

Netzwerkstaukontrolle und die Arbeitsweise verschiedener Algorithmen in TCP

von

Michał Roziel

Matrikelnummer : 5012845

Ein wissenschaftlicher Bericht im Rahmen der Vorlesung
„Wissenschaftliches Arbeiten“
an der htw saar im Studiengang Informatik

Saarbrücken, den 29. August 2025

Abstract

Dieser Bericht zielt darauf ab, aktuell benutzte Algorithmen der Netzwerkstaukontrolle in Computernetzwerken zu vergleichen.

Die Algorithmen der Staukontrolle, welche in diesen Vergleich einfließen sind : TCP BBR, TCP NewReno, TCP Cubic, und TCP Vegas.

Mittels des Open-Source Netzwerksimulators *NS-3* [1] wird ein virtuelles Netzwerk mit einer 10Mbit/s Engstelle zwischen zwei Endpunkten aufgestellt. In diesem Netzwerk wird zunächst ein künstlicher Datenverkehr erzeugt. Der genannte Datenverkehr wird anschließend aufgezeichnet und das dabei entstehende *Congestion Window*(CW) dient als Basis für den Vergleich. Die unterschiedlichen CW's werden schließlich analysiert und in Bezug auf das gegebene Szenario evaluiert. Dieser Bericht bietet dem Leser einen Überblick über einige CC-Algorithmen und ein grundlegendes Verständnis darüber, wie Computernetzwerke auf Datenstau und Paketverlust reagieren.

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Insbesondere habe ich alle KI-basierten Werkzeuge angegeben, die ich bei der Erstellung, Übersetzung oder Überarbeitung des Textes verwendet habe.

Ich erkläre hiermit weiterhin, dass die vorgelegte Arbeit zuvor weder von mir noch von einer anderen Person an dieser oder einer anderen Hochschule eingereicht wurde.

Darüber hinaus ist mir bekannt, dass die Unrichtigkeit dieser Erklärung eine Benotung der Arbeit mit der Note „nicht ausreichend“ zur Folge hat und einen Ausschluss von der Erbringung weiterer Prüfungsleistungen zur Folge haben kann.

Saarbrücken, den 29. August 2025

Unterschrift Michał Roziel

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Grundlagen und Begriffe	1
1.1.1. Transmission Control Protocol	1
1.2. Algorithmen der Staukontrolle	2
1.2.1. TCP BBR	2
1.2.2. TCP NewReno	3
1.2.3. TCP Cubic	3
1.2.4. TCP Vegas	3
1.2.5. Merkmale der CC Algorithmen auf einen Blick	4
1.3. Definitionen	4
1.3.1. Queuing Delay	4
1.3.2. Congestion Window	4
1.3.3. Round-Trip Time	4
2. Versuchsaufbau	5
2.1. Analyse der Ergebnisse	6
3. Ergebnisse und Diskussion	6
4. Fazit und Schlussfolgerungen	6
4.1. Offene Fragen	6
4.2. Diskussion	6
Literaturverzeichnis	7
Anhang	8
A. Zusätzliche Abbildungen	8
B. GnuPlot Skript zur Erstellung der CWND Graphen	8
C. Nicht erfüllte Vorgaben	9
C.1. Formel von Bayes	9
C.2. Beweis der Formel von Bayes	9
D. Datenmaterial	9
E. Web-Standards	9

1. Einleitung

Network congestion control (**CC**) ist ein essentieller Bestandteil der meisten modernen Computernetzwerke. Wenn eine Netzwerkschnittstelle zu einem Zeitpunkt versucht eine zu große Menge an Datenpaketen aufzunehmen, kommt es zu Stau von Datenverkehr und zu einem potentiellen Verlust von Datenpaketen. Aufgrund diesem Vorkommen werden Algorithmen innerhalb von Netzwerkprotokollen verwendet, diese erkennen den Anstau von Datenverkehr im Netzwerk, und helfen den Fluss von Datenpaketen zu steuern. Neben dem effizienten Durchfluss von Informationen ist zeitgleich auch die Fairness, was die Verteilung von Ressourcen einer Netzwerkschnittstelle an ihre Hosts angeht, wichtig. Auch dies wird von CC-Algorithmen gewährleistet. In dem heutigen Stand von Rechnernetzen werden verschiedene Protokolle zur Netzwerkstaukontrolle verwendet, Ich werde mich im Rahmen dieses Berichts allerdings auf das Transmission Control Protocoll beschränken, da dies das am meisten verbreitete ist.

Mit stets weiterentwickelten Rechnernetzen, und einem jährlich zunehmenden Datenverkehr, wie auch in der Deutschen Internetschnittstelle *DE-CIX* [2] in Frankfurt gewinnen diese Algorithmen an Bedeutung.

1.1. Grundlagen und Begriffe

Um die Funktionsweise und den Unterschied zwischen den hier behandelten CC-Algorithmen verstehen zu können, muss der Leser erst ein Grundverständnis über die Kommunikation innerhalb von Computernetzwerken haben. Grundsätzlich wird heutzutage eins von zwei am verbreitesten Protokollen verwendet, entweder TCP oder UDP.

1.1.1. Transmission Control Protocoll

Das Transmission Control Protocoll (**TCP**) ist ein weit verbreitetes Netzwerkprotokoll. TCP lässt sich in zu der Schicht 4 (Transportschicht) in dem OSI-Modell einordnen, hierbei liegt es zwischen der Vermittlungs- und Kommunikationsschicht. TCP wurde 1981 unter RFC 793 erstmals standardisiert. [3]

Die Aufgabes des TCP Protokolls ist es, zwischen zwei Hosts eine Verbindung aufzubauen, welche anschließend dazu genutzt wird, Nachrichten in zu verschicken und zu empfangen.

“transport-layer protocol [...] from an application’s perspective, it is as if the hosts running the processes were directly connected;” [4, 241].

Dies Bedeutet, dass TCP ebenfalls eine gewisses Abstraktionsniveau des Nachrichtenaustausches abnimmt.

Ein klares Unterscheidungsmerkmal des TCP von dem ebenfalls bekannten User Datagramm Protocoll (UDP) ist, dass TCP verbindungsorientiert arbeitet, während UDP als verbindungslos gilt. Zudem werden bei TCP Daten in Form von Packets

verschickt, während man bei UDP von Datagrammen spricht.

Bei TCP wird zu Beginn ein *Three-Way Handshake* wie folgt durchgeführt :

Der Sender schickt zunächst eine Nachricht mit einem Verbindungswunsch an den Empfänger und setzt das Flag *Synchronize*, **SYN**.

Der Empfänger antwortet mit einer Bestätigung die erste Nachricht erhalten zu haben, und schickt ebenfalls einen Verbindungswunsch. Es werden die Flags **SYN-ACK** (Synchronise-Acknowledge) gesetzt.

Als letztes schickt der Sender eine Bestätigung, dass die Nachricht des Empfängers angekommen ist, dies geschieht wieder mit dem Flag **ACK**. Nun ist die Verbindung bereit, Daten in beide Richtungen zu übertragen. Nach jedem gesendeten Datenpaket folgt eine **ACK** Bestätigung.

Die Abbildung 2 im Anhang visualisiert den Three-Way Handshake.

1.2. Algorithmen der Staukontrolle

Algorithmen der Staukontrolle kommen zum Einsatz, wenn in einem Netzwerk ein potentieller Datenstau erkannt wird. Grundsätzlich starten die Algorithmen in dem Arbeitsmodus *slow start*. Falls Datenstau erkannt wird, treten diese Algorithmen in die Phase *congestion avoidance*.

Hiermit wird mit verschiedenen Vorgehensweisen gegen die Netzwerküberlastung gesteuert.

Es existieren unterschiedliche Typen von CC-Algorithmen, die jeweils ihre eigenen Vor- und Nachteile haben. In diesem Bericht wird jeweils ein Algorithmus pro Typ behandelt.

1.2.1. TCP BBR

Der *Bottleneck Bandwidth and Round-Trip Time* (**BBR**) Algorithmus wurde erstmals in dem von der *Association for Computing Machinery* (**ACM**) veröffentlichten Magazin ACM vorgestellt. [5]

Seit 2016 wurden 3 Versionen entwickelt. Diese werden jeweils mit *BBRv_x* gekennzeichnet, wobei *x* die entsprechende Version beschreibt. BBR ist ein modellbasiertes Staukontrollverfahren, dessen Arbeitsweise in 4 Phasen unterteilt werden kann :

1. *STARTUP*(Startphase)
2. *DRAIN*(Abbau des Staus)
3. *ProbeBW*(Messen der Bandbreite)
4. *ProbeRTT*(Messen der Round-Trip-time)

Während andere CC-Algorithmen wie etwa NewReno oder CUBIC auf Paketverlust reagieren, misst BBR die vorliegende Engpassbreite sowie RTT, und bestimmt daraus die Sende-Rate, welche anschließend in dem Netzwerk eingesetzt wird. Da BBR nicht direkt auf Paketverlust reagiert, kommt es mit gut mit zufälligen Paketverlust

zurecht, hat aber zeitgleich Schwierigkeiten mit der Fairness was die Verteilung von Ressourcen angeht :

“Unfairness happens [...], which relates to different settings of round-trip times and buffer sizes. Essentially, the reason for the unstable or unequal unfairness is the absence of responding mechanisms for bandwidth convergence.” [6]

Die Fairness kann hierbei mit dem zwischen 0 und 1 liegenden Jain’s Fairness (**JFI**) Index gemessen werden. [7]

1.2.2. TCP NewReno

Der TCP **NewReno** Algorithmus wurde erstmal 1999 mit dem RFC 2582 eingeführt. [8] NewReno ist ein *Loss-Based* Algorithmus, das bedeutet der Arbeitsmodus *congestion avoidance* tritt ein, falls ein Paketverlust erkannt wird. Das Wachstum des `cwnd` (vgl.1.3.2) ist hierbei linear gegenüber der Anzahl der Pakete.

1.2.3. TCP Cubic

Cubic ist ebenfalls ein *Loss-Based* Algorithmus.

Die Wachstumsfunktion, welche anschließend die neue Größe des *Congestion Window* beschreibt, wird definiert als : $W(t) = C(t - K)^3 + W_{max}$. Hierbei ist W die Größe des Congestion Windows, C eine Cubic-Konstante, t die Zeit seit dem letzten Paketverlust, und K die Zeit, welche *TCP Cubic* benötigt um wieder W_{max} zu erreichen.

Mit der Sensitivität auf Paketverlust β kann K wie folgt berechnet werden [9] :

$$K = \sqrt[3]{\frac{W_{max} \cdot \beta}{C}}$$

1.2.4. TCP Vegas

Vegas ist ein Avoidance-basierter CC-Algorithmus, welcher 1994 vorgestellt wurde. Im Kapitel 5. von dem Buch *TCP Congestion Control : A Systems Approach* wird beschrieben, dass Vegas den gemessenen Durchsatz von Paketen mit dem erwarteten Wert vergleicht. [10] Auf Basis dieses Vergleiches wird dann bestimmt, wie viele Pakete ohne Verluste verschickt werden können.

Der erwartete Wert ist hier der Idealwert von dem Durchsatz, welcher über das Netzwerk gesendet werden könnte, falls keine Warteschlange vorliegen würde. Dieser kann wie folgt bestimmt werden :

$ExpectedRate = \frac{cwnd}{BaseRTT}$ wobei $BaseRTT$ die minimale RTT (vgl. 1.3.3) beschreibt.

1.2.5. Merkmale der CC Algorithmen auf einen Blick

	Algorithmus	Typ	Signal der Congestion avoidance
BBR	a	b	c
NewReno	d	e	f
Cubic	g	h	i
Vegas	n	f	f

1.3. Definitionen

Hier werden dem Leser einige Definitionen über die in dem Bericht vorkommenden Begriffe näher gebracht.

1.3.1. Queuing Delay

Queuing Delay beschreibt das Warten einer *Queue* auf das Versenden von Paketen durch das gegebene Netzwerk.

1.3.2. Congestion Window

Das *Congestion Window*(**cwnd**) beschreibt die maximale Anzahl von Segmenten (Paketen) welche gleichzeitig über ein Netzwerk gesendet werden können, ohne dass Datenstau auftritt. Falls es zu Engpässen kommt, fällt der Verlauf von **cwnd**.

1.3.3. Round-Trip Time

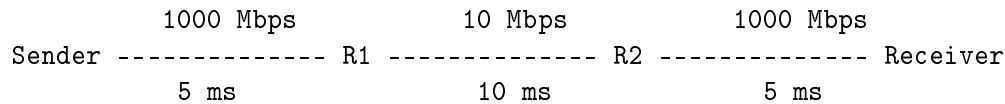
Der Round-Trip Time (**RTT**) ist die Zeit von dem Absenden eines Segments bis zu dem Eintreffen der jeweiligen Bestätigungsnachricht **ACK** beim Sender.

2. Versuchsaufbau

Mit einem Test innerhalb des Command Line Simulators *NS-3.45* [1] lässt sich ein beliebiger CC-Algorithmus ausführen.

Netzwerktopologie

Zunächst definieren wir die Netzwerktopologie auf welcher die CC-Algorithmen laufen werden. [11]



So ist es möglich, einen Netzwerkstau zu simulieren, dieser bleibt für jeden Algorithmus gleich.

Durch das Verändern der folgenden *C++* Codezeile der Datei `tcp-bbr-example.cc` mit dem Namen des gewünschten Algorithmus lässt sich der Test unter gleichen Netzwerkbedingungen für die anderen Testfälle ausführen :

```
[...]
std::string tcpTypeId = "ALGO_NAME";
[...]
```

Mittels der Navigation in das Directory *ns-3.45* per Kommandozeile und dem Befehl

```
./ns3 run examples/tcp/tcp-bbr-example.cc
```

lässt sich der jeweilige Testlauf ausführen. Die aufgezeichneten Informationen können mit dem im Anhang hinterlegten Skript visualisiert werden.

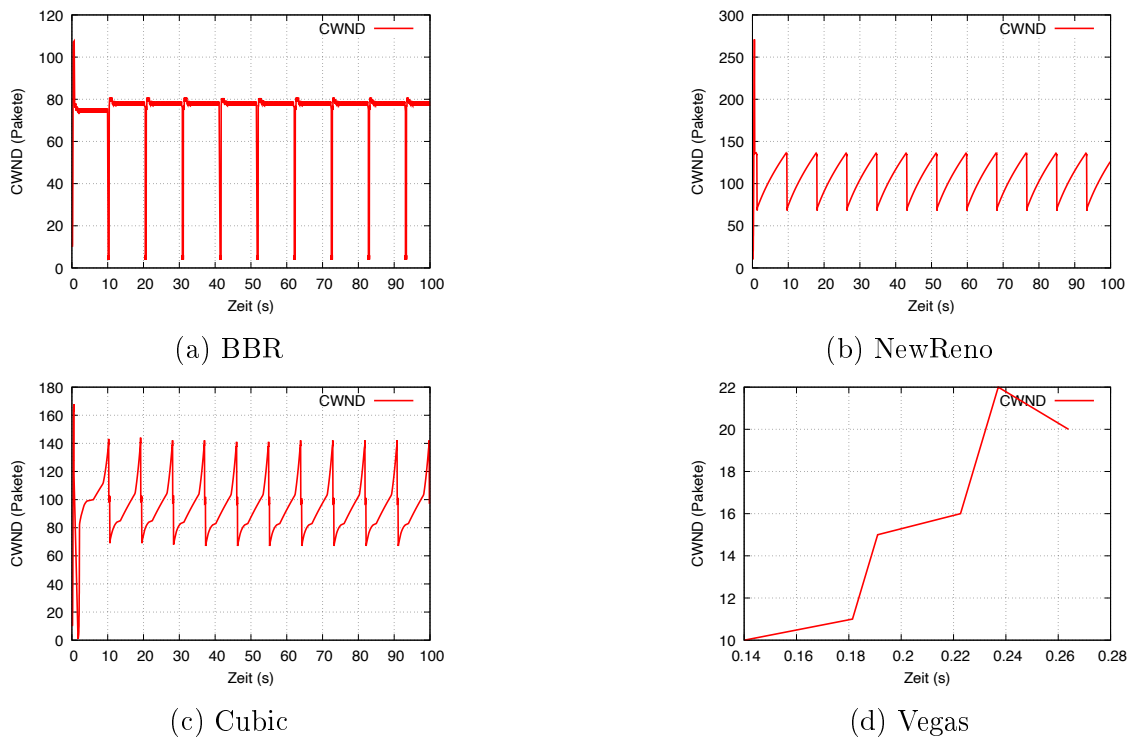


Abbildung 1: Vergleich der aufgezeichneten Congestion Windows.

2.1. Analyse der Ergebnisse

Wie an den *Congestion Window* Graphen erkennbar, besitzt jeder der vorgestellten Algorithmen eine eigene Herangehensweise was das Regulieren von Datenstau angeht. Die RTT wird bei 40 Millisekunden liegen, da die Verzögerung aufgrund der Netzwerktopologie bei $5\text{ms} + 10\text{ms} + 5\text{ms}$ in jede Richtung liegt.

BBR (a)

Das im Graph in Abbildung 1(a) gezeigte **cwnd** weist auf klare, periodische Einbrüche des Verlaufs auf, diese lassen sich auf die Phase *ProbeRTT* des Algorithmus zurückführen. Dies unterscheidet BBR von den anderen CC-Algorithmen, da hier ein Einbruch im **cwnd** nicht direkt ein Hinweis auf Paketverlust ist, sondern jeweils eine gezielte Messung der RTT bedeutet. Mit jeder Messung wird eine neue minimale RTT bestimmt, und die Warteschlange von Paketen kann am Engpass geleert werden.

NewReno (b)

Der in Abbildung 1(b) aufgezeichnete Verlauf von NewReno zeigt im **cwnd** ein Sägezahn-ähnliches Muster. Hierbei lässt sich erst die lineare Steigung und dann der abrupte Einbruch der Anzahl der gesendeten Paketen leicht erkennen. Das **cwnd** wächst in der *congestion avoidance* Phase bis zum nächsten Einbruch. Nach dem Einbruch tritt der Algorithmus in eine *Recovery* Phase ein, wobei der Graph erneut linear zunimmt.

Cubic (c)

Mit dem in Abbildung 1(c) visualisierten Graphen kann der Leser das Arbeitsmuster von Cubic erkennen. Ähnlich wie NewReno in Abbildung 1(b) reagiert Cubic auf Paketverluste, hat allerdings eine strengere Anstiegskurve, da hier der Graph kubisch verläuft. Ebenfalls zu erkennen sind Plateaus, in denen für eine kurze Zeit das **cwnd** nicht ansteigt. Diese liegen an Orten, wo zuvor das W_{max} erreicht wurde.

Vegas (d)

In Abbildung 1 (d) wächst das **cwnd** ohne große Einbrüche. Dieser Verlauf passt zu Vegas, da der Algorithmus das **cwnd** nur langsam erhöht wenn ein Engpass erkannt wird. Somit wird die Warteschlange an Paketen klein gehalten.

3. Ergebnisse und Diskussion

4. Fazit und Schlussfolgerungen

4.1. Offene Fragen

4.2. Diskussion

Literaturverzeichnis

- [1] “a discrete-event network simulator for internet systems,” version 3.45. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>
- [2] DE-CIX, “Traffic statistics frankfurt,” Frankfurt am Main, Deutschland, 2025, letzter Zugriff: 29. August 2025. [Online]. Available: <https://www.de-cix.net/en/locations/frankfurt/statistics>
- [3] J. Postel, “transmission control protocol,” Marina Del Rey, California, 1981. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc793>
- [4] K. W. James F.Kurose, *Computer Networking: A Top-Down Approach*, 8th ed. London: Pearson, 2022.
- [5] N. Cardwell, Y. Cheng, C. S. Gunn, S. H. Yeganeh, and V. Jacobson, “Bbr: Congestion-based congestion control: Measuring bottleneck bandwidth and round-trip propagation time,” *Queue*, vol. 14, no. 5, 2016. [Online]. Available: <https://queue.acm.org/detail.cfm?id=3022184>
- [6] L. Tang, “Bbr fairness evaluation using ns-3,” arXiv preprint arXiv:2410.22560 [cs.NI], 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2410.22560v1>
- [7] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, “A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems,” *CoRR*, vol. cs.NI/9809099, 1998. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/cs/9809099>
- [8] T. Henderson and S. Floyd, “The NewReno Modification to TCP’s Fast Recovery Algorithm,” RFC 2582, Apr. 1999. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc2582>
- [9] S. Ha, I. Rhee, and L. Xu, “Cubic: a new tcp-friendly high-speed tcp variant,” *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, vol. 42, no. 5, p. 64–74, Jul. 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1400097.1400105>
- [10] L. Peterson, L. Brakmo, and B. Davie, *TCP Congestion Control: A Systems Approach*. Systems Approach LLC, 2022. [Online]. Available: <https://tcpcc.systemsapproach.org/index.html>
- [11] M. P. T. Aarti Nandagiri, Vivek Jain, “Tcp bbr example,” 2020, copyright (c) 2018-20 NITK Surathkal. [Online]. Available: <https://github.com/nsnam/ns-3-dev-git/blob/master/examples/tcp/tcp-bbr-example.cc>

Anhang

A. Zusätzliche Abbildungen

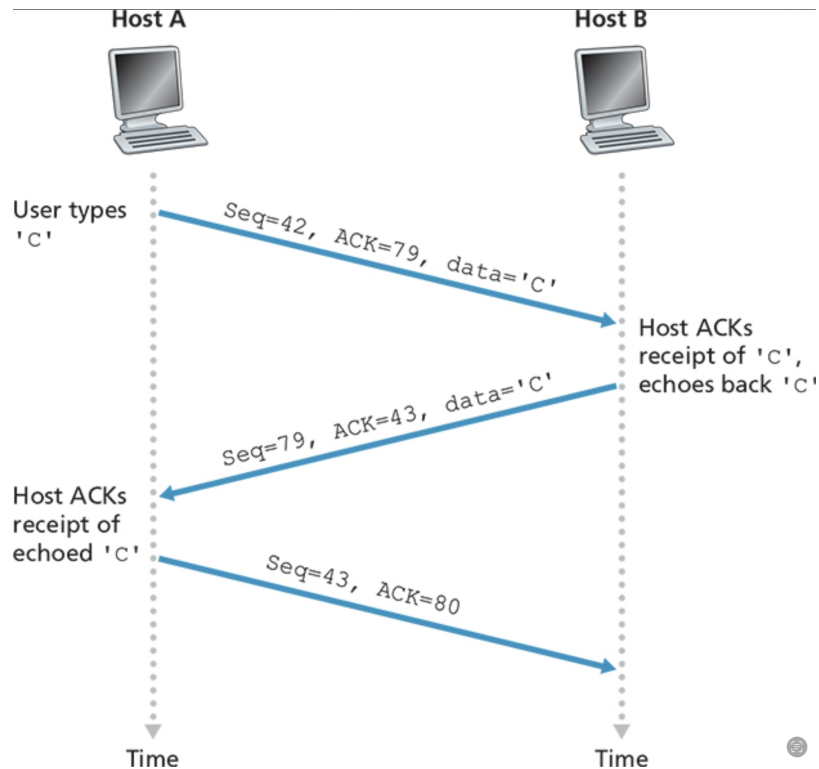


Abbildung 2: Detaillierte Darstellung des Three-Way Handshake.

B. GnuPlot Skript zur Erstellung der CWND Graphen

Hier folgt das Skript mit dem die in Kapitel 2 vorgestellten cwnd Graphen erstellt worden sind.

```
set terminal pdfcairo size 10cm,7cm enhanced font "Helvetica,14"
set output "cwnd.pdf"

set xlabel "Zeit (s)"
set ylabel "CWND (Pakete)"
set grid
set key top right

plot "cwnd.dat" using 1:2 with lines lw 2 lc rgb "red" title "CWND"
```

C. Nicht erfüllte Vorgaben

Aufgrund des Mangels von unter anderem der Anzahl an komplexen Formeln zu dem Thema des Berichts folgen hier die restlichen Vorgaben.

C.1. Formel von Bayes

Die Bayessche Formel ist eine grundlegende Formel in der Statistik. Sie beschreibt die bedingte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ereignisses A_k gegeben Ereignis B . Ereignis A_k wird oft als die *a priori* Wahrscheinlichkeit bezeichnet.

Sei $P(B) > 0$. $A_1 \dot{\cup} \dots \dot{\cup} A_n = \Omega$ Dann gilt :

$$P(A_k|B) = \frac{P(A_k) \cdot P(B|A_k)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(B|A_i)}$$

C.2. Beweis der Formel von Bayes

Der Satz liefert :

$$P(A_k|B) = \frac{P(A_k \cap B)}{P(B)} = \frac{P(A_k) \cdot \frac{P(B \cap A_k)}{P(A_k)}}{P(B)} = \frac{P(A_k) \cdot P(B|A_k)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(B|A_i)}$$

□

D. Datenmaterial

E. Web-Standards

0