Stauwelle – Anleitung zur Simulation

Nov 6, 2026 · @Andreas

1. Zweck und Umfang

Die Simulation zeigt, wie aus einer einzigen, harmlosen Bremsung des ersten Fahrzeugs ein Stau entstehen kann, obwohl niemand einen Fehler macht und es kein Hindernis gibt. Auslöser ist allein die Reaktionszeit: Jedes Fahrzeug reagiert erst nach t_1 auf seinen Vorgänger und muss dann etwas stärker bremsen als dieser. Die Abweichung wächst von Fahrzeug zu Fahrzeug und läuft als Welle gegen die Fahrtrichtung durch die Kolonne.

Was die Simulation leistet

- Sie bildet eine Kolonne aus n Fahrzeugen auf einer Spur ab, die zunächst mit der Geschwindigkeit v_0 im Abstand s_0 fährt.
- Sie zeigt, wie weit die Bremswelle nach hinten reicht, wie stark die Fahrzeuge abbremsen, ob einzelne Fahrzeuge zum Stillstand kommen und wann die Kolonne wieder gleichmäßig fährt.
- Sie lässt dich die Parameter ändern und das Ergebnis sofort vergleichen, zum Beispiel Abstand, Reaktionszeit oder Bremsstärke.

Was sie bewusst vereinfacht

- Eine Fahrspur, keine Überholvorgänge, keine Spurwechsel, keine Steigung und keine Kurven.
- Alle Fahrzeuge sind gleich lang und folgen derselben Regel, es gibt keine unterschiedlichen Fahrertypen.
- Nur das Spitzenfahrzeug bremst, und zwar einmal. Danach fährt es konstant mit v_1 weiter.
- Bis zu 80 Fahrzeuge und höchstens 600 Sekunden Simulationszeit. Die Berechnung läuft in Schritten von 0,01 s im Browser, es werden keine Daten gesendet.

Die Zahlen sind daher keine Prognose für eine reale Straße. Sie zeigen den Mechanismus und das Verhältnis der Parameter zueinander.

2. Bedienung

Die Simulation startet beim Öffnen der Seite von selbst und läuft, bis du „Brake“ drückst. Vor dem Klick fährt die Kolonne unverändert mit v_0 im Abstand s_0.

1. Parameter prüfen oder ändern. Jede Änderung setzt die Simulation nach etwa einer Viertelsekunde auf den Anfang zurück.

2. „Brake“ drücken. Das Spitzenfahrzeug bremst mit der Bremsverzögerung a_1 von v_0 auf v_1 und fährt dann konstant weiter. Der Button ist danach gesperrt, bis die Simulation zurückgesetzt wird.
3. Der Welle zusehen und in den Diagrammen ablesen, wie weit und wie stark sie sich ausbreitet.
4. Mit „Zurücksetzen“ oder einer Parameteränderung von vorn beginnen.

Bedienelement	Wirkung
Brake	Löst die einmalige Bremsung des Spitzenfahrzeugs aus.
Pause / Weiter	Hält die Simulation an und setzt sie fort. Die Anzeigen bleiben stehen.
Zurücksetzen	Stellt die Kolonne in den Ausgangszustand und gibt „Brake“ wieder frei.
Tempo (0,5× bis 8×)	Ablaufgeschwindigkeit der Animation. Das Ergebnis ändert sich dadurch nicht, nur die Wartezeit. Standard ist 1×.
Weitere Parameter	Klappt fünf weitere Eingabefelder auf (aB, aA, L, ks1, ks2), siehe Abschnitt 3.

Automatische Stopps. Wenn alle Fahrzeuge wieder mit v_1 fahren und der Abstand s_0 bis auf 0,1 m hergestellt ist, pausiert die Simulation einmalig nach weiteren 3 s. „Weiter“ lässt sie weiterlaufen. Nach 600 s Simulationszeit endet sie ohne Fortsetzung.

Ungültige Eingaben. Ein Feld mit unzulässigem Wert wird rot umrandet, darunter erscheint ein Hinweis, und „Brake“ bleibt gesperrt, bis alle Werte gültig sind. Die zulässigen Bereiche stehen in Abschnitt 3.

3. Eingabewerte

Die Eingaben legen fest, wie dicht und wie schnell die Kolonne fährt, wie stark das Spitzenfahrzeug bremst und wie die Folgefahrzeuge reagieren. Der wichtigste Hebel ist das Produkt aus Geschwindigkeitssprung und Reaktionszeit: Jedes Folgefahrzeug verliert beim Bremsen etwa $(v_0 - v_1) \times t_1$ an Lücke, bevor es überhaupt reagiert. Mit den Standardwerten sind das 11,1 m/s × 0,3 s = 3,3 m pro Fahrzeug.

Mit **Lücke** ist in dieser Anleitung der Abstand zwischen dem Heck des Vorgängers und der Front des Fahrzeugs gemeint. Der Abstand von Front zu Front ist um die Fahrzeuglänge L größer.

Hauptparameter

Symbol	Eingabe	Standard	Zulässig	Einheit
n	Anzahl Fahrzeuge	20	ganze Zahl von 2 bis 80	Stk
s_0	Abstand (Lücke) am Start	60	mindestens 1	m
v_0	Fahrgeschwindigkeit vor dem Bremsen	120	mindestens 2	km/h
v_1	Geschwindigkeit des Spitzenfahrzeugs nach dem Bremsen	80	0 bis kleiner als v_0	km/h
t_1	Reaktionszeit der Folgefahrzeuge	0,3	0 bis 3	s
a_1	Bremsverzögerung des Spitzenfahrzeugs	2	0,5 bis 10	m/s²

- **n, Anzahl Fahrzeuge.** Zählt das Spitzenfahrzeug mit. Jedes Fahrzeug reagiert nur auf seinen Vorgänger, deshalb verhalten sich die ersten Fahrzeuge unabhängig von n immer gleich. n bestimmt nur, wie weit die Welle verfolgt wird. Wer sehen will, ob sich eine Welle aufschaukelt oder abklingt, braucht genügend Fahrzeuge hinter der Stelle, an der sie kippt.
- **s_0, Abstand.** Der Puffer der Kolonne und zugleich der Sollwert, den jedes Fahrzeug wiederherstellen will. Ein größerer Abstand dämpft die Welle, ein kleiner verstärkt sie. s_0 steckt außerdem in der Bremsformel (ks2 / s_0 × Lücke): Dort zählt der relative Lückenverlust. Derselbe Verlust von 3,3 m bremst bei s_0 = 20 m also deutlich stärker als bei s_0 = 100 m. Ist s_0 zu klein, kommen Fahrzeuge zum Stillstand oder die Lücke schrumpft auf Null.
- **v_0, Fahrgeschwindigkeit.** Startgeschwindigkeit und zugleich Obergrenze: Kein Fahrzeug fährt schneller als v_0. Die Dynamik hängt fast nur vom Unterschied $v_0 - v_1$ ab, nicht von den absoluten Werten. Die Höhe von v_0 entscheidet daher vor allem darüber, ob ein Fahrzeug bis auf 0 km/h fällt.
- **v_1, Geschwindigkeit nach dem Bremsen.** Der Geschwindigkeitssprung $v_0 - v_1$ ist der Anstoß für die Welle. Ein kleines v_1 erzeugt einen tiefen Einbruch. Bei v_1 = 0 steht das Spitzenfahrzeug, die Kolonne kommt nie zur Ruhe, die Simulation läuft bis 600 s.
- **t_1, Reaktionszeit.** Maßgeblich für den Lückenverlust $(v_0 - v_1) \times t_1$. Mit t_1 = 0 reagieren alle sofort, die Welle bleibt schwach. Schon bei 0,6 s kippt die Kolonne bei den übrigen Standardwerten in den Stillstand.

- **a_1, Bremsverzögerung.** Bestimmt, wie schnell das Spitzenfahrzeug von v_0 auf v_1 kommt. Die Bremsdauer beträgt $(v_0 - v_1) / a_1$, bei den Standardwerten 5,6 s. Sanftes Bremsen (kleines a_1) streckt den Anstoß in die Länge und die Welle fällt flacher aus. Ab etwa 4 m/s² ändert sich kaum noch etwas.

Weitere Parameter

Diese fünf Felder sind unter „Weitere Parameter“ eingeklappt. Sie beschreiben die Grenzen und die Reaktionsstärke der Folgefahrzeuge.

Symbol	Eingabe	Standard	Zulässig	Einheit
aB	Maximale Bremsung der Folgefahrzeuge	10	0,5 bis 10	m/s²
aA	Maximale Beschleunigung der Folgefahrzeuge	1,5	0,1 bis 10	m/s²
L	Fahrzeuglänge	4,5	2 bis 20	m
ks1	Reaktionsstärke beim Beschleunigen	0,05	0 bis 5	1/s²
ks2	Reaktionsstärke beim Bremsen	5	0 bis 50	m/s²

- **aB, maximale Bremsung.** Obergrenze der Verzögerung eines Folgefahrzeugs. Beim Standardwert 10 m/s² greift sie praktisch nie. Ein kleineres aB flacht die Bremsung ab und dämpft damit die Welle. Bei kurzen Abständen oder langer Reaktionszeit verhindert es im Test den Stillstand (Abschnitt 7).
- **aA, maximale Beschleunigung.** Obergrenze, wie schnell ein Fahrzeug nach dem Tief wieder aufholen darf. Sie greift nur, wenn die Formel mehr verlangen würde. Ein kleines aA verlängert die Erholung der Kolonne.
- **L, Fahrzeuglänge.** Verändert die Länge der Kolonne und die Darstellung, aber nicht die Dynamik, weil die Regelung auf die Lücke (Heck zu Front) reagiert.
- **ks1, Reaktionsstärke beim Beschleunigen.** Gewicht, mit dem ein Fahrzeug eine falsche Lücke korrigiert, solange der Vorgänger nicht langsamer ist als es selbst. Ein kleiner Wert gleicht sanft aus, ein großer Wert lässt die Kolonne überschwingen und verstärkt die Welle. Bei ks1 = 0 gleicht die Kolonne die Lücke praktisch nie wieder aus.
- **ks2, Reaktionsstärke beim Bremsen.** Gewicht, mit dem ein Fahrzeug auf Lückenverlust mit Bremsen antwortet. Ein großer Wert bremst schon bei kleinem Verlust hart, baut die Lücke schnell wieder auf, lässt die Welle aber wachsen. Ein kleiner Wert bremst schwach, die Welle bleibt flach, die Erholung dauert länger.

Feste Modellkonstante

Das Gewicht kv = 1,0 1/s der Relativgeschwindigkeit ist nicht einstellbar. Es sorgt dafür, dass jedes Fahrzeug seine Geschwindigkeit an die seines Vorgängers anpasst.

4. Ergebniswerte

Unter der Fahrbahn stehen fünf Kennzahlen und eine Textzeile. Sie zeigen den aktuellen Zustand der Simulation und werden etwa zehnmal pro Sekunde aktualisiert. Ob ein Stau entstanden ist, erkennst du an „Stehende Fahrzeuge“, wie schlimm es war an „Langsamstes Fahrzeug“ und „Kleinster Abstand“.

Anzeige	Bedeutung	So liest du den Wert
Zeit	Simulationszeit seit Start oder Zurücksetzen in Sekunden. Sie läuft auch vor dem Klick auf „Brake“.	Die Bremsung beginnt bei der Zeit, die beim Klick angezeigt wird. Im Weg-Zeit-Diagramm ist dieser Punkt rot markiert.
Spitzenfahrzeug	Aktuelle Geschwindigkeit von Fahrzeug 1 in km/h.	Zeigt v_0 bis zum Klick, fällt dann mit a_1 auf v_1 und bleibt dort.
Langsamstes Fahrzeug	Niedrigste aktuelle Geschwindigkeit aller Fahrzeuge, dazu die Nummer des Fahrzeugs.	Wandert die Nummer mit der Zeit nach hinten, läuft die Welle durch die Kolonne. Ein Wert unter v_1 heißt: Die Welle ist stärker als der Anstoß.
Stehende Fahrzeuge	Anzahl der Fahrzeuge, die gerade stehen (unter 0,2 km/h), im Verhältnis zu n.	Ab 1 steht ein Stau. Der Wert ist aktuell, nicht aufsummiert: Er sinkt wieder, wenn sich der Stau auflöst.
Kleinster Abstand	Kleinste Lücke zwischen zwei Fahrzeugen seit Start oder Zurücksetzen. Startwert ist s_0.	Ein Wert nahe 0 heißt Beinahe-Kollision oder Auffahren. Je kleiner der Wert, desto knapper war es.

Textzeile. Unter den Kennzahlen fasst ein Satz den Verlauf zusammen und passt sich der Phase an:

- Vor dem Klick: Hinweis auf v_0, s_0 und v_1.
- Nach dem Klick, solange niemand steht: Nummer des letzten Fahrzeugs, das die Welle erreicht hat, und der tiefste bisher erreichte Wert.

- Sobald ein Fahrzeug steht: Nummer des ersten Fahrzeugs im Stillstand und die Zeit nach dem Bremsen, dazu die aktuelle Zahl der stehenden Fahrzeuge oder der Satz „Der Stau hat sich aufgelöst“.
- Bei Unterschreiten des Mindestabstands: der Hinweis auf Auffahrunfälle. Die Simulation lässt die Fahrzeuge dann nicht überlappen und hält sie bei etwa 0,05 m Abstand.
- Zum Schluss: die Zeit nach dem Bremsen, nach der alle wieder mit v_1 fahren und der Abstand s_0 hergestellt ist.

Beruhigt. Als „beruhigt“ gilt die Kolonne, wenn mindestens 2 s nach der Bremsung vergangen sind, jede Geschwindigkeit höchstens 0,07 km/h von v_1 abweicht und jede Lücke höchstens 0,1 m von s_0. Die Zeit bis dahin ist ein Maß für die Dauer der Staufolgen.

5. Diagramme

Vier Ansichten zeigen dieselbe Simulation aus verschiedenen Blickwinkeln. Die Farbe bedeutet überall dasselbe: Sie folgt der Geschwindigkeit des Fahrzeugs von 0 km/h (rot) über orange und gelb bis v_0 (blau). Die Legende steht oben rechts im Fahrbahn-Feld.

Fahrbahn

Draufsicht auf die Kolonne, Fahrtrichtung nach rechts. Fahrzeuge sind maßstäblich mit der Länge L gezeichnet und tragen ihre Nummer, sobald genug Platz ist. Ein roter Streifen am Heck bedeutet: Das Fahrzeug bremst gerade mit mehr als 0,3 m/s². „Spitze“ markiert Fahrzeug 1. Unten stehen ein Maßstab in Metern und die Gesamtlänge der Kolonne. Die Ansicht folgt der Kolonne und zoomt so, dass alle Fahrzeuge im Bild bleiben.

Worauf achten: Wo Fahrzeuge rot werden und das Bremslicht zeigen, läuft die Welle gerade durch. Die Lücken zwischen den Fahrzeugen schrumpfen dort sichtbar.

Geschwindigkeit je Fahrzeug

Ein Balken pro Fahrzeug zeigt die aktuelle Geschwindigkeit in km/h. Fahrzeug 1 steht ganz rechts, wie auf der Fahrbahn, das letzte Fahrzeug links. Zwei gestrichelte Linien markieren v_0 und v_1. Der dunkle Strich in jedem Balken ist der Tiefstwert, den dieses Fahrzeug seit dem Bremsen erreicht hat. Fahre mit dem Zeiger über einen Balken, dann stehen Geschwindigkeit, Tiefstwert, Beschleunigung und Lücke des Fahrzeugs unter dem Diagramm.

Worauf achten: Die Tiefstwert-Striche zeichnen das Profil der Welle. Fallen sie von Fahrzeug zu Fahrzeug nach hinten ab, schaukelt sich die Welle auf. Liegen sie alle bei v_1, ist sie abgeklungen. Ein Strich bei 0 heißt: Dieses Fahrzeug stand.

Beschleunigung je Fahrzeug

Ein Balken pro Fahrzeug zeigt die aktuelle Beschleunigung in m/s²: Grün steht für Beschleunigen, Rot für Bremsen, die Nulllinie liegt dazwischen. Die Reihenfolge ist wie im Geschwindigkeitsdiagramm. Die Skala ist bewusst ungleich: Nach oben reicht sie nur wenig über aA, nach unten bis über aB oder a_1, damit kleine Beschleunigungen lesbar bleiben.

Angezeigt wird die tatsächliche Beschleunigung. Sie schließt alle Begrenzungen ein: aB, aA, $v \geq 0$, $v \leq v_0$ und den Schutz vor Überlappung. Kurze Spitzen können deshalb höher ausfallen als aB, wenn die Simulation ein Auffahren verhindert.

Worauf achten: Während das Spitzenfahrzeug bremst, steht sein Balken bei $-a_1$. Die roten Balken der Folgefahrzeuge setzen jeweils um t_1 verzögert ein und wandern nach links. Grüne Balken markieren die Erholung, wenn die Fahrzeuge die Lücke wieder aufbauen.

Weg-Zeit-Diagramm

Waagerecht läuft die Zeit in Sekunden, senkrecht der Abstand hinter dem Spitzenfahrzeug in Metern (von Front zu Front, 0 oben, nach unten wachsend). Jede Linie ist ein Fahrzeug und ist nach seiner Geschwindigkeit gefärbt. Eine rot gestrichelte Linie markiert den Moment der Bremsung, eine senkrechte Linie die aktuelle Zeit. Die Achsen wachsen mit: Die Zeitachse verdoppelt sich ab etwa 60 s, die Abstandsachse passt sich der Kolonnenlänge an.

Worauf achten:

- Eine waagerechte Linie heißt: Das Fahrzeug fährt genauso schnell wie das Spitzenfahrzeug, der Abstand ändert sich nicht.
- Eine Linie, die nach unten abknickt, gehört zu einem Fahrzeug, das langsamer ist als die Spitze und zurückfällt.
- Der Abstand zwischen zwei benachbarten Linien ist der Frontabstand, also s_0 plus L am Start. Er schrumpft in der Welle.
- Die roten und orangen Abschnitte bilden zusammen einen schrägen Streifen. Je steiler er nach unten verläuft, desto schneller läuft die Welle nach hinten.

6. Modell

Jedes Folgefahrzeug regelt seine Beschleunigung aus zwei Größen: dem Geschwindigkeitsunterschied zum Vorgänger und der Lücke. Beide sieht es mit der Verzögerung t_1. Am Start fahren alle mit v_0 und der Lücke s_0, dort ist die Beschleunigung aller Fahrzeuge null.

Spitzenfahrzeug. Nach dem Klick auf „Brake“ gilt, solange v größer als v_1 ist:

```
a = −a₁
```

Danach fährt es mit a = 0 konstant weiter. Die Bremsdauer beträgt $(v_0 - v_1) / a_1$.

Folgefahrzeuge. Alle Größen stammen vom Zeitpunkt $t - t_1$. Ist der Vorgänger langsamer als das Fahrzeug selbst, gilt die Bremsformel:

```
a = kv · (v_vor − v) + (ks2 / s₀) · s − ks2
```

Sonst gilt die Beschleunigungsformel:

```
a = kv · (v_vor − v) + ks1 · (s − s₀)
```

Darin ist s die Lücke, v die eigene Geschwindigkeit und v_vor die des Vorgängers. Die Standardwerte sind kv = 1,0 1/s, ks1 = 0,05 1/s² und ks2 = 5 m/s². Der Bremsterm ks2 / s_0 × s − ks2 lässt sich auch als ks2 × (s / s_0 − 1) lesen. Er ist null bei s = s_0, −ks2/2 bei halber Lücke und −ks2 bei Lücke 0.

Begrenzungen.

- Die Beschleunigung eines Folgefahrzeugs liegt zwischen −aB und +aA.
- Die Geschwindigkeit bleibt zwischen 0 und v_0. Es gibt keine Rückwärtsfahrt.
- Die Lücke wird nie kleiner als 0,05 m. Unterschreitet ein Fahrzeug das, setzt die Simulation es zurück, begrenzt seine Geschwindigkeit auf die des Vorgängers und zeigt den Hinweis auf Auffahrunfälle.

Wie die Welle entsteht. Beim Bremsen des Vorgängers verliert ein Folgefahrzeug während der Reaktionszeit etwa $(v_0 - v_1) \times t_1$ an Lücke. Um die Lücke wieder aufzuweiten, muss es deshalb nicht nur die Geschwindigkeit des Vorgängers annehmen, sondern kurz noch langsamer werden. Das nächste Fahrzeug sieht diesen stärkeren Einbruch und muss wiederum noch etwas mehr nachgeben. Der Einbruch wächst von Fahrzeug zu Fahrzeug, bis die ersten stehen. Die Welle läuft entgegen der Fahrtrichtung durch die Kolonne.

Numerik. Die Simulation rechnet in Zeitschritten von 0,01 s mit einer trapezförmigen Integration. Die Reaktionsverzögerung entsteht aus einem Speicher der letzten t_1 / 0,01 Zeitschritte jedes Fahrzeugs.

7. Einfluss der Eingabewerte auf die Ergebnisse

Die Tabelle zeigt, wie sich das Ergebnis ändert, wenn jeweils ein Wert vom Basisfall abweicht. Alle anderen Werte bleiben auf ihrem Standard: n = 20, s_0 = 60 m, v_0 = 120 km/h, v_1 = 80 km/h, t_1 = 0,3 s, a_1 = 2 m/s², aB = 10 m/s², aA = 1,5 m/s², L = 4,5 m, ks1 = 0,05 1/s², ks2 = 5 m/s². Die Werte stammen aus Testläufen mit derselben Rechnung wie in der App, du

kannst sie mit den Eingabefeldern nachstellen. „Tiefster Wert“ ist die niedrigste Geschwindigkeit, die irgendein Fahrzeug nach dem Bremsen erreicht. „Steht“ zählt die Fahrzeuge, die dabei zum Stillstand kamen.

Änderung	Tiefster Wert	Steht	Kleinster Abstand	Ruhig nach
Basisfall	40 km/h (Fz. 20)	0	43,1 m	103 s
s_0 = 20 m	0 km/h (Fz. 20)	1	0,1 m, Auffahren	87 s
s_0 = 30 m	27 km/h	0	11,5 m	90 s
s_0 = 40 m	35 km/h	0	22,5 m	92 s
s_0 = 100 m	40 km/h	0	83,1 m	125 s
t_1 = 0 s	50 km/h	0	47,1 m	105 s
t_1 = 0,1 s	48 km/h	0	46,1 m	104 s
t_1 = 0,6 s	0 km/h (Fz. 16)	5	26,4 m	104 s
t_1 = 1,0 s	0 km/h (Fz. 7)	14	13,8 m	216 s
v_1 = 100 km/h	79 km/h	0	51,1 m	93 s
v_1 = 60 km/h	5 km/h	0	36,3 m	109 s
v_1 = 40 km/h	0 km/h (Fz. 14)	7	34,2 m	107 s
v_0 = 80, v_1 = 40 km/h	0 km/h (Fz. 20)	1	43,1 m	103 s
v_0 = 160, v_1 = 120 km/h	80 km/h	0	43,1 m	103 s
a_1 = 0,5 m/s²	60 km/h	0	50,9 m	110 s
a_1 = 1 m/s²	47 km/h	0	45,6 m	106 s
a_1 = 8 m/s²	37 km/h	0	42,1 m	102 s
ks2 = 1 m/s²	47 km/h	0	43,9 m	168 s
ks2 = 10 m/s²	27 km/h	0	41,5 m	90 s
ks2 = 20 m/s²	0 km/h (Fz. 18)	3	35,9 m	94 s
ks1 = 0 1/s²	69 km/h	0	48,4 m	nicht erreicht
ks1 = 0,3 1/s²	0 km/h (Fz. 10)	11	34,5 m	209 s
ks1 = 1 1/s²	0 km/h (Fz. 4)	17	33,3 m	328 s
aB = 2 m/s²	38 km/h	0	41,4 m	107 s

Änderung	Tiefster Wert	Steht	Kleinster Abstand	Ruhig nach
aA = 0,5 m/s²	40 km/h	0	43,1 m	104 s
L = 2 m oder 10 m	40 km/h	0	43,1 m	103 s
n = 10	64 km/h (Fz. 10)	0	48,1 m	95 s
n = 40	0 km/h (Fz. 32)	9	32,8 m	152 s
n = 80	0 km/h (Fz. 32)	49	32,4 m	231 s

Was die Tabelle zeigt

- **Reaktionszeit t_1 und Abstand s_0 entscheiden.** Von 0,3 auf 0,6 s kippt die Kolonne in den Stillstand, von 60 auf 20 m ebenfalls. Größere Abstände puffern die Welle, kleine verstärken sie.
- **Der Sprung $v_0 - v_1$ zählt, nicht die absoluten Werte.** Mit 80 → 40 km/h und 120 → 80 km/h ist der Verlauf bis auf die Verschiebung um 40 km/h identisch. Deshalb steht bei 80 → 40 km/h ein Fahrzeug, bei 120 → 80 km/h nicht.
- **Sanftes Bremsen hilft, hartes bringt ab etwa 4 m/s² nichts mehr.** a_1 = 0,5 m/s² hebt den tiefsten Wert von 40 auf 60 km/h, a_1 = 8 m/s² senkt ihn nur noch um 3 km/h.
- **ks2 wirkt in beide Richtungen.** Ein größerer Wert baut die Lücke schneller wieder auf (Ruhe nach 90 s statt 168 s bei ks2 = 1), lässt die Welle aber tiefer einbrechen. Bei ks2 = 20 steht schon ein Teil der Kolonne.
- **ks1 kann die Kolonne instabil machen.** Mit ks1 = 0,3 stehen 11 Fahrzeuge, mit ks1 = 1 sind es 17 und die Kolonne braucht 328 s zur Ruhe. Mit ks1 = 0 wird die Lücke praktisch nie wieder ausgeglichen.
- **aA und aB sind Grenzen, keine Treiber.** Im Basisfall greift aA nicht. Bei t_1 = 0,6 s verlängert aA = 0,5 m/s² die Erholung von 104 auf 204 s. Ein kleines aB verhindert den Stillstand: aB = 2 m/s² bei t_1 = 0,6 s, aB = 3 m/s² bei s_0 = 20 m.
- **Die Fahrzeuglänge L verändert das Ergebnis nicht.** Sie wirkt nur auf Darstellung und Kolonnenlänge.
- **Mehr Fahrzeuge zeigen mehr Welle.** Bei n = 10 reicht der Einbruch bis 64 km/h, bei n = 40 und 80 steht ein Teil der Kolonne. Die ersten Fahrzeuge verhalten sich unabhängig von n gleich, n macht nur sichtbar, wie weit die Welle wächst.

8. Grenzen des Modells und Hinweise

Die Ergebnisse gelten für dieses Modell und sind keine Prognose für eine reale Straße. Sie zeigen, welche Größen den Stau treiben und in welcher Reihenfolge.

- **Vereinfachtes Fahrverhalten.** Alle Fahrer haben dieselbe Reaktionszeit und dieselbe Regel. Sie schauen nur auf den direkten Vorgänger, nicht auf mehrere Fahrzeuge voraus. Reale Kolonnen dämpfen Wellen oft besser, weil Fahrer vorausschauen.
- **Gewählte Konstanten.** kv, ks1 und ks2 sind so gewählt, dass die Welle sichtbar wird. Sie sind nicht an Messdaten angepasst.
- **Auffahren ist kein Ergebnis.** Sobald der Hinweis auf Auffahrunfälle erscheint, hält die Simulation die Fahrzeuge künstlich auf 0,05 m Abstand. Alles danach zeigt eine Kolonne, die so nicht fahren würde.
- **Unrealistische Kombinationen.** 120 km/h bei 20 m Lücke oder eine Bremsverzögerung von 8 m/s² sind zulässig, dienen aber dem Vergleich und nicht dem Nachbau einer Verkehrslage.
- **Eine Bremsung, eine Spur.** Es gibt keine Spurwechsel, keine erneute Bremsung und keine Steigung. Nach der Beruhigung fährt die Kolonne bis zum Ende der Simulation mit v_1 weiter.
- **Stillstand und Beruhigung sind Schwellen.** Ein Fahrzeug zählt unter 0,2 km/h als stehend. Die Kolonne gilt als beruhigt, wenn Geschwindigkeiten bis auf 0,07 km/h und Lücken bis auf 0,1 m stimmen. Mit anderen Schwellen würden die Zeiten etwas anders ausfallen.
- **Zeitlimit.** Nach 600 s endet die Simulation. Bei $v_1 = 0$ oder ks1 = 0 wird die Beruhigung nicht erreicht.

Tipp zum Vergleichen. Ändere immer nur einen Wert und setze danach mit „Brake“ neu an. Beobachte zuerst „Stehende Fahrzeuge“ und „Kleinster Abstand“, dann im Weg-Zeit-Diagramm, wie weit sich der rote Streifen nach hinten zieht.