

Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen unter verschiedenen Verkehrsbedingungen

von Dr.-Ing. Ning Wu

(Veröffentlicht in *Straßenverkehrstechnik*,

Heft 5/1996. Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, 1996)

Kurzfassung:

Die Rückstaulängen sind wichtige Parameter in der Verkehrstechnik zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Qualität der Verkehrsanlagen. Bei den Lichtsignalanlagen sind die Rückstaulängen am Ende der Sperrzeit (Rotende) für die Dimensionierung der Fahrstreifen von maßgebender Bedeutung. Während die mittlere Rückstaulänge die Leistungsfähigkeit der Lichtsignalanlage widerspiegelt, werden die sogenannte 95%- und 99%-Rückstaulänge am Rotende (bzw. am Stauende) für die Dimensionierung der Länge der Links-(Rechts-) Abbiegespur verwendet, damit die Blockierung der Fahrstreifen des gradeausfahrenden Verkehrs ausbleibt. Bei den Lichtsignalanlagen sind die Rückstaulängen am Rotende von größter Bedeutung. Auch die Rückstaulängen am Stauende (maximale Rückstaulänge im Zeitpunkt, in dem der Stau vor der Haltelinie vollständig abgebaut wird, gemessen von der Haltelinie bis zum Ende des Rückstaus) müssen in Betracht gezogen werden.

In diesem Aufsatz wird eine Reihe von theoretisch - empirischen Funktionen angegeben, die 95% und 99%-Rückstaulängen am Rotende (bzw. am Stauende) unter stationärem Verkehrs darstellen. Auch die Teilgebundenheit des Zuflusses kann berücksichtigt werden.

Schlüsselwörter:

Lichtsignalanlagen
Rückstaulänge
Percentilen der Rückstaulänge
stationärer und instationärer Verkehr
freier und teilgebundener Verkehr

Verfasseranschrift:

PD Dr.-Ing. Ning Wu
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Verkehrswesen
44 780 Bochum
ning.wu@rub.de

Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen unter verschiedenen Verkehrsbedingungen

von Dr.-Ing. Ning Wu

1. Einführung

Die Rückstaulängen sind wichtige Parameter in der Verkehrstechnik zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Qualität der Verkehrsanlagen. Bei den Lichtsignalanlagen sind die Rückstaulängen am Ende der Sperrzeit (Rotende) für die Dimensionierung der Fahrstreifen von maßgebender Bedeutung. Während die mittlere Rückstaulänge die Leistungsfähigkeit der Lichtsignalanlage widerspiegelt, werden die sogenannte 95%- und 99%-Rückstaulänge am Rotende (bzw. am Stauende) für die Dimensionierung der Länge der Links-(Rechts-) Abbiegespur verwendet, damit die Blockierung der Fahrstreifen des geradeausfahrenden Verkehrs möglichst weitgehend ausbleibt. Unter 95%- bzw. 99%-Rückstaulänge versteht man die Länge des Rückstaus, die bei 95% bzw. 99% aller Umläufe nicht überschritten wird. Oder anders ausgedrückt: nur bei 5% bzw. 1% der Umläufe ist der Rückstau länger. Bei den Lichtsignalanlagen sind die Rückstaulängen am Rotende von größter Bedeutung. Auch die Rückstaulängen am Stauende (maximale Rückstaulänge im Zeitpunkt, in dem der Stau vor der Haltelinie vollständig abgebaut wird, gemessen von der Haltelinie bis zum Ende des Rückstaus) müssen in Betracht gezogen werden. Rückstaulängen am Grünende sind nicht maßgebend, sie liegen aber der Berechnung der Rückstaulängen am Rotende und Stauende zugrunde. Die mittlere Rückstaulänge kann allgemein - gleichgültig ob am Rotende oder Grünende - nach der Warteschlangentheorie ermittelt werden. Die mittlere Rückstaulänge und die mittlere Wartezeit unter stationärem Verkehr können nach der Regel von Little durch die Gleichung $\text{Rückstaulänge} = \text{Wartezeit} \cdot \text{Verkehrsstärke}$ ineinander umgerechnet werden. Auch unter instationärem Verkehr besteht eine bestimmte Beziehung zwischen der mittleren Rückstaulänge und der mittleren Wartezeit (Akcelik 1980). Zur Berechnung der mittleren Rückstaulängen am Grünende und Rotende haben verschiedene Autoren Gleichungen für unterschiedlichen Bedingungen angegeben (für stationären Verkehr: Webster 1958, Miller 1975; für instationären Verkehr: Kimber-Hollis 1979, Akcelik 1978, Wu 1990).

Die Ermittlung der 95%- und 99%-Rückstaulängen am Rotende (bzw. am Stauende) ist viel schwieriger. Es ist bis jetzt nicht gelungen, analytische Lösungen zu erarbeiten. Auch empirische Formeln gibt es nicht. Webster hat im Jahr 1958 durch Simulation zwei Tabellen über die 95%- und 99%-Rückstaulängen am Rotende unter stationärem Verkehr angegeben. Pöschl und Waglechner haben im Jahr 1982 die Simulation mit einem leistungsfähigeren

Rechner wiederholt und die von Webster angegebenen Tabellen geringfügig modifiziert. Die von Webster und Pöschl-Waglechner angegebenen Tabellen sind bis jetzt die einzigen Hilfsmittel zur Ermittlung der 95%- und 99%-Rückstaulängen am Rotende. Beim Benutzen dieser Tabellen müssen mehrfach Inter- bzw. Extrapolationen durchgeführt werden. Dies ist für die Berechnung mit der EDV-Anlage äußerst unpraktisch und für die manuelle Berechnung sehr unhandlich und fehleranfällig.

In diesem Aufsatz wird eine Reihe von theoretisch - empirischen Funktionen angegeben, die 95% und 99%-Rückstaulängen am Rotende (bzw. am Stauende) unter stationärem Verkehrs darstellen. Auch die Teilgebundenheit des Zuflusses kann berücksichtigt werden. Die Rückstaulänge unter stationärem Verkehr kann durch Regression ermittelt werden. Die der Regression zugrunde liegenden Daten werden mit Hilfe von EDV-Anlagen durch Einsatz der Markow-Ketten errechnet (vgl. Wu, 1990). Die Verteilungsfunktionen der Rückstaulängen können dadurch für jeden ausgewählten Zeitpunkt innerhalb des Umlaufs ermittelt werden. Die Ergebnisse sind numerisch ermittelte Werte, die unter den vorgegebenen Modellbedingungen exakt zutreffen. Für die 95%- und 99%-Rückstaulänge am Rotende (bzw. am Stauende) unter instationärem Verkehr werden die Funktionen durch die Transformationstechnik (transition) ermittelt (vgl. Kimber-Hollis 1979 und Akcelik 1980). Die Teilgebundenheit des Verkehrs wird mit einem Abminderungsfaktor für die Rückstaulänge nach Wu (1990) berücksichtigt. Für alle Typen der Rückstaulängen wurden Nomogramme hergestellt, die die Ermittlung der Rückstaulängen in der Praxis erheblich erleichtern können.

In diesem Aufsatz werden folgende Symbole in den Gleichungen verwendet :

95%-Rückstaulänge	=	Rückstaulänge, die in 95% der Umläufe nicht überschritten wird	(Fz)
99%-Rückstaulänge	=	Rückstaulänge, die in 99% der Umläufe nicht überschritten wird	(Fz)
W	=	mittlere Wartezeit pro Fahrzeug	(s/Fz)
N_{GE}	=	mittlere Rückstaulänge am Grünende	(Fz)
N_{RE}	=	mittlere Rückstaulänge am Rotende	(Fz)
N_{RE95}	=	95%-Rückstaulänge am Rotende	(Fz)
N_{RE99}	=	99%-Rückstaulänge am Rotende	(Fz)
N_{SE}	=	mittlere Rückstaulänge am Stauende	(Fz)
N_{SE95}	=	95%-Rückstaulänge am Stauende	(Fz)
N_{SE99}	=	99%-Rückstaulänge am Stauende	(Fz)
G	=	Länge der Grünzeit	(s)
R	=	Länge der Rotzeit	(s)
R'	=	scheinbare Rotzeit am Stauende	(s)

C	=	Länge der Umlaufzeit	(s)
q	=	Verkehrsstärke	(Fz/s)
λ	=	Grünzeitanteil = G/C	(-)
n	=	Anzahl der Fahrstreifen	(-)
s	=	Sättigungsverkehrsstärke	(Fz/s)
<i>Die Sättigungsverkehrsstärke gilt als Gesamtwert für alle Fahrstreifen, die zu einer Signalgruppe gehören. Für deutsche Verhältnisse kann als Standardwert $s=n \cdot 0.5$ eingesetzt werden.</i>			
x	=	Auslastungsgrad	(-)
$\bar{x}$	=	durchschnittlicher Auslastungsgrad in der Spitzenstunde bei instationärem Verkehr	(-)
c	=	Leistungsfähigkeit pro Umlauf = $s \cdot G$	(Fz)
Q	=	Leistungsfähigkeit der Lichtsignalanlage	
	=	c/C	(Fz/s)
l	=	Länge des Fahrzeuges	
	(m)		
xx	=	Index für mittlere, 95%- oder 99%-Rückstaulänge	
in	=	Index für Instationarität	
Kg	=	Abminderungsfaktor der Rückstaulänge durch Teilgebundenheit des Verkehrs	(-)

2. Rückstaulängen am Rotende unter stationärem und freiem Verkehr

Die mittlere 95%- und 99%-Rückstaulänge am Rotende unter stationärem und freiem Verkehr können allgemein als Funktionen von der mittleren Rückstaulänge am Grünende N_{GE} , der Verkehrsstärke q , der Umlaufzeit C und des Grünzeitanteils λ aufgefaßt werden. Die Regressionsfunktionen der Rückstaulängen können i.a. mit der folgenden theoretisch - empirischen Formel angegeben werden:

$$\begin{aligned}
 N_{RExx} &= \alpha \cdot N_{GE} + \beta \cdot (q \cdot C) \cdot (1 - \lambda) + \gamma \cdot (q \cdot C)^n \\
 &= N_{GExx}(\alpha) + \beta \cdot (q \cdot C) \cdot (1 - \lambda) + \gamma \cdot (q \cdot C)^n
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Dabei sind α , β , γ und n Parameter, die jeweils für die mittlere Rückstaulänge, die 95%-Rückstaulänge und die 99%-Rückstaulänge verschiedene Werte annehmen. Die Gleichung 1 setzt sich aus 3 Gliedern zusammen. Das erste Glied beschreibt die jeweiligen Rückstaulängen am Grünende. Dieses Glied ist eine Funktion von der mittleren

Rückstaulänge am Grünende N_{GE} . Das zweite Glied ist der Zuwachs der Rückstaulänge zwischen Grünende und Rotende. Dieses Glied ist von der Anzahl der Fahrzeuge, die in der Rotzeit ankommen ($R=C \cdot (1-\lambda)$), abhängig. Das dritte Glied ist ein Korrekturfaktor, der von der Anzahl der Fahrzeuge, die in einem Umlauf ankommen, abhängig ist. Das erste und das dritte Glied repräsentieren den stochastischen Anteil der Rückstaulängen; das zweite Glied beschreibt den deterministischen Anteil der Rückstaulänge. Die Parameter α , β , γ und n können durch Regression bestimmt werden.

Es wurden für die mittlere Rückstaulänge, die 95%-Rückstaulänge und die 99%-Rückstaulänge jeweils 560 Stichproben ($G=10-50s$ mit Schrittweite 10s, $x=0.3-0.98$ mit Schrittweite 0.02 und $C=60-90s$ mit Schrittweite 10s) nach dem Verfahren der Markow-Ketten errechnet (Wu, 1990). Die Regressions - Parameter α , β , γ und n wurden durch das Verfahren des kleinsten Fehlerquadrats ermittelt. Folgende Parameter für die Rückstaulänge werden festgestellt:

Rückstaulänge	α	β	γ	n	Standardabweichung s
N_{RE}	1.00	1.00	0.00	0.00	0.027
N_{RE95}	2.97	1.20	1.29	0.26	0.291
N_{RE99}	4.65	1.19	1.84	0.39	0.601

Tab. 1

Es zeigt sich, daß die Abweichungen der Regression von den durch Markow-Ketten errechneten Werte immer unter 1 Fahrzeug liegen (Standardabweichung $s < 1$).

Die mittlere Rückstaulänge am Grünende N_{GE} kann nach Miller (1975)

$$N_{GE} = \frac{\exp(-1.33\sqrt{s \cdot G} \cdot (1-x) / x)}{2(1-x)} \quad (2)$$

berechnet werden. Sie kann auch nach Wu (1990)

$$N_{GE} = \frac{x^{1.72 \cdot (s \cdot G)^{0.43}}}{2(1-x)} \quad (3)$$

ermittelt werden. Der Unterschied zwischen den beiden Formeln ist nicht signifikant.

Setzt man die Gleichung 2 und die Parameter der Tab. 1 in die Gleichung 1 ein, erhält man

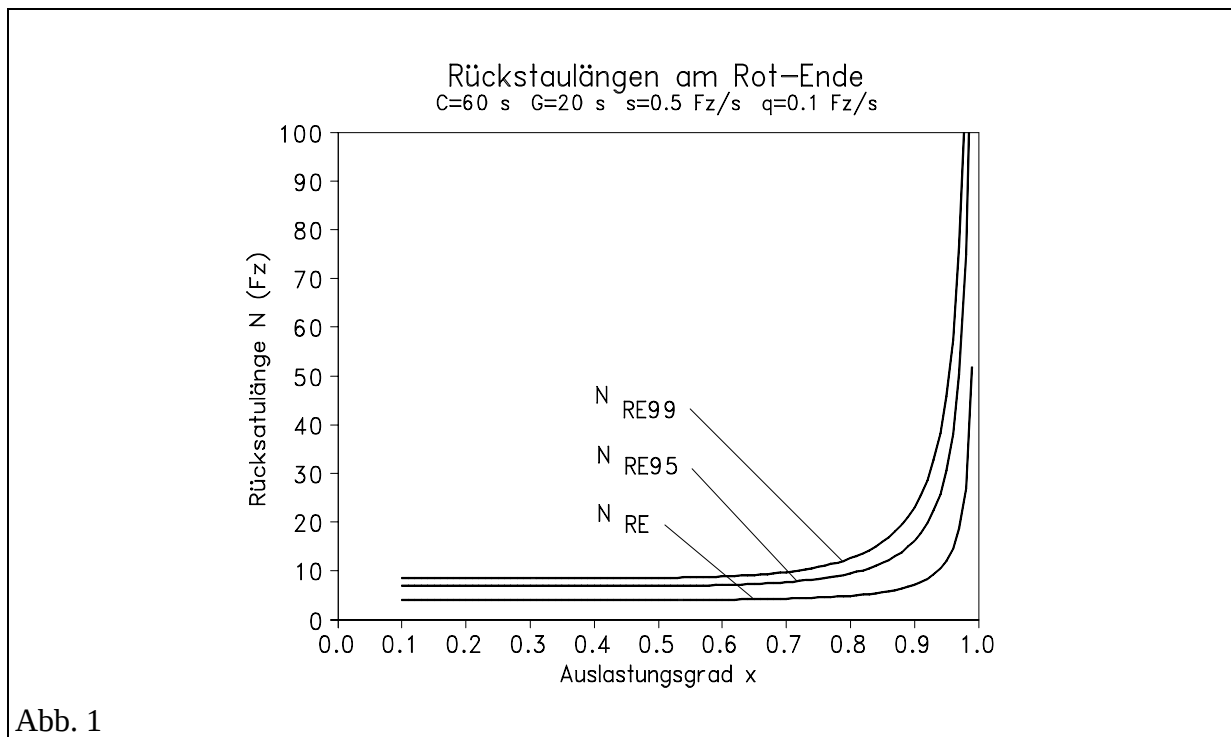
$$N_{RE} = \frac{\exp(-1.33\sqrt{s \cdot G} \cdot (1-x)/x)}{2(1-x)} + (q \cdot C) \cdot (1-\lambda) \quad (4)$$

$$N_{RE95} = \frac{2.97 \cdot \exp(-1.33\sqrt{s \cdot G} \cdot (1-x)/x)}{2(1-x)} + 1.20 \cdot (q \cdot C) \cdot (1-\lambda) + 1.29(q \cdot C)^{0.26} \quad (5)$$

und

$$N_{RE99} = \frac{4.65 \cdot \exp(-1.33\sqrt{s \cdot G} \cdot (1-x)/x)}{2(1-x)} + 1.19 \cdot (q \cdot C) \cdot (1-\lambda) + 1.84 \cdot (q \cdot C)^{0.39} \quad (6)$$

Die Beziehung zwischen N_{RE} , N_{RE95} und N_{RE99} ist in der Abb. 1 dargestellt. Als Beispiel werden $C=60s$, $G=20s$, $s=0.5 \text{ Fz/s}$ und $q=0.1 \text{ Fz/s}$ eingesetzt.



Vergleicht man die Ergebnisse der Gleichungen 5 und 6 mit den von Pöschl und Waglechner (1982) durch Simulation ermittelten Tabellen, kann man feststellen, daß die Übereinstimmungen verblüffend gut sind (Tab. 2). Die absolute Abweichung beträgt maximal 2 Fahrzeuge. Die Abweichung geht offensichtlich auf die Rundung der Zahlen und auf stochastisch bedingte Abweichungen der Simulationsergebnisse zurück.

	x	c λ	2 S R		5 S R		10 S R		15 S R		20 S R		30 S R		40 S R	
95%- Rück- stau- länge am Rot- ende	0.30	0.2	2	2	3	3	5	5	7	7	9	8	12	11	15	14
		0.4	2	2	3	3	4	4	6	6	7	7	9	9	12	12
		0.6	1	<u>2</u>	2	<u>3</u>	3	<u>4</u>	4	<u>5</u>	5	5	7	7	9	9
		0.8	1	<u>2</u>	1	<u>2</u>	2	<u>3</u>	3	3	3	<u>4</u>	4	<u>5</u>	5	<u>6</u>
	0.50	0.2	3	3	5	5	8	<u>7</u>	10	10	13	<u>12</u>	18	18	23	23
		0.4	3	3	4	4	6	6	8	8	10	10	14	14	18	18
		0.6	2	<u>3</u>	3	3	5	5	6	6	8	8	10	10	13	13
		0.8	2	2	2	<u>3</u>	3	<u>4</u>	4	4	5	5	6	<u>7</u>	8	8
	0.70	0.2	5	5	7	7	10	10	14	14	17	17	24	24	31	31
		0.4	5	5	6	6	9	<u>8</u>	11	11	14	14	19	19	24	24
		0.6	4	<u>5</u>	5	5	7	7	8	8	10	10	14	14	17	17
		0.8	4	4	4	<u>5</u>	4	<u>5</u>	5	<u>6</u>	6	<u>7</u>	8	<u>9</u>	10	10
	0.80	0.2	8	8	9	<u>10</u>	13	13	17	17	20	20	28	28	35	35
		0.4	7	<u>8</u>	8	<u>9</u>	11	11	14	14	16	16	22	22	27	<u>28</u>
		0.6	7	7	7	<u>8</u>	9	9	11	11	12	13	16	16	20	20
		0.8	6	<u>7</u>	6	<u>7</u>	7	7	7	<u>8</u>	8	<u>9</u>	10	10	12	12
	0.90	0.2	15	<u>16</u>	17	17	20	<u>21</u>	24	24	28	28	35	<u>36</u>	43	<u>44</u>
		0.4	15	15	16	16	18	<u>19</u>	21	21	24	24	29	<u>30</u>	35	<u>36</u>
		0.6	14	<u>15</u>	15	15	16	16	18	18	20	20	23	23	27	27
		0.8	14	14	14	14	14	14	15	15	16	<u>15</u>	17	17	19	<u>18</u>
	0.95	0.2	30	<u>31</u>	32	32	35	<u>36</u>	39	39	43	43	50	<u>51</u>	58	<u>59</u>
		0.4	29	<u>30</u>	31	31	33	33	36	36	39	39	44	44	50	50
		0.6	29	<u>30</u>	30	30	31	31	33	33	35	<u>34</u>	38	38	42	<u>41</u>
		0.8	29	29	29	29	29	29	30	<u>29</u>	31	<u>30</u>	32	<u>31</u>	34	<u>32</u>
99%- Rück- stau- länge am Rot- ende	0.30	0.2	3	3	4	4	7	<u>6</u>	9	<u>8</u>	11	<u>10</u>	14	<u>13</u>	17	17
		0.4	2	2	4	4	6	<u>5</u>	7	7	9	<u>8</u>	11	11	14	14
		0.6	2	2	3	3	4	<u>5</u>	6	6	7	7	9	9	11	11
		0.8	2	2	2	<u>3</u>	3	<u>4</u>	4	<u>5</u>	4	<u>6</u>	6	<u>7</u>	7	<u>8</u>
	0.50	0.2	4	4	6	6	9	9	12	12	15	15	21	<u>20</u>	26	<u>25</u>
		0.4	4	4	5	5	8	8	10	10	12	12	17	17	21	21
		0.6	3	<u>4</u>	4	<u>5</u>	6	6	8	8	9	<u>10</u>	12	<u>13</u>	15	<u>16</u>
		0.8	3	3	3	4	4	<u>5</u>	5	<u>6</u>	6	<u>7</u>	8	<u>9</u>	9	<u>11</u>
	0.70	0.2	7	7	9	9	13	<u>12</u>	16	16	20	20	27	27	34	34
		0.4	7	7	8	8	11	11	14	<u>13</u>	16	16	22	22	27	27
		0.6	7	7	7	7	9	9	11	11	12	<u>13</u>	16	<u>17</u>	20	<u>21</u>
		0.8	6	6	6	6	7	7	7	<u>8</u>	8	<u>10</u>	10	<u>12</u>	12	14
	0.80	0.2	11	11	13	13	17	<u>16</u>	20	20	24	24	31	<u>32</u>	39	39
		0.4	11	11	12	12	15	<u>14</u>	17	17	20	20	26	26	31	<u>32</u>
		0.6	10	<u>11</u>	11	11	13	13	14	14	16	16	19	<u>20</u>	23	<u>24</u>
		0.8	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	13	<u>14</u>	15	17
	0.90	0.2	23	23	25	25	28	28	32	32	35	35	43	43	50	51
		0.4	22	<u>23</u>	24	24	26	26	29	<u>28</u>	31	31	37	37	42	43
		0.6	22	<u>23</u>	23	23	24	24	26	<u>25</u>	27	27	31	<u>30</u>	34	34
		0.8	22	22	22	22	22	22	23	<u>22</u>	23	<u>22</u>	25	<u>24</u>	26	26
	0.95	0.2	45	<u>47</u>	48	48	51	51	55	55	58	58	66	66	73	<u>74</u>
		0.4	45	<u>46</u>	47	47	49	49	52	<u>51</u>	54	54	60	<u>59</u>	65	65
		0.6	44	<u>46</u>	46	46	47	47	49	<u>48</u>	50	<u>49</u>	54	<u>53</u>	57	<u>56</u>
		0.8	44	<u>45</u>	45	45	45	<u>44</u>	46	<u>45</u>	46	<u>45</u>	48	<u>46</u>	49	<u>47</u>

Tab. 2 : Rückstaulängen am Rotende

S - Simulation nach Pöschl

41 - Abweichung = 1 Fz

R - Regression nach Gleichung 6

23 - Abweichung = 2 Fz

3. Rückstaulängen am Stauende unter stationärem und freiem Verkehr

Gleichung 5 und 6 stellen die 95%- und 99%-Rückstaulänge am Rotende unter stationärem und freiem Verkehr dar. Die Rückstaulängen am Rotende sind aber nicht die maximalen Rückstaulängen innerhalb der Umlaufzeit. Da sich die Rückstaulänge ab Beginn der Grünzeit von der Haltelinie her abbaut, wächst die Rückstaulänge am Stauende weiter nach hinten. Weitere Fahrzeuge werden nach dem Rotende (Grünbeginn) noch angehalten. Für ein Fahrzeug, das auf die Lichtsignalanlage zufährt, scheint die Sperrzeit länger als die Rotzeit am Signal wirklich ist. Bezeichnet man die Zeitspanne von Rotbeginn bis zu dem Zeitpunkt, bei dem die Rückstaulänge vollständig abgebaut wird, als R' und setzt man R' in die Gleichung 5 und 6, erhält man die 95%- und 99%-Rückstaulängen am Stauende.

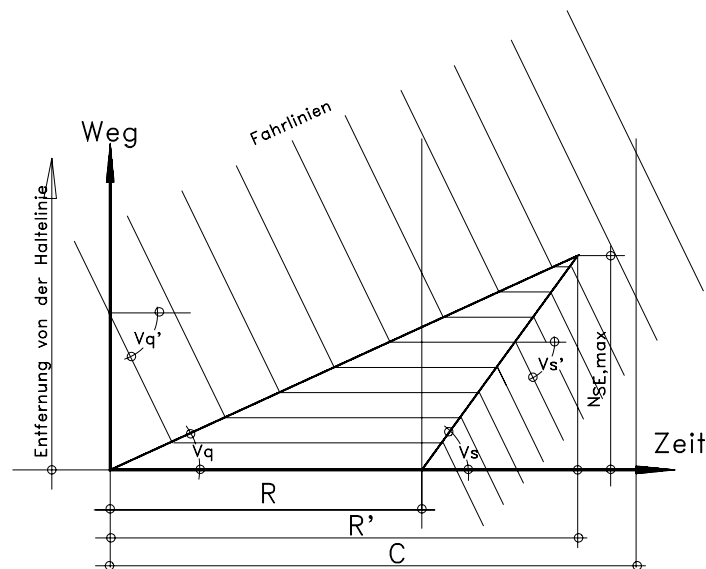


Abb. 2

Der Länge von R' kann nach der Kontinuums - Theorie ermittelt werden. Hier wird nur die sogenannte deterministische Rückstaulänge zur Herleitung betrachtet. Die deterministische Rückstaulänge von der Haltelinie bis zum Stauende kann in dem Zeit-Weg-Diagramm (Abb. 2) dargestellt werden. Hier ist V_s die Geschwindigkeit, mit der der Stau von der Haltelinie weg abgebaut wird und V_q die Geschwindigkeit, mit der der Stau vom Stauende weiter nach hinten wächst. Nimmt man an, daß die Fahrzeuge vorn mit der Geschwindigkeit $V_{s'}$ den Stau verlassen und hinten mit der Geschwindigkeit $V_{q'}$ in den Stau einfährt, dann ist nach der Kontinuum - Theorie

$$Vq = \frac{0 - q}{\frac{1}{l} - \frac{q}{Vq'}} \quad V_s = \frac{s - 0}{\frac{s}{Vs'} - \frac{1}{l}} \quad (7)$$

Nach der Geometrie des Zeit-Weg-Diagramms (Abb. 2) kann R' leicht ermittelt werden:

$$R' = \frac{R}{1 - \frac{q}{s} \cdot \left(\frac{1}{l} - \frac{s}{Vs'} \right) / \left(\frac{1}{l} - \frac{q}{Vq'} \right)} \quad (8)$$

Für Vq' und Vs' sollte die mittlere Fahrgeschwindigkeit, mit der die Fahrzeuge aus dem Stau und in den Stau fahren, in Meter pro Sekunde eingesetzt werden.

Schreibt man die Gleichung 8 um in die folgende Form

$$R' = \frac{1 - \frac{q}{s}}{1 - \frac{q}{s} \cdot \left(\frac{1}{l} - \frac{s}{Vs'} \right) / \left(\frac{1}{l} - \frac{q}{Vq'} \right)} \cdot \frac{R}{1 - \frac{q}{s}}$$

um und ersetzt man

$$\frac{1 - \frac{q}{s}}{1 - \frac{q}{s} \cdot \left(\frac{1}{l} - \frac{s}{Vs'} \right) / \left(\frac{1}{l} - \frac{q}{Vq'} \right)} = K \quad (9)$$

dann lautet

$$R' = K \cdot \frac{R}{1 - \frac{q}{s}} \quad (10)$$

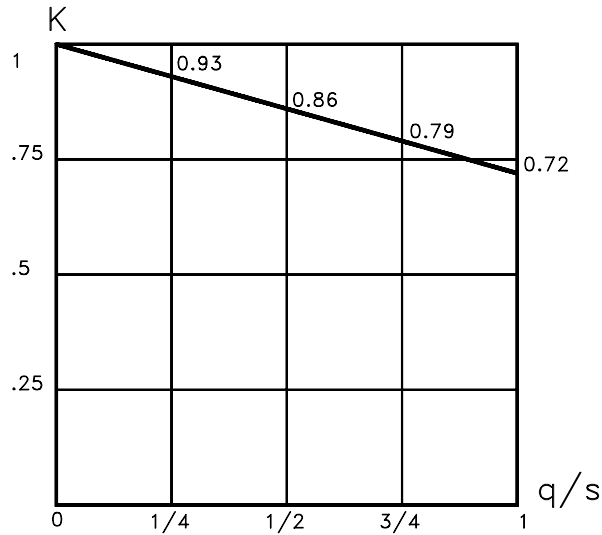


Abb. 3

K ist von den Geschwindigkeiten Vq' und Vs' und von der Verkehrsstärken q und s abhängig. Setzt man $Vs'=Vq'=11.11$ m/s (40 km/h) und $l=6$ m in die Gl. 9 ein, dann liegt K zwischen 1 (bei $q=0$) und 0.72 (bei $q=s$). Der Verlauf von K als Funktion von der Verkehrsstärke q ist in der Abb. 3 dargestellt. K verläuft als eine Funktion von q linear.

In der Praxis liegt die Verkehrsstärke q meistens im Bereich zwischen dem 1/4- und 1/2-fachen der Sättigungsverkehrsstärke s . Um die Gleichung 10 zu vereinfachen, kann K durch seinen Mittelwert in diesem Bereich ersetzt werden. Der Mittelwert in diesem Bereich liegt bei ca. 0.9. Die Gleichung lautet dann

$$R' = 0.9 \cdot \frac{R}{1 - \frac{q}{s}} \quad (11)$$

Auch Akcelik (1980) hat hier einen Faktor von 0.9 vorgeschlagen. Seiner Feststellung lagen aber praktische Beobachtungen zugrunde.

Setzt man die Gleichung 11 in die Gleichung 1 ein, so erhält man eine allgemeine Formel für die Rückstaulänge am Stauende unter stationärem und freiem Verkehr:

$$\begin{aligned} N_{SExx} &= \alpha \cdot N_{GE} + \beta \cdot (q \cdot C) \cdot \frac{1 - \lambda}{1 - \frac{q}{s}} + \gamma \cdot (q \cdot C)^n \\ &= N_{GExx}(\alpha) + \beta \cdot (q \cdot C) \cdot \frac{1 - \lambda}{1 - \frac{q}{s}} + \gamma \cdot (q \cdot C)^n \end{aligned} \quad (12)$$

Setzt man die entsprechenden α -, β -, γ - und n -Werte in die Gleichung 12 ein, erhält man die maximalen 95%- und 99%-Rückstaulängen am Stauende:

$$N_{SE95} = \frac{2.97 \cdot \exp(-1.33\sqrt{s \cdot G} \cdot (1-x) / x)}{2(1-x)} + 1.08 \cdot (q \cdot C) \cdot \frac{1-\lambda}{1-\frac{q}{s}} + 1.29 \cdot (q \cdot C)^{0.26} \quad (13)$$

und

$$N_{SE99} = \frac{4.65 \cdot \exp(-1.33\sqrt{s \cdot G} \cdot (1-x) / x)}{2(1-x)} + 1.07 \cdot (q \cdot C) \cdot \frac{1-\lambda}{1-\frac{q}{s}} + 1.84 \cdot (q \cdot C)^{0.39} \quad (14)$$

Die mittlere Rückstaulänge am Stauende lautet (vgl. auch Akcelik 1980):

$$N_{SE} = \frac{\exp(-1.33\sqrt{s \cdot G} \cdot (1-x) / x)}{2(1-x)} + 0.9 \cdot (q \cdot C) \cdot \frac{1-\lambda}{1-\frac{q}{s}} \quad (15)$$

4. Rückstaulängen unter instationärem Verkehr

Unter instationärem Verkehr versteht man den Verkehrszustand, bei dem die Verkehrsstärke über die Zeit nicht konstant bleibt. Die Rückstaulängen aller Arten (mittlere, 95%- und 99%-Rückstaulänge) sind demnach auch von der Zeit abhängig. Die Betrachtungsweise der Instationarität wird drauf beschränkt, daß nur ein bestimmter Zeitabschnitt (z.B. die Spitzenstunde) behandelt wird. Die Ganglinie der Verkehrsstärke in diesem Zeitabschnitt wird vordefiniert (z.B. als eine Parabel). Die mittleren Werte der Rückstaulängen und Wartezeiten werden dann über diesen Zeitabschnitt ermittelt.

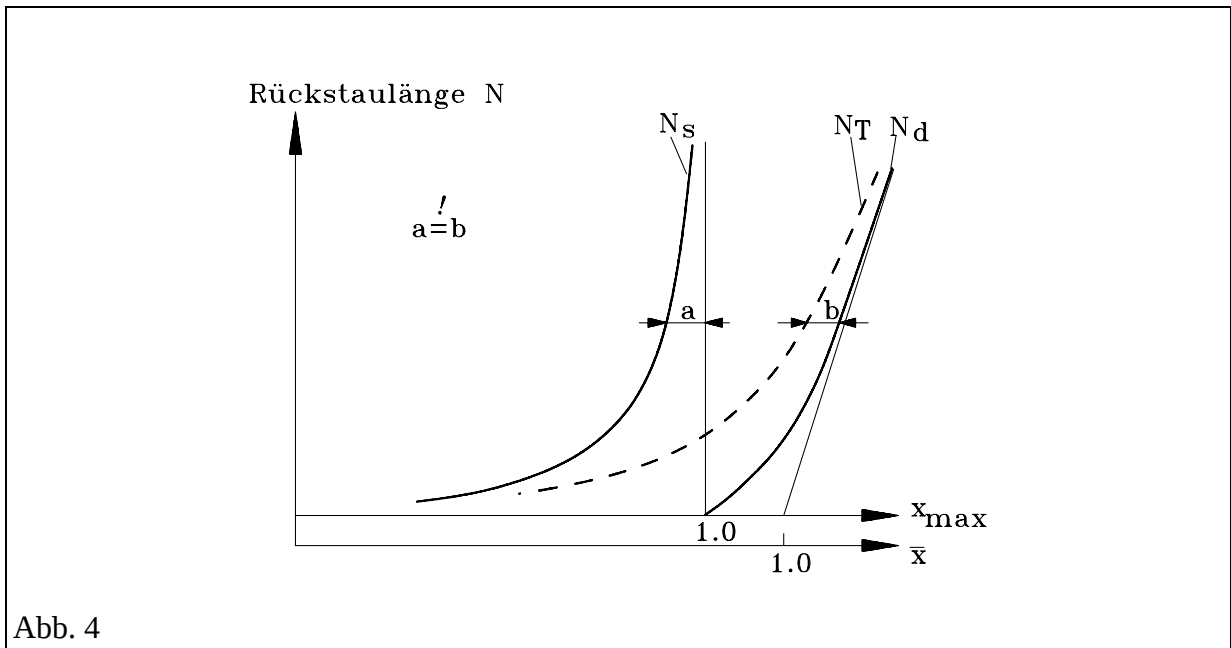


Abb. 4

Die Rückstaulängen unter instationärem Verkehr können durch die sogenannte Transformationstechnik (transition) ermittelt werden (vgl. Kimber, Hollis 1979, Akcelik 1980 und Wu 1990). Diese Technik kann anhand der Abb. 4 erläutert werden.

In der Abb. 4 werden die stochastische Rückstaulänge unter stationärem Verkehr N_S , die deterministische Rückstaulänge bei überlasteten Zustand ($x > 1$) unter instationärem Verkehr N_d und die gesamte Rückstaulänge (stochastisch+deterministisch) N_T unter instationärem Verkehr zusammen dargestellt. N_T ist die gesuchte Größe, die durch Transformation ermittelt werden soll. Das Prinzip der Überbrückung (Transformation) ist das Postulat: $a = b$. Setzt man hier für N_S verschiedene Formeln der Rückstaulänge unter stationärem Verkehr ein (mittlere, 95%- und 99%-Rückstaulänge), erhält man für N_T entsprechend die transformierte Annäherungs-Formel für die Berechnung der Rückstaulänge unter instationärem Verkehr. Die deterministische Rückstaulänge bei Überlastung N_d ist für sämtliche Fälle gleich. Um die Transformation zu erleichtern, ist eine Vereinfachung bei der Berechnung der mittleren Rückstaulänge am Grünende N_{GE} sinnvoll und notwendig. Akcelik (1980) hat folgende Approximation vorgeschlagen:

$$N_{GE} = \begin{cases} \frac{15 \cdot (x - x_0)}{1 - x} & x \geq x_0 \\ 0 & x < x_0 \end{cases} \quad (16)$$

mit

$$x_0 = 0.67 + \frac{s \cdot G}{600} \quad (17)$$

Demnach kann z.B. die transformierte Formel zur Berechnung der mittleren Rückstaulänge am Grünende nach Wu (1990) wie folgt dargestellt werden:

$$N_{GE,in} = \begin{cases} 523.8 \cdot Q \cdot [1.09 \cdot \bar{x} - 1 + \sqrt{(1.09 \cdot \bar{x} - 1)^2 + \frac{1.09 \cdot \bar{x} - x_0}{174.6 \cdot Q}}] & \begin{matrix} \bar{x} > 0.92x_0 \\ \bar{x} < 1.14 \end{matrix} \\ 900 \cdot Q \cdot [\bar{x} - 1 + \sqrt{(\bar{x} - 1)^2 + \frac{\bar{x} - 0.92 \cdot x_0 - 0.08}{300 \cdot Q}}] & \bar{x} \geq 1.14 \\ 0 & \bar{x} \leq 0.92x_0 \end{cases} \quad (18)$$

Diese Formel gilt für eine parabelförmige Standard-Ganglinie mit einer 1-stündigen Spitzenstunde und einer Ganglinien-Spanne $z = 0.4$ (Bedeutung: siehe Wu 1990). Die Gleichung 18 wird auch für die Berechnung der mittleren Wartezeit unter instationärem Verkehr verwendet. Die mittlere Wartezeit in der betrachteten Spitzenstunde kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$\bar{W} = \frac{C \cdot (1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda \cdot \bar{x})} + \frac{N_{GE,in}}{Q} \quad (19)$$

Setzt man jeweils $N_{GExx} = \alpha \cdot N_{GE}$ für die 95%- und 99%-Rückstaulänge als N_S in die Transformation ein, erhält man die entsprechenden Formeln zur Berechnung der 95%- und 99%-Rückstaulänge am Grünende unter instationärem und freiem Verkehr:

$$N_{GExx,in}(\alpha) = \begin{cases} 523.8 \cdot Q \cdot [1.09 \cdot \bar{x} - 1 + \sqrt{(1.09 \cdot \bar{x} - 1)^2 + \alpha \cdot \frac{1.09 \cdot \bar{x} - x_0}{174.6 \cdot Q}}] & \begin{matrix} \bar{x} > 0.92x_0 \\ \bar{x} < 1.14 \end{matrix} \\ 900 \cdot Q \cdot [\bar{x} - 1 + \sqrt{(\bar{x} - 1)^2 + \alpha \cdot \frac{\bar{x} - 0.92 \cdot x_0 - 0.08}{300 \cdot Q}}] & \bar{x} \geq 1.14 \\ 0 & \bar{x} \leq 0.92x_0 \end{cases} \quad (20)$$

Nach Gleichung 1 und 12 lauten dann die allgemeinen Formeln für die jeweiligen Rückstaulängen am Rotende und am Stauende unter instationärem und freiem Verkehr:

$$N_{RExx,in} = N_{GExx,in}(\alpha) + \beta \cdot (q \cdot C) \cdot (1 - \lambda) + \gamma \cdot (q \cdot C)^n \quad (21)$$

und

$$N_{SExx,in} = N_{GExx,in}(\alpha) + \beta \cdot (q \cdot C) \cdot \frac{(1-\lambda)}{1-\frac{q}{s}} + \gamma \cdot (q \cdot C)^n \quad (22)$$

Man kann auch die Gl. 19 durch andere Formeln (Akcelik 1980, Kimber-Hollis 1979 und Wu 1990 für andere Ganglinien) zur Berechnung der mittleren Rückstaulänge am Grünende unter instationärem und freiem Verkehr ersetzen und die 95%- und 99%-Rückstaulängen mit Gl. 19 bis 22 errechnen. Die Gl. 18 liefert aber realistischere Ergebnisse.

5. Berücksichtigung der Teilgebundenheit der Verkehrs bei der Berechnung der Rückstaulänge

Die Annahme, daß hintereinander fahrende Fahrzeuge gegenseitig keinen Einfluß aufeinander haben - beschrieben durch den Begriff "Freier Verkehr" - stimmt nicht immer mit den Tatsachen des realen Verkehrs überein, insbesondere bei hoch belasteten einspurigen Straßen. Ein Fahrzeug muß beim dichten Verkehr einen räumlichen bzw. zeitlichen Abstand zu dem vorausfahrenden Fahrzeug einhalten. Man spricht in diesem Fall von teilgebundenem Verkehr. Der geringste mögliche zeitliche Abstand in dem Verkehr, der auf die Signalanlage zufließt, wird als Mindestzeitlücke τ bezeichnet.

Nach Wu (1990) kann bei der Berechnung der Rückstaulänge die Teilgebundenheit im zufließenden Verkehr an einer Lichtsignalanlage durch einen Faktor Kg annäherungsweise berücksichtigt werden:

$$Kg = 1 - \frac{1 - (1 - q \cdot \tau)^2}{2 - x} \quad (23)$$

wobei τ die Mindestzeitlücke zwischen den hintereinander fahrenden Fahrzeugen ist. Je nach dem Fahrzeugtyp und je nach der Fahrmentalität des Fahrers kann die Mindestzeitlücke τ unterschiedlich sein. Wenn die Varianz σ_τ^2 der Verteilung der Mindestzeitlücken τ bekannt ist, kann der Verminderungsfaktor wie folgt berechnet werden (vgl. Wu, 1990):

$$\begin{aligned} Kg &= 1 - \frac{1 - (1 - \bar{\tau} \cdot q)^2 - q^2 \cdot \sigma_\tau^2}{2 - x} \\ &= 1 - \frac{2 \cdot q \cdot \bar{\tau} - (\bar{\tau}^2 + \sigma_\tau^2) \cdot q^2}{2 - x} \end{aligned} \quad (24)$$

Nach Böhm (1968) ist die mittlere Mindestzeitlücke $\bar{\tau} = 1.6$ sec. Die Varianz σ_τ^2 der erlangverteilten Mindestzeitlücken τ lautet demnach:

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{\bar{\tau}^2}{6} = \frac{1.6^2}{6} = 0.43 \quad \text{sec}^2$$

Setzt man $\bar{\tau} = 1.6 \text{ sec}$ und $\sigma_{\tau}^2 = 0.43 \text{ sec}^2$ in die Gl. 24 ein, erhält man

$$\begin{aligned} Kg &= 1 - \frac{1 - (1 - 1.6 \cdot q)^2 - q^2 \cdot 0.43}{2 - x} \\ &= 1 - \frac{3.2 \cdot q - 3 \cdot q^2}{2 - x} \end{aligned} \quad (25)$$

Kg ist immer größer als 0 und kleiner als 1, d.h. die Rückstaulänge wird durch die Teilgebundenheit des Zuflusses reduziert.

Ersetzt man den Faktor α durch $\alpha' = \alpha \cdot Kg$ in die Gleichungen in den vorhergehenden Kapiteln, erhält man die Formel zur Berechnung der Rückstaulänge unter Berücksichtigung der Teilgebundenheit des Zuflusses.

6. Ermittlung anderer Perzentilen der Rückstaulängen

In der vorhergehenden Kapiteln sind Gleichungen zur Ermittlung der 95%- und 99%-Rückstaulängen unter verschiedenen Verkehrsbedingungen vorgestellt worden. Andere Perzentilen der Rückstaulängen können anhand dieser beiden Rückstaulängen mit einer angemessenen Inter- bzw. Extrapolationsfunktion ermittelt werden.

Theoretisch soll die Verteilungsfunktion der Rückstaulängen als Inter- bzw. Extrapolationsfunktion eingesetzt werden. Da diese Verteilungsfunktion der Rückstaulängen an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen nicht bekannt bzw. nicht leicht darzustellen ist, wird hier eine Annäherungsfunktion zur Darstellung der Verteilung der Rückstaulängen verwenden. Es wird davon ausgegangen, daß die Verteilungsfunktion der Rückstaulängen aller Arten durch eine Funktion wie folgt annäherungsweise beschrieben werden kann:

$$P(n) = 1 - x^{A(B \cdot n + 1)} \quad (26)$$

Wobei sind A und B noch zu bestimmende Parameter.

Setzt man die 95%- und 99%-Rückstaulänge in die Gl. 26 ein, erhält man

$$\begin{cases} P(N_{95}) = 0.95 = 1 - x^{A(B \cdot N_{95} + 1)} \\ P(N_{99}) = 0.99 = 1 - x^{A(B \cdot N_{99} + 1)} \end{cases} \quad (27a)$$

Das entspricht

$$\begin{cases} 0.05 = x^{A(B \cdot N_{95} + 1)} \\ 0.01 = x^{A(B \cdot N_{99} + 1)} \end{cases} \quad (27b)$$

Löst man das Gleichungssystem Gl. 27 nach A und B auf, erhält man

$$\begin{aligned} A &= \frac{\ln(0.05) \cdot N_{99} - \ln(0.01) \cdot N_{95}}{\ln(x) \cdot (N_{99} - N_{95})} \\ B &= \frac{\ln(0.01) - \ln(0.05)}{\ln(0.05) \cdot N_{99} - \ln(0.01) \cdot N_{95}} \\ A \cdot B &= \frac{\ln(0.01) - \ln(0.05)}{\ln(x) \cdot (N_{99} - N_{95})} \end{aligned} \quad (28)$$

Nach Gl. 26 erhält man dann

$$\begin{aligned} N_\alpha &= N|_{P(n)=\alpha \cdot 100} \\ &= \frac{1}{A \cdot B} \left(\frac{\ln(1 - P(n))}{\ln(x)} - A \right) \\ &= \frac{\ln(x) \cdot (N_{99} - N_{95})}{\ln(0.01) - \ln(0.05)} \left(\frac{\ln(1 - P(n))}{\ln(x)} - \frac{\ln(0.05) \cdot N_{99} - \ln(0.01) \cdot N_{95}}{\ln(x) \cdot (N_{99} - N_{95})} \right) \\ &= \frac{\ln(1 - P(n)) \cdot (N_{99} - N_{95}) - (\ln(0.05) \cdot N_{99} - \ln(0.01) \cdot N_{95})}{\ln(0.01) - \ln(0.05)} \\ &= \frac{\ln(0.01) - \ln(1 - P(n))}{\ln(0.01) - \ln(0.05)} \cdot N_{95} - \frac{\ln(0.05) - \ln(1 - P(n))}{\ln(0.01) - \ln(0.05)} \cdot N_{99} \\ &\approx \left(2.86 + \frac{\ln(1 - P(n))}{1.61} \right) \cdot N_{95} - \left(1.86 + \frac{\ln(1 - P(n))}{1.61} \right) \cdot N_{99} \\ &\approx N_{95} - \left(1.86 + \frac{\ln(1 - P(n))}{1.61} \right) \cdot (N_{99} - N_{95}) \\ &\approx N_{95} - \left(1.86 + \frac{\ln(1 - \frac{\alpha}{100})}{1.61} \right) \cdot (N_{99} - N_{95}) \end{aligned} \quad (29)$$

Natürlich muß die ermittelte Rückstaulänge N_α immer größer als oder gleich 0 sein. Daher ist bei der Inter- bzw. Extrapolation der Rückstaulänge die Gleichung

$$N_{\alpha} = \begin{cases} 16 \\ N_{95} - (186 + \frac{\ln(1 - \frac{\alpha}{100})}{1.61}) \cdot (N_{99} - N_{95}) & \text{für } N_{\alpha} > 0 \\ 0 & \text{für } N_{\alpha} \leq 0 \end{cases} \quad (29a)$$

anzuwenden.

Z. B., man kann aus der Gl. 29a die 85%-Rückstaulänge ermitteln:

$$\begin{aligned} N_{85} &\approx N_{95} - (186 + \frac{\ln(1 - 0.85)}{1.61}) \cdot (N_{99} - N_{95}) \\ &\approx N_{95} - 0.68 \cdot (N_{99} - N_{95}) \end{aligned} \quad (30)$$

7. Zusammenfassung

Es wurden Gleichungen zur Berechnung der Rückstaulänge an Lichtsignalanlagen unter verschiedenen Bedingungen hergeleitet. Die Rückstaulängen können in folgenden Kategorien unterteilt werden:

1. Rückstaulänge unterteilt nach ihrer Percentile:

- mittlere Rückstaulänge
- 95%-Rückstaulänge
- 99%-Rückstaulänge

2. Rückstaulänge unterteilt nach den Zeitpunkten:

- Rückstaulänge am Grünende
- Rückstaulänge am Rotende
- Rückstaulänge am Stauende

3. Rückstaulänge unterteilt nach den Verkehrszuständen:

- unter stationärem Verkehr
- unter instationärem Verkehr
- unter freiem Verkehr
- unter teilgebundenem Verkehr

Die Formel zur Berechnung der Rückstaulänge kann in einer allgemeinen Form dargestellt werden:

$$N_{XXxx} = N_{GExx}(\alpha') + \beta' \cdot (q \cdot C) \cdot (1 - \lambda) + \gamma' \cdot (q \cdot C)^{n'} \quad (31)$$

Die Parameter $N_{G_{Exx}}(\alpha')$, α' , β' , γ' und n' werden nach den Tabellen 3 bis 8 errechnet. $N_{G_{Exx}}(\alpha')$ ist i.a. eine Funktion von α' .

Für stationären Verkehr

Tab. 3: Rückstaulänge am Grüende

lfd.	Rückstaulänge	$N_{G_{Exx}}(\alpha')$	α'	β'	γ'	n'
1.	N_{GE}	$\alpha' \cdot N_{GE}$	$1.00 \cdot Kg$	0	0.00	0.00
2.	N_{GE95}	$\alpha' \cdot N_{GE}$	$2.97 \cdot Kg$	0	1.29	0.26
3.	N_{GE99}	$\alpha' \cdot N_{GE}$	$4.65 \cdot Kg$	0	1.84	0.39

Tab. 4: Rückstaulänge am Rotende

lfd.	Rückstaulänge	$N_{G_{Exx}}(\alpha')$	α'	β'	γ'	n'
4.	N_{RE}	$\alpha' \cdot N_{GE}$	$1.00 \cdot Kg$	1.00	0.00	0.00
5.	N_{RE95}	$\alpha' \cdot N_{GE}$	$2.97 \cdot Kg$	1.20	1.29	0.26
6.	N_{RE99}	$\alpha' \cdot N_{GE}$	$4.65 \cdot Kg$	1.19	1.84	0.39

Tab. 5: Rückstaulänge am Stauende

lfd.	Rückstaulänge	$N_{G_{Exx}}(\alpha')$	α'	β'	γ'	n'
7.	N_{SE}	$\alpha' \cdot N_{GE}$	$1.00 \cdot Kg$	$K/(1-q/s)$	0.00	0.00
8.	N_{SE95}	$\alpha' \cdot N_{GE}$	$2.97 \cdot Kg$	$1.20 \cdot K/(1-q/s)$	1.29	0.26
9.	N_{SE99}	$\alpha' \cdot N_{GE}$	$4.65 \cdot Kg$	$1.19 \cdot K/(1-q/s)$	1.84	0.39

Für instationären Verkehr

Tab. 6: Rückstaulänge am Grüende

lfd.	Rückstaulänge	$N_{G_{Exx}}(\alpha')$	α'	β'	γ'	n'
10.	$N_{GE,in}$	$N_{GE,in}(\alpha')$	$1.00 \cdot Kg$	0	0.00	0.00
11.	$N_{GE95,in}$	$N_{GE95,in}(\alpha')$	$2.97 \cdot Kg$	0	1.29	0.26
12.	$N_{GE99,in}$	$N_{GE99,in}(\alpha')$	$4.65 \cdot Kg$	0	1.84	0.39

Tab. 7: Rückstaulänge am Rotende

lfd.	Rückstaulänge	$N_{GExx}(\alpha')$	α'	β'	γ'	n'
13.	$N_{RE,in}$	$N_{GE,in}(\alpha')$	$1.00 \cdot Kg$	1.00	0.00	0.00
14.	$N_{RE95,in}$	$N_{GE95,in}(\alpha')$	$2.97 \cdot Kg$	1.20	1.29	0.26
15.	$N_{RE99,in}$	$N_{GE99,in}(\alpha')$	$4.65 \cdot Kg$	1.19	1.84	0.39

Tab. 8: Rückstaulänge am Stauende

lfd.	Rückstaulänge	$N_{GExx}(\alpha')$	α'	β'	γ'	n'
16.	$N_{SE,in}$	$N_{GE,in}(\alpha')$	$1.00 \cdot Kg$	$K/(1-q/s)$	0.00	0.00
17.	$N_{SE95,in}$	$N_{GE95,in}(\alpha')$	$2.97 \cdot Kg$	$1.20 \cdot K/(1-q/s)$	1.29	0.26
18.	$N_{SE99,in}$	$N_{GE99,in}(\alpha')$	$4.65 \cdot Kg$	$1.19 \cdot K/(1-q/s)$	1.84	0.39

Mit

$$N_{GE} = \frac{\exp(-1.33\sqrt{s \cdot G} \cdot (1-x) / x)}{2(1-x)} \quad (32)$$

$$N_{GExx,in}(\alpha') = \begin{cases} 523.8 \cdot Q \cdot [1.09 \cdot \bar{x} - 1 + \sqrt{(1.09 \cdot \bar{x} - 1)^2 + \alpha' \cdot \frac{1.09 \cdot \bar{x} - x_0}{174.6 \cdot Q}}] & \begin{matrix} \bar{x} > 0.92x_0 \\ \bar{x} < 1.14 \end{matrix} \\ 900 \cdot Q \cdot [\bar{x} - 1 + \sqrt{(\bar{x} - 1)^2 + \alpha' \cdot \frac{\bar{x} - 0.92 \cdot x_0 - 0.08}{300 \cdot Q}}] & \bar{x} \geq 1.14 \\ 0 & \bar{x} \leq 0.92x_0 \end{cases} \quad (33)$$

$$K = \frac{1 - \frac{q}{s}}{1 - \frac{q}{s} \cdot \left(\frac{1}{l} - \frac{s}{Vs'} \right) / \left(\frac{1}{l} - \frac{q}{Vq'} \right)} \approx 0.9 \quad (34)$$

und

$$Kg = 1 - \frac{3.2 \cdot q - 3 \cdot q^2}{2 - x} \quad (35)$$

Für die 95%- und 99%-Rückstaulänge am Rot- und Stauende konnten unter verschiedenen Bedingungen Nomogramme hergestellt werden. Die Nomogramme zur Ermittlung von 95%-Rückstaulänge am Rotende wurden von Brilon e. a. (1994) für die Dimensionierung der Abbiegespuren an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen vorgeschlagen. Ein vollständiger

Satz dieser Nomogramme kann beim Autor angefordert werden. Die Nomogramme dort enthalten:

- 95%-Rückstaulänge unter **stationärem** und **freiem** Verkehr
- 95%-Rückstaulänge unter **stationärem** und **teilgebundenem** Verkehr
- 99%-Rückstaulänge unter **stationärem** und **freiem** Verkehr
- 99%-Rückstaulänge unter **stationärem** und **teilgebundenem** Verkehr

- 95%-Rückstaulänge unter **instationärem** und **freiem** Verkehr
- 95%-Rückstaulänge unter **instationärem** und **teilgebundenem** Verkehr
- 99%-Rückstaulänge unter **instationärem** und **freiem** Verkehr
- 99%-Rückstaulänge unter **instationärem** und **teilgebundenem** Verkehr

Die Nomogramme werden jeweils für die Umlaufzeiten $C=60, 70, 80$ und 90 s hergestellt.

Die hier hergeleiteten Formeln und Nomogramme sollen nach den Empfehlungen der Tabelle 9 angewendet werden.

Tab. 9 :Empfehlungen zur Anwendung der Formel und Nomogramme:

	Verkehr in der Spitzenstunde	Verkehr in der Normalstunde
mehrspurige Straße	instationärer und freier Verkehr Tab. 6, 7, 8 mit $K_g=1$	stationärer und freier Verkehr Tab. 3, 4, 5 mit $K_g=1$
einspurige Straße	instationärer und teilgebundener Verkehr Tab. 6, 7, 8 mit $K_g \neq 1$	stationärer und teilgebundener Verkehr Tab. 3, 4, 5 mit $K_g \neq 1$

"Spitzenstunde" bedeutet, daß die Verkehrsstärke nach dem betrachteten Zeitintervall deutlich, d.h. wenigstens 15% niedriger liegt als im Dimensionierungszeitraum. Für mehrspurige Straßen ist angenommen, daß sich der Verkehr an der Haltelinie gleichmäßig auf alle Fahrstreifen verteilt. "Normalstunde" bedeutet, daß im Bereich der betrachteten Stunde (d.h. auch vorher und nachher) die Verkehrsbedingungen etwa konstant sind.

Andere Perzentilen der Rückstaulängen aller Arten können durch die Inter- bzw. Extrapolationsfunktion annäherungsweise ermittelt werden:

$$N_{\alpha} = \begin{cases} N_{95} - \left(186 + \frac{\ln(1 - \frac{\alpha}{100})}{1.61}\right) \cdot (N_{99} - N_{95}) & \text{für } N_{\alpha} > 0 \\ 0 & \text{für } N_{\alpha} \leq 0 \end{cases} \quad (36)$$

Literaturverzeichnis

Akcelik, R.:

Time-dependent expressions for delay, stop rate and queue length at traffic signals.
Australian Road Research Board, No. 361-1, okt. 1980.

Brilon, W.; Wu, N.:

Delays at fixed-time traffic signal under time-dependent traffic conditions.
Traffic Engineering and Control. Dec. 1990.

Brilon, W.; Großmann, M.; Blanke, H.:

Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen (Deutsches HCM).

Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 669, 1994.

Böhm, H.:

Anwendung der Mont-Carlo Methode in der Straßenverkehrstechnik.
Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 73, 1968.

Kimber, R.M.; Hollis, E.M.:

Traffic queues and delays at road junctions.
TRRL Laboratory Report, LR 909, 1979.

Miller, A.J.:

Signalised intersections - capacity guide.

Australian Research Board Bulletin, No. 4, 1968, Reprinted as ARRB Research Report ARR No. 79, 1978.

Pöschl, P.; Waglechner:

Neue Tafeln für kritische Rückstauzahlen an Signalzufahrten bei Poisson-Zufluß.
Straßenverkehrstechnik, Heft 2, 1982.

Webster, F.V.:

Traffic Signal Setting.
Road Research Technical Paper, No. 39, HNSO, London, 1958.

Wu, N.:

Wartezeiten an festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen unter zeitlich veränderlichen (instationären) Verkehrsbedingungen.
Straßenverkehrstechnik, Heft 3, 1992.

Wu, N.:

Wartezeit und Leistungsfähigkeit von Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung von Instationarität und Teilgebundenheit des Verkehrs (Dissertation).

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 8, 1990.

Wu, N.:

Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen unter verschiedenen Verkehrsbedingungen.
Arbeitsblätter des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Nr. 6, 1992.