

# Staukontrolle durch Active Queue Management

Thomas Fischer, Dominik Billing

*Masterseminar Kommunikationssysteme*

*Lehr- und Forschungseinheit für Kommunikationssysteme und Systemprogrammierung*

*Ludwig-Maximilians-Universität München*

**Zusammenfassung**—Dieser Artikel beschreibt die Problematik im Internet, die durch den Einsatz von konventioneller Staukontrolle in Routern und die Struktur des Internets hervorgerufen wird. Die Problematik konventioneller Staukontrolle liegt darin, dass Pakete wahllos fallen gelassen werden und es auf diese Art zu großem Overhead kommt, der durch Flaschenhälse im Internet noch verstärkt wird.

Wir werden als Lösung für das Problem der Staukontrolle im Internet Active Queue Management herausarbeiten. Hierbei werden Pakete nicht wahllos fallen gelassen, sondern im Gegensatz alle Flüsse gleich behandelt und nachfolgende Router mittels markierter Pakete darüber informiert, dass es zu Staus kommen kann. Active Queue Management ist der Überbegriff von Methoden, um die mittlere Pufferauslastung der Router möglichst gering zu halten. Anschließend werden wir die Active Queue Management Methoden RED, BLUE, PI und ECN vorstellen und miteinander vergleichen.

## I. EINFÜHRUNG UND MOTIVATION

Nach Floyd [1] sind Ende-zu-Ende (E2E) Staukontrollmechanismen von TCP mittlerweile ein kritischer Faktor in der Robustheit des Internets. Das Internet wächst unaufhaltsam weiter, es gibt keine eng verknüpfte Netzgemeinschaft mehr und nicht jeder Endknoten verwendet die E2E Staukontrolle für bestmöglichen Datenfluss. Entwickler kümmern sich nicht länger darum, E2E Staukontrolle in ihre Internet-Anwendungen zu integrieren. Die Konsequenz davon ist, dass das Netzwerk selbst seine Ressourcennutzung kontrolliert.

Graffi [2] beschreibt, dass Bandbreite aktuell die knappste Ressource in Netzwerken ist. Die eingehenden und ausgehenden Bandbreiten normaler ADSL Verbindungen sind unterschiedlich. Typischerweise ist die ausgehende Bandbreite deutlich kleiner als die eingehende. Das bedeutet, dass nicht alle eingehenden Daten verarbeitet und weitergesandt werden können. Staus sind also Probleme, die hier auftreten können, wenn keine angemessenen Mechanismen angewendet werden. Das TCP-Protokoll sieht vor, Pakete nach dem "First in First out"-Prinzip fallenzulassen, wenn die Puffer voll laufen.

Die Problemstellung hier ist es also Mechanismen zu finden, Staus in E2E Verbindungen zu kontrollieren. Nach Le [3] soll die durchschnittliche Pufferauslastung klein gehalten werden, damit E2E-Staukontrolle ermöglicht wird. Die Herausforderung besteht darin, dass an den Flaschenhälsen der potenzielle Stau erkannt wird und das komplette Netzwerk darauf reagiert, indem beispielsweise die Sendegeschwindigkeit des Ursprungs eines Datenstroms drastisch reduziert wird [2].

Das folgende Kapitel (Kapitel II) beschreibt die generellen Konzepte der Staukontrolle in Netzen und präsentiert Active Queue Management als Lösungsansatz für das Problem. In Kapitel III wird Active Queue Management definiert und einige

Anwendungsfälle davon präsentiert. Die Active Queue Management Algorithmen RED, BLUE, ECN und PI werden in Kapitel IV vorgestellt und in Kapitel V miteinander verglichen. Ein Ausblick zu zukünftigen Entwicklungen und Forschungen sowie andere Ansätze zur Staukontrolle zusammen mit den zusammengefassten Ergebnissen erfolgt in Kapitel VI.

## II. STAUKONTROLLE IN NETZEN

Neben [1] wird auch von Morris [4] postuliert, dass die Effektivität von TCP mit zunehmender Anzahl an konkurrierenden Datenströme nachlässt. Dieser Effekt beginnt sich zu zeigen, sobald mehr Datenströme als Pakete die vorhandene Bandbreite verwenden. Diese Probleme sind auch im Internet spürbar und es zeigt sich, dass das Internet einen gravierenden Performanceverlust dadurch erfährt. Die einfachste Lösung für diese Probleme wäre die radikale Vergrößerung von Routerpuffern zusammen mit einer Begrenzung der Anzahl der Pakete jedes einzelnen Datenstroms individuell. Da dies aber nicht ausführbar ist, müssen Staukontrollalgorithmen implementiert werden, mit den folgenden Hauptzielen. Es soll eine hohe Ausnutzung von Flaschenhälsen wie Routern erreicht werden. Der Überlauf von Flaschenhälsen und damit eine zeitliche Verzögerung durch Staus sowie ein hoher Paketverlust soll verhindert werden. Zusätzlich soll die zur Verfügung stehende Bandbreite gleichmäßig zwischen konkurrierenden Datenströmen aufgeteilt werden [4]. Um diese gleichmäßige Verteilung zu erreichen, ist TCP standardmäßig mit dem „First Come First Serve“-Prinzip nicht geeignet. Deshalb müssen hierfür andere Methoden entwickelt werden, die den Puffer in Routern anders abarbeiten und dennoch einfach zu verwenden sind [5].

Die Internet Protokoll Architektur basiert auf einem verbindungslosen E2E Paketdienst, der das IP Protokoll benutzt. Die vielen Vorteile dieses verbindungslosen Designs, der Flexibilität und Robustheit wurden schon oft beschrieben. Allerdings kommen diese Vorteile zu einem Preis. Sorgfältiges Design ist benötigt, um einen guten Dienst zu leisten bei hoher Last. Fehlende Aufmerksamkeit bei den Dynamiken des Paketweiterleitens kann in ernsthafter Dienstdegradation enden oder „Internet Zusammenbruch“ [6]. Dieses Phänomen wurde während der ersten Wachstumsphase des Internets in den 1980er Jahren festgestellt und wird „congestion collapse“ [7] genannt. Bereits 1986 wurden von Jacobson entwickelte Stauverhinderungsmechanismen für Hosts entwickelt, die auch aktuell einen „congestion collapse“ verhindern [6].

Da das Internet seit dieser Zeit immer weiter wächst, wurde es offensichtlich, dass TCP Stauverhinderungsmechanismen

[8], die absolut wichtig, nötig und mächtig sind, nicht unter allen Umständen ausreichend gute Dienste leisten. Das Hauptproblem liegt darin, dass von den Enden der Netzwerke nur bedingt Kontrolle ausgeübt werden kann. Deshalb müssen auch in Routern Mechanismen angewendet werden, die die Stauverhinderungsmechanismen der Endpunkte ergänzen. Hierbei muss man zwischen den beiden Klassen „Queue Management“ und „Scheduling“ von Router Algorithmen unterscheiden. Queue management Algorithmen verwalten die Länge von Paket-Puffern durch Fallenlassen von Paketen wenn nötig oder angemessen. Scheduling Algorithmen legen fest, welche Pakete als nächstes gesendet werden sollen und können primär dafür genutzt werden, die Zuweisung von Bandbreite zwischen den Datenströmen zu verwalten [6].

Nach Jain [9] gibt es zwei Gründe, warum das Problem der Staukontrolle in Netzwerken sehr schwierig ist. Erstens gibt es Voraussetzungen für Staukontroll Schemas, die es schwierig machen eine zufriedenstellende Lösung zu finden. Zweitens gibt es unzählige Netzwerkregeln, die das Design eines Stauschemas beeinflussen. Das sind die Gründe, warum ein Schema, das für ein Netzwerk entwickelt wurde, in einem anderen Netzwerk nicht funktioniert. Grundbedingung für Schemas zur Staukontrolle sind: Das Schema muss einen kleinen Overhead haben, alle Datenströme gleichbehandeln, schnell auf andere Situationen reagieren können, in schlechten Umgebungen funktionsfähig sein und für alle Benutzer optimal sein.

Um E2E-Staukontrolle in Routern zu betreiben, muss nicht nur jeder einzelne Router auf sich allein gestellt seinen Puffer überwachen, sondern auch an die nächsten Router Informationen weiterleiten. Für diese Benachrichtigung könnten zwei reservierte Bits im TCP/IP-Header genutzt werden [2]. Mittels „Explicit Congestion Notification“ (ECN) sollen Pakete mit der Staubenachrichtigung weiterversandt werden im Gegensatz zum einfachen Fallenlassen der Pakete. Auf diese Art und Weise werden vorangehende Router darüber informiert, dass es zu einem Stau gekommen ist und möglicherweise einzelne Pakete doppelt versandt werden müssen oder die Geschwindigkeit gedrosselt werden sollte. Prinzipiell ist es in Netzwerken, in denen es die Hauptaufgabe von Routern ist, Pakete an den Output-Port weiterzuleiten, kein Problem Pakete einfach fallen zulassen. Dies ist allerdings im Internet heute nicht mehr der Fall, da E2E-Verbindungen über sehr viele Router gehen können. ECN ist ein zuverlässiger Mechanismus, beinhaltet allerdings keine Methoden zur Erkennung von Staus [10]. Da es nicht vorhersehbar ist, wie hoch der Datenverkehr zukünftig sein wird, besteht das wirkliche Problem also darin, Staus frühzeitig und zuverlässig zu erkennen [11].

Router sollten den Ursprüngen eines Datenstrom signalisieren, dass die Sendegeschwindigkeit reduziert werden muss, um Staus zu vermeiden. Zusätzlich kann so eine gleichmäßige Verteilung der Bandbreite erfolgen, wenn besonders gierige Datenströme vorhanden sind. „Active Queue Management“ (AQM) hat das Ziel Staus in Netzwerken rechtzeitig zu entdecken, bevor die Routerpuffer volllaufen. Es gibt im Prinzip zwei Möglichkeiten andere Router darüber zu informieren, dass ein Stau bevorsteht: Pakete können fallengelassen oder markiert werden. Die erste Strategie erfordert,

dass die Endpunkte kooperieren und erzeugt einen Overhead, weil Pakete anschließend erneut gesendet werden müssen. Endpunkte müssen auf markierte Pakete reagieren, als wären sie fallengelassen worden, allerdings wird hier kein weiterer Overhead erzeugt, da die Pakete nicht erneut gesendet werden müssen. AQM-Algorithmen können zusätzlich die Bandbreite von besonders gierigen Datenströmen reduzieren, indem deren Pakete häufiger fallengelassen werden [2].

### III. DEFINITION UND ANWENDUNG VON ACTIVE QUEUE MANAGEMENT

- Wirklich gute Quelle hierfür ist [6] Kapitel 2 *wirklich sehr gute Quelle*
- Effizientes Active Queue Management in Internet Routern [12]
- Dimensionierung von Router Puffern [13]
- Stochastische Modellierung und die Theorie von Queues [14]
- Analyse und Simulation eines gleichbehandelnden Queue Algorithmus [15]

### IV. DIE GÄNGIGSTEN ACTIVE QUEUE MANAGEMENT ALGORITHMEN

- RED (Random Early Detection) [16] [17]
- Adaptive RED[18]
- BLUE [19]
- ECN [20]
- PI Controller [21]

### V. VERGLEICH DER VORGESTELLTEN ALGORITHMEN

- Vergleich RED, ARED, PI [3]
- Vergleich RED, PI [22]
- Vergleich RED, BLUE, ARED, ECN, PI [2]

### VI. AUSBLICK UND ANDERE ANSÄTZE

- Ein wirklich optimaler Algorithmus muss noch gefunden werden [2]
- Statt Staukontrolle andere Wege suchen (CHOCe) [23]

### LITERATUR

- [1] S. Floyd und K. Fall, "Router mechanisms to support end-to-end congestion control," Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley CA, Tech. Rep., 1997.
- [2] K. Graffi, K. Pussep, N. Liebau, und R. Steinmetz, "Taxonomy of active queue management strategies in context of peer-to-peer scenarios," Technische Universität Darmstadt, Tech. Rep., 2007.
- [3] L. Le, J. Aikat, K. Jeffay, und F. Smith, "The effects of active queue management on web performance," in *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, Ser. SIGCOMM '03. ACM, 2003.
- [4] R. Morris, "Tcp behavior with many flows," in *Proceedings of the 1997 International Conference on Network Protocols (ICNP '97)*, Ser. ICNP '97. IEEE Computer Society, 1997.
- [5] B. Suter, T. Lakshman, D. Stiliadis, und A. Choudhury, "Design considerations for supporting tcp with per-flow queueing," in *INFOCOM '98. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 1, Mär. 1998, pp. 299–306vol.1.

- [6] B. Braden, D. Clark, J. Crowcroft, B. Davie, S. Deering, D. Estrin, S. Floyd, V. Jacobson, G. Minshall, C. Partridge, L. Peterson, K. Ramakrishnan, S. Shenker, J. Wroclawski, und L. Zhang, "Recommendations on queue management and congestion avoidance in the internet," United States, 1998.
- [7] J. Nagle, "Congestion control in ip/tcp internetworks," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 14, Nr. 4, pp. 11–17, Okt. 1984. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1024908.1024910>
- [8] W. Stevens, "Tcp slow start, congestion avoidance, fast retransmit, and fast recovery algorithms," United States, 1997.
- [9] R. Jain, "Congestion control in computer networks: issues and trends," *Network, IEEE*, vol. 4, Nr. 3, pp. 24–30, Mai 1990.
- [10] S. Floyd, "Tcp and explicit congestion notification," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 24, Nr. 5, pp. 8–23, Okt. 1994.
- [11] R. Jain, "Congestion control and traffic management in atm networks: Recent advances and a survey," *Comput. Netw. ISDN Syst.*, vol. 28, Nr. 13, pp. 1723–1738, Okt. 1996. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/0169-7552\(96\)00012-8](http://dx.doi.org/10.1016/0169-7552(96)00012-8)
- [12] B. Suter, T. Lakshman, D. Stiliadis, und A. Choudhury, "Efficient active queue management for internet routers," in *Proceedings of INTEROP, Engineering Conference*, 1998.
- [13] G. Appenzeller, I. Keslassy, und N. McKeown, "Sizing router buffers," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 34, Nr. 4, pp. 281–292, Aug. 2004.
- [14] R. Wolff, *Stochastic modeling and the theory of queues*. Prentice Hall, 1998.
- [15] A. Demers, S. Keshav, und S. Shenker, "Analysis and simulation of a fair queueing algorithm," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 19, Nr. 4, pp. 1–12, Aug. 1989.
- [16] S. Floyd und V. Jacobson, "Random early detection gateways for congestion avoidance," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 1, Nr. 4, pp. 397–413, Aug. 1993.
- [17] V. Firoiu und M. Borden, "A study of active queue management for congestion control," in *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 3, Mär. 2000, pp. 1435–1444vol.3.
- [18] S. Floyd, R. Gummadi, und S. Shenker, "Adaptive red: An algorithm for increasing the robustness of red's active queue management," AT&T Center for Internet Research at ICSI, Tech. Rep., 2001.
- [19] W. Feng, K. Shin, D. Kandlur, und D. Saha, "The blue active queue management algorithms," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 10, Nr. 4, pp. 513–528, Aug. 2002.
- [20] K. Ramakrishnan, S. Floyd, und D. Black, "The addition of explicit congestion notification (ecn) to ip," United States, 2001.
- [21] C. Holot, V. Misra, D. Towsley, und W.-B. Gong, "On designing improved controllers for aqm routers supporting tcp flows," in *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 3, 2001, pp. 1726–1734vol.3.
- [22] S. Kunniyur und R. Srikant, "Analysis and design of an adaptive virtual queue (avq) algorithm for active queue management," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 31, Nr. 4, pp. 123–134, Aug. 2001.
- [23] R. Pan, B. Prabhakar, und K. Psounis, "Choke - a stateless active queue management scheme for approximating fair bandwidth allocation," in *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 2, 2000, pp. 942–951vol.2.
- [24] S. Athuraliya, S. Low, V. Li, und Q. Yin, "Rem: active queue management," *Network, IEEE*, vol. 15, Nr. 3, pp. 48–53, Mai 2001.