

A Unifying Approach to the Dynamics of Production, Supply, and Traffic Networks

Dirk Helbing

Institute for Transport & Economics
Faculty of Traffic Sciences
Dresden University of Technology

www.helbing.org

Frankfurter Allgemeine

Natur und Wissenschaft

20-03-2002

Wie Chiphersteller von Fußgängern lernen

Neue Bauelemente für die Halbleitertechnik / Logische Operationen mit magnetischen Pulsen

Die Erkenntnisse der modernen Physik haben eine technische Entwicklung ermöglicht, die unser Leben tiefgreifend verändert hat. Ganz gleich, ob wir im Internet surfen, mit dem Handy Aktienkurse abfragen oder durch Sensoren vor Autounfällen bewahrt werden, immer steht neuestes physikalisches Know-how dahinter. Doch die Physiker untersuchen in zunehmendem Maße auch Vorgänge wie Verkehrsstaus, Kursentwicklungen auf Märkten oder Produktionsabläufe in Chipfabriken, die scheinbar nichts mit der Physik zu tun haben. Welche Erfolge die physikalische Forschung erzielt hat und vor welchen Herausforderungen sie steht, ist auf einer Tagung deutlich geworden, die von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in der vergangenen Woche in Regensburg veranstaltet wurde.

In etwa zwanzig Jahren wird die herkömmliche Halbleitertechnik an ihre Grenzen stoßen. Dann werden sich die gängigen elektronischen Bauelemente nicht mehr weiter verkleinern lassen. Deshalb untersuchen schon jetzt zahlreiche Forscher die Funktionsweise neuartiger Bauelemente. So lassen sich einzelne Elektronen beispielsweise in sogenannten Quantenpunkten festhalten, wie Jörg Kotthaus von der Universität München berichtete. Schließt man einen Quantenpunkt an einen Stromkreis, fließen einzelne Elektronen durch den Quantenpunkt hindurch. Mit einer zusätzlichen Elektrode läßt sich dieser Strom

„elektronengenau“ steuern. Bisher arbeiten solche Einzelelektronen-Transistoren nur bei extrem tiefen Temperaturen. Erst wenn es gelingt, ihre Abmessungen auf etwa zehn Nanometer zu verringern, wird man sie auch bei Zimmertemperatur verwenden können. Die Forscher glauben, daß dies in zehn bis fünfzehn Jahren möglich sein wird.

Bringt man mehrere Elektronen auf einen Quantenpunkt, so ordnen sie sich auf ihm in ähnlicher Weise an wie die Elektronen in einem Atom. Ein Quantenpunkt wird deshalb auch als ein künstliches Atom bezeichnet. Zwei nebeneinander liegende Quantenpunkte können sich ein Elektron teilen und dadurch ein künstliches Molekül bilden. Das Elektron befindet sich dabei in einem Quantenzustand, mit dem sich die Informationsmenge von einem Quantenbit (Qubit) speichern läßt. Aus mehreren solcher künstlicher Moleküle könnte man vielleicht in fernerer Zukunft einen Quantencomputer herstellen. Gegenwärtig zerfallen die Qubits jedoch schon nach kurzer Zeit, wodurch die Quanteninformationen verlorengehen.

Elektronen tragen nicht nur eine elektrische Ladung, sie sind auch winzige Magnete. Zahlreiche Forscher entwickeln elektronische Bauelemente, die die magnetischen Eigenschaften der Elektronen ausnutzen. So haben Russell Cowburn und seine Mitarbeiter von der Universität Durham in Großbritannien Schaltkreise hergestellt, in de-

nen sich statt elektrischer Ströme magnetische Pulse bewegen. Die Schaltkreise bestehen aus Drähten, die nur etwa hundert Nanometer dick und in eine Richtung magnetisiert sind. Wird das Ende eines solchen Drahtes einem entgegengerichteten Magnetfeld ausgesetzt, kommt es zu einem Dominoeffekt. Das Magnetfeld löst am Drahtende eine Ummagnetisierung aus, die sich durch den ganzen Draht fortpflanzt. Mit diesen magnetischen Pulsen hat man inzwischen einige zehntausend logische Operationen fehlerfrei ausgeführt.

Auch bei dem Bauelement, das Ralf Richter bei Siemens in Erlangen entwickelt hat, spielt der Magnetismus eine wichtige Rolle. In dem Bauteil durchqueren die Elektronen drei aufeinanderliegende dünne Schichten, deren oberste und unterste magnetisch sind und den Strom leiten. Dazwischen liegt eine nichtleitende Schicht, durch die die Elektronen „tunneln“ müssen. Sind die beiden äußersten Schichten in gleicher Richtung magnetisiert, können die Elektronen ohne Schwierigkeit die isolierende Schicht durchdringen. Sind die äußeren Schichten jedoch entgegengesetzt magnetisiert, wird das Tunneln erschwert. Ändert man die Magnetisierungsrichtung der obersten Schicht, kann man den Elektronenstrom vergrößern oder verkleinern. Der Physiker hat in seiner Doktorarbeit sechs solcher magnetischen Stromschalter zu einem logischen Bauelement verknüpft, des-

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Fortsetzung von der vorigen Seite

Stauforschung genutzt

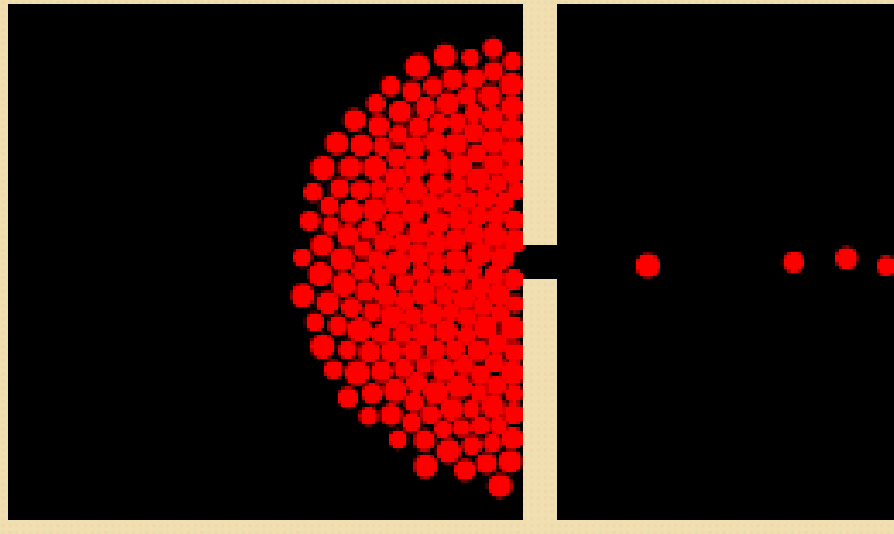
sen Funktionsweise innerhalb einiger tausendstel Sekunden umprogrammiert werden kann. Das Ziel dieser Forschung ist ein Mikrochip, dessen Architektur den Anforderungen kurzfristig angepaßt werden kann.

Daß man auch Erfahrungen aus dem Verkehr auf Autobahnen und aus Fußgängerströmen in Innenstädten für die Produktion von Mikrochips nutzen kann, erläuterte Dirk Helbing von der Technischen Universität Dresden. Es ist ein bekanntes Phänomen, daß man besonders langsam vorankommt, wenn es alle besonders eilig haben. In Panik geratene Fußgänger behindern einander und blockieren dadurch die Fluchtwege. Autofahrer, die einen Stau auf der Autobahn erleichtert hinter sich lassen, beschleunigen häufig zu stark und erzeugen prompt den nächsten Stau, der gewissermaßen aus dem Nichts entsteht. Mit Computersimulationen und physikalischen Verfahren kann man inzwischen recht genau vorhersagen, unter welchen Bedingungen es zu einem Stau kommt und wie sich der Stau entwickelt. Dabei hat sich gezeigt, daß starker Verkehr wesentlich besser fließt, wenn alle etwas langsamer fahren.

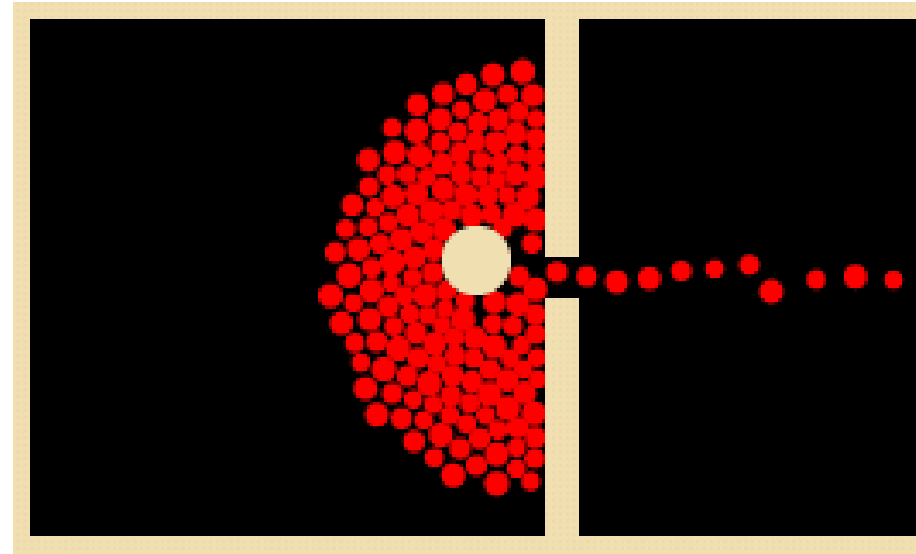
Das Motto „Langsamer ist schneller“ hat sich nun auch bei der Produktion von Mikrochips bewährt. Die komplizierten Strukturen der Chips stellt man in zahlreichen Schritten vollautomatisch her. Dazu werden tellergroße Scheiben aus einem halbleitenden Material mit unterschiedlichen Substanzen bedampft, mit lichtempfindlichen Lacken überzogen, belichtet, in ätzende Bäder getaucht und gesäubert und abermals belichtet. Ein Greifer transportiert die Scheiben einzeln zwischen den Stationen hin und her. Wartezeiten sind dabei nicht zu vermeiden. Um einen möglichst großen Durchsatz zu erreichen, hatte man bisher die einzelnen Arbeitsschritte so schnell wie möglich absolviert. Doch jetzt konnte Dirk Helbing in Zusammenarbeit mit Infineon zeigen, daß es dabei zu Staus im Produktionsablauf gekommen ist, die den Verkehrsstaus ähnelten. Die Staus lassen sich indes vermeiden, wenn man alles etwas gemächlicher angeht. Die Produktion von Mikrochips konnte dadurch bis um 30 Prozent erhöht werden.

RAINER SCHIARE

Physical interactions and friction effects
due to uncontrolled rush and pushy behavior



Faster-is-slower effect

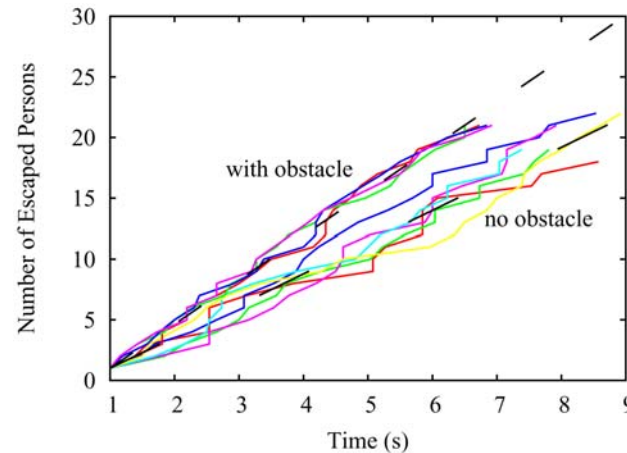
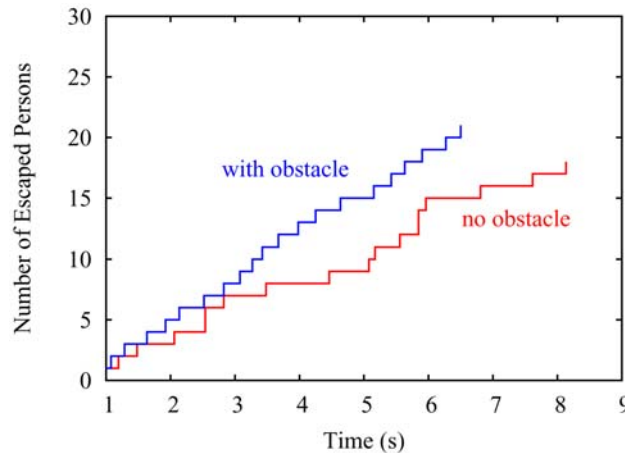


Obstacles can improve outflow



Learning from pedestrians

D. H., I. Farkas, and T. Vicsek, Nature **407**, 487 (2000).

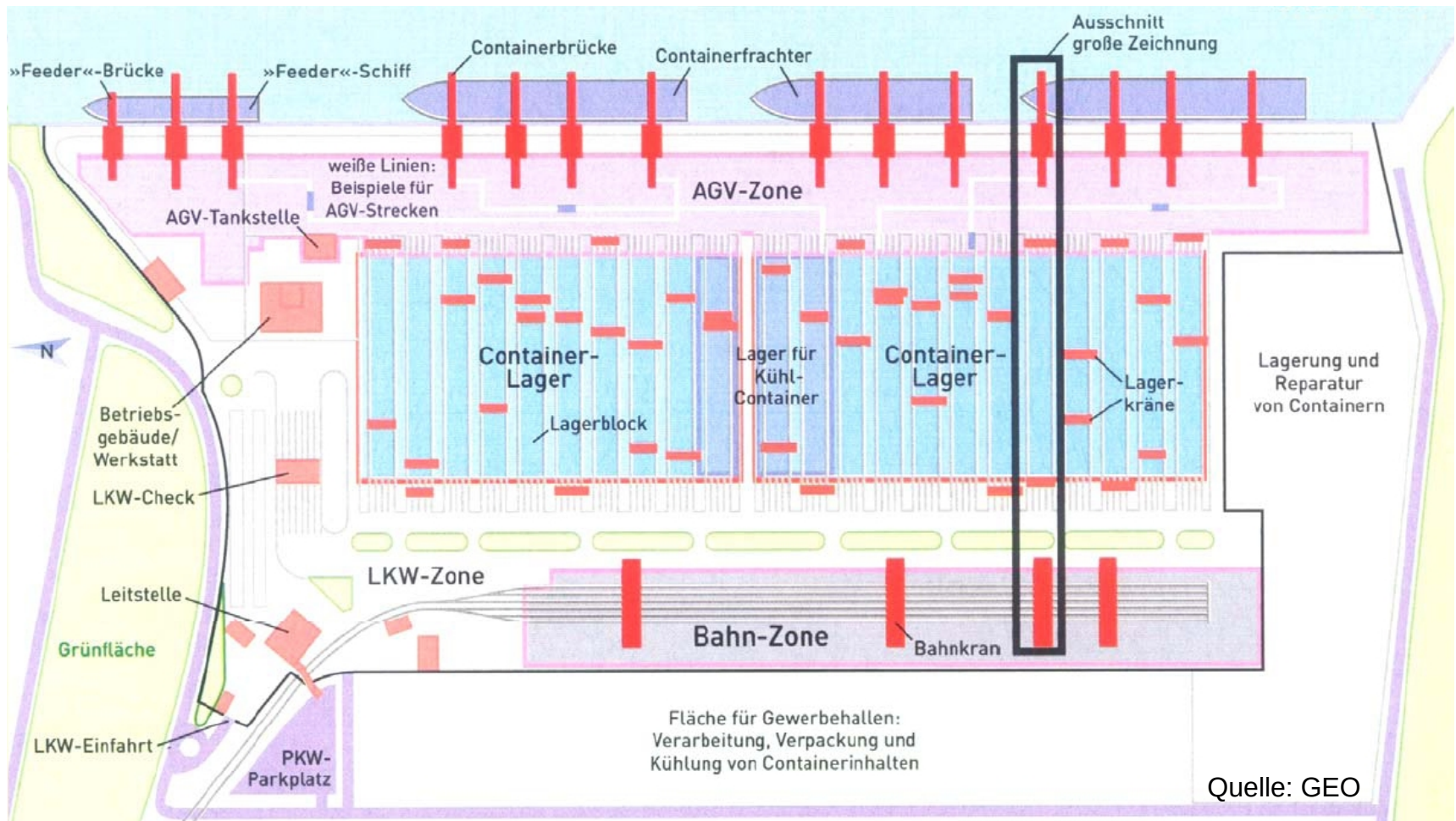


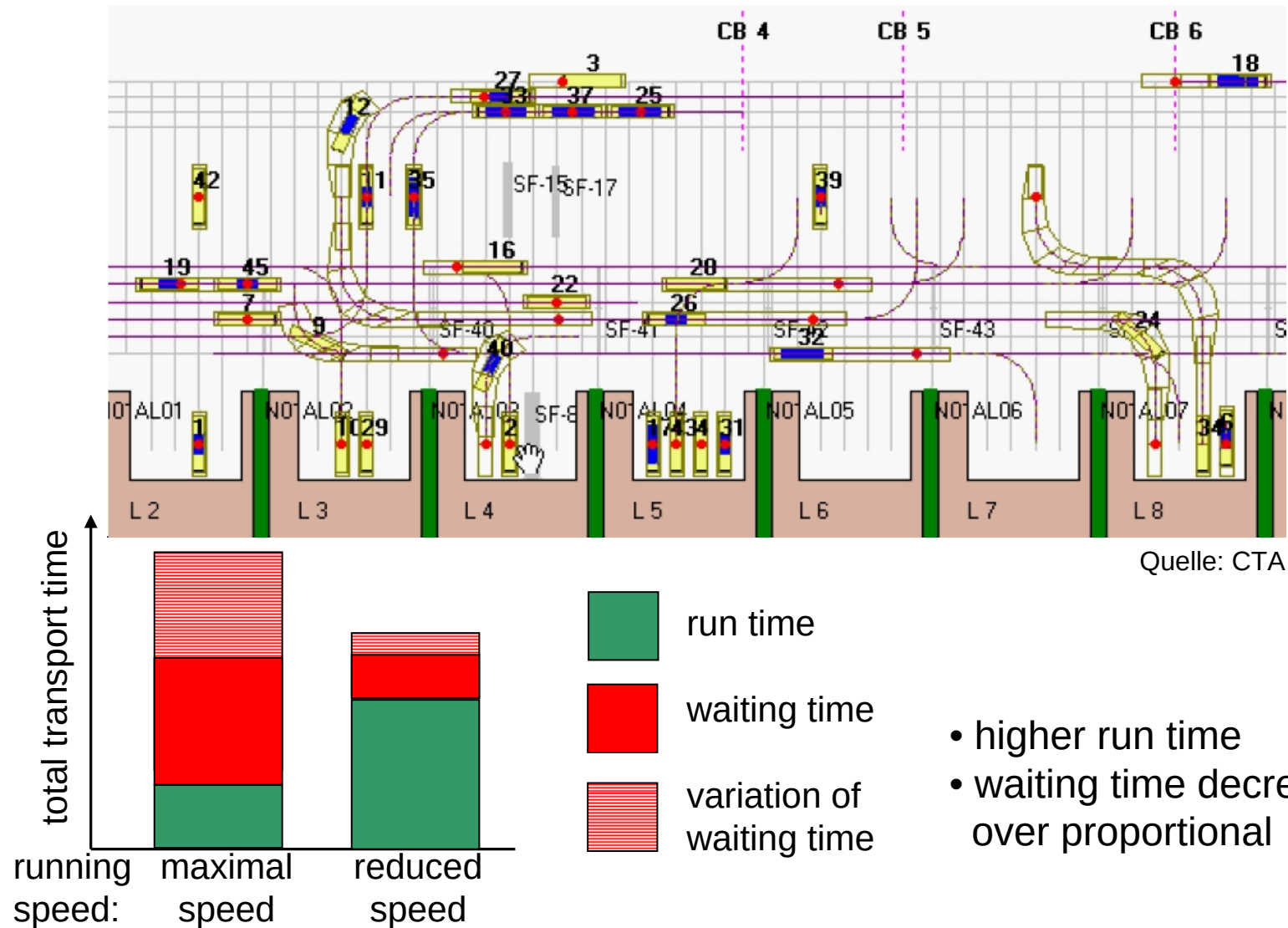
D. H. *et al.*,
 Transpn.
 Science **39**, 1
 (2005).

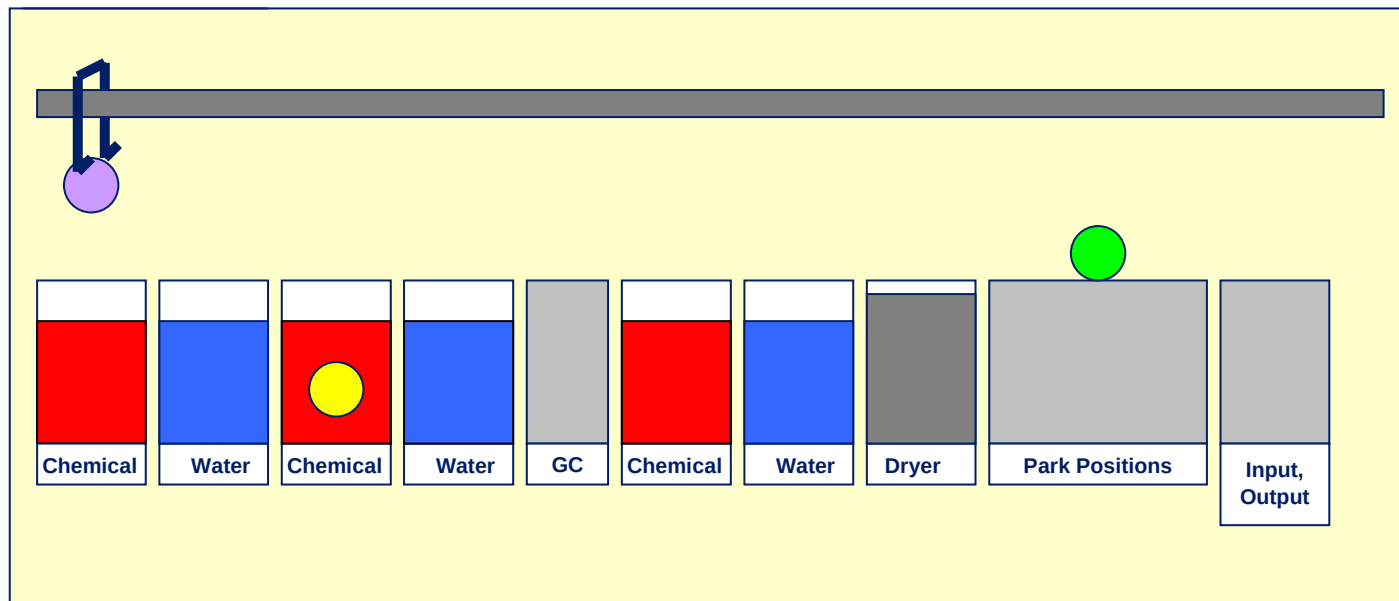
Without an obstacle one can observe clogging effects and a tendency of people to fall in panic situations (left).

The clogging effect can be significantly reduced by a suitable obstacle, which increases the efficiency of escape and diminishes the tendency of falling (right).

- Container transport from ship to storage and back



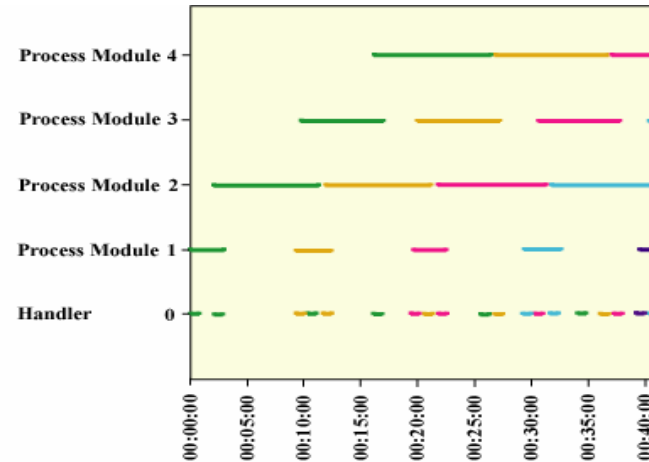
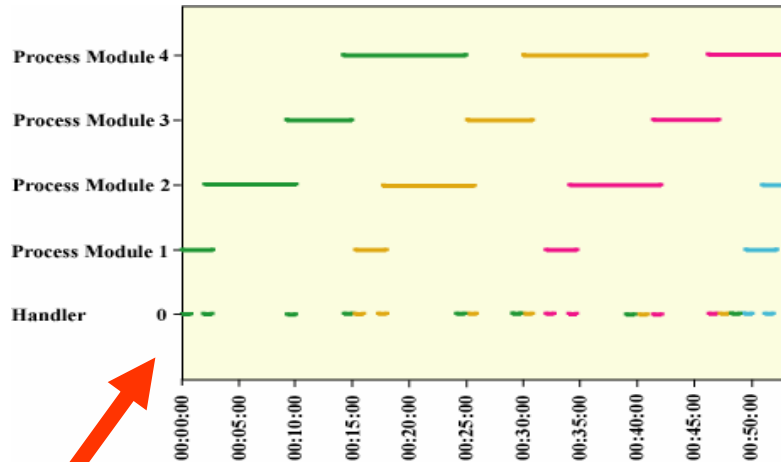




D. Fasold, Diplomarbeit, TU Dresden.

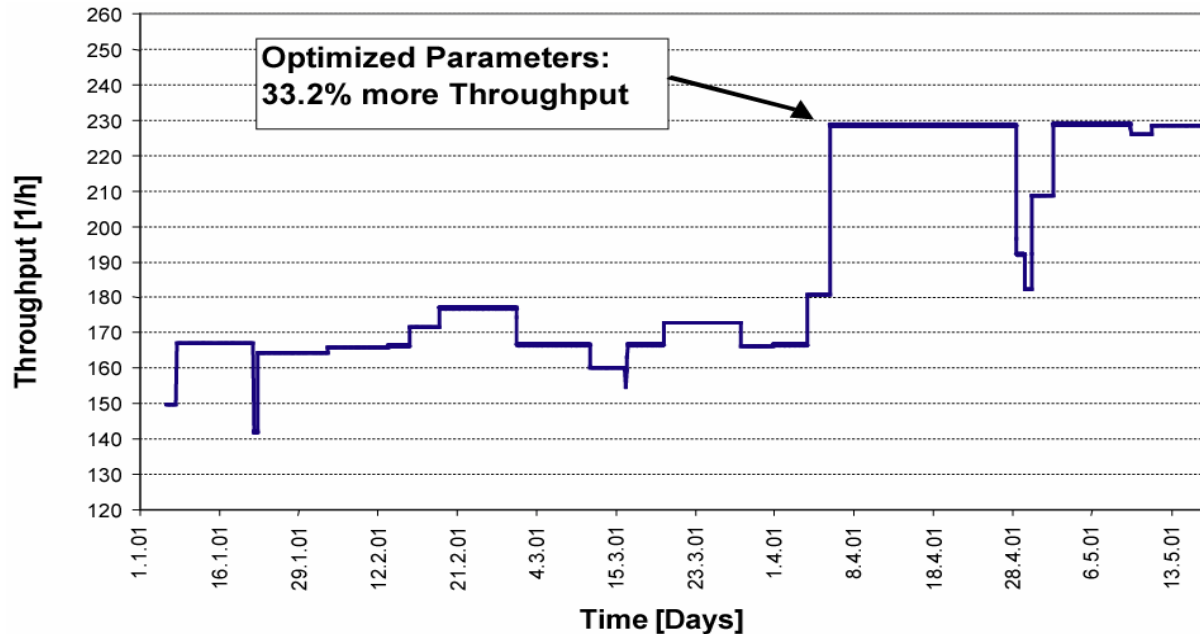
D. H., T. Seidel, S. Lämmer, K. Peters: Self-organization principles in supply and production systems, in *Socio- and Econophysics* (2006).

Slower-is-Faster Effect in Semiconductor Production



Slower-is-faster effect

Old recipe:
ca. 170/h



New recipe:
ca. 230/h

We found

- non-stationary and non-periodic solutions
- large sensitivity
- unpredictable dynamics
- inefficient production.

We reached

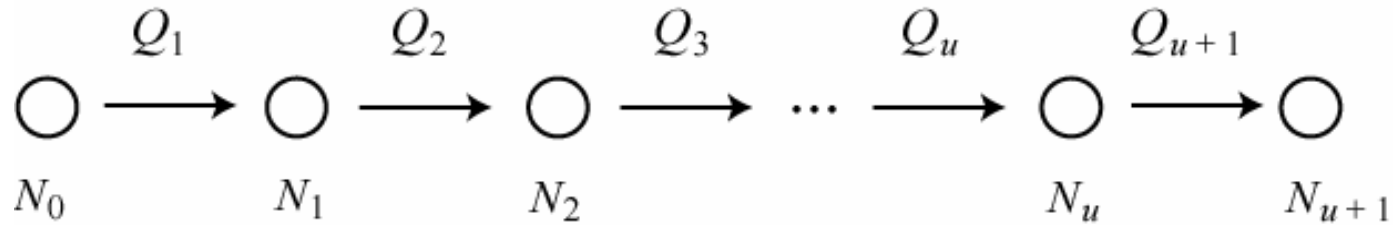
- stable production
- high throughputs.

Production systems are characterized by a complex (e.g. **fractal**) phase space

Possible dynamic solutions include **unstable** and **chaotic** solutions

(Phase) **Transitions** from one dynamic behavior to another one occur at **critical** parameter **thresholds**

Methods developed to describe **complex systems** are required to understand and optimize the dynamics of production processes



The **stock level** (“**inventory**”) N_b at **supplier** b changes in **time** t according to

$$\frac{dN_b}{dt} = Q_b(t) - Q_{b+1}(t)$$

$Q_b(t)$... rate at which supplier b receives ordered products from supplier $b - 1$

$Q_{b+1}(t)$... rate at which supplier b delivers products to the next downstream supplier $b + 1$

D. H., *New Journal of Physics* **5.90**, 1-28 (2003).

The **temporal change of the delivery rate** is proportional to the deviation of the actual **de-livery or production rate** from the desired one W_b (the **order rate**). Its **adaptation** takes on average some **time interval** τ :

$$\frac{dQ_b}{dt} = \frac{1}{\tau} [W_b(t) - Q_b(t)]$$

with $W_b(t) = W_b(\{N_a(t)\}, \{dN_a(t)/dt\}) = W(N_{(b)}(t))$

$$N_{(b)}(t) = \sum_{c=-n}^n w_c \left(N_{b+c} + \Delta t \frac{dN_{b+c}}{dt} \right)$$

is a weighted mean value of the own stock level and the the ones of the next n upstream and n downstream suppliers. The weights w_c are normalized to one:

$$\sum_{c=-n}^n w_c = 1.$$

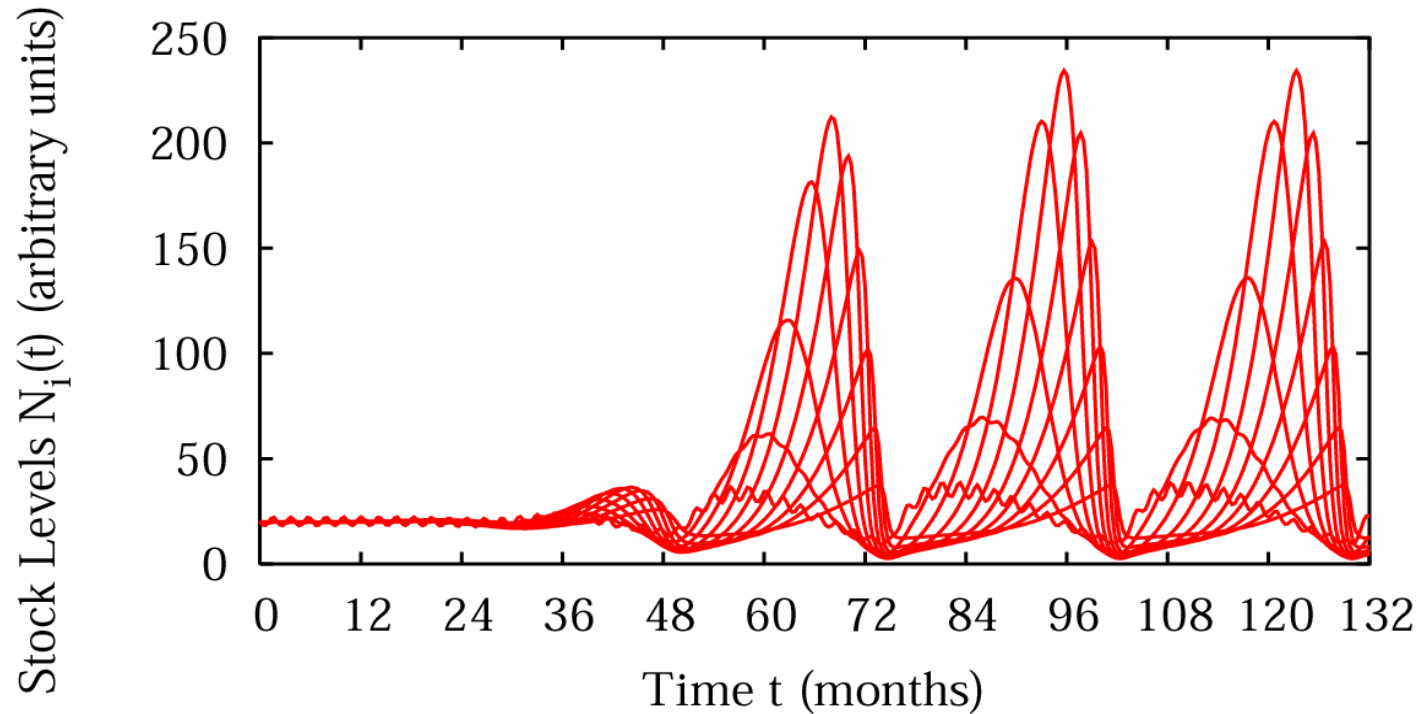
Are small variations amplified as in stop-and-go traffic?

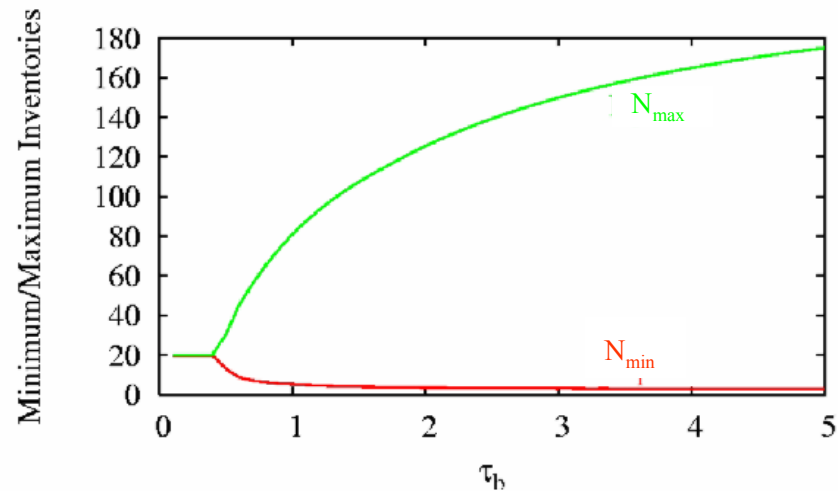
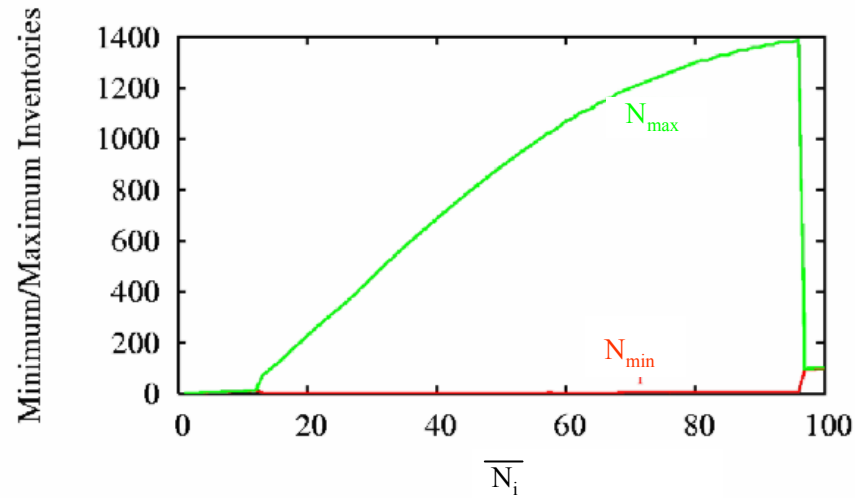
If yes, what would be the consequences?

- Unreliable forecasts and production schedules
- Unpredictable lead times
- Inefficient production

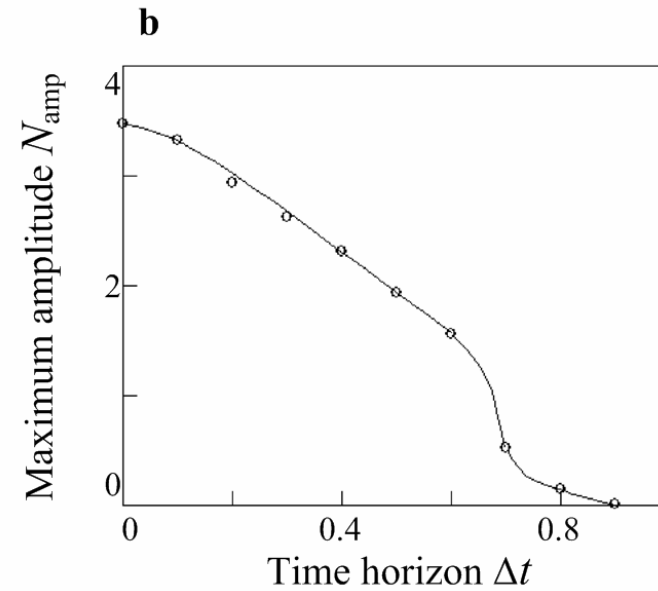
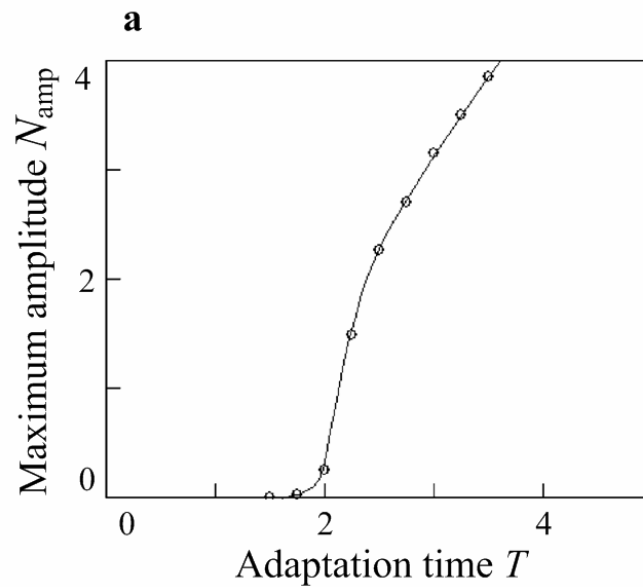


Dynamics of a Sequential Supply Chain: Mode Selection and Synchronization





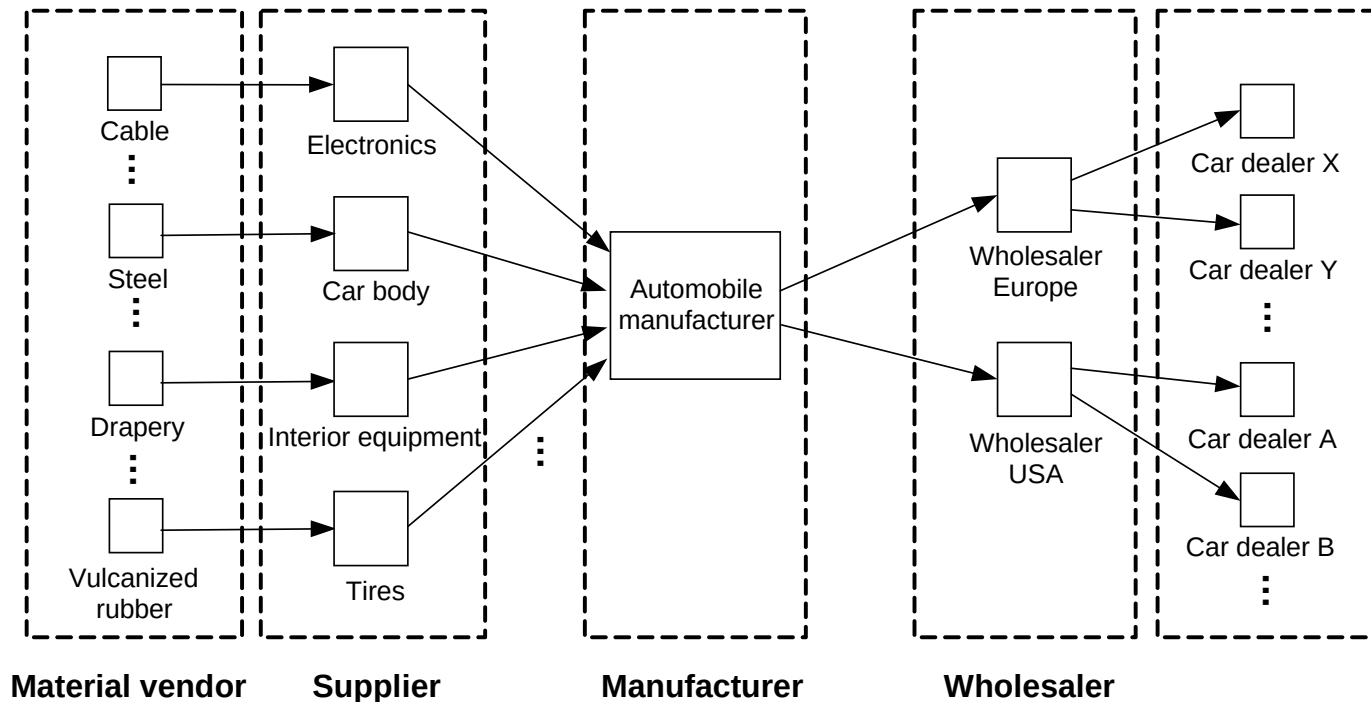
Management Strategy and Maximum Oscillation Amplitude



Open questions:

- **Inventory** vs. **just in time** production?
- How important is the **network topology**?

Supply Chain as a network structure:



Conservation of resources

$$\dot{N}_i(t) = \underbrace{Q_i(t)}_{\text{supply}} - \underbrace{\sum_{j=1}^m a_{ij} Q_j(t)}_{\text{re-entrant}} - \underbrace{Y_i(t)}_{\text{outflow}}$$

(a_{ij}) input matrix $\mathbf{A}$
 $N_i(t)$ inventory level
 $Q_i(t)$ delivery rate
 $Y_i(t)$ consumption rate
 $P_i(t)$ price level

Adaptation of delivery rates

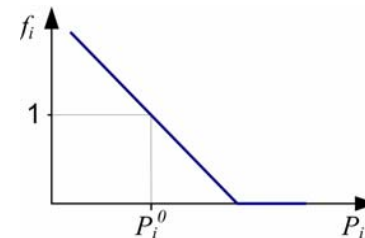
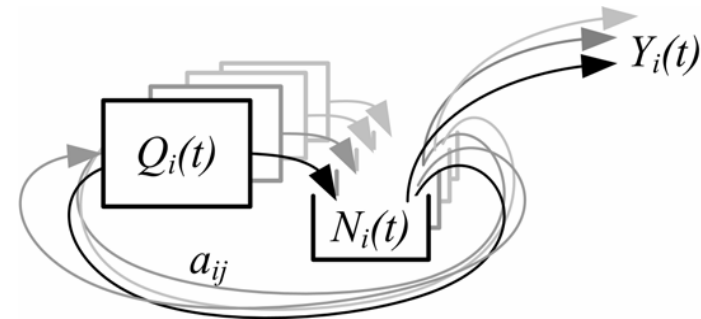
$$\frac{\dot{Q}_i(t)}{Q_i(t)} = \hat{\nu} \underbrace{\left(\frac{N_i^0}{N_i(t)} - 1 \right)}_{\text{deviations from desired level}} - \hat{\mu} \underbrace{\frac{\dot{N}_i(t)}{N_i(t)}}_{\text{temporal changes}}$$

Adaptation of prices

$$\frac{\dot{P}_i(t)}{P_i(t)} = \nu \underbrace{\left(\frac{N_i^0}{N_i(t)} - 1 \right)}_{\text{deviations from desired level}} - \mu \underbrace{\frac{\dot{N}_i(t)}{N_i(t)}}_{\text{temporal changes}}$$

Consumption

$$Y_i(t) = [Y_i^0 + \xi_i(t)] f_i(P_i(t))$$



D. H., U. Witt, S. Lämmer, T. Brenner, *Physical Review E* **70**, 056118 (2004).

Stationary Equilibrium

$$N_i^0, P_i^0, Q_i^0, Y_i^0 = Q_i^0 - \sum_j a_{ij} Q_j^0$$

Linearized Equations

$$\begin{aligned} \frac{dn_i}{dt} &= q_i - \sum_j a_{ij} q_j - Y_i^0 f'_i(P_i^0) p_i - \xi_i(t) \quad \text{with} \quad n_i(t) = N_i(t) - N_i^0 \\ \frac{dp_i}{dt} &= \frac{P_i^0}{N_i^0} \left(-\nu_i n_i - \mu_i \frac{dn_i}{dt} \right) \quad p_i(t) = P_i(t) - P_i^0 \\ \frac{dq_i}{dt} &= \alpha_i \frac{Q_i^0}{N_i^0} \left(-\nu_i n_i - \mu_i \frac{dn_i}{dt} \right) \quad q_i(t) = Q_i(t) - Q_i^0 \\ \alpha_i &= \frac{\hat{\nu}_i}{\nu_i} = \frac{\hat{\mu}_i}{\mu_i} \end{aligned}$$

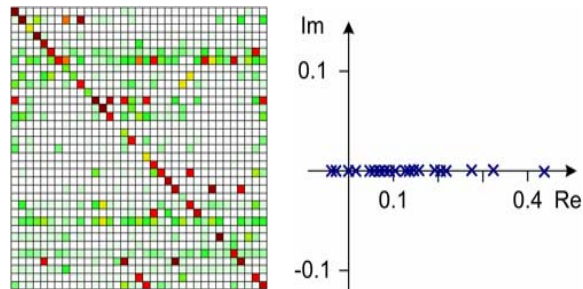
Eigenvalues

$$\begin{aligned} 2\lambda_{i,\pm} &= -A_i \pm \sqrt{A_i^2 - 4B_i} \\ \lambda_{i,3} &= 0 \end{aligned}$$

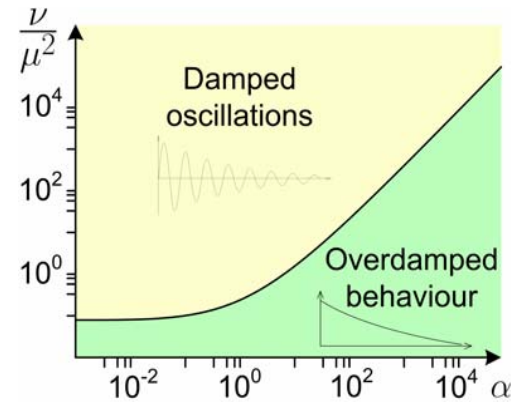
with

$$\begin{aligned} A_i &= \mu_i [C_i + \alpha_i D_i (1 - \omega_i)] \\ B_i &= \nu_i [C_i + \alpha_i D_i (1 - \omega_i)] \\ C_i &= P_i^0 Y_i^0 |f'_i(P_i^0)| / N_i^0 \\ D_i &= Q_i^0 / N_i^0 \\ \omega_i &\dots \text{ eigenvalues of } \mathbf{A} \end{aligned}$$

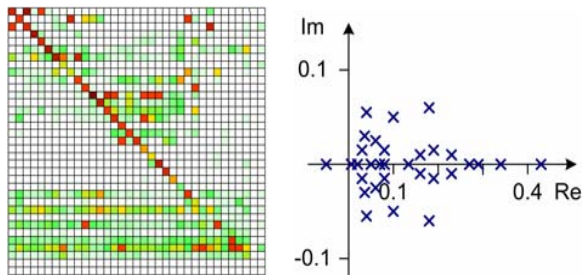
Input matrices with **real** eigenvalues only



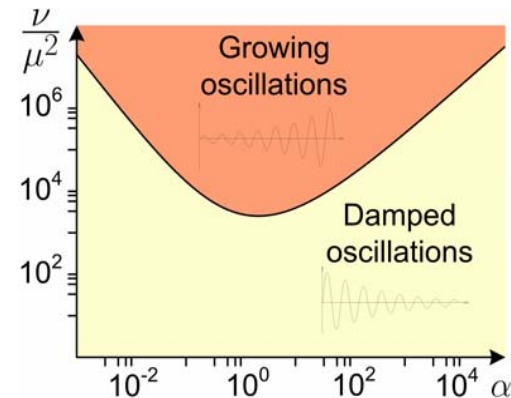
Overdamped behaviour possible.
Oscillations are **never growing**.



Input matrices with **complex** eigenvalues

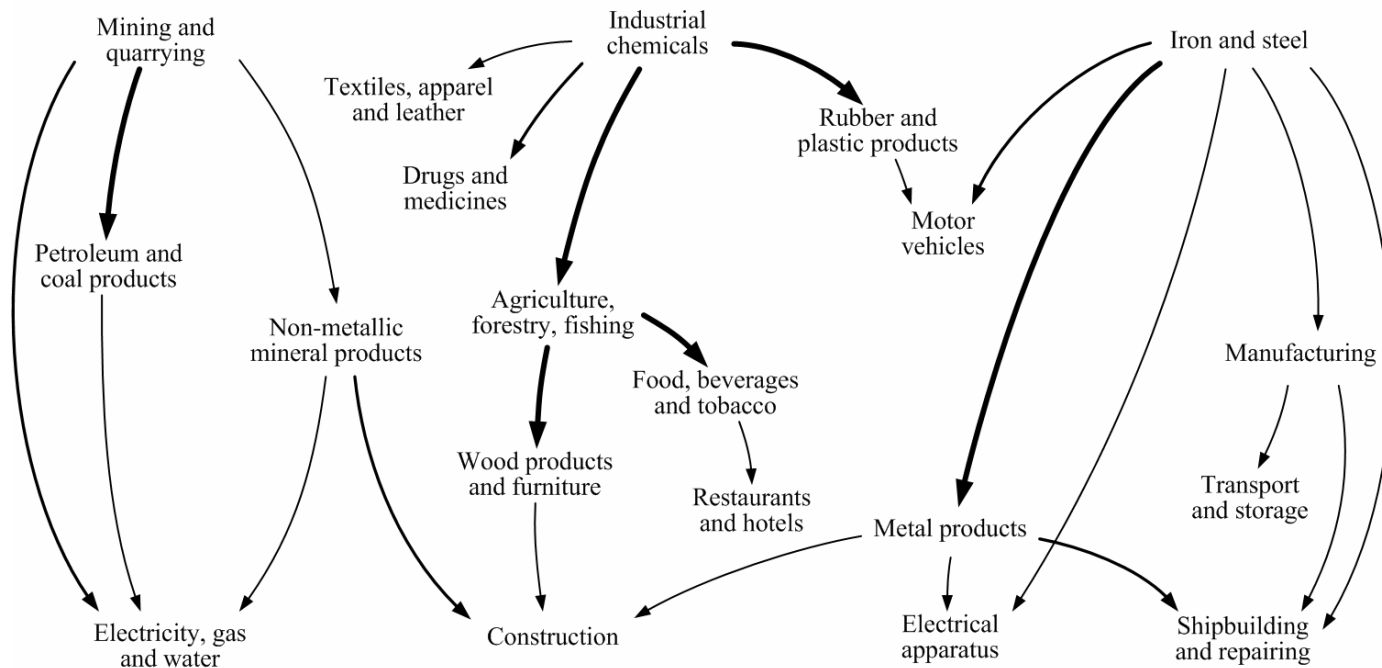


Always oscillating.
Growing oscillations are likely.



Commodity flow (average of FRA, GER, JAP, UK, USA)

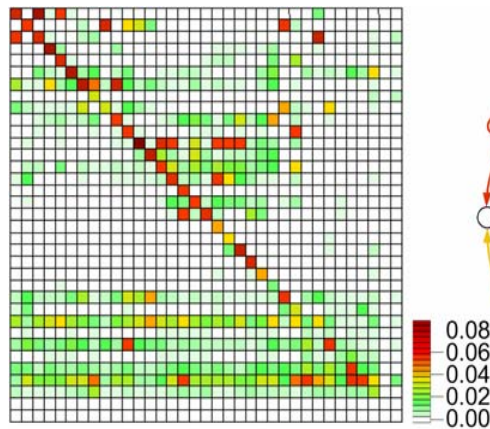
Network structure



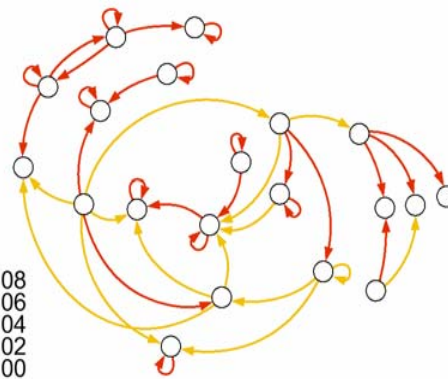
D. H., U. Witt, S. Lämmer, T. Brenner, *Physical Review E* **70**, 056118 (2004).

- Investigation of the network structure:
- **Positive** and **negative feedbacks** in production processes
- **Time lags** in the information flow and adaptation process

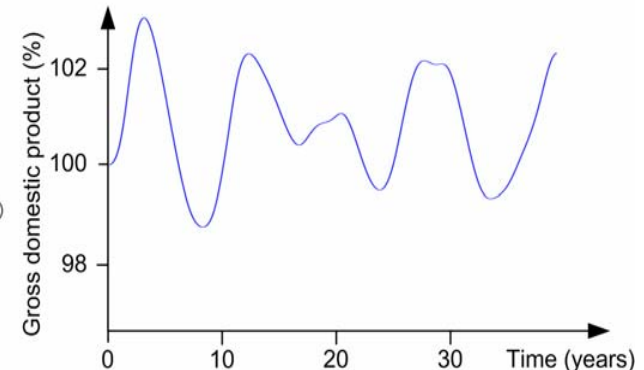
Business cycles because of the structure of production networks?



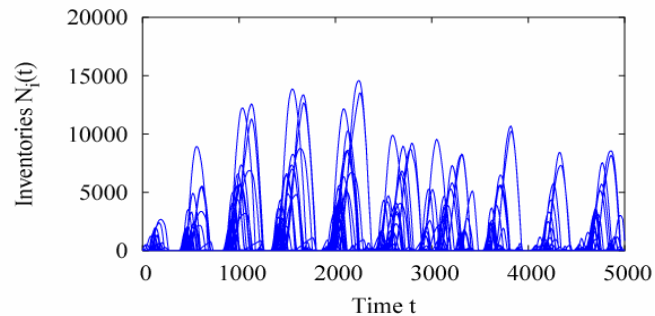
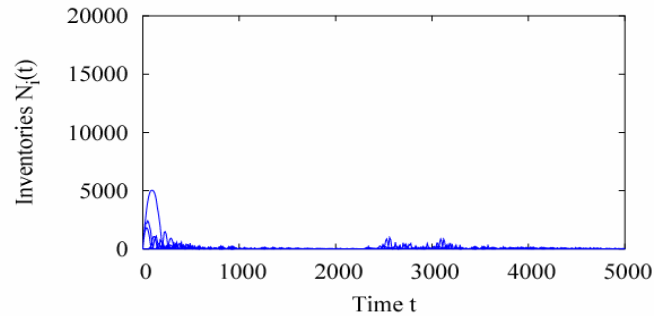
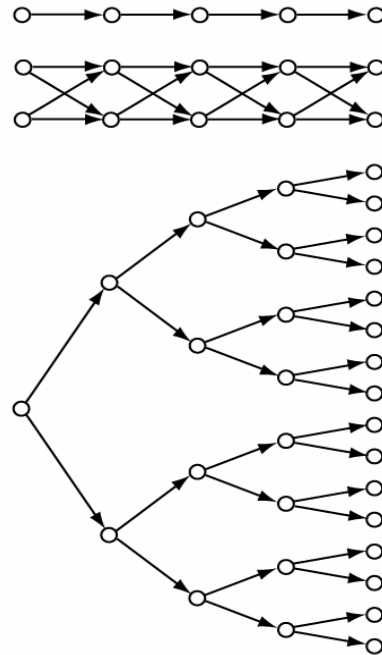
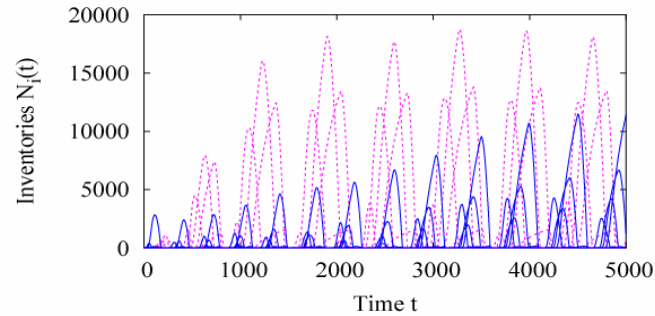
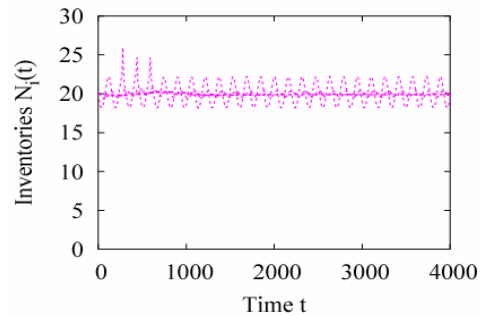
Input output matrix



Related delivery
network



Resulting oscillations
in the gross domestic
product



D. H., *New Journal of Physics* **5.90**, 1-28 (2003).

Road Networks

Directed Links:

- Road sections
- Travel- and delay time
- Congestion, queues

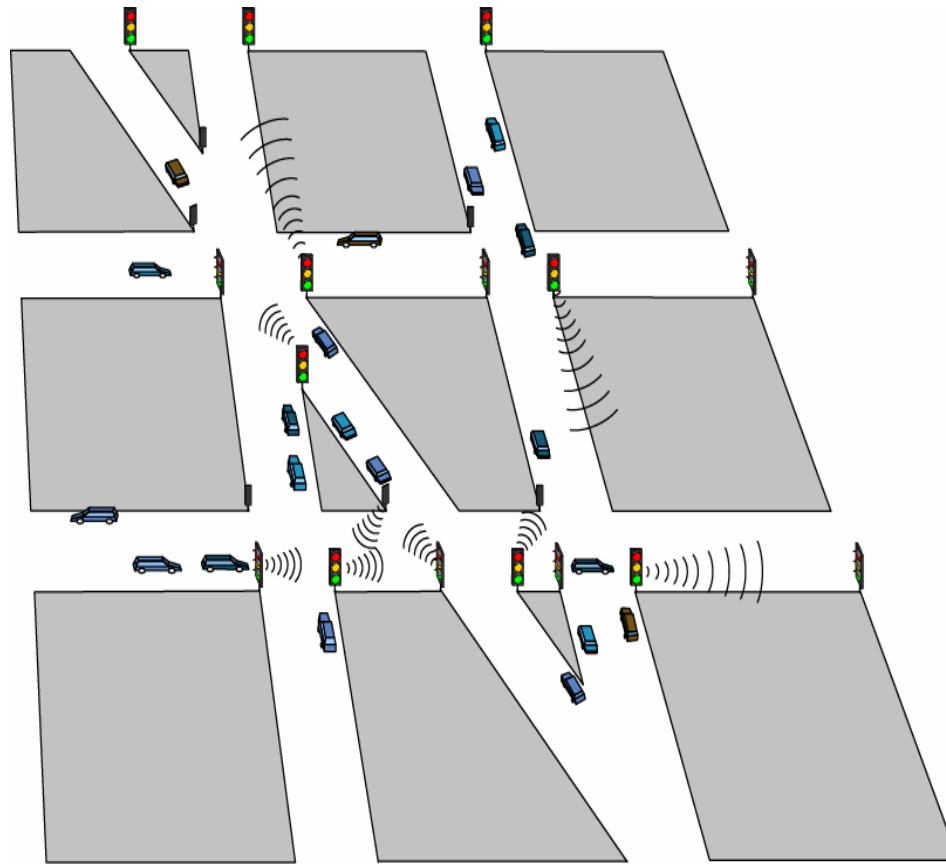
Nodes:

- Junctions
- Different origin-destination
- Conflicting flows
- Traffic light scheduling
- Green Wave
- Accidents

Production Networks

- ⇔ Buffers
- ⇔ Cycle time
- ⇔ Full buffers
- ⇔ Processing units
- ⇔ Different products flows
- ⇔ Conflicts in usage of gripper, transfer cars etc.
- ⇔ Production scheduling
- ⇔ ConWiP strategy
- ⇔ Machine breakdowns

- for complex street networks
- for traffic disruptions (building sites, accidents, etc.)
- for particular events (Olympic games, pop concerts, etc.)



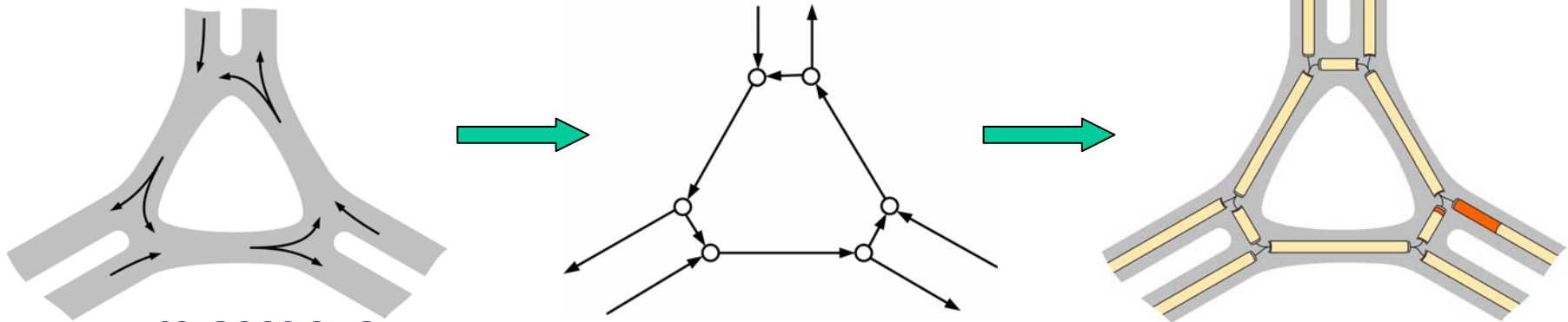
Directed links are homogenous road sections

- Traffic dynamics: congestion, queues

Nodes are connectors between road sections

- Junctions: merging, diverging

D. H., S. Lämmer, J.-P. Lebacque, in C. Deissenberg and R. F. Hartl (eds.) *Optimal Control and Dynamic Games* (Springer, 2005).



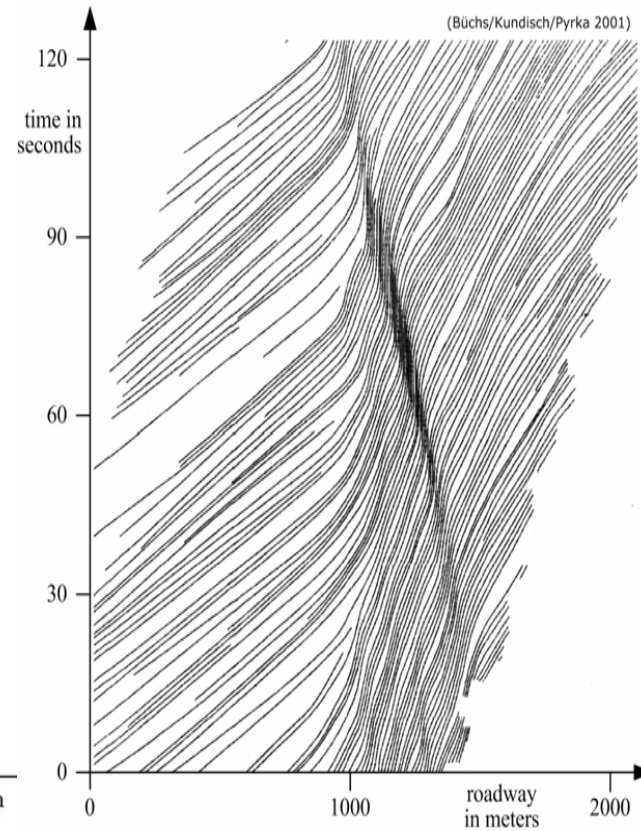
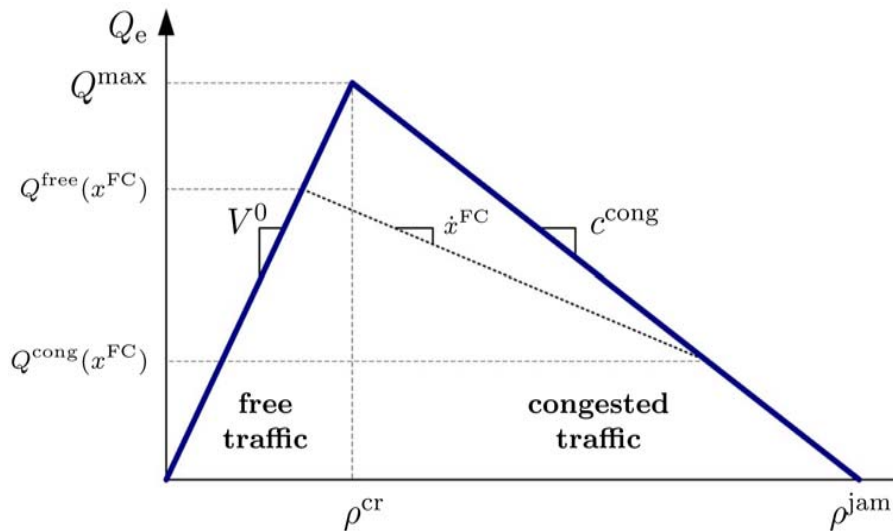
- Traffic lights: control, optimization

Traffic assignment

- Route choice, destination flows

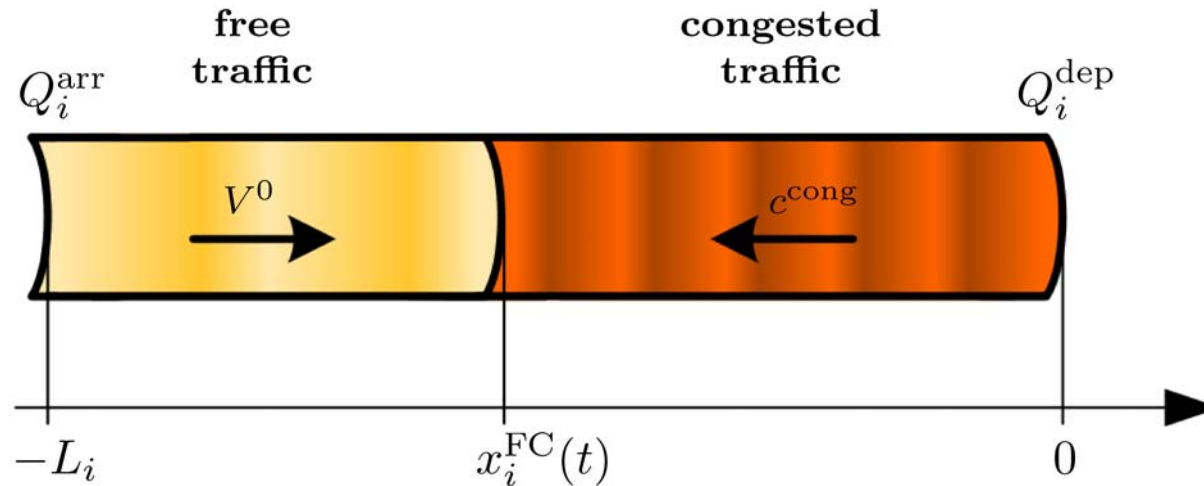
**Local Rules,
Decentralization,
Self organization**

Flow Q and density ρ are empirically correlated via the fundamental diagram $Q_e(\rho)$



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \underbrace{\frac{dQ_e(\rho)}{d\rho}}_{c(\rho)} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$$

Derivative Q_e' plays an important role!



Movement of congestion

$$\frac{d}{dt}x_i^{FC} = \frac{\Delta Q(x_i^{FC})}{\Delta \rho(x_i^{FC})}$$

Number of vehicles

$$\frac{d}{dt}N_i(t) = Q_i^{arr}(t) - Q_i^{dep}(t)$$

Travel time

$$\frac{d}{dt}T_i(t) = 1 - \frac{Q_i^{dep}(t)}{Q_i^{arr}(t - T_i(t))}$$

Side Conditions

- Conservation

$$\sum_i Q_i^{\text{dep}} = \sum_j Q_j^{\text{arr}}$$

- Non-negativity

$$Q_i^{\text{dep}} \geq 0$$

$$Q_j^{\text{arr}} \geq 0$$

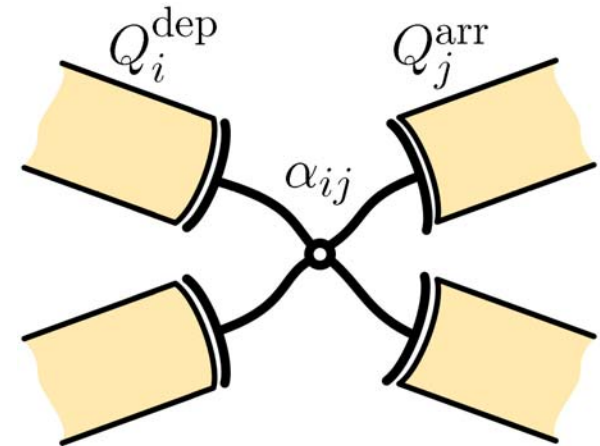
- Upper boundary

$$Q_i^{\text{dep}} \leq Q_i^{\text{dep,pot}}$$

$$Q_j^{\text{arr}} \leq Q_j^{\text{arr,pot}}$$

- Branching

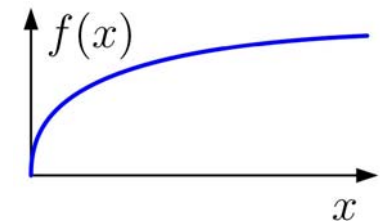
$$\sum_i \alpha_{ij} Q_i^{\text{dep}} = Q_j^{\text{arr}}$$



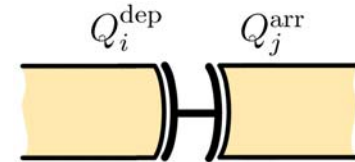
Goal function

$$F = \sum_i f(Q_i^{\text{dep}}) \rightarrow \max$$

$$f(x) = x^p \quad \text{with } p \ll 1$$



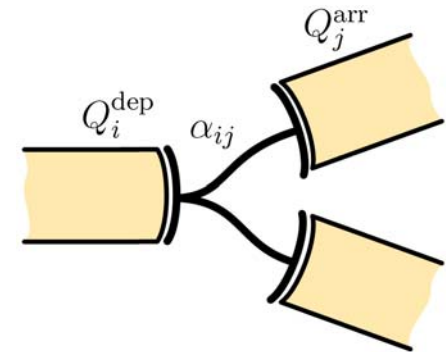
1 to 1: $Q_i^{\text{dep}} = Q_j^{\text{arr}} = \min \left\{ Q_i^{\text{dep,pot}}, Q_j^{\text{arr,pot}} \right\}$



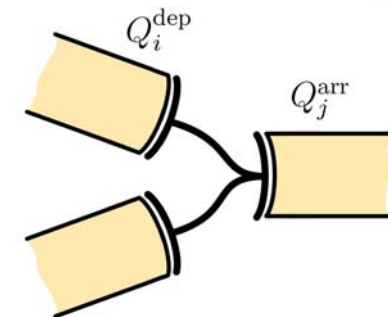
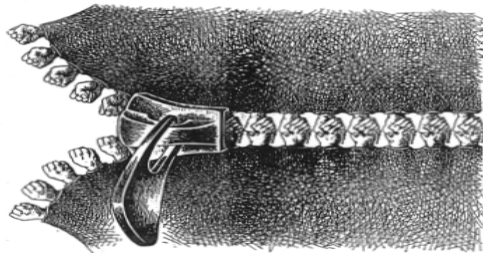
1 to n: Diverging with branch weight α_{ij}



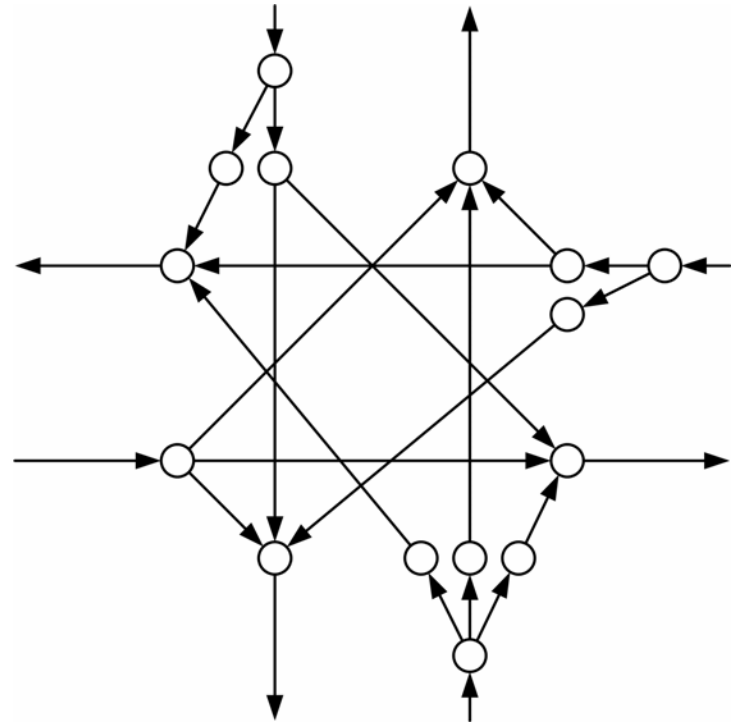
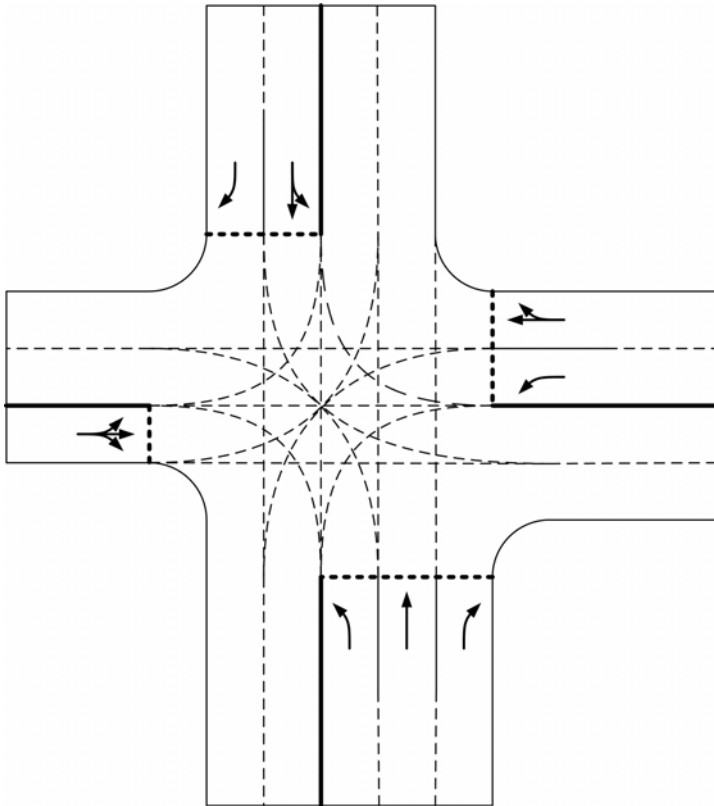
$$Q_i^{\text{dep}} = \min \left\{ Q_i^{\text{dep,pot}}, \min_j \frac{Q_j^{\text{arr,pot}}}{\alpha_{ij}} \right\}$$



n to 1: Merging $Q_j^{\text{arr}} = \alpha_{ij} Q_i^{\text{dep}}$



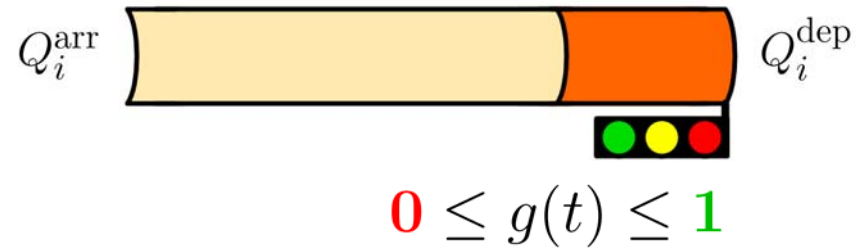
D. H., J. Siegmeier, S. Lämmer, *Networks and Heterogeneous Media* (2007).



Traffic light

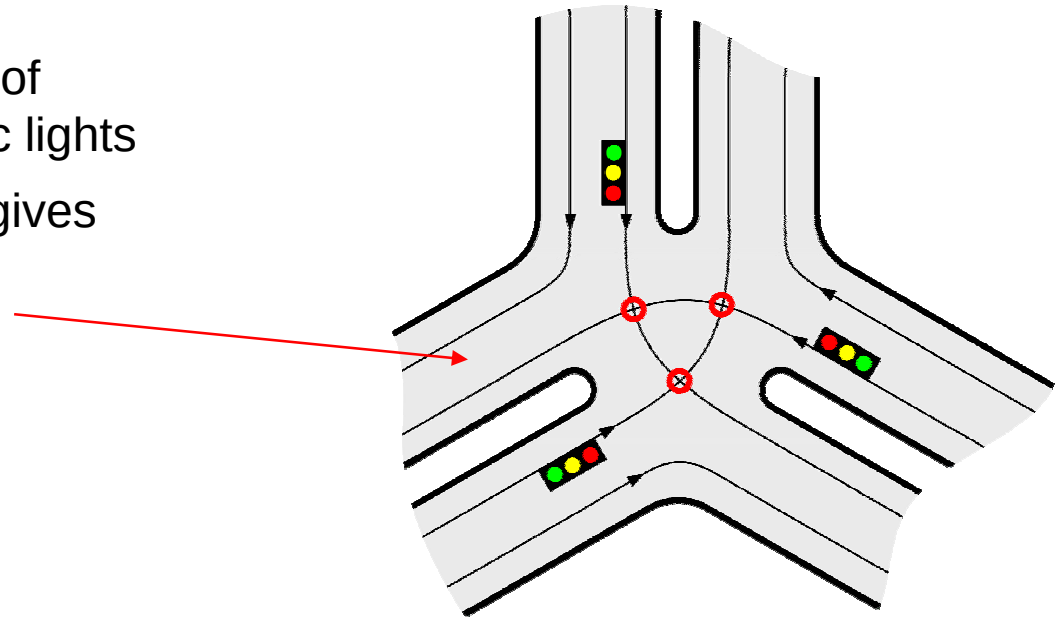
- Additional side condition

$$Q_i^{\text{dep}}(t) \leq g(t) \cdot Q_i^{\text{max}}$$

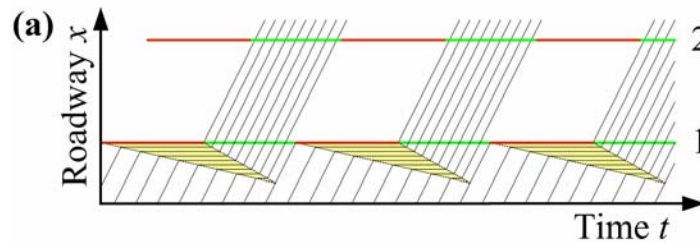


Intersection

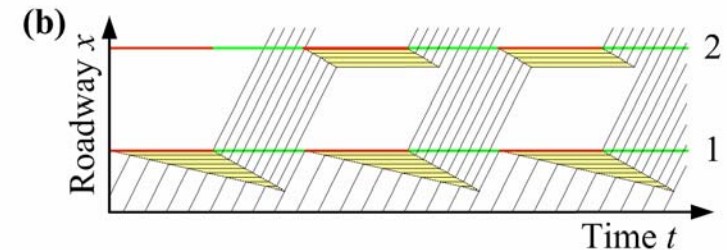
- Is **only** defined by a set of mutually excluding traffic lights
- Each intersection point gives one more side condition



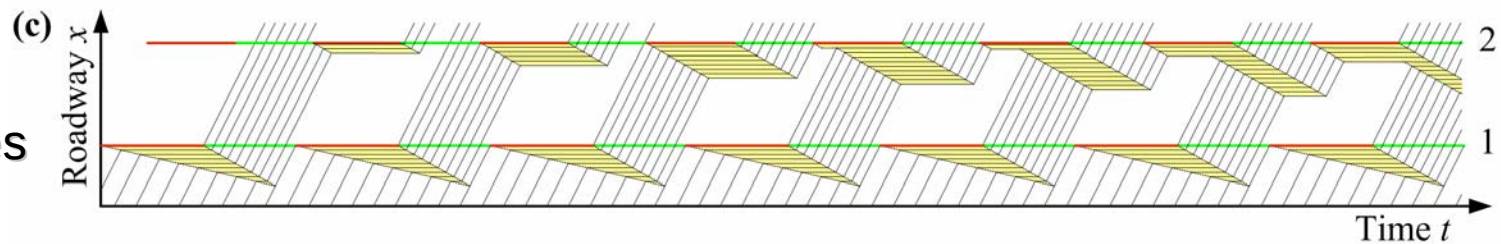
Green wave



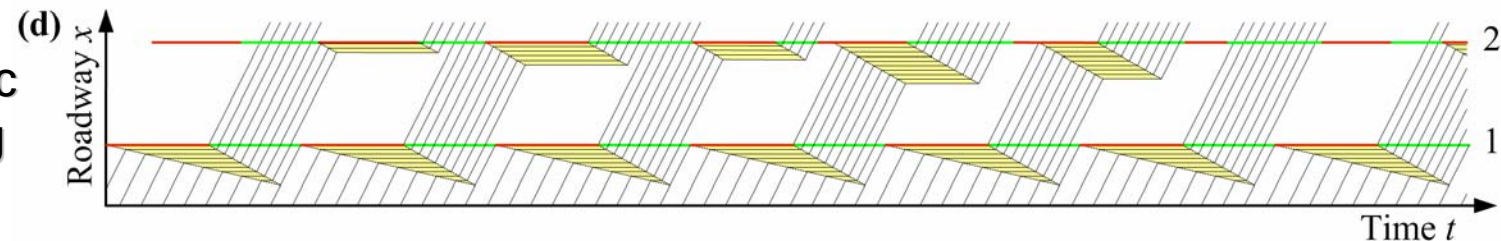
Non-optimal
phase shift



Different
cycle times



Stochastic
switching



Particular Challenges and Difficulties:

- Large variations in demand, turning rates, etc.
- Irregular networks, nodes with 5, 6, 7 links
- Switching times discourage frequent switches, reduce flexibility a lot!
- Queue front does not stay at service station (traffic light, intersection), instead propagates upstream and complicates queue dynamics
- Travel times are dependent on load/congestion level
- Delay times propagate in opposite directions
- Variety of service/turning directions is costly: reduces the fraction of green time for each direction
- Congested subsequent roads can diminish the effect of green times
- Minimum flow property reduces throughput of shared lanes
- Optimal sequence of signal phases changes, optimal solutions are aperiodic!
- Some directions may be served several times, while others are only served one time (i.e. it can make sense to split jobs!)

Optimization problem is dominated by non-linearities and NP hard!

I. “Gaseous” Free-Flow Low-Density Regime

- Demand considerably below capacity
- Application of the first-in-first-out/first-come-first-serve principle
- Individual cars get green lights upon arrival at intersection
- Default state is a red light!
- All turning directions can be served
- Low throughput because of small vehicle arrival rate



D. H., T. Seidel, S. Lämmer, K. Peters: Self-organization principles in supply and production systems, in *Socio- and Econophysics (2006)*.

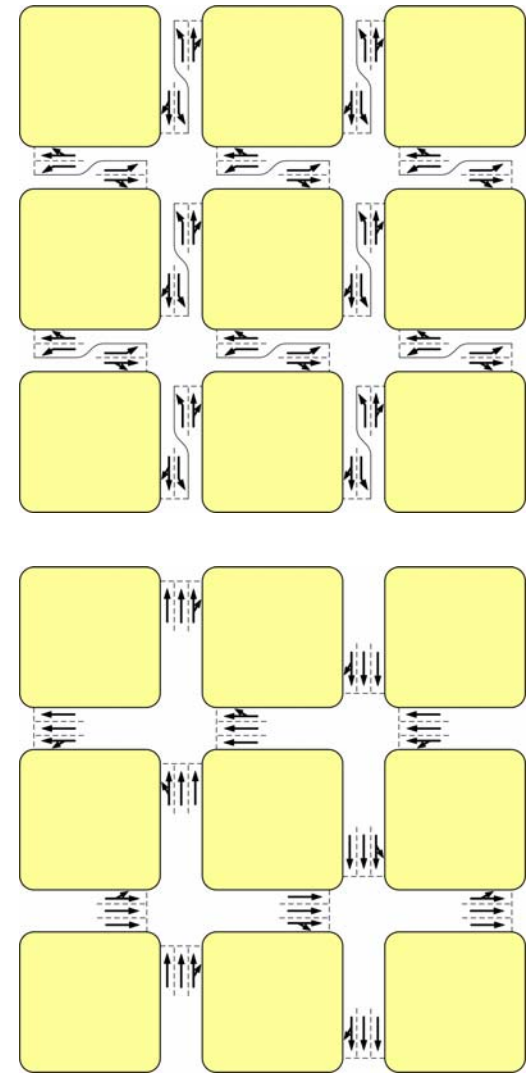
II. Droplet-/Platoon-Forming, Mutually Obstructed Regime

- Demand below and possibly close to capacity
- Simultaneous arrivals and, therefore, conflicts of usage likely
- Waiting times are unavoidable. Hence, vehicle platoons are forming
- The goal is to minimize waiting times
- Serving platoons rather than single vehicles increases throughput!
- Longer standing platoons are prioritized compared to shorter ones
- Moving platoons are prioritized compared to similarly long standing platoons. This is essential for traffic light synchronization and formation of **green waves**.

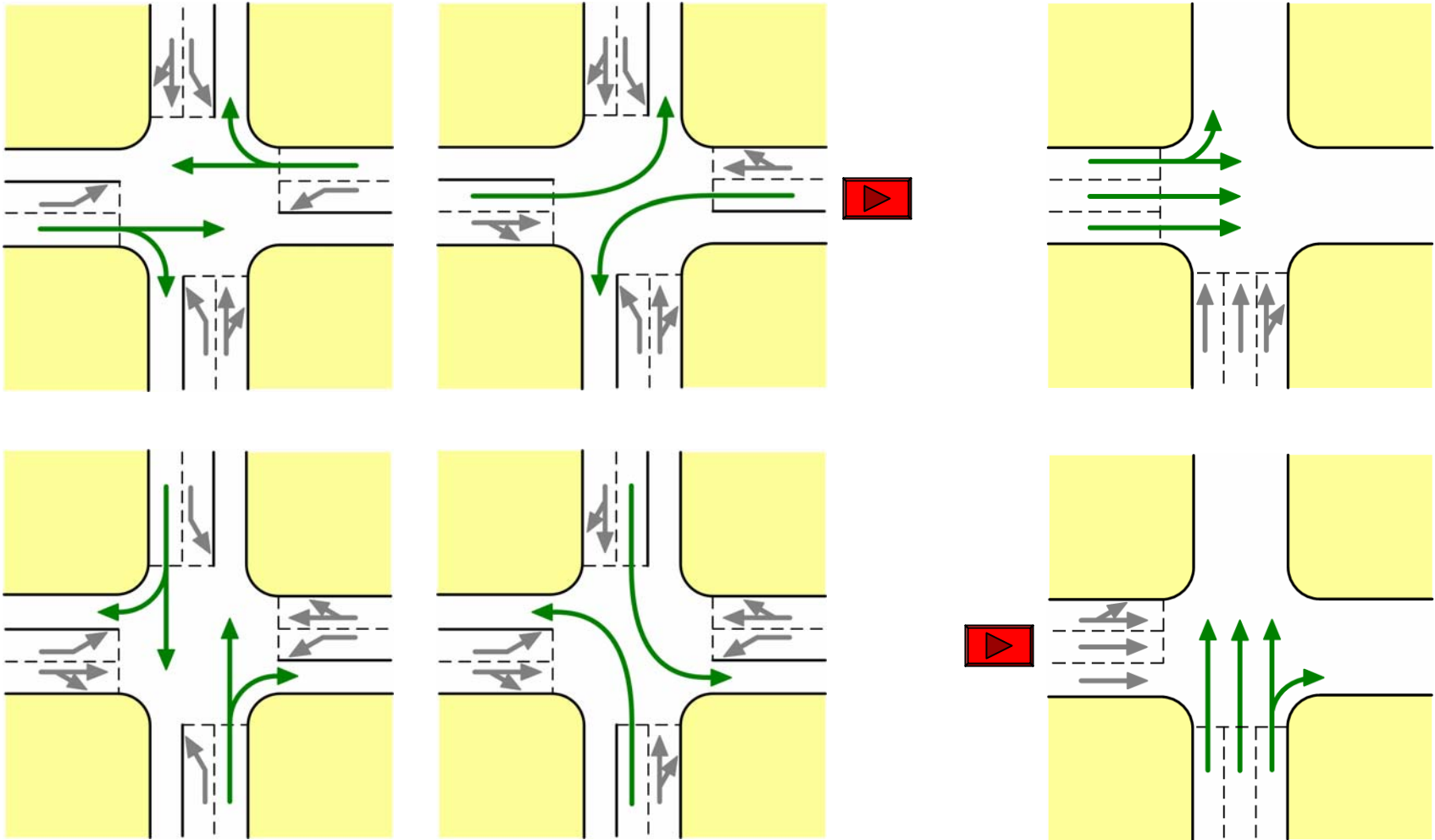


III. Condensed, Congested, Queue-Dominated Regime

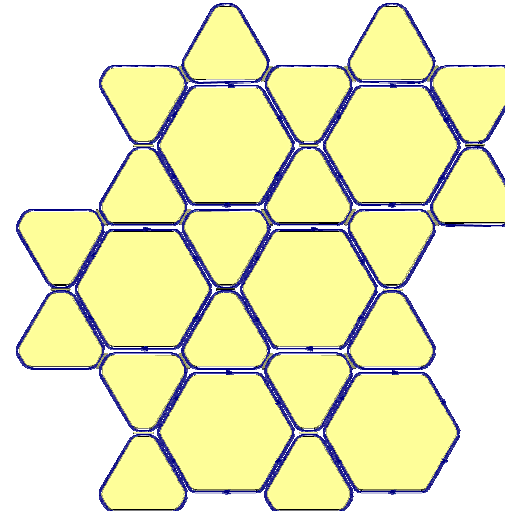
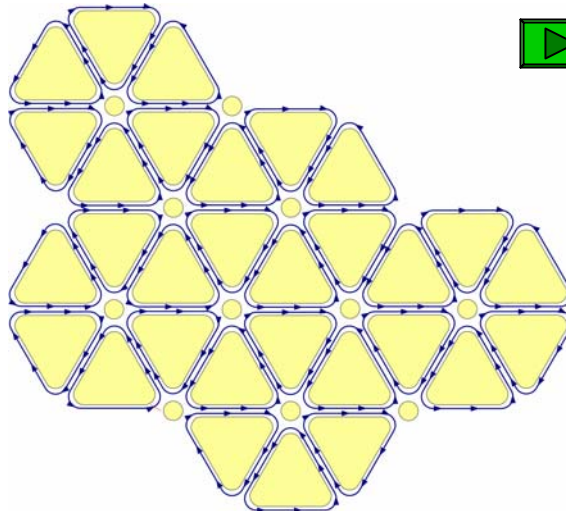
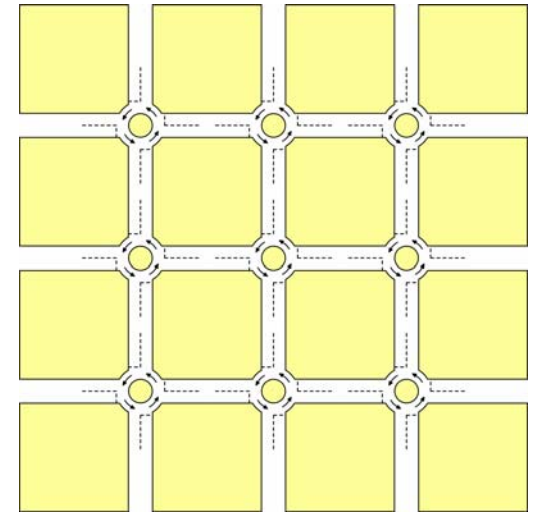
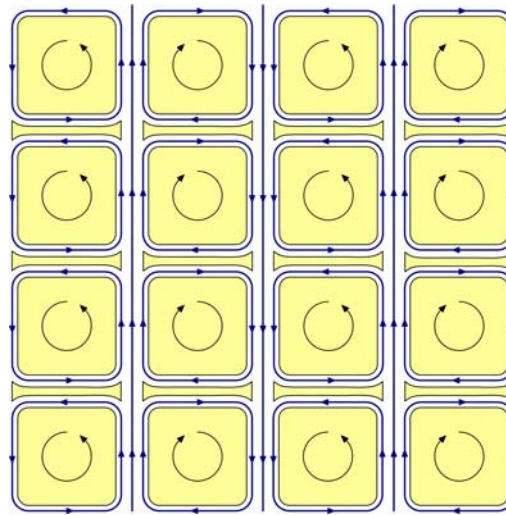
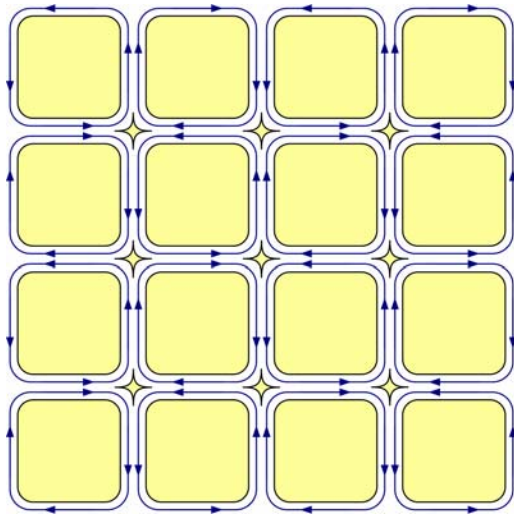
- Demand above capacity
- Goal becomes flow maximization, as queues form in all directions
- Application of flow bundling principle (similarly to platoon formation) is recommended: Reduction of service/turning directions, i.e. of heterogeneity, increases capacity



Reduction of Traffic Phases Means Increase of Capacity



Intersection-Free Designs



D. H., J. Siegmeier, S. Lämmer, *Networks and Heterogeneous Media* (2007).

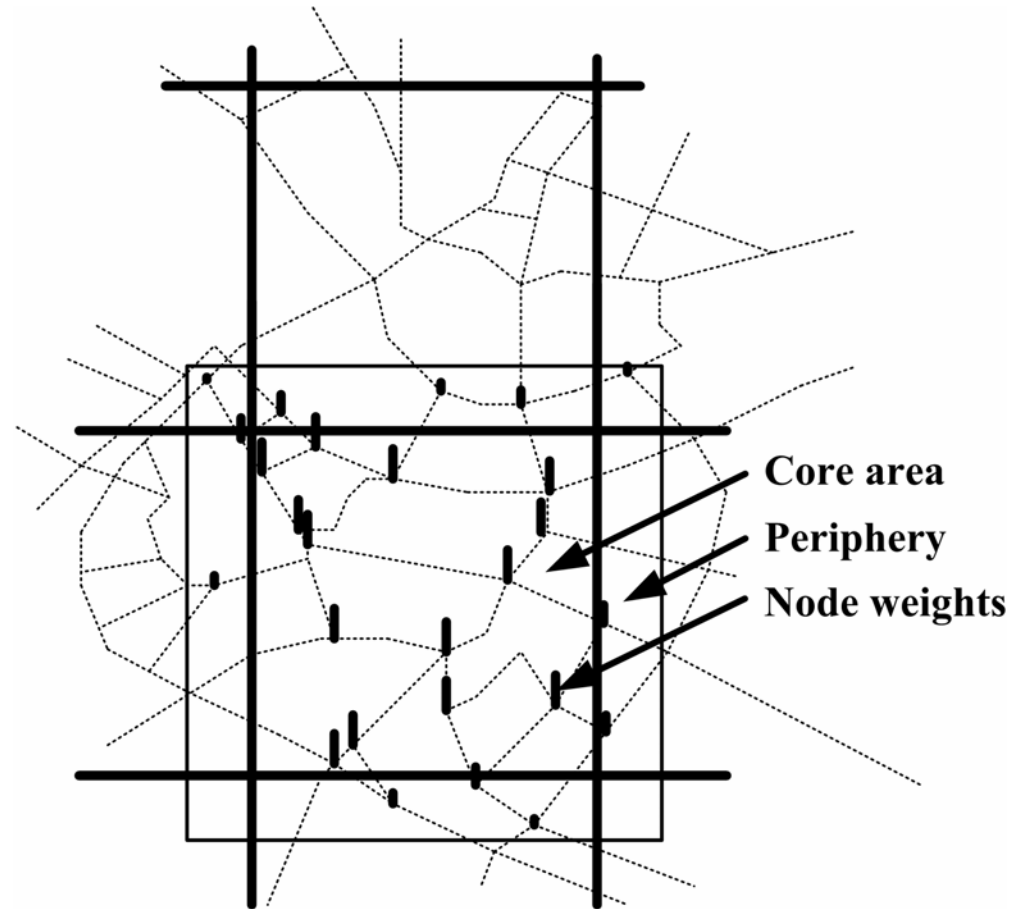
IV. Bubble Flow, Heavily Congested Gap Propagation Regime

- Demand considerably above capacity
- Almost all streets are more or less fully congested
- Gap propagation principle replaces vehicle propagation
- Goal is to avoid stopping of gap (“bubble propagation”)
- Larger and moving gaps are given priority

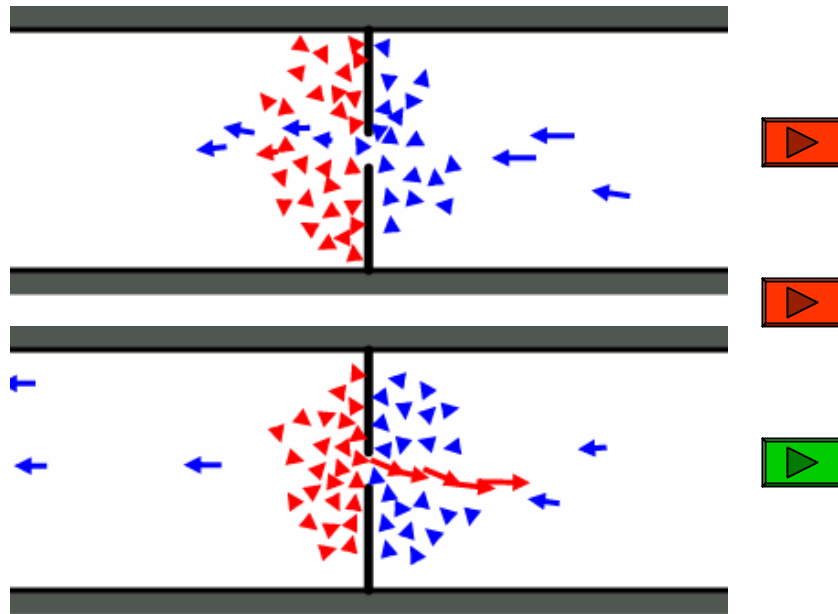


Best in terms of throughput is an approximately half-filled system. The load/occupancy corresponding to the maximum throughput should not be exceeded. The use of access control with traffic lights is, therefore, recommended. This defines a kind of CONWIP strategy for traffic.

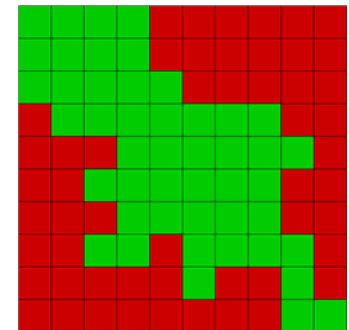
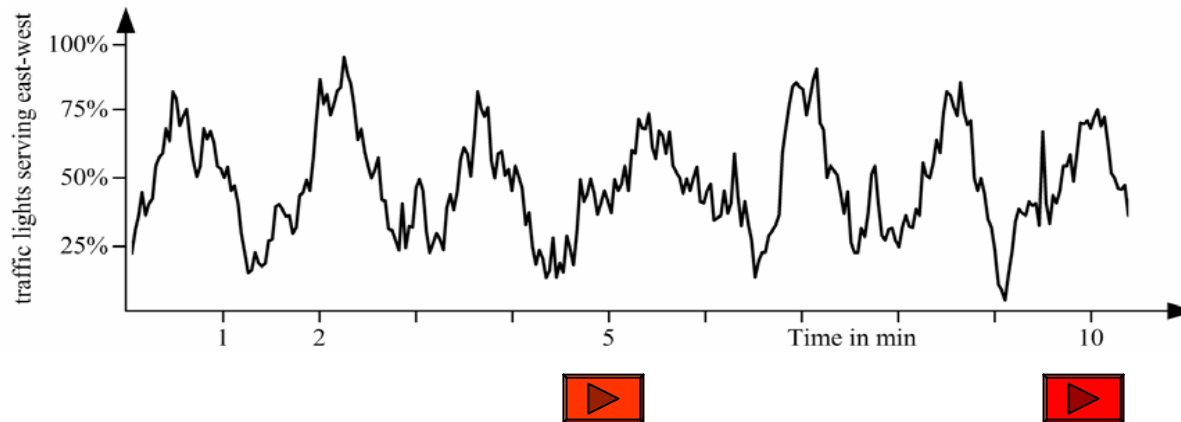
- Specification of core areas (e.g. rectangular or hexagonal).
- Each **core area** is surrounded by a **peripheral area**.
- Size of peripheral area depends on optimization horizon and velocities on the links (e.g. 300-500 meters).
- **Weights** are assigned to the nodes. In the periphery, weight values should become smaller with increasing distance to the core area.
- Introducing node weights significantly improves the efficiency of the optimization process.



Self-Organized Oscillations at Bottlenecks and Synchronization



- **Pressure-oriented**, autonomous, distributed signal control:
 - Major serving direction alternates, as in pedestrian flows at intersections
 - Irregular oscillations, but ‘synchronized’
- In huge street networks:
 - ‘Synchronization’ of traffic lights due to vehicle streams spreads over large areas



Simulation “Pirnaischer Platz” (City center of Dresden)

