

Der Tschernobyl-Reaktor und deutsche Kernreaktoren

S. Mittag, FZD

Ein “Bilder-Artikel” zur Reaktorphysik

Für Steffi und Falk

Am 26. April 1986 ereignete sich in der Ukraine, damals Bestandteil der Sowjetunion, eine nukleare Katastrophe, die Reaktorexpllosion von Tschernobyl, welche ganz wesentlich zur politischen Entscheidung für den Atomausstieg in Deutschland beitrug.

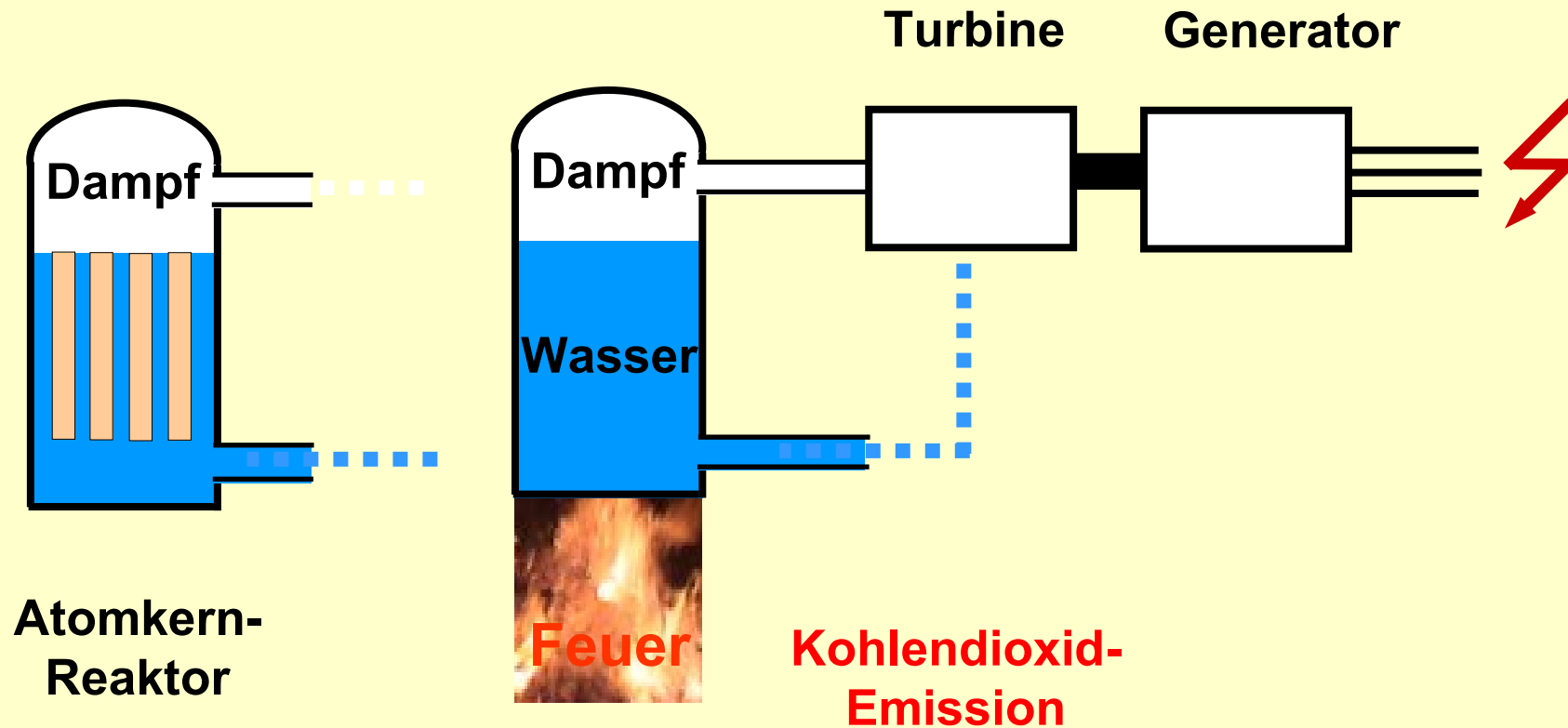
Dieser Artikel soll dem Leser helfen, die Grundzüge der Sicherheit deutscher Kernkraftwerke (Leichtwasser-Reaktoren, LWR) zu verstehen, speziell im Vergleich zum Tschernobyl-Reaktor (RBMK). Es sind keine Vorkenntnisse erforderlich, die physikalischen Grundlagen werden anschaulich erklärt. Die Darstellung ist vereinfacht, zeigt aber das Wesentliche.

Verantwortungsbewusste Bürger - vor allem politische Entscheidungsträger - sollten sich nicht einfach nur auf die Aussagen von „Experten“ verlassen, sondern grundlegende Sachverhalte richtig begreifen und angemessen bewerten.

Kraftwerk mit Dampfturbine

1

S. Mittag, FZD



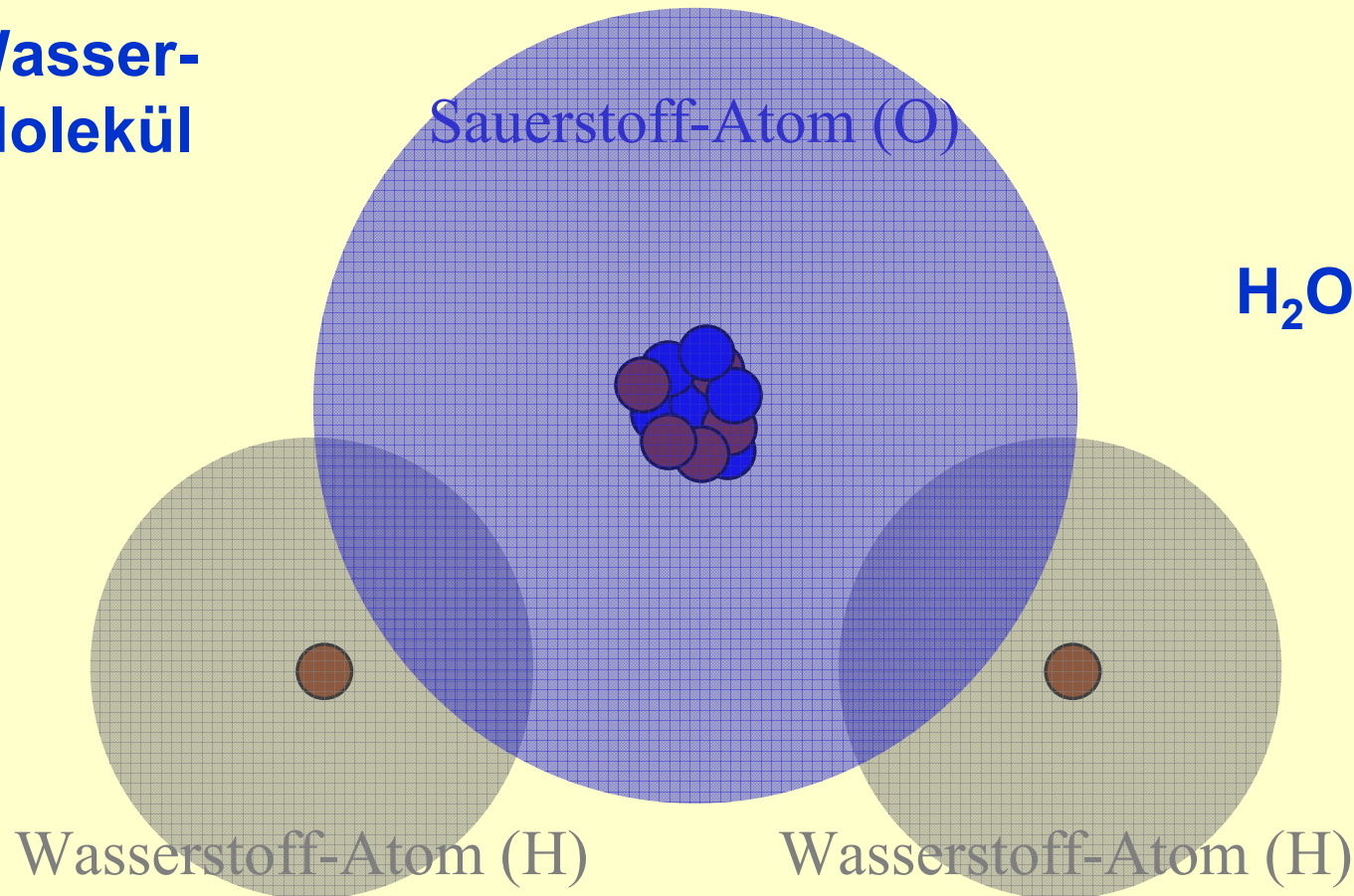
In einem Wärmekraftwerk werden fossile Rohstoffe (Kohle, Erdgas, ...) verbrannt, um Wasser zu verdampfen. Der Druck des Dampfes treibt eine Turbine an, der Generator erzeugt Elektroenergie. Im Kernkraftwerk wird die Feuerung durch einen Reaktor ersetzt, der wie ein riesiger Tauchsieder wirkt: Brennstäbe liefern Wärme durch Kernspaltung. Bevor der Reaktorbetrieb erklärt wird, sind einige Grundlagen zu behandeln.

Atome und Moleküle

2

S. Mittag, FZD

Wasser-
Molekül



Atome (Durchmesser ~ Zehnmillionstel Millimeter) haben einen Kern (positiv geladen) und eine Hülle, die von Elektronen (negativ) gebildet wird. Obwohl der Kern fast die gesamte Atommasse enthält, ist er winzig im Vergleich zur Hülle: wie ein Kirschkern im Kölner Dom. Die viel leichteren Elektronen, die chemische Bindungen zwischen Atomen realisieren, beanspruchen ein vergleichsweise riesiges Volumen.

Atomkerne

Bausteine



Protonen (+)

jedes Atomkerns



Neutronen ()



Nukleonen

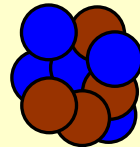
Einfachster Kern:



H-1 (Wasserstoff
Proton)

H₂O
Kühlung

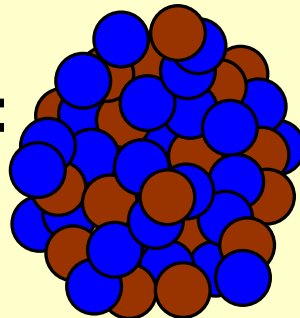
Kern mit 12 Nukleonen:



C-12 (Kohlenstoff:
6 Protonen)

Kohle
(Graphit)

Kern mit 235 Nukleonen:



U-235 (Uran:
92 Protonen)

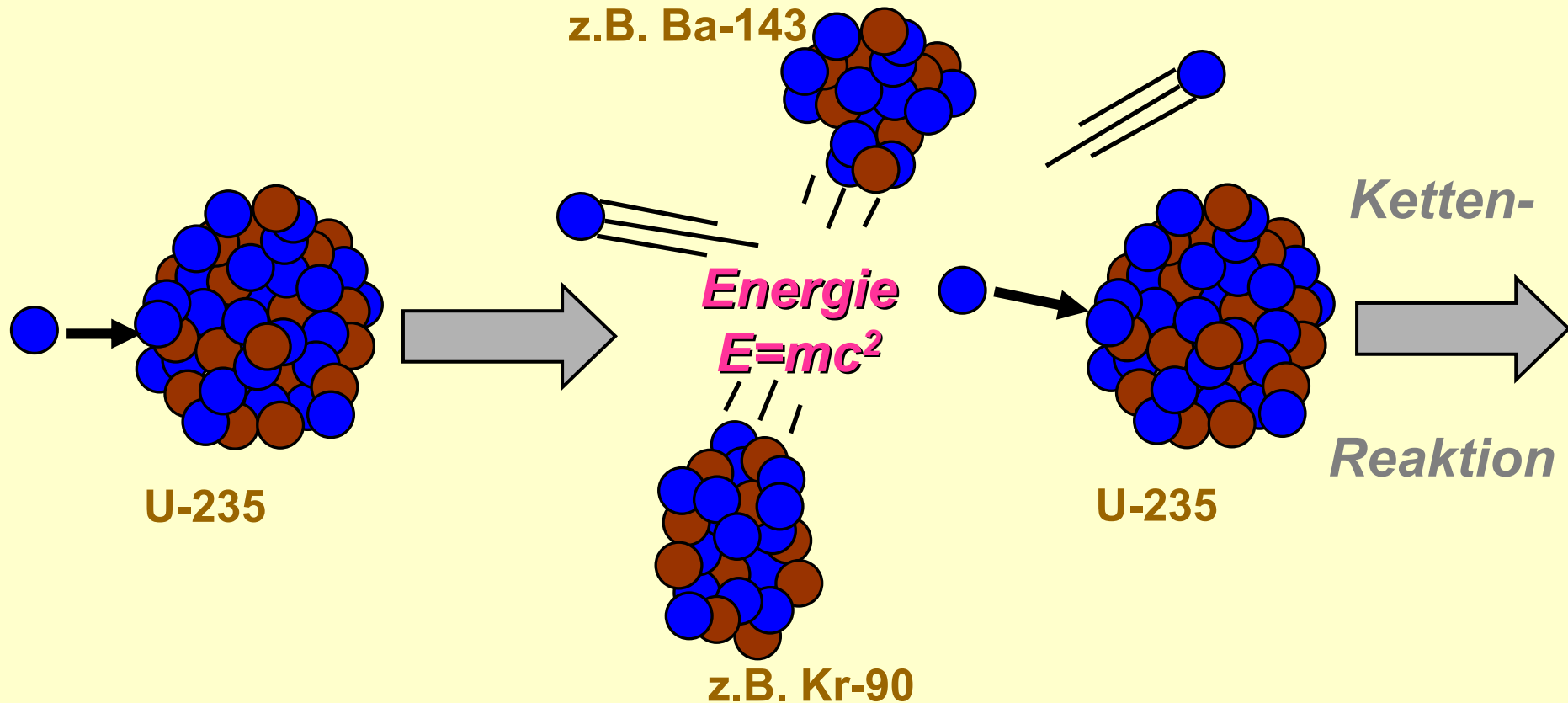
Kern-
brenn-
stoff

Für Kernreaktoren sind die Atomkerne von Bedeutung. Sie bestehen aus Protonen (positiv geladen) und Neutronen. Letztere sind elektrisch neutral. Freie Neutronen können daher die Elektronenhüllen wie einen weiten leeren Raum durchqueren, praktisch ohne Wechselwirkung mit den Elektronen.

Kern-Spaltung durch Neutronen

4

S. Mittag, FZD



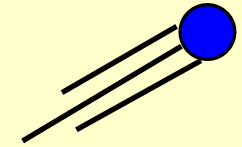
Wenn Neutronen auf Uran-235-Kerne treffen, können sie diese spalten. Dabei wird eine Energiemenge freigesetzt, die riesengroß ist im Vergleich zur Verbrennungswärme einer gleichen Masse von Kohle. Bei jeder Kernspaltung entstehen 2-3 freie Neutronen, die wiederum Kerne spalten und neue Neutronen freisetzen können. So entsteht eine Kettenreaktion, die man im Reaktor sicher steuern kann. Die Spaltprodukte sind oft radioaktiv, manche emittieren auch „verzögerte“ Neutronen (0,7% der Spaltneutronen).

„Schicksal“ der Neutronen im Kernreaktor

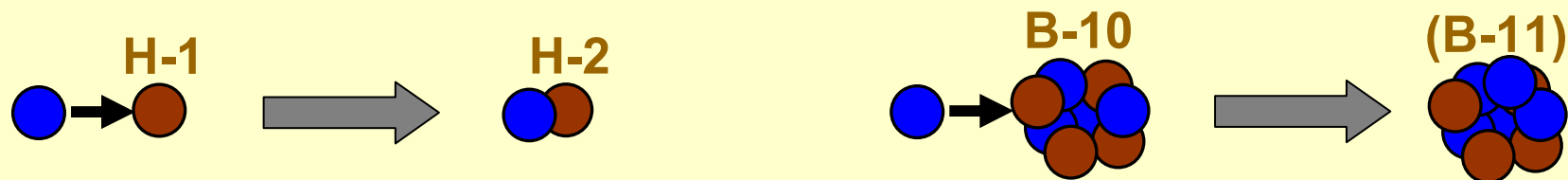
5

S. Mittag, FZD

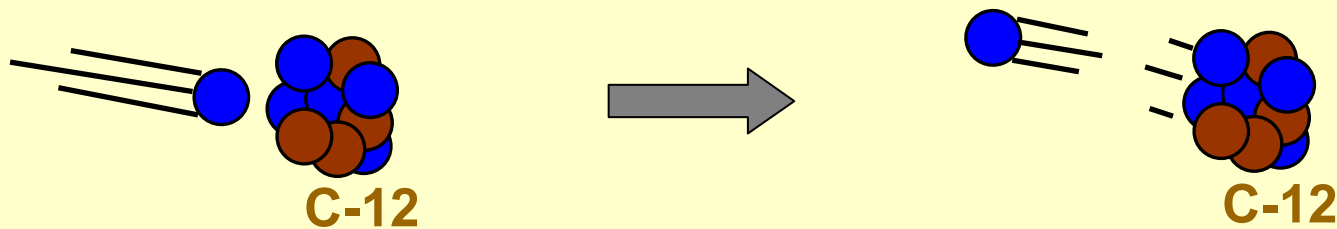
Leckage: Neutronen „fliehen“ aus Reaktor



Absorption: Neutronen werden von Kernen „geschluckt“



Moderation: schnelle Neutronen werden „gebremst“



Nicht alle Neutronen lösen Uranspaltungen aus. Manche vereinigen sich mit anderen Kernen, z. B. mit Wasserstoff-1 oder Bor-10. Dagegen ist Kohlenstoff-12 ein sehr stabiler Nukleonenverband, der „ein 13. Mitglied ablehnt“. Bei Zusammenstößen kann C-12 energiereiche Neutronen aus der Spaltung abbremsen, aber nicht absorbieren. Langsame Neutronen spalten Uran-235 viel besser als schnelle. Daher werden in den meisten Reaktoren schnelle Neutronen gezielt auf „moderate Geschwindigkeiten“ gebracht.

Abbremsung der schnellen Neutronen (*Moderation*)

Durch (mehrere) Zusammenstöße mit Atomkernen,

z.B.:

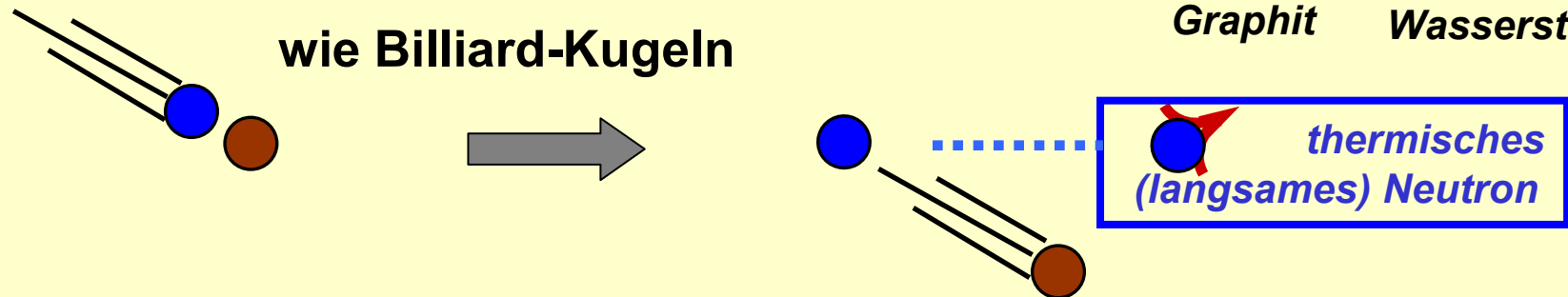
C-12

Graphit

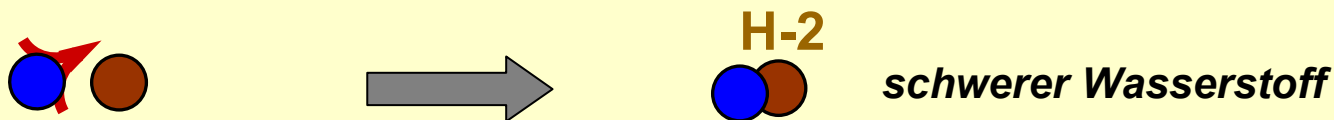
H-1

(leichter)

Wasserstoff

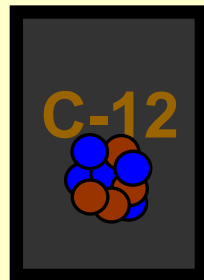


Absorption thermischer Neutronen

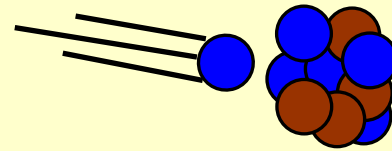


Schnelle Spaltneutronen werden auch durch Stöße mit Wasserstoffkernen gebremst bzw. „moderiert“. Dabei kann das Neutron sogar in einem einzigen Stoß seine gesamte Energie an das Proton (H-1) abgeben. Das langsame Neutron wird „thermisch“ genannt, da seine Energie der Energie der Wärmebewegung der umgebenden Atome entspricht. Der rote Keil soll die Fähigkeit zur Uranspaltung andeuten. Ganz im Gegensatz zu schnellen, „binden sich“ thermische Neutronen „gern auf ewig“ an Protonen.

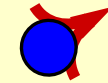
Wesentliche Materialien in Kernreaktoren



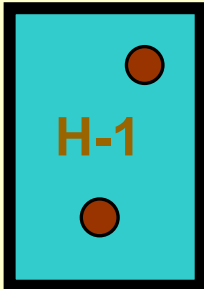
Graphit



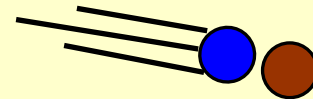
Moderation



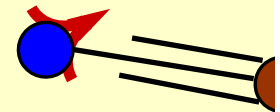
C-12: Keine Absorption durch „stabiles Dutzend“!



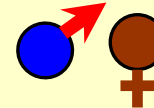
Wasser



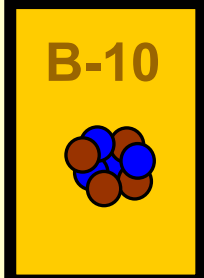
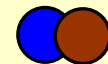
Moderation



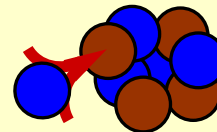
Kühlmittel



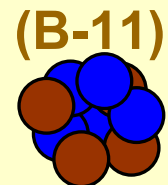
Absorption



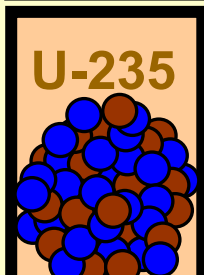
Bor



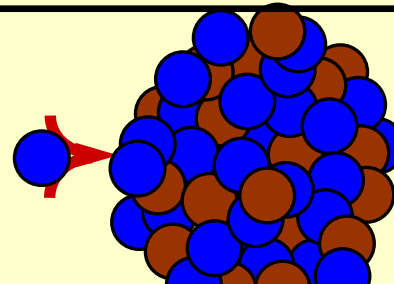
Absorption



Genutzt zur Steuerung der Neutronenzahl im Reaktor



Uran



Spaltung

Energiefreisetzung

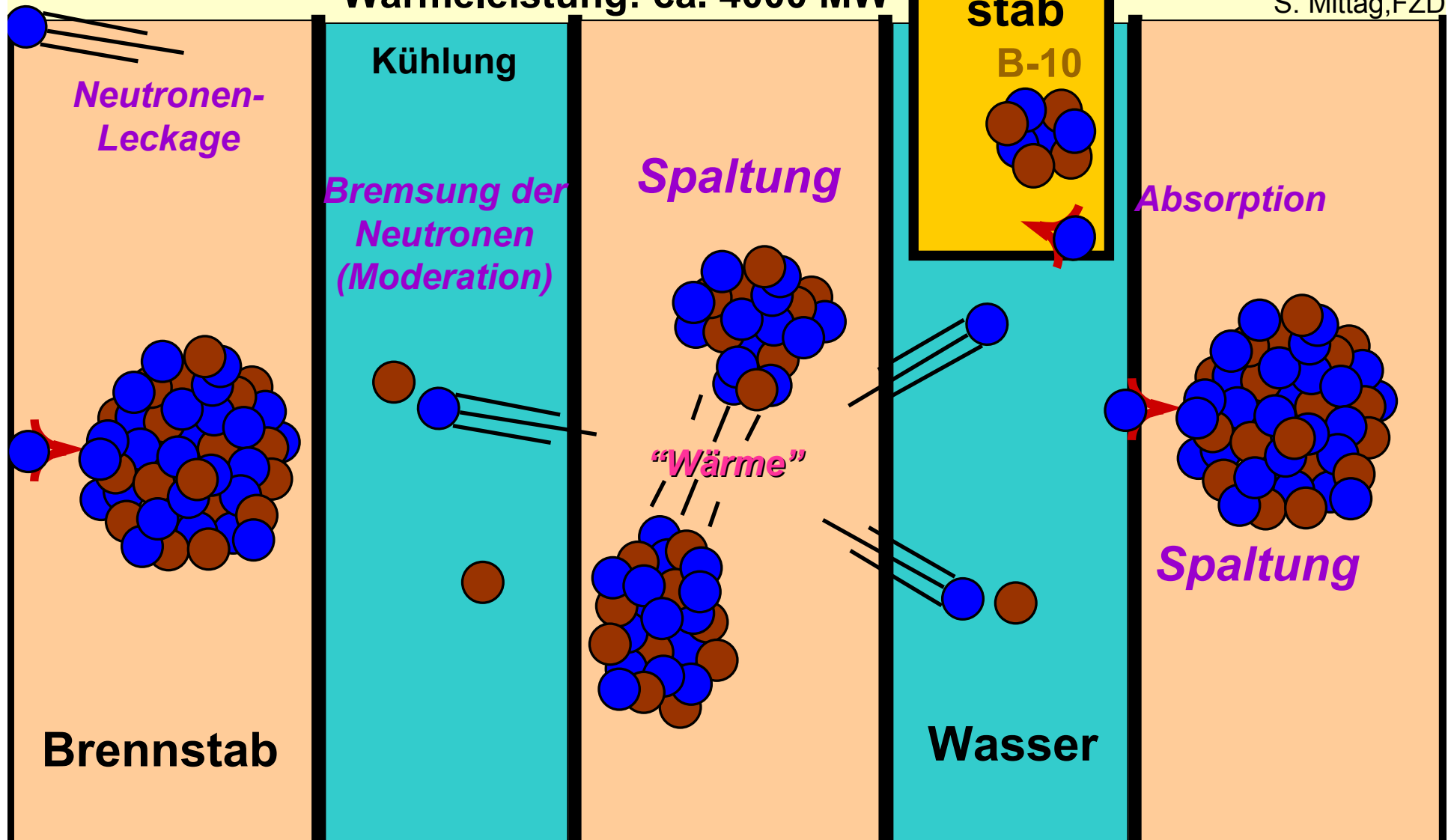
Wasser ist also im Reaktor ein ausgezeichneter Moderator für schnelle, aber auch ein starker Absorber für thermische Neutronen: Frau Proton möchte keinen hastig schnellen Partner, lieber ist ihr der einfühlsame, langsamere Herr Neutron. C-12 will kein 13. Nukleon. Diese harten physikalischen Fakten sind ganz wesentlich zum Verständnis der Unterschiede zwischen Siemens- und Tschernobyl-Reaktoren.

Siemens-Reaktor (LWR), vereinfacht

Wärmeleistung: ca. 4000 MW

8

S. Mittag, FZD



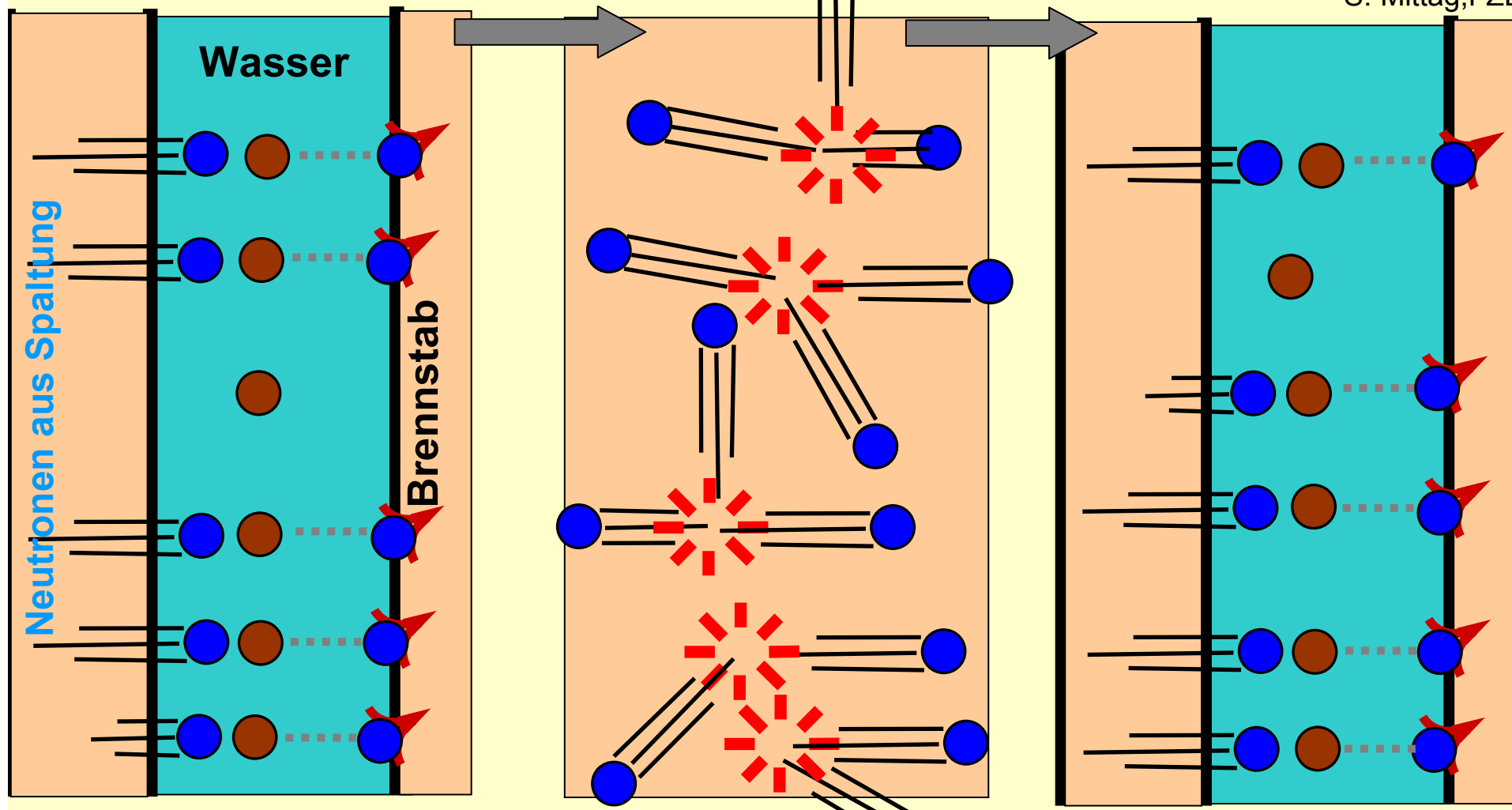
Ein Siemens-LWR enthält kein Graphit, Moderation erfolgt durch Wasserstoff. Bei dieser Konstruktion ist im Wasser die Moderation deutlich stärker als der Neutroneneinfang. Mittels Eintauchen von Steuerstäben werden Neutronen gezielt eingefangen, was zur Reduzierung der Kernspaltungs-Rate, d.h. der Wärmefreisetzung führt. Damit wird die Reaktorleistung gesteuert bzw. der Reaktor sicher abgeschaltet.

Reaktor-Normalbetrieb: 5 Neutronen

K=1

9

S. Mittag, FZD

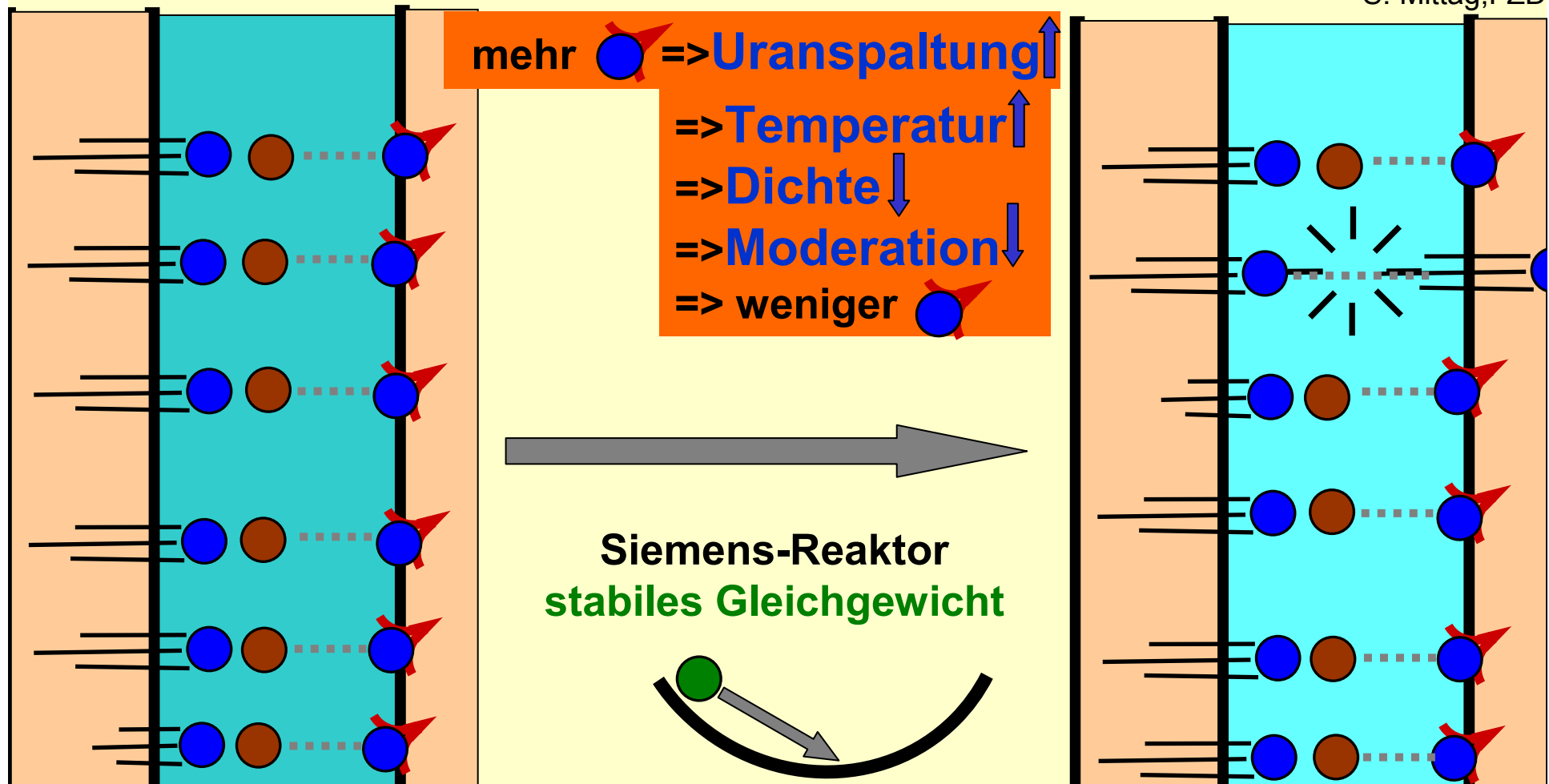


Im Reaktor fliegen Milliarden und aber Milliarden von Neutronen kreuz und quer umher. Stellvertretend für alle, sieht man links 5 Spaltneutronen, die abgebremst werden und dann zu 5 neuen Spaltungen führen (5 Symbole mit rotem Keil). Die Spaltneutronen der „nächsten Generation“ (Bild Mitte, Spaltbruchstücke weggelassen) erleiden verschiedene Schicksale (vgl. Bild 5). Von den (2-3) Neutronen aus einer Spaltung führt letztlich im Mittel genau eines wieder zu einer neuen Spaltung (neue Generation, Bild rechts); der Multiplikations-Faktor ist $K=1$. So wird im Reaktor gleichmäßig Wärme erzeugt.

Schwankung mit negativer Temperatur-Rückkopplung

10

S. Mittag, FZD



Im Reaktor können Schwankungen auftreten: aus irgendeinem Grund wächst die Neutronenzahl (6 statt vorher 5) und damit die Spaltrate (links). Dies bedeutet stärkere Wärmeproduktion und Aufheizung, wodurch die mittlere Dichte des Wassers sinkt: Im rechten Bildteil fehlt ein moderierender H-1-Kern, weil dort eine Dampfblase entstanden ist. Damit sind wieder nur 5 spaltbereite Neutronen vorhanden, der Ausgangszustand (Bild 9) hat sich von selbst wieder eingestellt. Diese „negative Rückkopplung“ oder inhärente Stabilisierung ist in deutschen Kernkraftwerken immer garantiert. [Es existiert auch eine negative Rückkopplung über die Brennstoff-Temperatur – ihre Erklärung würde jedoch diesen Rahmen sprengen.]

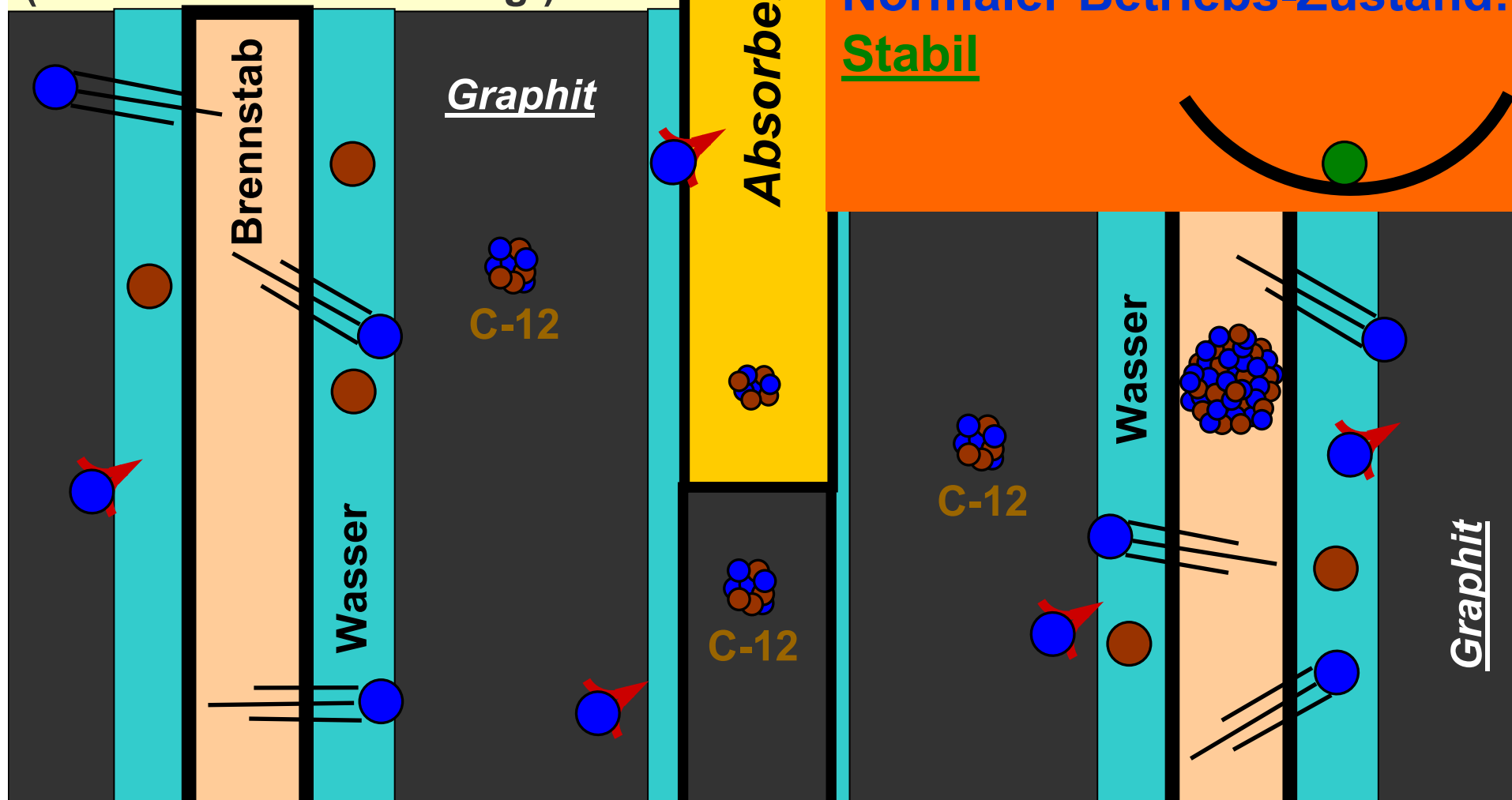
Tschernobyl-Reaktor

Steuerstab mit Graphitfuß

(vereinfachte Darstellung!)

11

S. Mittag, FZD

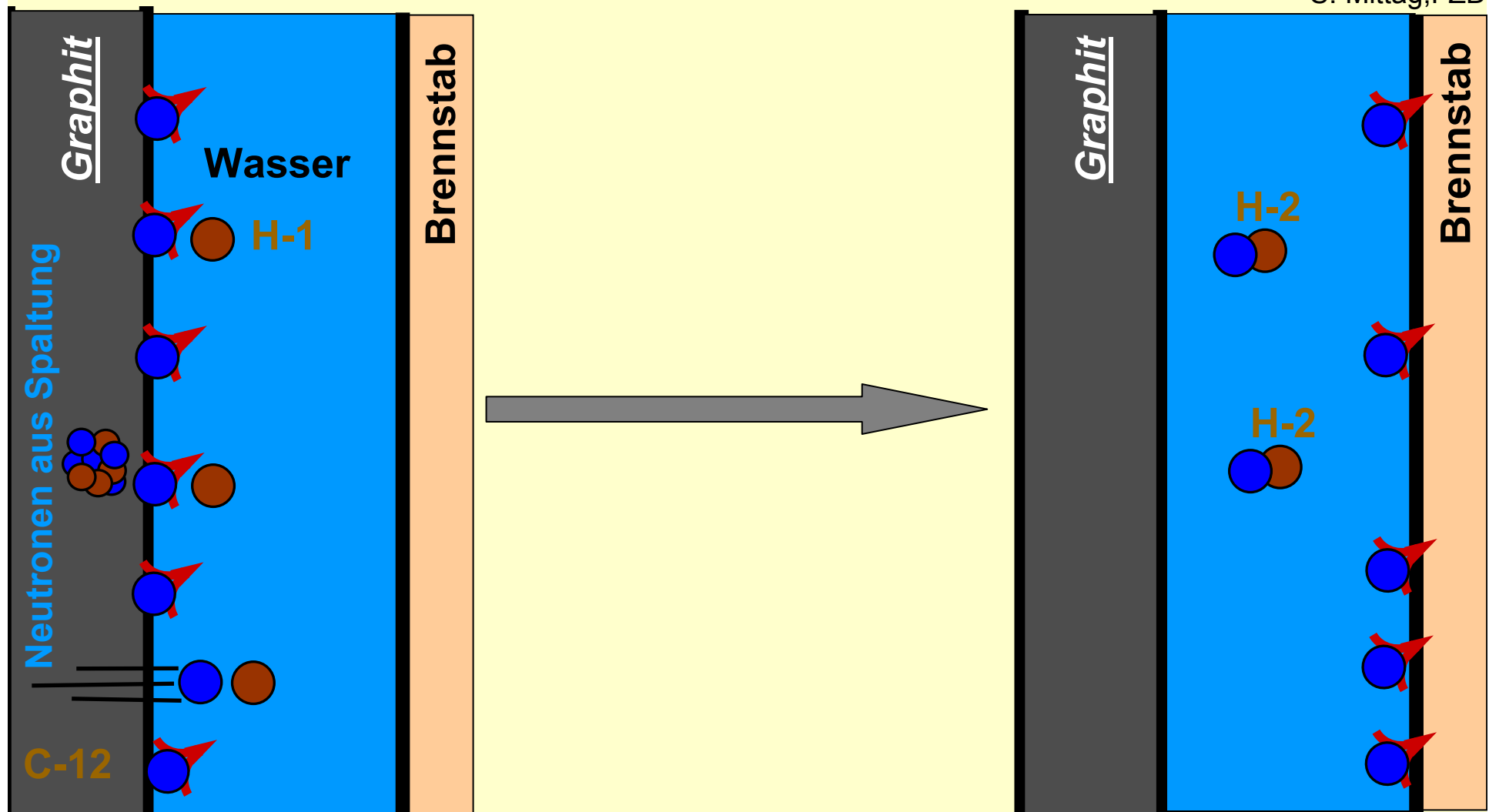


Der Tschernobyl-Reaktor (Typ: RBMK) ist anders aufgebaut. Graphit ist hier der Hauptmoderator. Das Wasser enthält im Normalbetrieb viele Dampfblasen (geringe Dichte der H-1-Kerne). Graphit befindet sich auch in den unteren Teilen der Steuerstäbe. Bei Normalbetrieb ist dieser Reaktor im stabilen Temperatur-Gleichgewicht, die Temperatur-Rückkopplung ist negativ. Die nominale Wärmeleistung beträgt 3200 MW.

Tschernobyl-Reaktor unmittelbar vor Unfall

12

S. Mittag, FZD

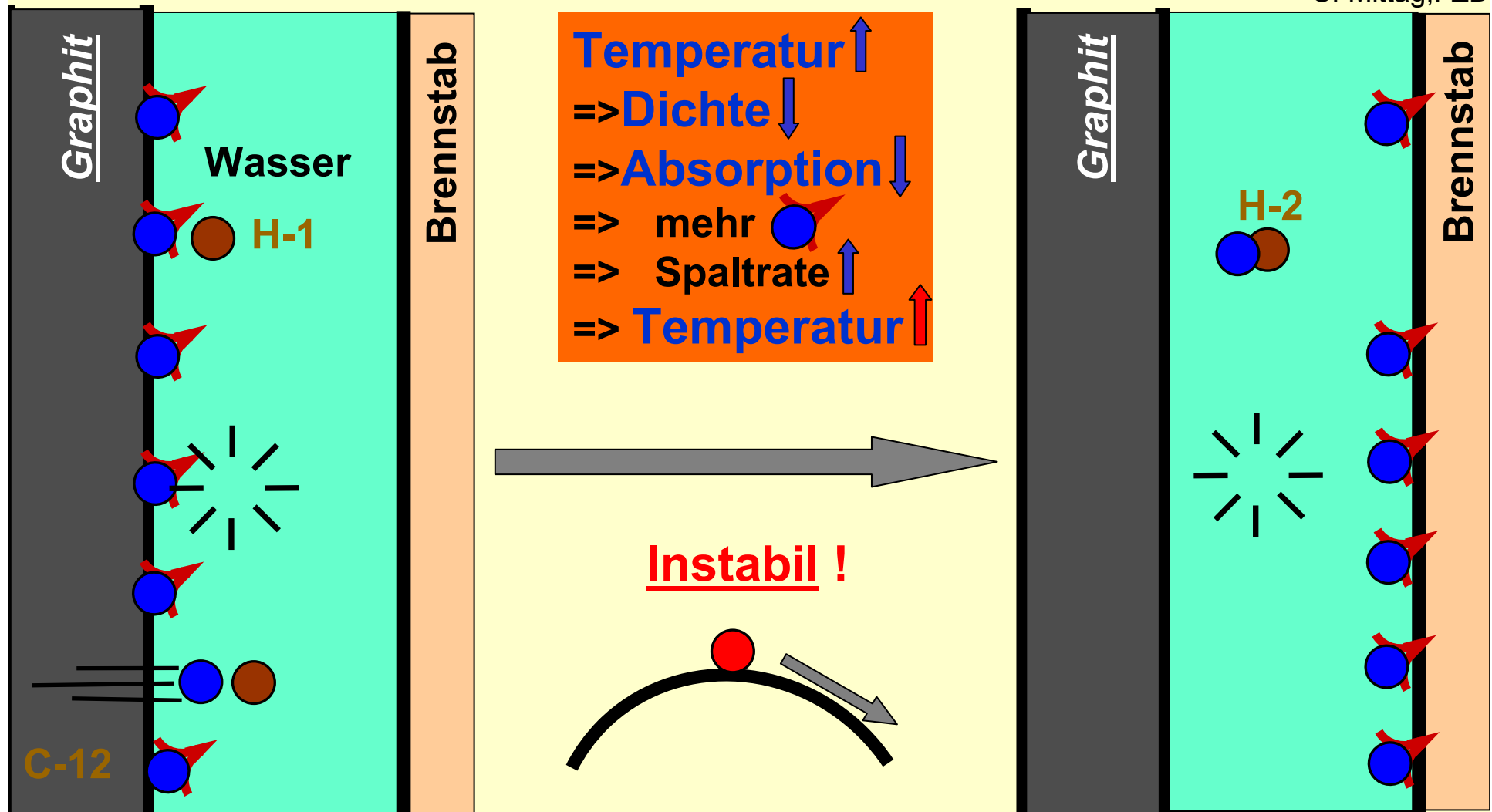


Ende April 1986 war ein Funktionstest bei 1000 MW Wärmeleistung vorgesehen. Entgegen den Vorgaben wurde der Test jedoch bei ca. 200 MW ausgeführt, und die Wasserdichte war höher als im Normalbetrieb (kleinerer Dampfanteil). Die meisten Neutronen kommen bereits gebremst aus dem Graphit (links im Bild); viele werden daher von Wasserstoff-Kernen („einsamen Protonen“) eingefangen. Im Wasser überwiegt also die Absorption thermischer Neutronen die Moderation schneller Neutronen.

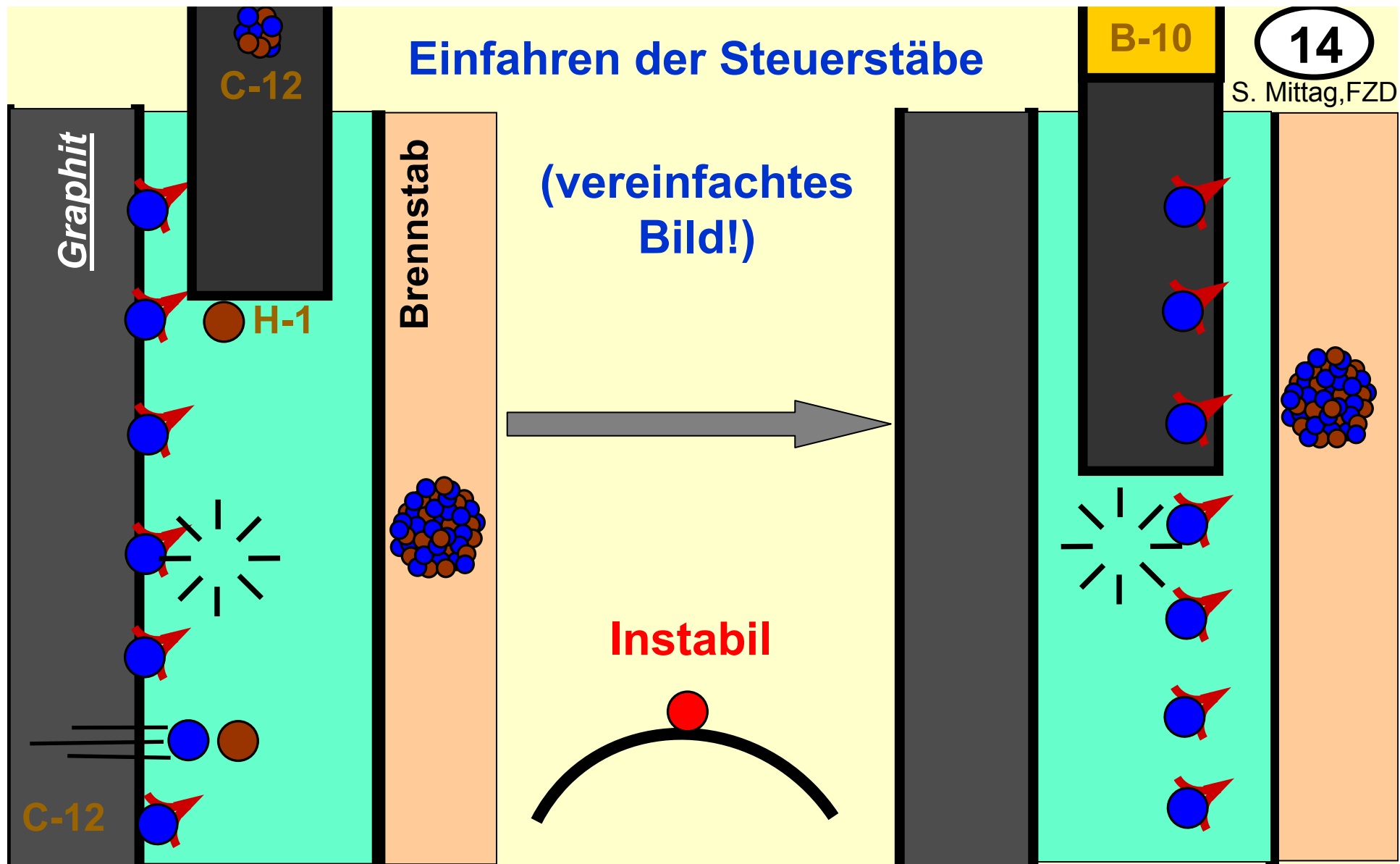
Schwankung bei positiver Temperatur-Rückkopplung

13

S. Mittag, FZD

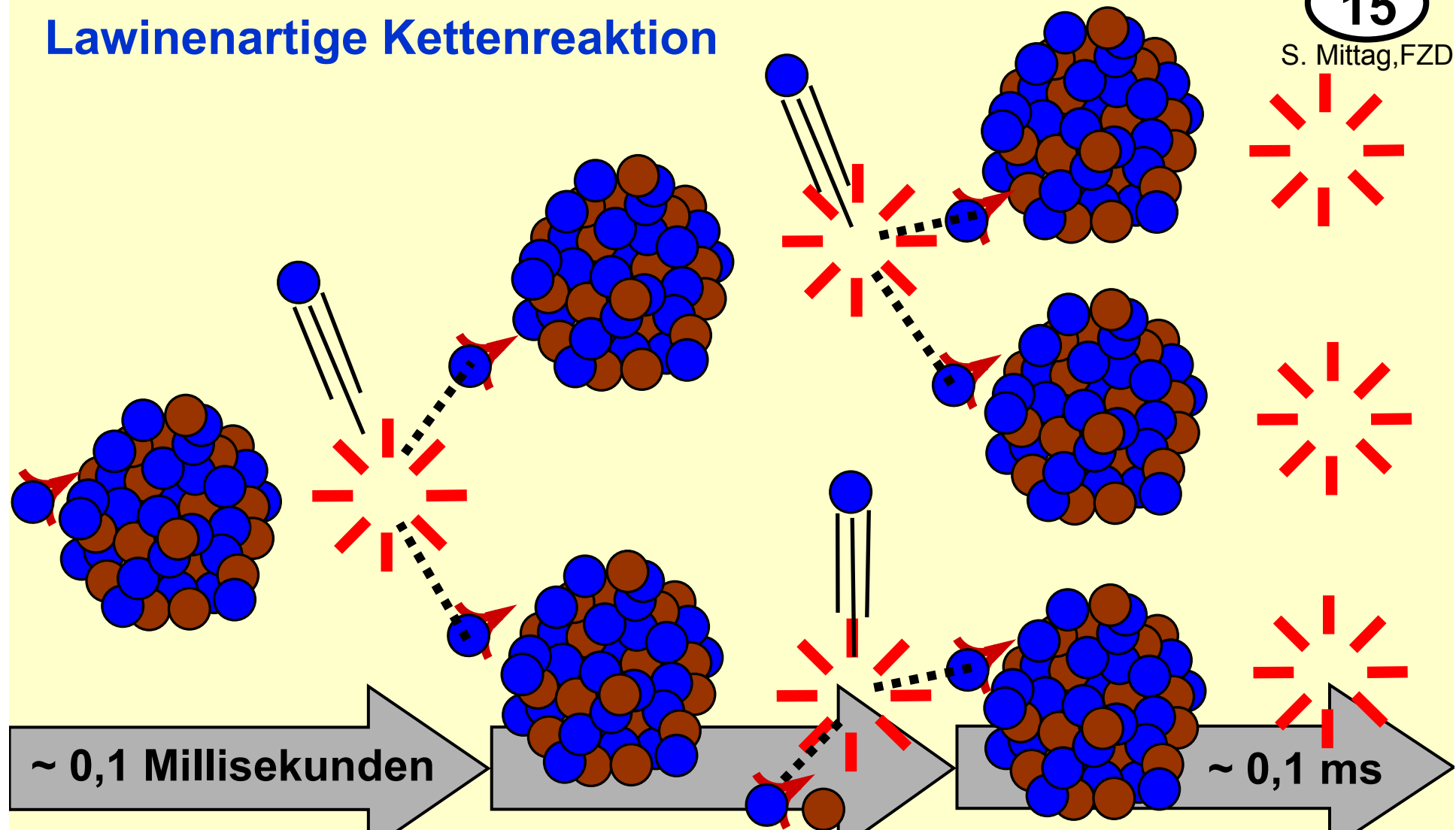


Hier liegt der Knackpunkt zum Verstehen der Unfallursache. Bei Erwärmung des Wassers infolge einer Schwankung entsteht eine Dampfblase (links), weniger thermische Neutronen werden eingefangen, mehr gelangen zum U-235 (Brennstab, rechts); die Spaltrate steigt, und damit die Heizleistung. Erwärmung führt somit automatisch zu weiterer Erwärmung (positive Temperaturrückkopplung). Die Erhitzung „schauelt sich auf“. Die Reaktor-Operateure wussten de facto nichts über diesen extrem gefährlichen Zustand!



Sie bemerkten den spontanen Leistungsanstieg, hatten aber keine Erklärung dafür. Also fuhren sie die Steuerstäbe ein, die in zu großer Zahl und zu weit ausgefahren waren. Somit wurden Graphit-Teile in Gebiete mit hoher Neutronendichte geschoben (Wasser herausgedrängt). C-12 moderiert, aber absorbiert Neutronen nicht („will kein 13. Nukleon“), daher gelangten jetzt noch mehr thermische Neutronen zum U-235. Die Steuerstäbe, die als Bremsen wirken sollen, beschleunigten hier die Kettenreaktion zusätzlich!

Lawinenartige Kettenreaktion



Der Multiplikationsfaktor K (Neutronenvervielfachung von einer Generation zur nächsten, vgl. Bild 9) war in dieser Konstellation größer als eins ($K > 1,007$), der Reaktor war „prompt überkritisch“. Unter diesen Umständen geschieht die Vervielfachung der prompt (ohne Verzögerung) aus den Spaltungen entspringenden Neutronen rasend schnell. In einer Sekunde stieg die Spaltrate auf das Tausendfache an, bevor die Steuerstab-Absorberteile überhaupt wirksam werden konnten. Die rasante Hitzeentwicklung zerstörte Brennstäbe und Reaktor. Ein solcher Vorgang ist im Siemens-Reaktor physikalisch-technisch unmöglich.

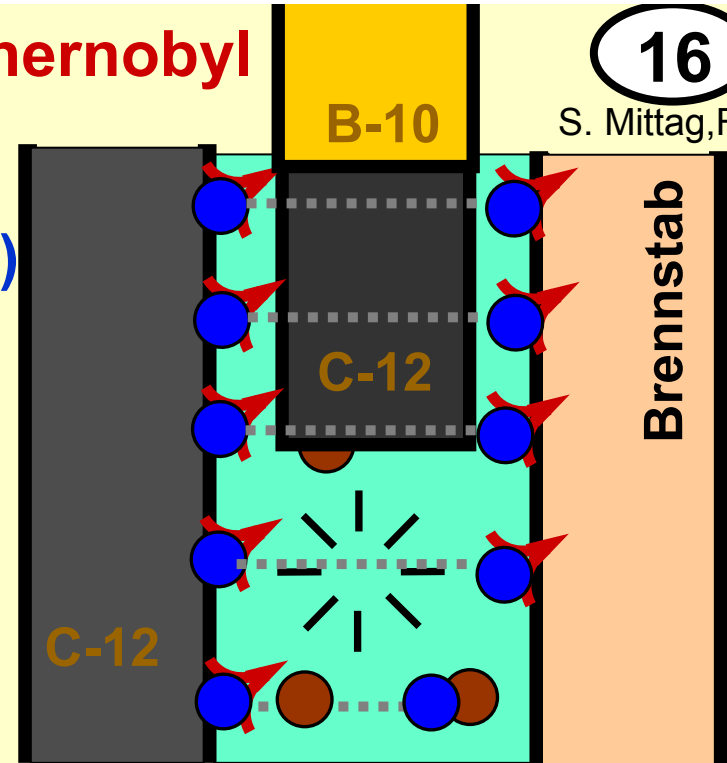
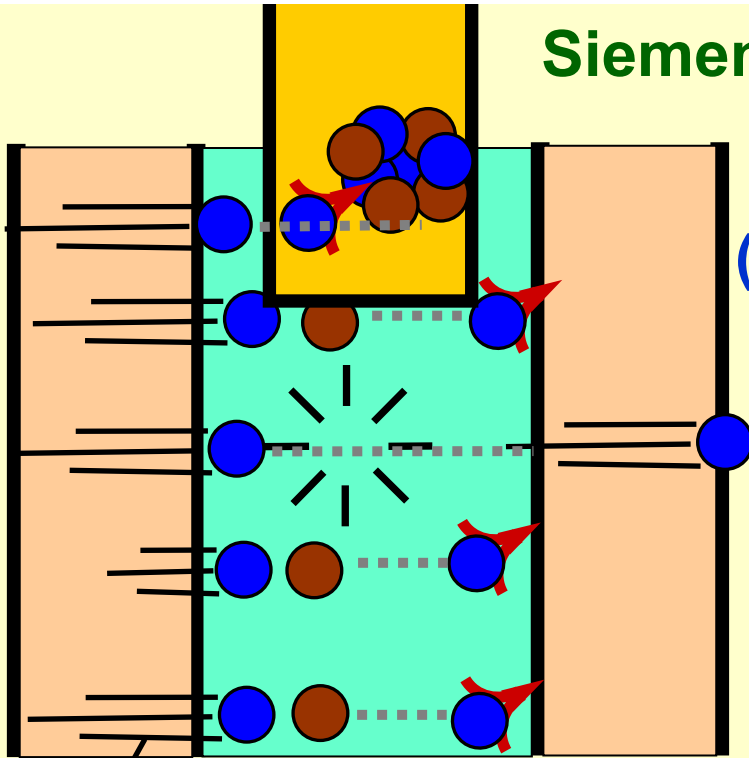
Siemens

Tschernobyl

16

S. Mittag, FZD

Vergleich
(vereinfacht)



Moderation überwiegt

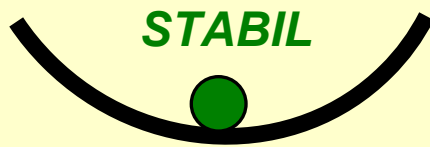
Wasser
Verdrängung

Absorption überwiegt

Leistungsabfall

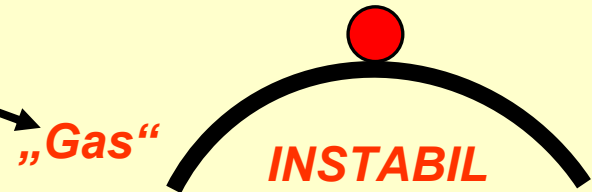
durch Dampf (Erhitzung)
durch Steuerstab(fuß)

Leistungsanstieg



IMMER

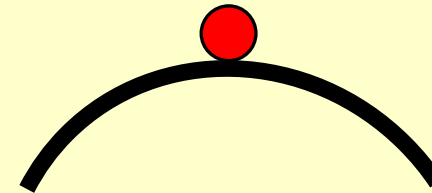
„Bremse“



! MÖGLICH !

1. Gravierende Konstruktionsmängel

Instabiler Zustand möglich!
(positive Temperatur-Rückkopplung)



Fehlkonstruktion der “Reaktorbremsen” (Steuerstäbe)

Fehlende sichere Behälter zur Rückhaltung der Radioaktivität

2. Mangelnde Schulung des Betriebs-Personals

3. Verstöße des Betriebs-Personals gegen Vorschriften

Manövrieren in instabilen Zustand

Steuerstäbe ausgefahren (zu viele zu weit heraus: lt. Vorschrift verboten)