservierte Übertragungskapazität dem tatsächlichen Bedarf anzupassen. Reservierte, aber ungenutzte Bandbreite führt zu Verschwendung und sollte daher vermieden werden. Andererseits droht bei zu geringer verfügbarer Datenrate die Verletzung von QoS-Anforderungen. So ist es wichtig einen Schätzer zu finden, der auf Lastschwankungen adäquat reagiert.

Der Schätzer sollte einerseits kleinere Lastschwankungen glätten, größere Schwankungen der Datenrate indes hinreichend schnell entdecken. Letzteres gilt besonders dann, wenn es darum geht, ausgeliehene Bandbreite bei erneuter Last-erhöhung so schnell zurückzufordern, dass keine Echtzeitbedingungen verletzt werden. Wir wollen nun derartige Schätzer einführen und bewerten.

2.2 Algorithmen zur Charakterisierung von Momentanbelastungen

Basierend auf den periodischen Lastmessungen ρ_i für die Beobachtungsintervalle T_i schlagen wir hier zwei grundsätzlich verschiedene Typen einfach parametrisierter Schätzer vor, wahlweise mit *geometrischer* oder *arithmetischer* Gewichtung.

Definition 1 (Geometrische Gewichtung)

$$\hat{\rho}(t_i) = \alpha \rho_i + (1 - \alpha) \cdot \hat{\rho}(t_{i-1}), \quad i \geq 1, \quad \alpha \in (0, 1], \quad \hat{\rho}(t_0) := \rho_0.$$

Der Faktor α deutet an wie schnell die Schätzfunktion auf deutlich veränderte Werte der Lastmessung reagiert (genauer untersucht in Abschnitt 2.4). Die geo-

metrische Gewichtung ist auch als *exponential weighted moving average* (EWMA) bekannt [8]. Als Abkürzung bezeichnen wir im Folgenden mit G_α die geometrische Gewichtung mit Parameter α .

Definition 2 (Arithmetische Gewichtung)

$$\hat{\rho}(t_i) = C_0 \cdot \sum_{j=0}^{w-1} \frac{w-j}{w} \rho_{i-j}, \quad i \geq 1,$$

wobei $w \in \{1, 2, \dots\}$ mit ρ_k zu initialisieren für alle $2-w \leq k \leq 0$ und C_0 bezeichne eine Normalisierungskonstante.

Diese Schätzfunktion ist gleichbedeutend mit einem Schiebefenster der Größe w und linear wachsendem Gewicht. Bei der arithmetischen Gewichtung wird jedem der w herangezogenen Messwerte das Gewicht $\frac{k}{w}$ zugeordnet, wobei k die Position innerhalb des Fensters ist und der jüngste Messwert die Position $k = w$ einnimmt. Der Faktor C_0 normalisiert die Summe der Gewichte auf 1 und beträgt somit $C_0 = \frac{2}{w+1}$. Für die arithmetische Gewichtung mit Fenstergröße w benutzen wir im Folgenden die Abkürzung A_w .

2.3 Bewertung der Schätzfunktionen für Momentanbelastungen

In der Folge wollen wir die Schätzfunktionen mit geometrischer und arithmetischer Gewichtung bewerten. Die angestrebten Ziele unserer Bewertung sind:

- Z1: Ein Beweis, dass der Schätzer jeweils der gesamten entstehenden Last genau einmal Rechnung trägt.
- Z2: Untersuchung wieviel Arbeitsrückstand (“backlog”) im ungünstigsten Fall entsteht, dadurch dass der Schätzer entstehende Last verspätet berücksichtigt.
- Z3: Untersuchung der zusätzlichen Verzögerungszeit, die aus der Abarbeitung des maximalen Arbeitsrückstandes entstehen kann.

ad Z1: Sei l_0 die im Intervall T_i entstehende Last

(a) Fall “*geometrische Gewichtung*”:

Im j -ten Intervall, $j \geq 1$, nach dem Auftreten von l_0 geht der Anteil $\alpha \cdot (1 - \alpha)^{j-1} \cdot l_0$ in den Lastschätzer ein. Demnach wird von l_0 langfristig

$$l_0 \cdot \alpha \cdot \sum_{j=0}^{\infty} (1 - \alpha)^j = l_0$$

berücksichtigt, d.h. die gesamte entstandene Last geht ein.

(b) Fall “*arithmetische Gewichtung*”:

Im j -ten Intervall, $1 \leq j \leq w$, nach dem Auftreten von l_0 geht $\frac{2}{w+1} \cdot \frac{w-(j-1)}{w} \cdot l_0$ in den Lastschätzer ein. Insgesamt wird von l_0 der Anteil

$$l_0 \cdot \frac{2}{w+1} \cdot \sum_{j=0}^{w-1} \frac{w-j}{w} = l_0$$

berücksichtigt, d.h. auch im Falle der arithmetischen Gewichtung wird die gesamte generierte Last langfristig exakt berücksichtigt.

ad Z2: Da wir $\rho_i \leq 1$ für alle Beobachtungsintervalle annehmen, liegt der Extremfall einer Lasterhöhung vor, falls $\rho_i = 1 \forall i \geq i'$ und $\rho_i = 0$ für $i < i'$. Wir ermitteln hierfür (mit $i' = 1$) den maximalen Arbeitsrückstand.

(a) Fall “*geometrische Gewichtung*”:

Für den Schätzer $\hat{\rho}(t_i)$ zum Zeitpunkt t_i ergibt sich für $\hat{\rho}(t_0) = 0$:

$$\begin{aligned} \hat{\rho}(t_i) &= \alpha\rho_i + \alpha(1-\alpha)\rho_{i-1} + \alpha(1-\alpha)^2\rho_{i-2} \\ &\quad + \dots + \alpha(1-\alpha)^{i-1}\rho_1 + \alpha(1-\alpha)^i\rho_0 = 1 - (1-\alpha)^i, \quad i \geq 1. \end{aligned}$$

Somit ergibt sich als BL (“backlog”), der im Intervall T_i durch Unterschätzung der entstandenen Last entsteht

$$BL(i) = \begin{cases} 1 - (1 - (1 - \alpha)^i) = (1 - \alpha)^i & \text{für } i \geq 1 \\ 0 & \text{für } i = 0. \end{cases}$$

Dies führt zu einer Gesamtsumme der seit t_0 unterschätzten Last direkt nach dem Intervall T_i , d.h. zu $t = t_i$:

$$BL_i = \sum_{j=1}^i BL(j) = \sum_{j=1}^i (1 - \alpha)^j = \frac{1 - \alpha - (1 - \alpha)^{i+1}}{\alpha}$$

Die unterschätzte Last ist damit nach oben beschränkt durch

$$BL_i \leq BL_\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1 - \alpha - (1 - \alpha)^{k+1}}{\alpha} = \frac{1 - \alpha}{\alpha} \quad \forall \alpha \in (0, 1], \quad \forall i$$

(b) Fall “*arithmetische Gewichtung*”:

Für den Schätzer $\hat{\rho}(t_i)$ zum Zeitpunkt t_i ergibt sich:

$$\hat{\rho}(t_i) = \begin{cases} 0 & \text{für } i \leq 0 \\ \frac{2}{w+1} \sum_{j=0}^{i-1} \frac{w-j}{w} = \frac{2wi+i-i^2}{(w+1)w} & \text{für } 1 \leq i \leq w \\ 1 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (1)$$

Dies impliziert einen BL durch Lastunterschätzung im Intervall T_i von

$$BL(i) = \begin{cases} 1 - \frac{2wi+i-i^2}{(w+1)w} & \text{für } 1 \leq i \leq w \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

und damit als Gesamtsumme der seit t_0 unterschätzten Last zu $t = t_i$:

$$BL_i = \sum_{j=1}^i BL(j) = \sum_{j=1}^i \left(1 - \frac{2wj + j - j^2}{(w+1)w}\right), \quad 1 \leq i \leq w, \quad (2)$$

sowie $BL_i = BL_w$ für $i > w$.

Für die unterschätzte Last stellt BL_w eine obere Schranke dar, d.h.

$$BL_i \leq BL_w = \sum_{j=1}^w \left(1 - \frac{2wj + j - j^2}{(w+1)w}\right) = \frac{w-1}{3} \quad \text{für alle } w \geq 1, \quad \forall i$$

- ad Z3:** Wir wollen nun die zusätzliche Verzögerungszeit $\tau_z(i)$ berechnen, die aus der Unterschätzung der angebotenen Last ungünstigstenfalls resultiert unter der Annahme, dass der akkumulierte BL im Intervall T_{i+1} mit der Rate $\hat{\rho}(t_i) \cdot r$ abgearbeitet wird. Diese Verzögerung besitzt drei Zeitanteile:
1. die maximale Wartezeit $\tau_w(i)$, die die Dateneinheiten des zum Zeitpunkt t_i vorhandenen BL bereits in der Sendewarteschlange verbracht haben:

$$\tau_w(i) = (BL_i \cdot \Delta t \cdot r) / r = BL_i \cdot \Delta t$$

2. die Bediendauer $\tau_b(i)$ für den gesamten BL ab Beginn einer Bedienung zum Zeitpunkt t_i :

$$\tau_b(i) = \frac{BL_i \cdot \Delta t \cdot r}{\hat{\rho}(t_i) \cdot r} = \frac{BL_i \cdot \Delta t}{\hat{\rho}(t_i)}$$

3. die Verzögerung τ_s durch die nur periodische Erfassung der dynamisch generierten Last mit Periodendauer Δt : $\tau_s = \Delta t$
- Zusammenfassend lässt sich $\tau_z(i)$ somit zu

$$\tau_z(i) = \tau_w(i) + \tau_b(i) + \tau_s = BL_i \cdot \Delta t + (BL_i \cdot \Delta t) / \hat{\rho}(t_i) + \Delta t$$

berechnen. Es ist offensichtlich, dass auch eine Definition von $\tau_z(i)$ ohne den Verzögerungsanteil τ_s vertretbar wäre, da τ_s im engeren Sinne nicht aus dem Verleihen von Übertragungskapazität resultiert.

Wenn wir nun $\varphi(i) \equiv BL_i + \frac{BL_i}{\hat{\rho}(t_i)}$ definieren, so ist $\tau_z(i) = \varphi(i) \cdot \Delta t + \Delta t$.

Wir suchen – bei Ermittlung der maximalen Zusatzverzögerung τ_{max} – den Wert $i = i_0$, der $\tau_z(i)$ maximiert. Da Δt konstant ist, ist dies gleichbedeutend mit der Suche des Maximums von $\varphi(i)$ und es ist $\tau_{max} = \tau_z(i_0)$.

- (a) Bestimmung von τ_{max} für den Fall einer *geometrischen Gewichtung*

$$\varphi(i) = \frac{(1 - \alpha) - (1 - \alpha)^{i+1}}{\alpha} + \frac{(1 - \alpha) - (1 - \alpha)^{i+1}}{\alpha \cdot (1 - (1 - \alpha)^i)} = \frac{1 - \alpha}{\alpha} (2 - (1 - \alpha)^i)$$

Dies führt für das gesuchte Maximum zu der Lösung $i_0 = \infty$ und zu

$$\tau_{max} = \tau_z(\infty) = \varphi(\infty) \cdot \Delta t + \Delta t = \Delta t \cdot (2/\alpha - 1). \quad (3)$$

Gleichung (3) ergibt für $\alpha = 1$ das a priori offensichtliche Resultat $\tau_{max} = \Delta t$. Grafisch ist τ_{max} im linken Diagramm von Abb. 2 illustriert.

- (b) Bestimmung von τ_{max} für den Fall einer *arithmetischen Gewichtung*
 Aus Komplexitätsgründen begnügen wir uns hier mit einer oberen Schranke für τ_{max} . Wir schätzen $\varphi(i)$ für $w \geq 3$ wie folgt ab:

$$\begin{aligned} \varphi(i) &\leq \max \left(BL_1 + \frac{BL_1}{\hat{\rho}(t_1)}, BL_2 + \frac{BL_2}{\hat{\rho}(t_2)}, \max_{i \geq 3} \left(BL_i + \frac{BL_i}{\hat{\rho}(t_i)} \right) \right) \\ &\leq \max \left(BL_1 + \frac{BL_1}{\hat{\rho}(t_1)}, BL_2 + \frac{BL_2}{\hat{\rho}(t_2)}, BL_w + \frac{BL_w}{\hat{\rho}(t_3)} \right). \end{aligned}$$

Als obere Schranke ergibt sich somit (vgl. Gleichungen (1) und (2)):

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= \varphi(i) \cdot \Delta t + \Delta t \\ &\leq \Delta t \cdot \max \left(\frac{w^2 + 4w - 1}{2(w+1)}, \frac{w^4 + 5w^3 - 10w^2 + 8w - 2}{(w^2 + w)(2w - 1)}, \frac{w^3 + 6w^2 + 5w - 12}{18w - 18} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

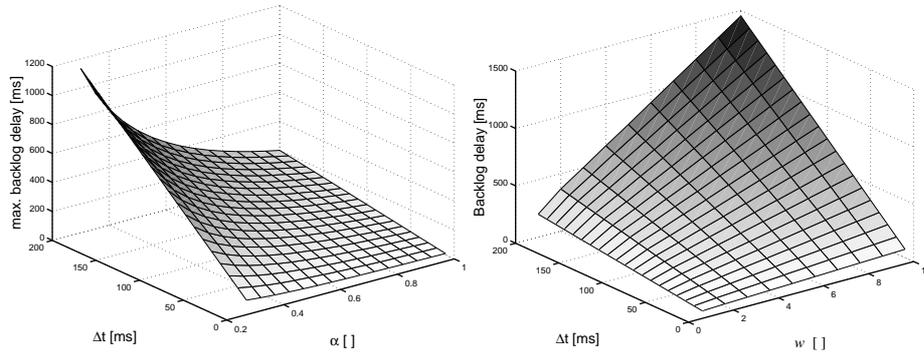


Abb. 2. Maximale Zusatzverzögerung τ_{max} bei geometrischer (links) bzw. arithmetischer Gewichtung in Abhängigkeit von den Parametern α bzw. w und Δt .

Für $w = 2$ beschränkt sich die Maximumbildung selbstverständlich auf die ersten beiden Terme und $w = 1$ führt wiederum zu dem trivialen Resultat $\tau_{max} = \Delta t$, vgl. auch Abb. 2.

2.4 Reaktionsfähigkeit der verschiedenen Schätzfunktionen auf Lastschwankungen

In der Folge untersuchen wir die Auswirkungen der Wahl des Schätzers und der Parametrisierung auf die Reaktionsfähigkeit bei Änderungen der Lastmessungen.

Entscheidend für die Auswahl der Schätzfunktion ist neben der maximalen zusätzlichen Verzögerung (vgl. Gl. (3) und (4)) aber auch deren qualitatives Verhalten. In Abbildung 3 wird hierzu beispielhaft das Reaktionsverhalten der beiden Schätzer mit je zwei unterschiedlichen Parametrisierungen illustriert. Dazu betrachten wir das Verhalten der Schätzer, wenn die Lastmessungen ρ_i einmalig der größtmöglichen Veränderung ausgesetzt sind (vgl. Abschnitt 2.3 - Z2).

Wir erkennen, dass die Funktionen A_{10} und $G_{0.3}$ schneller auf die Änderungen der Messung reagieren, als die Funktionen A_{20} und $G_{0.1}$ (Abk. in 2.2 eingeführt). Dies liegt daran, dass die geometrische Gewichtung mit α nahe bei 1 und die arithmetische Gewichtung mit kleinem w die aktuellen Messungen stärker gewichtet und die älteren Werte deswegen schneller "ausgeblendet" werden. Mit anderen Worten kann man sagen, dass A_{20} die Lastmessungen besser glättet, aber dafür weniger schnell reagiert. Desweiteren kann man erkennen, dass $G_{0.3}$ schneller auf die Änderung reagiert als A_{10} , aber trotzdem deutlich mehr Messwerte benötigt, um die Auslastung von exakt 100% hinreichend gut zu approximieren.

3 Schwellwertsysteme zur Steuerung der Betriebsmittelfreigabe

In diesem Abschnitt stellen wir stellvertretend drei verschiedene Schwellwertsysteme unterschiedlicher Granularität vor und schätzen die ungenutzte Übertragungskapazität im schlechtesten und einem mittleren Fall ab.

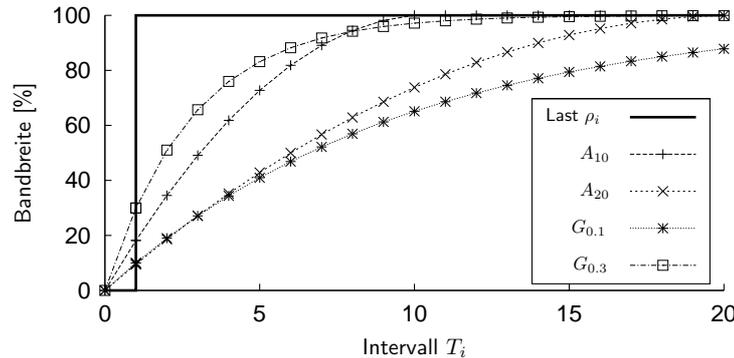


Abb. 3. Reaktionszeit des Schätzers im “worst case”

Schwellwertsysteme sollen bei der Steuerung von Betriebsmittelfreigabe bzw. -rückforderung unter Zuhilfenahme von Schätzern der Momentanbelastung folgende Eigenschaften erfüllen:

- Verhinderung von Oszillationen beim Versenden der Nachrichten zur Betriebsmittelfreigabe bzw. -rückforderung,
- rechtzeitige Zurückforderung von Bandbreite, bevor sie benötigt wird und
- Glättung der Schätzung der Momentanbelastung.

Insbesondere ist jeder “Besitzer” von Übertragungskapazität selbst für das evtl. Bereitstellen an andere Stationen zuständig, d.h. nach unserem Ansatz benutzt jede Station zur Steuerung der Betriebsmittelfreigabe/-reservierung ein individuelles Schwellwertsystem.

Wir repräsentieren Schwellwertsysteme je durch ein Zustandsmodell (Abb. 4). Dabei bezeichnen die Namen der Zustände, im Bereich von 0-100, den Anteil der vorab reservierten Kapazität in Prozent, der aktuell dem Besitzer zur Verfügung steht. Die Zustandsübergänge finden statt, wenn obere bzw. untere Schwellwerte für den Schätzer der Momentanbelastung über- bzw. unterschritten werden. In dem Drei-Zustands-Modell (linke Grafik in Abb. 4) findet also ein Übergang von Zustand 100 statt, genau dann wenn der Schätzer $\hat{\rho}(t_i)$ zum aktuellen Zeitpunkt t_i einen Wert ≤ 55 annimmt. Ist $20 < \hat{\rho}(t_i) \leq 55$, so findet ein Übergang in Zustand 70, ansonsten in Zustand 35 statt. Dies bedeutet hier, dass vom Zustand 100 ausgehend 30% der Bandbreite “verliehen” wird, sobald die Momentanbelastung vom Schätzer zwischen 20 und 55 Prozent eingestuft wird.

Um einfach strukturierte und gegen Oszillationen möglichst robuste Schwellwertsysteme zu erhalten, haben wir die Werte in den Modellen so gewählt, dass

- der Abstand zwischen oberem und unterem Schwellwert ≥ 10 beträgt,
- der Zustand sich immer $\geq 5\%$ über dem Wert des Schätzers befindet, und
- die Abstände zwischen den benachbarten Zuständen konstant sind (Ausnahme: Rundungen $33\frac{1}{3} \rightarrow 35$ und $66\frac{2}{3} \rightarrow 70$ im Drei-Zustandsmodell).

3.1 Obere Schranke der Überreservierung durch Schwellwerte im “worst case”

Die Übertragungskapazität, die im schlechtesten Fall durch den Einsatz der unterschiedlichen Schwellwertsysteme für andere Stationen ungenutzt bleibt, kann

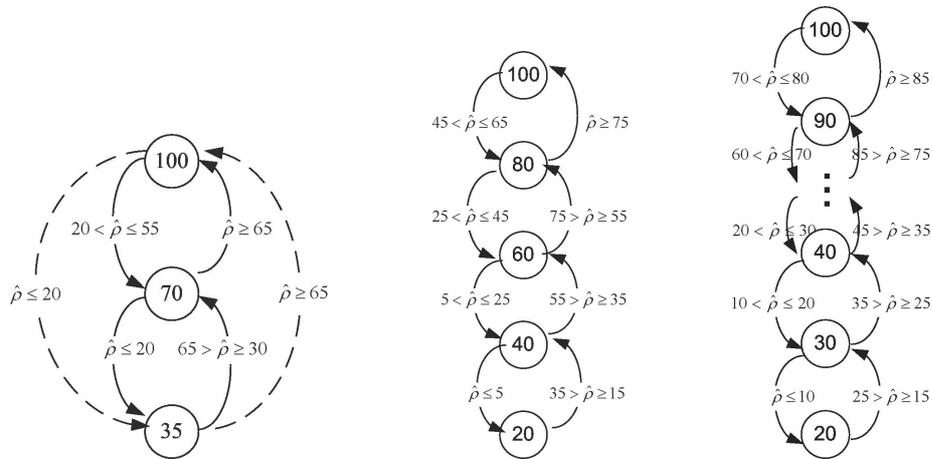


Abb. 4. Schwellwertmodelle mit drei, fünf und neun verschiedenen Zuständen – aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde bei den beiden rechten Modellen auf die vollständige Darstellung der Übergänge verzichtet.

einfach aus den Zustandsmodellen abgelesen werden (maximaler Abstand zwischen Schätzer $\hat{\rho}$ und korrespondierendem Zustand). Es ergeben sich für die vorgestellten Modelle mit drei, fünf, bzw. neun Zuständen die Werte 50%, 35%, bzw. 20%. *Nota bene:* Zur Ermittlung der ungenutzten Übertragungskapazität reicht es, den Schätzer $\hat{\rho}$ zu betrachten, da – wie in Abschnitt 2.3 (Z1) gezeigt – die gesamte entstehende Last genau einmal im Schätzer berücksichtigt wird.

Die Abschätzung im schlechtesten Fall scheint allerdings nur bedingt realistisch zu sein, z.B. für einen Strom mit konstanter Datenrate. Trotzdem kann hier abgelesen werden, dass sogar mithilfe eines Schwellwertsystems grober Granularität, wie z.B. des Fünf-Zustands-Modells aus Abb. 4, selbst im schlechtesten Fall noch 65% der Gesamtkapazität genutzt werden kann.

3.2 Abschätzung der Überreservierung durch Schwellwerte

Wir wollen nun die “mittlere” Überreservierung ermitteln, die durch die von uns vorgeschlagenen Schwellwertesysteme besteht. Dazu nehmen wir an – da wir keine weiteren Annahmen über die Charakteristik der Aufträge und deren zeitliche Abfolge treffen – dass die durch den Schätzer $\hat{\rho}(t_i)$ ermittelte Momentanbelastung im Intervall $[0, 1]$ gleichverteilt sei.

Wir illustrieren die Vorgehensweise zur Abschätzung an dem Drei-Zustands-Modell aus Abbildung 4. Zur Analyse bestimmen wir je die Überreservierung zu den einzelnen Bereichen möglicher Werte des Schätzers $\hat{\rho}(t_i)$. Diese kann wie folgt ermittelt werden: Im Fall $0 \leq \hat{\rho}(t_i) \leq 20$ (dargestellt in der ersten Zeile von Tabelle 1) befindet sich die Station in Zustand 35, hat also 65% der a-priori reservierten Kapazität “verliehen”. Als Überreservierung für diesen Bereich ergibt sich demnach im Mittel 25%.

In der nächsten Zeile der Tabelle ist der Bereich $20 < \hat{\rho}(t_i) \leq 30$ beschrieben. In diesem Fall kann der Zustand der Station nicht eindeutig vorhergesagt werden,

da dieser von dem vorausgehenden Zustand abhängt. Die Station könnte sich entweder in Zustand 35 oder in Zustand 70 befinden. Falls wir davon ausgehen, dass sich die Station ständig in Zustand 35 bzw. Zustand 70 befindet, so mittelt sich die ungenutzte (aber reservierte) Kapazität zu 10% bzw. 45%, ansonsten zu einem Wert dazwischen.

$\hat{\rho}(t_i)$ [%]	Zustand (reserviert [%])	überreserviert [%]
0-20	35	25
20-30	35 \vee 70	10-45
30-55	70	27.5
55-65	70 \vee 100	10-40
65-100	100	17.5

Tabelle 1: Zustände und Überreservierung einer Station für unterschiedliche Bereiche des Schätzers $\hat{\rho}(t_i)$.

Aus Tabelle 1 können wir nun zwei Werte σ_o bzw. σ_p ableiten, welche mit der optimistischen bzw. pessimistischen Annahme korrespondieren, dass sich die Station ständig (in Bezug auf die Überreservierung) im günstigen bzw. ungünstigen Zustand befindet. Die Annahme der Gleichverteilung von $\hat{\rho}(t_i)$ führt zu den Abschätzungen $\sigma_o = 20\%$ und $\sigma_p = 26.5\%$.

In Tabelle 2 sind abschließend die Abschätzungen angegeben, die sich für alle hier vorgestellten Modelle ergeben. Es ist die Abhängigkeit der, durch Überreservierung, ungenutzt bleibenden Kapazität von der Granularität der Modelle erkennbar. Insbesondere liegt aber die Überreservierung für alle Modelle – unter der hier vorgestellten Annahme – *deutlich* unter der Kapazität, die im statischen Fall im Mittel verschwendet wird (50%): Selbst mit dem einfachen Drei-Zustands-Modell aus Abb. 4 wird die verschwendete Bandbreite um 23.5% bis 30% der a priori reservierten Kapazität vermindert, bei dem vorgeschlagenen Neun-Zustands-Modell sogar um 36% bis 40%.

	optimistisch [%]	pessimistisch [%]
3-Zustands-Modell	20	26.5
5-Zustands-Modell	14	22
9-Zustands-Modell	10	14

Tabelle 2: Abschätzung der Überreservierung der vorgestellten Schwellwertsysteme

4 Resümee und Ausblick

Wie wir in diesem Beitrag durch analytische Bewertungen zeigen konnten, ist die vorgeschlagene Methode zum dynamischen Weiterreichen temporär unbenötigter Übertragungsressourcen – bei geeigneter Auswahl und Parametrisierung von Lastabschätzungs- und Bandbreitenweitergabealgorithmen – durch eine Reihe von Vorteilen gekennzeichnet, wie

- eine gegenüber nicht-lastadaptiven Verfahren deutlich bessere Auslastung des Betriebsmittels “Bandbreite” (des gemeinsam genutzten “Broadcast”-Netzes) bei gleichzeitiger Gewährleistung von Echtzeitschranken für die maximale Übertragungsverzögerung;

- dem Vermeiden von Oszillationen beim Versenden der Freigabe- bzw. Rückforderungsnachrichten für Betriebsmittel (bei Einsatz der glättenden Lastschätzer in Kombination mit Schwellwertsystemen für die dynamische Bandbreitenvergabe);
- eine dem Netzbenutzer ermöglichte gezielte Prioritätensetzung zwischen hoher Netzauslastung einerseits oder aber der Einhaltung niedriger Echtzeit-Verzögerungsschranken.

Eine relativ geringfügige Überreservierung (z.B. 5%) auch in Zeiten niedriger geschätzter Momentanbelastung kann den maximalen Arbeitsrückstand einer Station durch verspätete Rückforderung verliehener Bandbreite – auch in ungünstigsten Fällen – für eine garantierte Echtzeitfähigkeit hinreichend gering halten.

Die bisherigen analytischen Bewertungen sind indes noch auf das Verhalten der Endsysteme fokussiert und werden deshalb in weiteren Forschungsarbeiten gegenwärtig durch Simulationsexperimente komplettiert, die auch das Verhalten des Kommunikationsnetzes im Detail reflektieren (u.a. durch Berücksichtigung der evtl. erhöhten Übertragungsverzögerungen bei sehr großen Mengen auszutauschender Kontrollinformationen). Durch geeignete Simulationsexperimente lässt sich auch die interessante Frage der Reaktionsgeschwindigkeit in Echtzeitanwendungen beantworten. Wenn auch diese simulativen Studien die bislang gewonnenen Erkenntnisse bestätigen, so wird sich durch unseren neuen Ansatz zur dynamischen Betriebsmittelweitergabe in “Broadcast”-Netzen die mittlere Netzauslastung bei vertretbarem Zusatzaufwand (Momentanlastbeobachtung, Versenden von Kontroll-Nachrichten) trotz zu erfüllender Echtzeitanforderungen signifikant erhöhen lassen.

Literatur

- [1] Pascal Anelli and Gwendal Le Grand. Differentiated Services over Shared Media. In *IWQoS*, pages 288–293, Karlsruhe, Germany, 2001.
- [2] Manuel Bouyer and Eric Horlait. Bandwidth Management and Reservation over Shared Media. In *SFBSID'97*, Fortaleza, Brasil, November 1997.
- [3] D. Chalmers and M. Sloman. A Survey of Quality of Service in Mobile Computing Environments. 2(2), 1999.
- [4] H. Jonathan Chao and Xiaolei Guo. *Quality of Service Control in High-Speed Networks*. J. Wiley, 2002.
- [5] David D. Clark and Wenjia Fang. Explicit Allocation of Best-Effort Packet Delivery Service. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1998.
- [6] Gwendal Le Grand. *Qualité de service dans des environnements Internet mobile*. PhD thesis, Université P. et M. Curie, LIP 6, Paris, July 2001.
- [7] L. Massoulié and J. Roberts. Bandwidth Sharing: Objectives and Algorithms. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 10(3):320–328, 2002.
- [8] Erwin P. Rathgeb. Modelling and Performance Comparison of Policing Mechanisms for ATM Networks. *IEEE Selected Areas In Commun.*, 9(3):325–334, 1991.
- [9] Andrew S. Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice-Hall, 3rd edition, 1996.
- [10] Bernd E. Wolfinger, Martin Zaddach, Klaus Dieter Heidtmann, and Guangwei Bai. Analytical Modeling of Primary and Secondary Load as Induced by Video Applications using UDP/IP. *Computer Commun.*, 25(11/12):1094–1102, 2002.