

## Chaos

schluckt viel Energie,  
entsteht von selbst,  
ist der Normalfall...



## Ordnung

Bündelt Energie,  
entsteht nicht von selbst,  
ist die Ausnahme...





**Ordnung ohne einen**



**„Great Chairman Mao“**

**Musterbildung bei Pflanzen**

**oder**

**Warum Chaos wichtig ist**



## Was ist ein Muster?

Giuseppe Arcimboldo: *I quattro stagioni*

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



## Was ist ein Muster?



Kim-il-Sung: 50. Geburtstag

**Muster:=**eine nicht-zufällige Anordnung von Elementen im Raum (*Bünning*)

eine Gestalt, die erst auf der Ebene des Ganzen entsteht



Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



Universität  
Karlsruhe

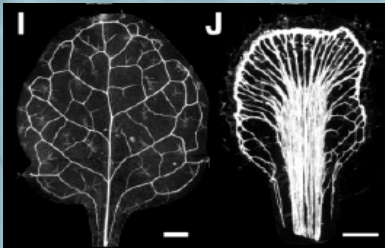
## Blattnerven (Leitbündel)

- artypisch und doch individuell
- entstehen aus Parenchymzellen
- jede Parenchymzelle kann sich in ein Leitbündel umwandeln (differenzieren)
- nur einige tun es tatsächlich.

### Folgerung:

Die Zellen tauschen Signale aus, um die Differenzierung zu steuern.

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



## Was ist das Signal?

- Zuführung des Pflanzenhormons Auxin fördert die Bildung von Leitbündeln
- Hemmung des Abtransports von Auxin (über einen Hemmstoff) ebenfalls

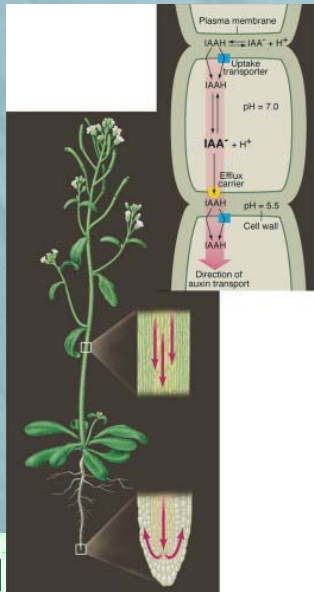
### Folgerung:

das Muster der Blattnerven hängt mit dem Fluss von Auxin zusammen



Universität  
Karlsruhe

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



## Wie fließt Auxin?

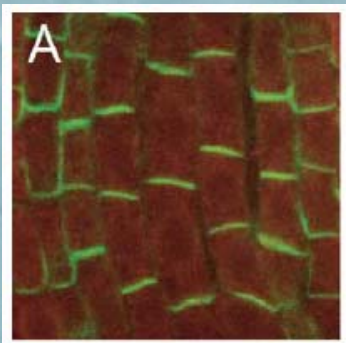
- Auxin ist eine schwache Säure
- In der (sauren) Zellwand ist es apolar.
- Es gelangt mittels Diffusion durch die Plasmamembran
- Im (neutralen) Cytoplasma gibt es ein Proton ab
- Es ist in der Zelle gefangen (Ionenfalle)

### Folgerung:

Auxin muß aktiv wieder aus der Zelle hinausgepumpt werden.



Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



Die mutmaßliche Auxinpumpe  
PIN1 (Fluoreszenzmarkierung)

## Wie fließt Auxin?

- Die Pumpe sitzt an einem Zellpol.
- Auxin wird also asymmetrisch gepumpt.
- Dadurch entsteht ein gerichteter Fluß.

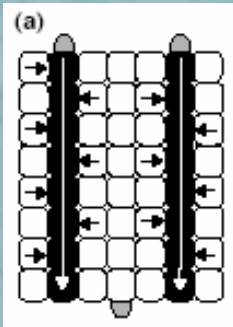
### Folgerung:

Das Venenmuster hängt von der Polarität der Auxinpumpe ab.



Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

## Wie entsteht das Muster?



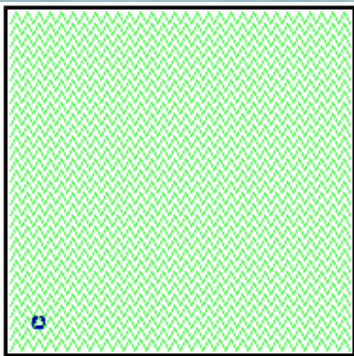
- Zunächst sind alle Zellen gleich.
- Sie nehmen von allen Seiten Auxin auf.
- Sie pumpen das Auxin nach unten hinaus.
- Irgendeine Zelle pumpt etwas stärker.
- Dadurch kommt es zu einer Drainage.



Universität  
Karlsruhe

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

## Wie entsteht das Muster?



- Die Zelle differenziert stärker.
- Differenzierte Zellen pumpen stärker.
- Dadurch wird die Drainage stärker.
- Durch die Differenzierung kann die eine Zelle noch stärker pumpen.

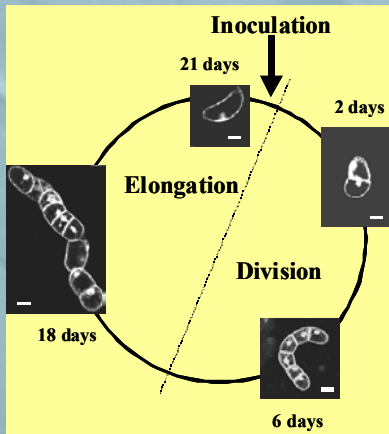
### Folgerung:

Ein zufälliger Unterschied schaukelt sich immer mehr auf („Wer hat, dem wird gegeben“).



Universität  
Karlsruhe

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



Campanoni, Blasius und Nick 2003



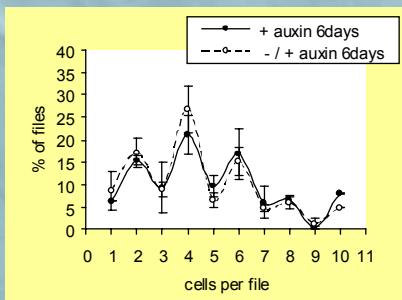
Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

## Wie kann man das untersuchen?

- Anzucht der Parenchymzellen in Kultur
- Anschalten der Teilung durch Auxin
- Teilung in einer Achse bildet Fäden
- Die Fäden haben eine „Richtung“

### Folgerung:

Die Zellen in Kultur verhalten sich wie „Blattgewebe im Glas“



## Aber: gibt es auch Musterbildung ?

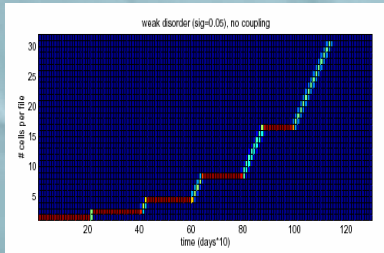
- Zahl der Fäden mit 1, 2, 3, .... Zellen
- Es gibt „Schwingungen“
- Geradzahlige Fäden sind häufig
- Ungeradzahlige sind selten

### Folgerung:

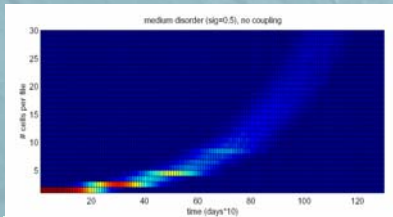
JAI! Die Zellteilung in einem Faden ist nicht zufällig, sondern wird geordnet!



Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



Strikte Ordnung



Völlige Unordnung

Universität  
Karlsruhe

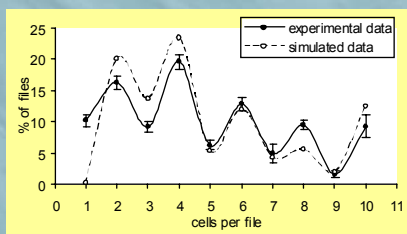
Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

## Kann man Musterbildung rechnen?

- Simulation: Zellzahl über die Zeit
- Farbcode: Häufigkeit einer Zellzahl
- Strikte Ordnung: alle Fäden sind gleich
- Völlige Unordnung: alle Zellzahlen kommen mit gleicher Häufigkeit vor

### Folgerung:

Das beobachtete Muster liegt irgendwo zwischen Ordnung und Unordnung



## Berechnung des beobachteten Musters

- Schwache Kopplung der Zellteilung
- Kopplung nur in einer Fadenrichtung
- Teilung einer Zelle erhöht die Häufigkeit für die Teilung der rechten Nachbarzelle
- Man kann die „Schwingungen“ recht genau simulieren

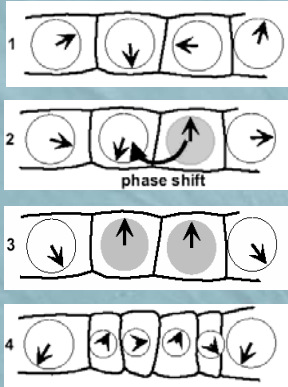
### Folgerung:

Das Muster entsteht durch ein Signal, das gerichtet durch den Faden wandert

Universität  
Karlsruhe

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

## Was ist das Signal?



• Berechnung: wie sieht das Muster aus, wenn dieses Signal gehemmt wird?

• Experiment: wie sieht das Muster aus, wenn man den Auxinfluß hemmt?

• Die beiden Muster stimmen überein!

• Das Signal ordnet nach dem „Prinzip des Schnellsten“ (wie beim Zugabeapplaus!)

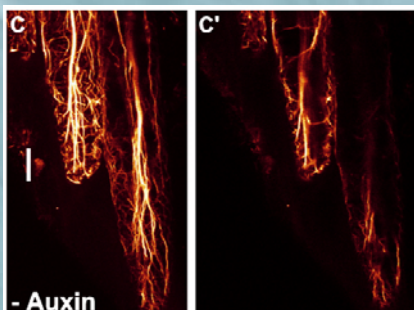
### Folgerung:

Das musterbildende Signal ist Auxin!



Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

## Woher kommt „Richtung“?



Actin – die „Muskeln“ der Pflanzenzelle  
Waller, Riemann, Nick 2002

• Die Auxinpumpe muß am Zellpol eingebaut werden.

• Es findet ein ständiges „Recycling“ statt.

• Der Transport benutzt Actin.

• Actin ist polar organisiert.

### Folgerung:

Die „Richtung“ des Auxintransports beruht letztlich auf der „Richtung“ von Actin.

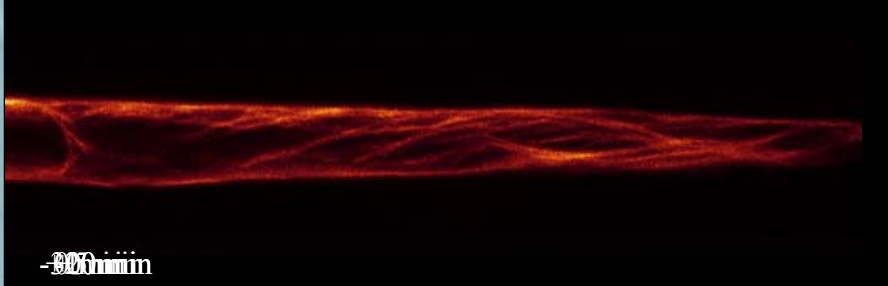


Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

## Actin reagiert auf Auxin

Reiszelle, Auxin zum Zeitpunkt 0, Actin über ein fluoreszentes Protein sichtbar gemacht.

Holweg, Süßlin, Nick 2004



- Actinbündel faser in feine Stränge auf.

### Folgerung:

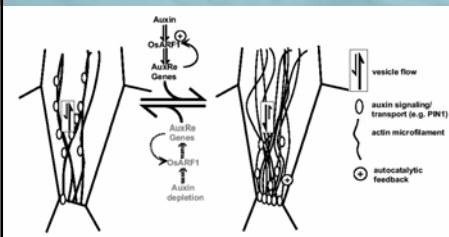
Die Beziehung zwischen Auxin und Actin ist zweiseitig.



Universität  
Karlsruhe

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

## Henne oder Ei?



- Auxin führt zu Entbündelung von Actin
- Entbündeltes Actin transportiert besser
- Actin transportiert Auxinpumpen
- Auxin wird stärker gepumpt



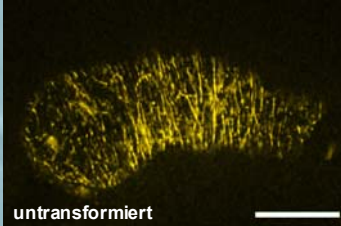
### Folgerung:

Schneeball-Effekt: Wer hat, dem wird gegeben – wie beim Blattnervenmuster



Universität  
Karlsruhe

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



Maisch und Nick 2006



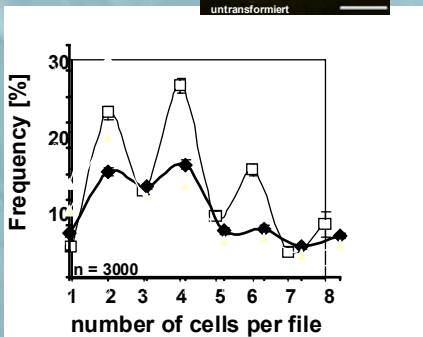
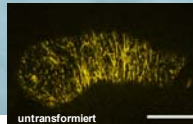
## Actin und Musterbildung

- Transgene Zell-Linie mit überstarker Actinbündelung
- Voraussage: Bündelung von Actin hemmt den Transport der Auxinpumpen
- Auxinpumpen werden nicht richtig platziert
- Der Fluß von Auxin wird gehemmt

### Folgerung:

Die Musterbildung sollte gestört sein – die „Schwingungen“ müßten verschwinden

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

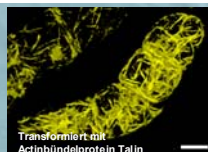


## Actin und Musterbildung

- Untransformierte Kontroll-Linie: „Schwingungen“ sind da
- Transformierte Linie: „Schwingungen“ sind nicht mehr da

### Folgerung:

Bündelung von Actin ist verknüpft mit einem Fehlen der Musterbildung



Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



**Achtung: „Falsche Kausalität“  
(Storch-Geburtenrate-Problem)**

- A. Zahl der Störche in Europa nimmt ab.
- B. Zahl der Geburten in Europa nimmt ab.
- C. Also bringt der Storch die kleinen Kinder.



Universität  
Karlsruhe

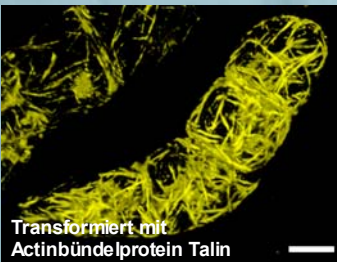
Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

## Die Geschichte vom Storch

- Actin gebündelt: Musterbildung fehlt
- Das heißt noch lange nicht, daß die Bündelung von Actin die Ursache für die fehlende Musterbildung ist.
- Es könnte sich um eine vorgespiegelte Ursächlichkeit handeln.

### Folgerung:

Man muß erst zeigen, daß bei einer Aufhebung der Bündelung die Musterbildung wiederhergestellt wird.



Universität  
Karlsruhe

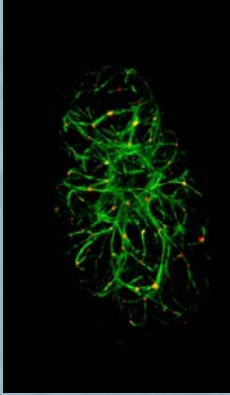
Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe

## Wie geht das?

- Durch Zugabe von Auxin lassen sich die Actinbündel in feine Stränge auflösen.
- Durch Auxin läßt sich also der Actindefekt der transformierten Linie „heilen“
- Kommen dann die „Schwingungen“ wieder zurück?
- JA! Es gibt dann keinen Unterschied zum Wildtyp mehr

### Folgerung:

Es ist eine echte Kausalität – Die Organisation von Actin ist die Ursache für das musterbildende Signal



Actin-Nucleationspunkte (rot) sitzen entlang dem Actinskelett (Jan Maisch)



Universität  
Karlsruhe

## Wie geht es weiter?

- Actin ist die Ursache der Musterbildung
- Wer oder was organisiert Actin?
- Actin wächst von Startpunkten (Actin-Nucleationszentren) aus
- Die Bewegung und Ordnung dieser Startpunkte bestimmt die Actinrichtung

### Vision:

Wie werden die Actin-Nucleationszentren geordnet, welche Rolle spielt Auxin dabei?

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



## Warum Pflanzen keinen Great Chairman Mao brauchen

- Musterbildung entsteht durch Selbstverstärkung (Auxin-Actin-Schleife) und gegenseitige Konkurrenz der Zellen um Auxin (Drainage).
- Kleine, oft zufällige Unterschiede, werden dadurch hochgeschaukelt, bis ein klares Muster entsteht.
- Pflanzen können also ein großes Maß an zellulärem Chaos tolerieren.

ABER: „Tolerieren“ heißt noch lange nicht „benötigen“...



Universität  
Karlsruhe

Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe



## Warum Pflanzen „Chaos“ brauchen

- Die Entwicklung einer Pflanze ist völlig offen.
- Es hängt von der Umwelt (z.B. Licht oder Dunkel) ab, wie die Pflanze aussieht.
- Die Musterbildung muß daher sehr flexibel sein, alle Zellen sind in der Lage, verschiedene Wege einzuschlagen.
- Wenn alle Zellen „ordentlich“ wären, würde die Musterbildung gleichzeitig in zu vielen Zellen beginnen, da es eben keinen „Chairman Mao“ gibt.
- Pflanzenzellen müssen daher stark variieren.



•„Chaos“ ist also wichtig!



Peter Nick, Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe