

Rückkopplungsgesteuerte Strukturbildung in global gekoppelten Halbleitersystemen

Projektleiter:

Prof. Dr. Eckehard Schöll, Ph.D.

Institut für Theoretische Physik

Technische Universität Berlin

Sekr. PN 7-1

Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin

Tel.: 030-314 23500, Fax: 030-314 21130

schoell@physik.tu-berlin.de

Wissenschaftliche Mitarbeiter/innen

Name	Akad. Grad	Dienststellung	Institut	im TP tätig
Amann, Andreas	Dipl. Phys.	Wiss. Mitarb.	Institut für Theor. Physik Technische Universität Berlin	seit 1998
Hizanidis, Johanne		Wiss. Mitarb.	Institut für Theor. Physik Technische Universität Berlin	seit 2002
Popovich, Svitlana	Dr. rer. nat.	Wiss. Mitarb.	Institut für Theor. Physik Technische Universität Berlin	2001-2002
Stegemann, Grischa	Dipl. Phys.	Wiss. Mitarb.	Institut für Theor. Physik Technische Universität Berlin	seit 2001

2.1 (B1) Ausgangsfragestellung

Ziel des Teilprojektes war die numerische und theoretische Untersuchung selbstorganisierter raum-zeitlicher Muster in bistabilen und multistabilen Halbleitersystemen. Der Schwerpunkt sollte dabei auf einer gezielten Beeinflussung, Steuerung und Selektion dieser Muster liegen. Als Modellsysteme dienten verschiedene Halbleiternanostrukturen, wie die resonante Tunneldiode (DBRT = Double Barrier Resonant Tunneling Diode), das Übergitter, sowie die schon länger in unserer Arbeitsgruppe untersuchte HHED (= Heterostructure Hot Electron Diode). Die Modellierung des nichtlinearen Stromtransports erfolgte dabei jeweils auf der Hierarchieebene der semiklassischen Dynamik von Elektronendichten. Dies führt auf reduzierte Modellgleichungen, die eine ähnliche Form haben wie die in anderen Teilprojekten des Projektbereiches B intensiv untersuchten Reaktions-Diffusions-Systeme. Daher hatten unsere Untersuchungen auch grundlegenden, methodischen Charakter über die speziellen Halbleiternanostrukturen hinaus.

In den Modellsystemen der resonanten Tunneldiode und des Übergitters sollten zunächst die auftretenden komplexen und mitunter chaotischen raum-zeitlichen Oszillationsszenarien analysiert werden, welche durch konkurrierende räumliche und zeitliche Instabilitäten entstehen. Die Musterselektion sollte dann mit Hilfe einer zeitlich verzögerten Rückkopplungsschleife des Outputsignals realisiert werden. Dabei sollten die Methoden der Chaotikontrolle durch zeitverzögerte Rückkopplung (*Autosynchronisation*), welche allgemein eine Stabilisierung instabiler periodischer Orbits erlauben, auf Raum-Zeit-Muster angewandt werden.

2.2 (B1) Ergebnisse

In unserer Arbeitsgruppe besteht langjährige Erfahrung in der nichtlinearen und chaotischen raum-zeitlichen Strukturbildung in Halbleitersystemen [31, 32, 33, 34]. In der vergangenen Antragsperiode haben wir uns schwerpunktmäßig mit der gezielten Beeinflussung und Kontrolle dieser Muster durch zeitverzögerte Rückkopplung befasst. Dabei erzielten wir eine Reihe von grundlegenden Ergebnissen zur Chaotikontrolle in räumlich-ausgedehnten Systemen mit globaler Kopplung, die unabhängig von den speziellen mikroskopischen Systemeigenschaften sind. Insbesondere konnten wir das Verständnis der Wirkungsweise unterschiedlicher (lokaler, globaler und periodisch modulierter) Rückkopplungsschemata vertiefen. Darüberhinaus gewannen wir allgemeine Ergebnisse zur komplexen Frontdynamik. Als konkrete Modellsysteme dienten (i) ein einfaches generisches Reaktions-Diffusions-System mit globaler Kopplung, das Transport in Halbleiter-Heterostrukturen wie der HHED beschreibt, (ii) die resonante Tunneldiode (DBRT) und (iii) Halbleiter-Übergitter. Die letzteren beiden Nanostrukturen sind von besonderem aktu-

ellem Interesse in der Halbleiterforschung im Hinblick auf Anwendungen. In unserem Teilprojekt spielten neben den Kooperationen innerhalb des Sfb, die zu gemeinsamen Publikationen führten, auch die Zusammenarbeit mit den Sfb-Gastwissenschaftlern Dr. P. Rodin (Ioffe Physico-Technical Institute St. Petersburg), Dr. W. Just (Queen Mary and Westfield College, London), Dr. N. Janson (Lancaster University and Loughborough University, UK) und Dr. A. Balanov (Lancaster University, UK, und Saratov State University, Russland) sowie mit weiteren Wissenschaftlern (J. Socolar, USA, L. Bonilla, Madrid, u.a.) eine wichtige Rolle. Dr. Rodin konnte einen großen Teil seines Gastaufenthaltes durch ein Alexander-von-Humboldt-Stipendium finanzieren.

Das durchgeführte Arbeitsprogramm gliederte sich entsprechend den untersuchten Modellsystemen in drei Teile.

(i) Kontrolle der raum-zeitlichen Dynamik in einem generischen Reaktions-Diffusions-System

Bereits im ersten Antragszeitraum hatten wir ein generisches Reaktions-Diffusions-Modell vom Aktivator-Inhibitor-Typ entwickelt [34], welches ursprünglich für den senkrechten Ladungstransport durch geschichtete Halbleiterstrukturen wie die HHED abgeleitet wurde und welches typisch ist für eine große Klasse von räumlich ausgedehnten strukturbildenden Systemen in Physik, Chemie und Biologie. Eine globale Kopplung wird durch den angeschlossenen Laststromkreis vermittelt. Dieses Modell zeigt sowohl Frontdynamik [6] als auch komplexe und chaotische raum-zeitliche Szenarien [7]. Im Berichtszeitraum haben wir neue überraschende Ergebnisse und wesentliche Fortschritte in der systematischen Untersuchung der Chaoskontrolle raum-zeitlicher Muster durch zeitverzögerte Rückkopplungsverfahren (Pyragas-Kontrolle [1, 40]) erzielt.

In dimensionslosen Einheiten haben die Modellgleichungen für das generische Modell die Form eines Reaktions-Diffusions-Systems vom Aktivator-Inhibitor-Typ mit globaler Kopplung. Wir haben dieses Modell erweitert durch Kontrollkräfte F_a und F_u [15]:

$$\partial_t a(\vec{x}, t) = \frac{u - a}{(u - a)^2 + 1} - Ta + \Delta a - KF_a(\vec{x}, t), \quad (2.1)$$

$$\partial_t u(t) = \alpha [j_0 - (u - \langle a \rangle)] - KF_u(t). \quad (2.2)$$

Hierbei ist a die ortsabhängige Aktivatorvariable (Elektronendichteverteilung in der Schicht senkrecht zur Transportrichtung) und u die Inhibitorvariable (Spannung am Bauelement). Die erste Gleichung stellt die Kontinuitätsgleichung für Elektronen, welche durch die Schicht fließen, dar; die zweite Gleichung ist die Kirchhoff-Gleichung für den Gesamtstrom $\sim j_0$, der über den Spannungsabfall an einem Lastwiderstand eine globale Kopplung bewirkt. Es sind α , j_0 und T Systemparameter, welche die Zeitskala, den externen Kontrollparameter bzw. einen Parameter, der den Bistabilitätsbereich bestimmt, darstellen. Die räumlich gemittelte Elektronendichteverteilung $\langle a \rangle$ geht in den Strom ein und

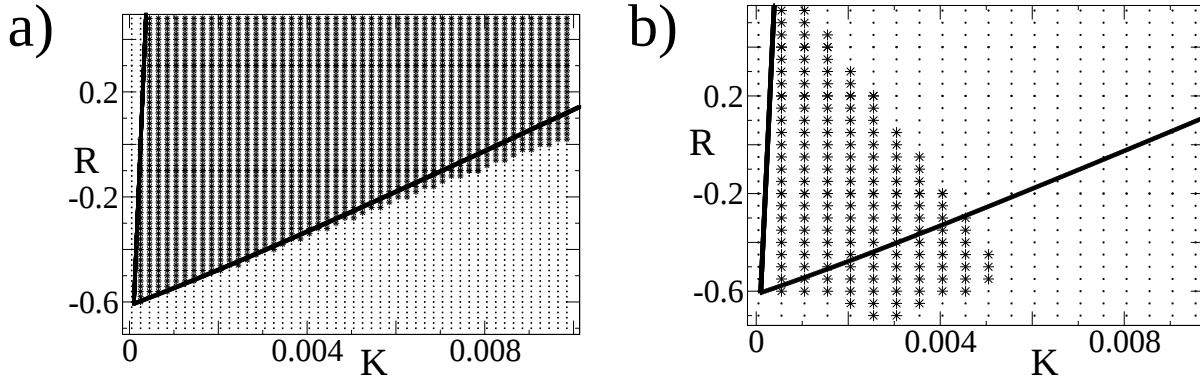


Abbildung 2.1: Kontrollgebiete der zeitverzögerten Rückkopplung in der $K - R$ Ebene für das generische HHED Modell mit (a) diagonaler und (b) lokaler Kontrolle ohne Inhibitorikontrolle. Hierbei bedeuten $\star$ erfolgreiche und $\cdot$ nicht erfolgreiche Kontrolle. Die durchgezogenen Linien bezeichnen die analytische Lösung für die Ränder der Kontrollgebietes nach (2.5). Nach [15]

repräsentiert die globale Kopplung. Die Ortsvariable in der Schichtebene $\vec{x}$ kann je nach Problemstellung ein- oder zweidimensional sein. Wir betrachten zunächst den eindimensionalen Fall. Die Kontrollkräfte F_a und F_u , welche mit einer Kontrollstärke K multipliziert werden, können allgemein gewählt werden.

Es sei zunächst $K = 0$ (keine Kontrolle). Komplexes und chaotisches Verhalten ist im allgemeinen in einem Parameterbereich zu erwarten, in dem gleichzeitig die Bedingungen für eine räumliche (Sromfilament) und eine zeitliche (Hopf-Bifurkation) Instabilität erfüllt sind, wie wir im räumlich eindimensionalen Fall gezeigt haben [7]. Daraus ergab sich die Frage, unter welchen Umständen analoges Verhalten in räumlich *zweidimensionalen* Systemen möglich ist. In Zusammenarbeit mit dem Gastwissenschaftler W. Just (London) sowie dem Teilprojekt B6 konnten wir mit Hilfe einer Amplitudenentwicklung der superkritischen Kodimension-Zwei-Bifurkation zeigen, daß eine Koexistenz von Turing- und Hopfinstabilität in zwei Dimensionen in einem (durch eine zweite diffusive Kopplung) lokal gekoppelten System im allgemeinen nicht zu erwarten ist, es sei denn die Systemgröße in einer der beiden Richtungen ist so klein, daß sich eine quasi-eindimensionale Dynamik ergibt [10].

Die generische Struktur der Gleichungen (2.1) und (2.2) liegt auch anderen Teilprojekten zu Grunde. Es ergab sich eine interessante Kooperation mit dem Teilprojekt B4, in dem ein elektrochemisches Modell zur Musterbildung auf Elektrodenoberflächen untersucht wurde: Ein detaillierter Vergleich mit unserem global gekoppelten Reaktions-Diffusions-Modell förderte erstaunliche Parallelen in den Szenarien der komplexen Raum-Zeit-Dynamik zu Tage [11]. Erweitert man das global gekoppelte zweikomponentige Reaktions-Diffusions-System durch eine dritte diffundierende Komponente, so können damit außer stationären,

atmenden oder spikenden Stromfilamenten auch laufende Filamente (bzw. Domänen) beschrieben werden [27].

Wir betrachten nun den Fall $K \neq 0$ in einer Raumdimension. Dabei seien die Systemparameter so gewählt, dass sich für $K = 0$ chaotisches raum-zeitliches Spiking ergibt. Unser Ziel ist die Stabilisierung eines instabilen periodischen raum-zeitlichen Orbits, welcher durch die Periode τ und den Floquetexponenten λ charakterisiert ist. Weiterhin sollen bei erfolgreicher Kontrolle die Kontrollkräfte F_a und F_u verschwindend klein werden (*nichtinvasive Kontrolle*).

Dies wird im allgemeinen durch verschiedene Varianten der zeitverzögerten Autosynchronisation (Pyragas-Kontrolle) erreicht [1, 2, 3]. Hier war unser Ziel, diese Verfahren auf Raum-Zeit-Muster zu erweitern. Insbesondere verwendeten wir als Ausgangspunkt eine lokale Rückkopplung in der Form $F_a = F_{\text{loc}}$, $F_u = F_{\text{vf}}$ (*diagonale Kopplung*), mit

$$F_{\text{loc}}(x, t) = a(x, t) - a(x, t - \tau) + R F_{\text{loc}}(x, t - \tau), \quad (2.3)$$

$$F_{\text{vf}}(t) = u(t) - u(t - \tau) + R F_{\text{vf}}(t - \tau), \quad (2.4)$$

wobei R ein Gedächtnisparameter ist. Für die diagonale Kontrolle genügt der Floquetexponent Λ des kontrollierten Orbits der exakten impliziten Gleichung [4],

$$\Lambda + K \frac{1 - e^{-\Lambda\tau}}{1 - R e^{-\Lambda\tau}} = \lambda. \quad (2.5)$$

Wie in Abb. 2.1(a) gezeigt, lässt sich das daraus resultierende Kontrollgebiet in der K-R Ebene numerisch mit hoher Genauigkeit für das generische Modell reproduzieren [15]. Die beiden auftretenden Gebietsgrenzen werden durch eine Flip-Bifurkation für kleine K Werte, sowie durch eine Hopf-Bifurkation für große K Werte hervorgerufen. Es ist nun interessant, zu untersuchen, wie sich das Kontrollgebiet durch das Verwenden anderer Kontrollschemas verformt. Ein Beispiel ist die *lokale* Kontrolle ohne Inhibitorontrolle, welche sich durch $F_u = 0$, $F_a = F_{\text{loc}}$ ergibt. In Abb. 2.1(b) ist zu erkennen, dass sich dadurch neue Kontrollgrenzen ergeben. Ein systematischer Vergleich verschiedener lokaler und globaler Kontrollschemas wurde in Zusammenarbeit mit W. Just (London) und J. Socolar (Duke University, USA) durchgeführt. Dabei konnten wir z.B. durch Berechnung der Floquet-Spektren zeigen, dass in Abb. 2.1(b) das Kontrollgebiet für große R und K von einer subkritischen Flip-Bifurkation begrenzt wird, und dass der Kontrollbereich bei globaler Kontrolle durch Weglassen der Inhibitorontrolle sogar vergrößert werden kann. Für die Anwendung sind insbesondere Kontrollschemas interessant, welche mit einem möglichst kleinen Verstärkungsfaktor K auskommen. In dieser Hinsicht erwies sich ein neues Kontrollschema, welches wir in Zusammenarbeit mit W. Just entwickelten [14], als überraschend effizient. Für dieses Kontrollschema werden zunächst die Floquet-Linkseigenmode $\phi_{u/a}$ und die mit dem adjungierten Problem assoziierte Floquet-Rechteigenmode $\psi_{u/a}$ für den größten Floquetexponenten des zu stabilisierenden Orbits berechnet.

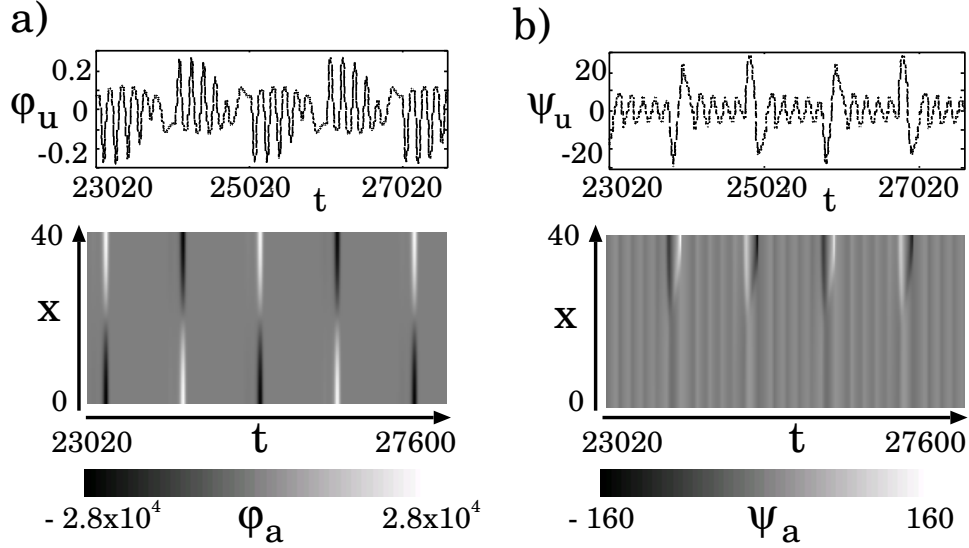


Abbildung 2.2: (a) Floquet-Linkseigenmode $\phi_u(t)$ und $\phi_a(x, t)$ für den größten Floquet-exponenten eines periodischen Orbits, sowie die entsprechende Floquet-Rechtseigenmode (b) $\psi_u(t)$ und $\psi_a(x, t)$. Nach [14]

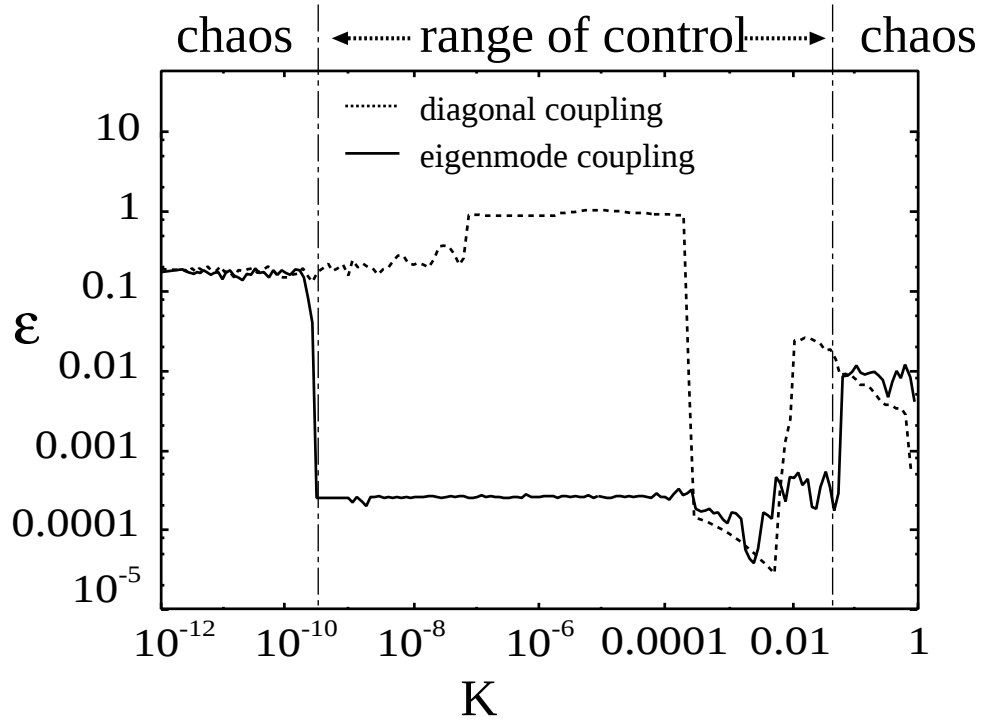


Abbildung 2.3: Vergleich der Floquet-Eigenmodenkontrolle (durchgezogene Linie) und der diagonalen Kontrolle (gestrichelte Linie). Geplottet ist das raum-zeitliche Mittel $\epsilon = \langle |a(x, t) - a(x, t - \tau)| + |u(t) - u(t - \tau)| \rangle_{x, t}$ gegen die Kontrollamplitude K . Nach [14]

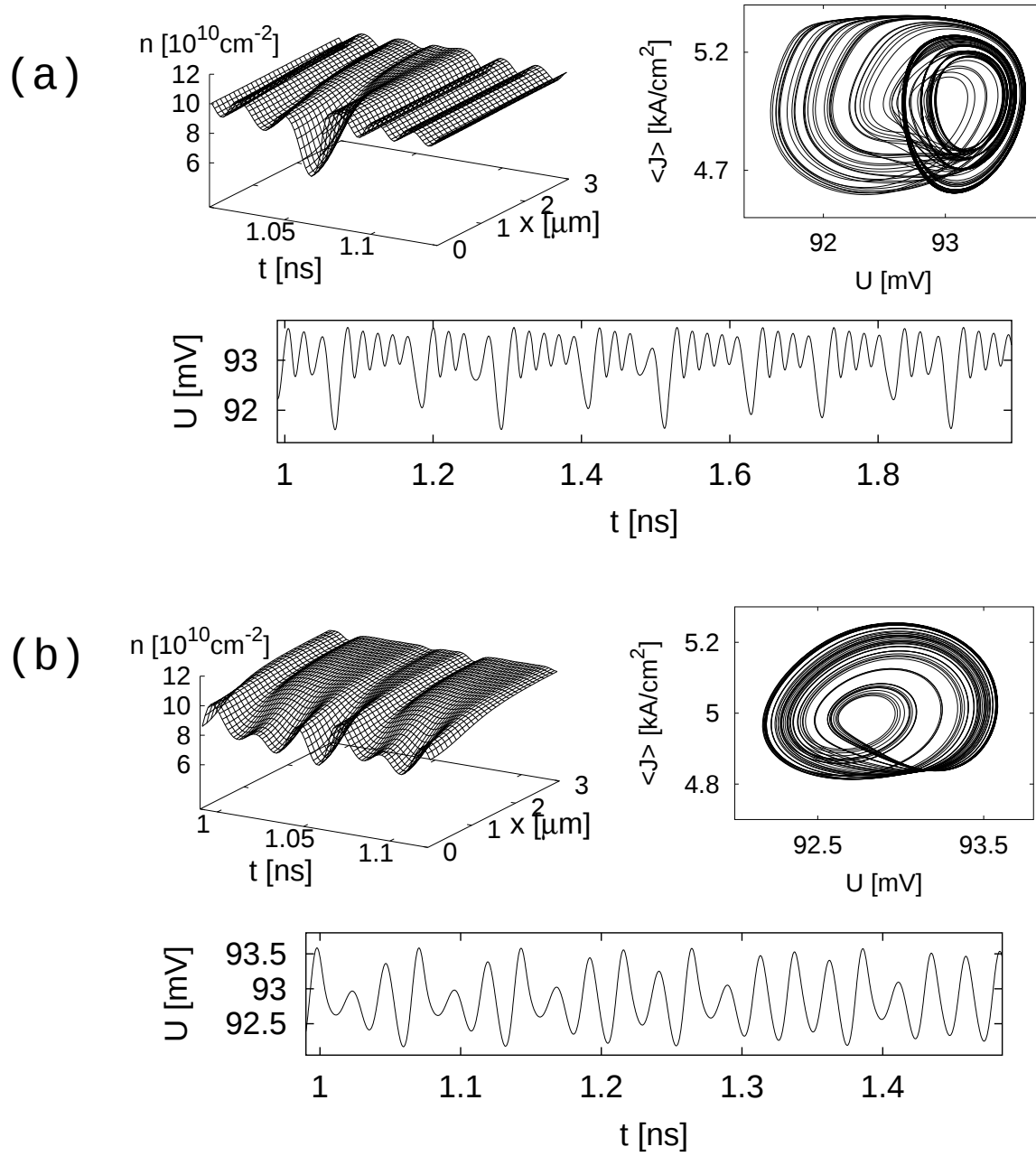


Abbildung 2.5: Chaotisches Spiking (a) und Breathing (b) der Stromdichtemuster der DBRT. Gezeigt sind jeweils das Raum-Zeit-Muster der Elektronendichte, die Projektion des Phasenportraits auf die globale Strom-Spannungs-Ebene und die Zeitserie der Spannung U . Parameter: $\epsilon = 16.5$ (a) und $\epsilon = 9.1$ (b). Nach [37].

Die Elektronen tunneln dabei vom Emitterkontakt durch die linke Barriere in den Quantentopf und von dort durch die rechte Barriere in den Kollektor. Als dynamische Variablen treten hierbei die ortsabhängige Elektronenkonzentration im Quantentopf $a(x, t)$ (Aktivator), sowie die an der Tunnelodiode anliegende elektrische Spannung $u(t)$ (Inhibitor) auf (jeweils in dimensionslosen Einheiten), wobei x die transversale Ortskoordinate senkrecht zur Stromtransportrichtung ist. Nachdem in unserer Arbeitsgruppe bereits Vorarbeiten zur transversalen Dynamik geleistet worden waren [6, 8], wurde im Berichtszeitraum zunächst die Berechnung der Tunnelströme J_{ew} und J_{ec} mikroskopisch fundiert [16]. Erweitert man das Modell wiederum durch Kontrollkräfte F_a , F_u , so erhält man in geeigneten Einheiten ein Gleichungssystem von der Form

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(a) \frac{\partial a}{\partial x} \right) + f(a, u) - K F_a(x, t), \quad (2.8)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{\epsilon} (U_0 - u - r \langle j \rangle) - K F_u(t). \quad (2.9)$$

Hierbei charakterisiert die nichtlineare Funktion $f(a, u)$ die Differenz der beiden ein- und auslaufenden Tunnelströme J_{ew} , J_{ec} und $D(a)$ ist ein effektiver Diffusionskoeffizient. Gleichung (2.9) beschreibt die globale Kopplung des Systems durch eine Beschaltung mit einem Widerstand r bei einer externen Spannung U_0 . ϵ ist ein Zeitskalenparameter und $\langle j \rangle$ ist die räumlich gemittelte Stromdichte. Dieses Reaktions-Diffusions-System ist von derselben Struktur wie das in (i) untersuchte, führt aber im Gegensatz zu jenem nicht zu einer S - sondern zu einer Z -förmigen Strom-Spannungs-Charakteristik.

Bei ausgeschalteter Kontrolle $K = 0$ fanden wir im bistabilen Regime transversale Schaltfronten [26], im anregbaren Regime stochastisch getriggerte Pulsfolgen [25] und im oszillatorischen Regime Szenarien mit atmenden Stromfilamenten und raum-zeitlichem Spiking [16]. Unsere Untersuchungen in Kooperation mit P. Rodin (St. Petersburg) zeigten, dass das dynamische Verhalten der DBRT chaotisch werden kann, wenn das Bauteil in einem aktiven Stromkreis betrieben wird [37]. Formal wird dies durch die Wahl eines negativen r in Gl. (refeq:u) erreicht. Hierbei konnten wir sowohl atmendes als auch spikendes chaotisches Verhalten nachweisen, wie in Abb. 2.2 (B1) dargestellt. Das vollständige Bifurkationsdiagramm in Abb. 2.2 (B1) zeigt ein komplexes Bifurkationsverhalten, welches wir in [25] näher untersucht haben.

Wir betrachten nun den Fall mit eingeschalteter Kontrolle $K \neq 0$ [25]. Das Ziel war hierbei, die Effektivität verschiedener Kontrollverfahren zu vergleichen. Als Ausgangspunkt diente wieder die theoretisch gut verstandene diagonale Kontrolle $F_u = F_{vf}$, $F_a = F_{loc}$, wobei F_{vf} und F_{loc} analog zu (2.3) und (2.4) berechnet werden. Wie schon für das generische Modell in (i), konnten wir auch für das DBRT-Modell die analytische Bedingung für erfolgreiche Kontrolle (2.5) numerisch exakt reproduzieren [25].

Bei lokaler Kontrolle ohne Spannungsrückkopplung, d.h. $F_u = 0$, $F_a = F_{loc}$, deformiert sich der Kontrollbereich wie in Abb. 2.7(a) dargestellt. Als sehr nützlich für die Bifurkations-

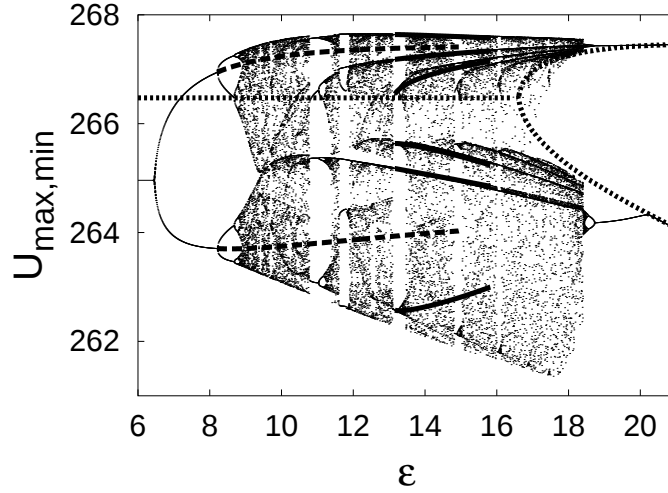


Abbildung 2.6: Bifurkationsdiagramm der Spannungsmaxima und -minima als Funktion des Zeitskalenparameters ϵ . Dick gepunktete Linie: räumlich-homogene Lösung, dick gestrichelte Linie: periodisches Breathing, dicke durchgezogene Linie: periodisches Spiking. Nach [25]

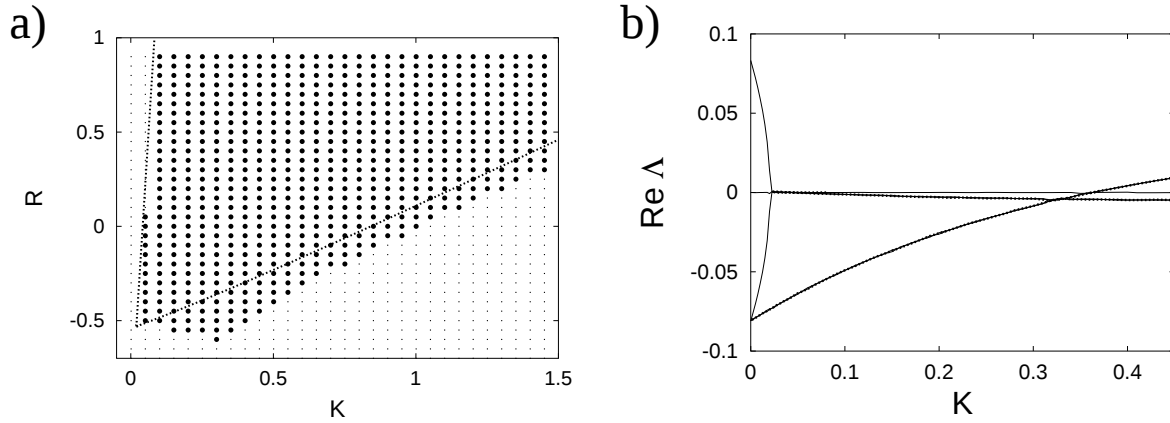


Abbildung 2.7: Kontrolle eines instabilen periodischen Orbits mit Hilfe des lokalen Kontrollschemas ohne Spannungsrückkopplung für $\epsilon = 9.1$. (a) Kontrollgebiet in der K - R Ebene. $\bullet$ bedeutet erfolgreiche Kontrolle, $\cdot$ keine Kontrolle, durchgezogene Linien: analytisches Resultat nach (2.5). (b) Die größten Realteile Δ des Floquet Spektrums in Abhängigkeit von K ($R = -0.55$). Gepunktete Linien bedeuten komplex konjugierte Paare von Eigenwerten. Nach [25]

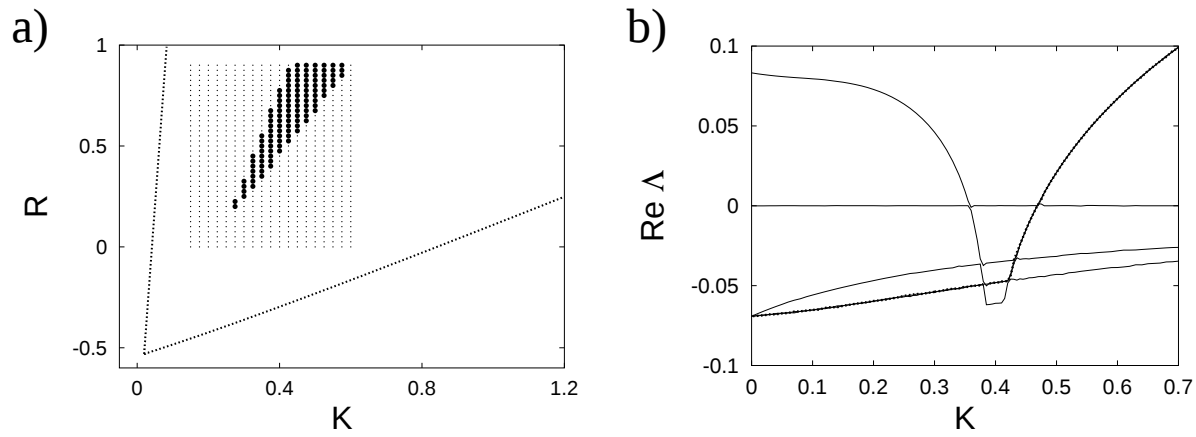


Abbildung 2.8: Wie Abb. 2.7, aber mit einer rein spannungsgesteuerter Kontrolle. Nach [25].

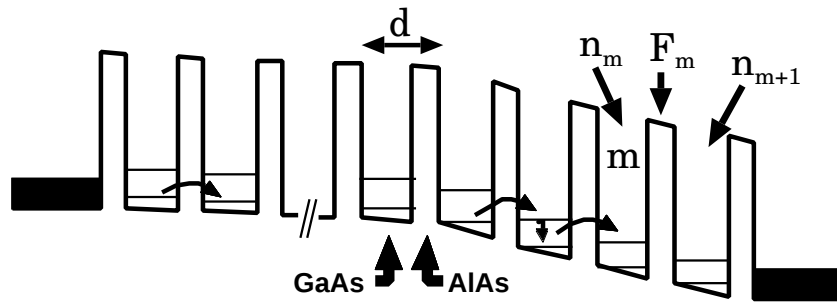


Abbildung 2.9: Energieschema eines Übergitters

analyse erwiesen sich hierbei Floquetdiagramme wie in Abb. 2.7(b). In diesem Fall ergibt sich z.B. aus dem Floquetdiagramm sofort, dass der linke Rand des Kontrollgebietes mit einer Flip-Bifurkation, der untere und rechte Rand aber jeweils mit Hopf-Bifurkationen assoziiert sind.

Das für die praktische Anwendung geeignetste Kontrollschema ist eine reine Spannungsrückkopplung, $F_u = F_{vf}$, $F_a = 0$, da hierbei die Kontrolle nur auf die physikalisch leicht zugängliche Spannungsvariable zurückgreift. Für die DBRT gelang es uns, mit diesem einfachen Verfahren einen instabilen periodischen Raum-Zeit-Orbit zu stabilisieren [25]. Das Kontrollgebiet (s. Abb.2.8(a)) ist allerdings im Vergleich zur diagonalen Kontrolle deutlich kleiner, was auch im zugehörigen Floquetdiagramm (Abb.2.8) nachvollzogen werden kann. Weitere interessante Kontrollschemata ergaben sich auch durch die Wahl einer räumlich gemittelten Kontrollkraft $F_a(x, t) = \langle F_{loc}(x', t) \rangle_{x'}$ [25].

(iii) Musterbildung und Selektion in Halbleiterübergittern

Halbleiterübergitter entstehen durch eine abwechselnde Schichtenfolge von zwei verschiedenen Materialien. Bei ausreichender Barrierendicke können die Elektronen als weitgehend in den Quantentöpfen lokalisiert angesehen werden. Das resultierende Energie-

schema ist in Abb. 2.9 dargestellt. Weiterhin sei angenommen, dass sich die Elektronen eines Topfes in einem lokalen Gleichgewicht befinden und somit mehrheitlich dessen niedrigstes Energieniveau bevölkern. Die Elektronen können aus dem Grundzustand eines Topfes in einen der freien Zustände des nächsten Topfes tunneln, ein eventueller Differenzbetrag in der Energie der Zustände kann dabei durch das zwischen den Töpfen herrschende elektrische Feld ausgeglichen werden. Die Stromdichte $j_{m \rightarrow m+1}(F_m, n_m, n_{m+1})$ vom Topf m nach $m+1$ ist folglich eine nichtlineare Funktion des Feldes F_m zwischen den Töpfen, sowie der Elektronendichten n_m und n_{m+1} in den beteiligten Töpfen. Für die konkrete mikroskopische Berechnung von $j_{m \rightarrow m+1}$ benutzen wir das in unserer Arbeitsgruppe entwickelte sequenzielle Tunnelmodell, s. den Übersichtsartikel von A. Wacker [17]. Für die Kontaktströme am Emitter $j_{0 \rightarrow 1}$ und am Kollektor $j_{N \rightarrow N+1}$ nehmen wir der Einfachheit halber Ohm'sche Randbedingungen an, welche durch eine Kontaktleitfähigkeit σ charakterisiert ist. N ist hierbei die Anzahl der Quantentöpfe des Übergitters.

Damit ergeben sich folgende Bewegungsgleichungen für die Elektronendichten:

$$e\dot{n}_m = j_{m-1 \rightarrow m} - j_{m \rightarrow m+1} \quad \text{für } m = 1, \dots, N, \quad (2.10)$$

$$\epsilon_r \epsilon_0 (F_m - F_{m-1}) = e(n_m - N_D) \quad \text{für } m = 1, \dots, N, \quad (2.11)$$

$$U_0 = - \sum_{m=0}^N F_m d, \quad (2.12)$$

mit der Elektronenladung $e < 0$, der relativen und absoluten Suszeptibilität ϵ_r bzw. ϵ_0 , der Dotierung N_D , der äußeren Spannung U_0 und der Periode des Übergitters d . Gl. (2.12) beschreibt eine globale Einschränkung durch die Gesamtspannung. Der Gesamtstrom durch das Übergitter ist durch $j = \sum_m j_{m \rightarrow m+1} / (N+1)$ gegeben [34].

Je nach Wahl der physikalischen Parameter (insbesondere von σ und N_D) ergibt das Gleichungssystem (2.10), (2.11) und (2.12) bei konstantem U_0 entweder stationäre oder oszillierende räumlich-inhomogene Lösungen (Felddomänen, begrenzt durch Elektronenanreicherungs- bzw. Verarmungsschichten). Im stationären Fall ist das System im allgemeinen multistabil, d.h. zu einem Spannungswert gibt es mehrere stabile Zweige, welche sich aber zum Beispiel im resultierenden Strom unterscheiden. In Zusammenarbeit mit L. Bonilla (Madrid) behandelten wir zunächst die Frage, welcher der möglichen Zweige nach einem abruptem oder kontinuierlichen Wechsel der äußeren Spannung vom System selektiert wird [9, 36]. Hierbei stellten wir fest, dass der Endzustand des Systems z.B. sehr empfindlich von dem Spannungsunterschied von Ausgangs- und Endspannung abhängen kann. Dies Verhalten konnten wir zur Selektion verschiedener Arbeitspunkte verwenden. Ein Großteil der teilweise überraschenden Effekte ließ sich darauf zurückzuführen, dass am Emitterkontakt Paare von Anreicherungs- und Verarmungsfronten der Elektronen (Dipole) erzeugt werden. Unsere theoretischen Voraussagen zur Schaltdynamik zwischen den multistabilen Zuständen wurden später durch Experimente am Paul-Drude-Institut Berlin in beeindruckender Weise quantitativ bestätigt [5].

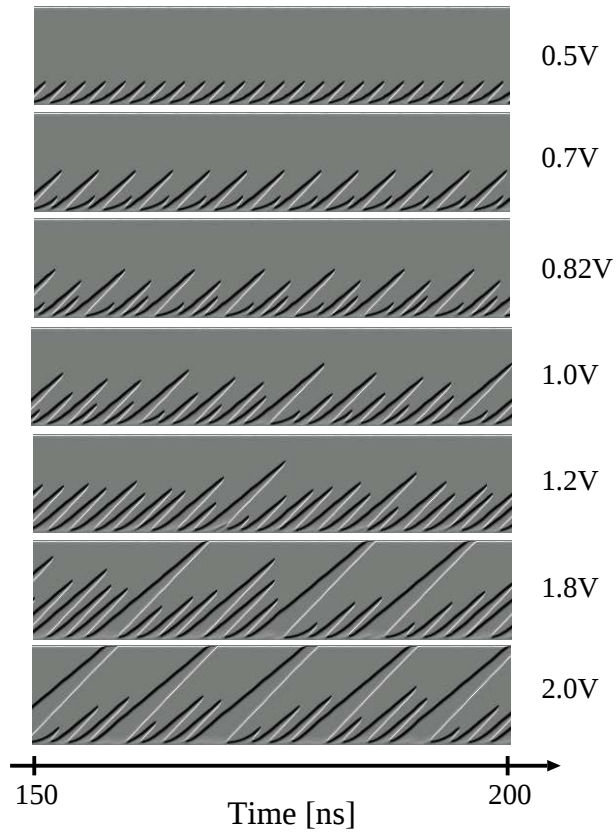


Abbildung 2.10: Chaotisches Szenario der Dynamik der Elektronendichte in einem Übergitter für verschiedene Spannungen (Raum-Zeit-Plots). Helle Regionen bedeuten eine Elektronenanreicherung, dunkle Regionen eine Elektronenverarmung. Nach [18].

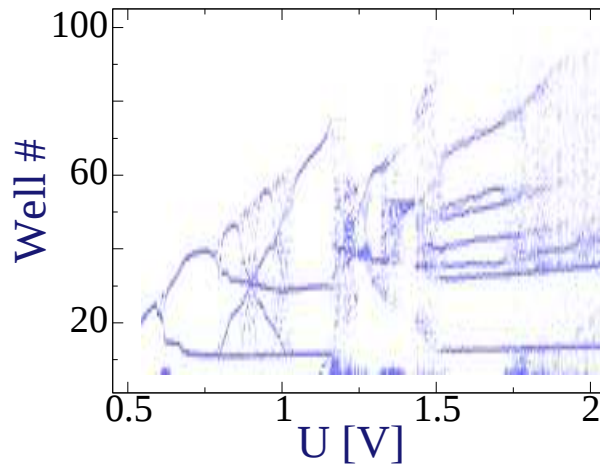


Abbildung 2.11: Bifurkationsdiagramm der Kollisionspositionen (Index des Quantentopfs) von Anreicherungs- und Verarmungsfronten für verschiedene Spannungswerte U . Nach [18].

Durch eine nähere Untersuchung der Fronterzeugungsprozesse am Emitter, sowie der Bewegung der Fronten innerhalb des Bauteils, gelang es uns, komplexe Selbstoszillationen wie Tripolmoden [19] zu erzeugen. Es zeigte sich, dass die Fronterzeugung am Emitter im wesentlich von der Kontaktleitfähigkeit σ und dem Gesamtstrom j abhängt. Insbesondere konnten wir auch erstmals chaotische Frontdynamik in einem ungetriebenen Übergitter (d.h. bei konstanter Spannung U_0) nachweisen [18]. Ein typisches Bifurkationsszenario ist in den Elektronendichteplots in Abb. 2.10 dargestellt. Wir sehen, dass mit wachsender Spannung das Übergitter sowohl periodisches als auch chaotisches Verhalten zeigt. Das volle Bifurkationsdiagramm zeigt neben einer alternierenden Folge von chaotischen und periodischen Regionen auch eine markante Spinnennetzstruktur, dessen Zentrum bei $U_0 = 0.9V$ liegt.

Weiterhin gingen wir der Frage nach, wie sich die Frontdynamik in einem Übergitter auf elementare Weise verstehen lässt. Hierbei fanden wir in Zusammenarbeit mit der Gruppe von U. Parlitz (Göttingen) eine überraschende Analogie zu einem Tankmodell, welches in ganz anderem Zusammenhang zur Beschreibung der Vorratshaltung in Fabriken verwendet wird [28]. Hierbei werden eine vorgegebene Anzahl von Töpfen abwechselnd über eine Zuleitung mit Flüssigkeit gefüllt, während aus allen Tanks gleichzeitig Flüssigkeit abfließt. Die Zuleitung wechselt dann zu einem neuen Tank, sobald dieser leer ist, und zudem der aktuell befüllte Tank eine gewisse Mindestfüllhöhe p_h erreicht hat. Das Verhältnis der Zufluss- und Abflussraten ist dabei so gewählt, dass die Gesamtmenge L_h der Flüssigkeit konstant bleibt. Die Füllhöhe in den Tanks entspricht im Übergittersystem der Länge der Hochfeldregion zwischen den Verarmungs- und Anreicherungsfronten, bzw. zwischen erster Verarmungsfront und Emitter für den aktuell befüllten Tank. Das Wechseln der Zuleitung im Tanksystem findet seine Entsprechung im Übergitter in der Generation einer Dipolfront am Emitter.

Für drei Tanks lässt sich die resultierende Dynamik durch eine eindimensionale, stückweise lineare iterierte Abbildung wie im Inset der Abb. 2.12 beschreiben. Diese modifizierte Zeltabbildung hat nur einen Bifurkationsparameter L_h/p_h . Das entsprechende Bifurkationsdiagramm in Abb. 2.12 stimmt in vielen Einzelheiten mit dem mikroskopisch berechneten Bifurkationsdiagramm in Abb. 2.11 überein. Insbesondere die Spinnennetzstruktur lässt sich so detailgenau reproduzieren. Wir konnten daher zeigen, dass sich die in Übergittern auftretende Frontdynamik auf sehr fundamentale Weise mit Hilfe von iterierten Abbildungen verstehen lässt [28]. Da hierbei die mikroskopischen Eigenschaften des Übergitters nicht in Erscheinung treten, ist anzunehmen, dass eine ähnliche Reduzierung auch für komplexen Frontsysteme mit globaler Kopplung in vielen anderen Disziplinen möglich ist und dass unser reduziertes Modell ein universelles Bifurkationsszenario beschreibt.

Technologisch sind oszillierende Übergitter insbesondere als GigaHertz-Generatoren interessant. In Zusammenarbeit mit der experimentellen Gruppe um E. Schomburg und

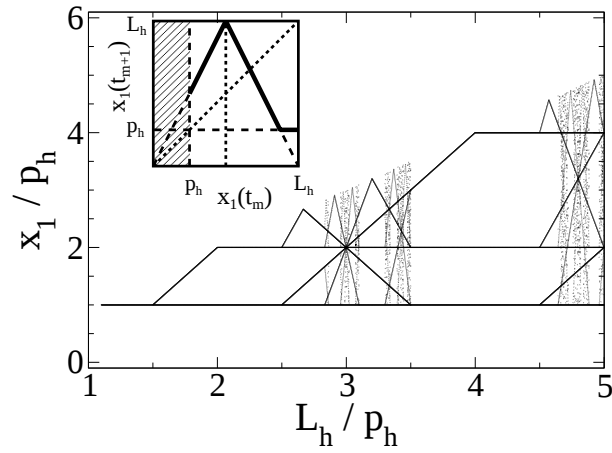


Abbildung 2.12: Bifurkationsverhalten der im Inset dargestellten modifizierten Zeltabbildung. Die Parameter x_1 bzw. L_h entsprechen der Frontposition bzw. der angelegten Spannung. Nach [28].

K. Renk (Regensburg) analysierten wir die Hochfrequenzimpedanz von Übergittern, sowie das Verhalten von Übergittern in einem Resonator oder unter Einfluß einer äußeren Wechselspannung [20, 21, 38]. Die Frontdynamik läßt sich durch eine periodische Wechselspannung kontrollieren und zeigt typisches Verhalten wie Arnoldzungen, Teufelstreppe und Phasensynchronisation. Außerdem entdeckten wir, dass eine geeignete äußere Beschaltung des Übergitters mit kapazitiven und induktiven Elementen die Schwingungsmoden des Übergitters fundamental verändern kann, indem die Frontbewegung unterdrückt wird (quenched mode), was zu einer Eigenfrequenz führt, welche die nominale Frequenz des Übergitters um mehr als das Doppelte übersteigt. In diesem Kontext entwickelten wir zusammen mit der Regensburger Gruppe konkrete Vorschläge zur experimentellen Realisierung von elektronischen Höchsfrequenzoszillatoren [22].

Weiterhin ist es in der praktischen Anwendung des Übergitters als Hochfrequenzgenerator wichtig, ein stabiles periodisches Outputsignal zu erzeugen und eventuelle chaotische Oszillationen zu unterdrücken. Zu diesem Zweck untersuchten wir die chaotische Frontdynamik unter verschiedenen Rückkopplungsschemata. Wir konnten erstmals zeigen, dass hier ein einfach zu realisierendes Kontrollschema mit globaler zeitverzögerter Rückkopplung erfolgreich ist [29, 30]. Wir ersetzten dazu in (2.12) U_0 durch $U_0 + U_c(t)$, mit einer Kontrollspannung

$$U_c(t) = -K (\bar{J}(t) - \bar{J}(t - \tau)) + RU_c(t - \tau), \quad (2.13)$$

mit

$$\bar{J}(t) = \alpha A \int_0^t j(t') e^{-\alpha(t-t')} dt', \quad (2.14)$$

wobei A die Querschnittsfläche des Bauteils und α eine Dämpfungskonstante sind. Wir zeigten, dass die Modifizierung des üblichen Pyragas-Verfahrens durch das Tiefpassfilter

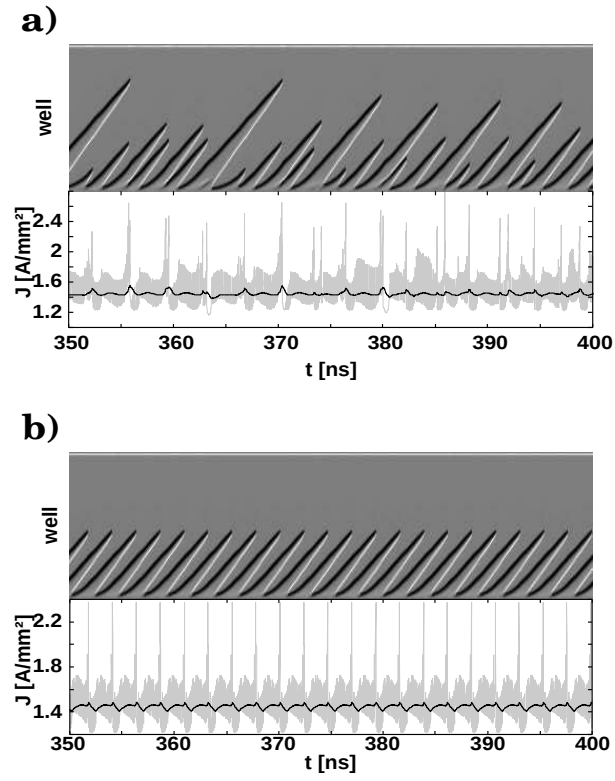


Abbildung 2.13: Erfolgreiche Stabilisierung eines chaotischen Front-Musters (a) nach Einschalten einer zeitverzögerten Rückkopplung zwischen Spannung und Strom (b). Nach [29]

(2.14) auf Grund der diskreten Struktur des Übergitters notwendig ist. Eine erfolgreiche Kontrolle mit Hilfe dieses Verfahrens ist in Abb. 2.13 demonstriert.

2.3 (B1) Offene Fragen

Das Arbeitsprogramm zur komplexen und chaotischen raum-zeitlichen Musterbildung in resonanten Tunnelnioden und Übergittern und zur Chaoskontrolle von Mustern durch zeitverzögerte Rückkopplung wurde wie im Antrag vorgesehen abgearbeitet. Die Erweiterung der Raum-Zeit-Dynamik auf zwei räumliche Dimensionen ist sowohl bei der Tunnelndiode als auch im Übergitter in Arbeit und wird bis zum Ende des Antragszeitraums abgeschlossen sein. Unsere grundlegenden Arbeiten zu unterschiedlichen Mechanismen der Chaoskontrolle haben einige neue Fragen aufgeworfen, die im kommenden Antragszeitraum bearbeitet werden sollen, z.B. zum Effekt von Latenzzeiten und Tiefpassfiltern auf die zeitverzögerte Rückkopplung und zur allgemeinen Bifurkationsanalyse der Autosynchronisation. Vor allem aber hat sich die Frage nach dem konstruktiven Einfluss von Rauschen auf Musterbildung und Autosynchronisation und nach der Rückkopplungskontrolle stochastischer Oszillationen zu einer zentralen Frage auch innerhalb des gesamten Sonderforschungsbereiches entwickelt; diese Aufgaben werden daher im Vordergrund der nächsten Antragsperiode stehen.

2.4 (B1) Beiträge zu internationalen Tagungen

[E] eingeladener Vortrag; [V] Vortrag; [P] Poster

2.4.1 (B1) Reisen nach Osteuropa, Übersee

Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
<u>A. Amann</u> A. Wacker E. Schöll L. L. Bonilla	Multistable switching in semiconductor superlattices	V	APS March Meeting	Seattle März 2001
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
<u>G. Schwarz</u> E. Schöll V. Novak W. Prettl	Streamer motion in Hall-effect Corbino geometries	P	14th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems	Prag Juli 2001
<u>E. Schöll</u> A. Amann M. Rudolf J. Unkelbach	Transverse spatio-temporal instabilities in the double barrier resonant tunneling diode	P	Int. Conf. on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-12)	Santa Fe, USA Aug. 2001
A. Amann A. Wacker <u>E. Schöll</u>	Tripole current oscillations in superlattices	V	Int. Conf. on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-12)	Santa Fe, USA Aug. 2001
P. Rodin	Superfast ionization fronts: from impact ionization to band-to-band tunneling	E	Kolloquium	St. Petersburg Nov. 2001
A.-K. Jappsen A. Amann A. Wacker E. Schomburg <u>E. Schöll</u>	Synchronization of dipole domains in GHz driven superlattices	P	Symposium on Nanostructures: Physics and Technology	St. Petersburg Juni 2002
<u>E. Schöll</u> J. Unkelbach A. Amann P. Rodin	From bistability to spatio-temporal chaos in a resonant-tunneling diode	P	Symposium on Nanostructures: Physics and Technology	St. Petersburg Juni 2002
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
<u>K. Peters</u> U. Parlitz A. Amann	Hybrid systems forming strange billiards	V	SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems	Snowbird, USA Mai 2003
A. Amann <u>E. Schöll</u> N. Baba W. Just	Time delayed feedback control of chaos by spatio-temporal filtering	V	Int. Conference on Physics and Control	St. Petersburg Aug. 2003
<u>E. Schöll</u> A. Amann J. Schlesner J. Unkelbach N. Janson W. Just	Chaos control of nonlinear current oscillations in semiconductor heterostructures	V	Int. Conference on Physics and Control	St. Petersburg Aug. 2003

2.4.2 (B1) Reisen nach Westeuropa

Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
A.-K. Jappsen	Current oscillations in superlattices under weak ac bias	E	Workshop on <i>Quantum Heterostructures and THz Electronics</i>	Regensburg Feb. 2001
A. Wacker	Nonequilibrium Transport in Nanostructures	E	Workshop on <i>Low-dimensional Semiconductor Quantum Structures</i>	Schloss Ringberg Feb. 2001
E. Schöll	Spatio-temporal instabilities and chaos control in globally coupled semiconductor systems	E	253. WE-Heraeus-Seminar <i>Dynamische Strukturbildung in komplexen Systemen</i>	Bad Honnef März 2001
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
E. Schöll	Raum-zeitliche Instabilitäten in Halbleiterquantenstrukturen	E	Physikalisches Kolloquium	Bremen Mai 2001
A. Wacker	Semiconductor Superlattices: A model system for nonlinear transport	E	Kolloquium	Lund Juni 2001
E. Schöll	Spatio-temporal instabilities and chaos in semiconductor quantum structures	E	SIAM-EMS Conference on "Applied Mathematics in our Changing World"	Berlin Sep. 2001
A. Amann	Large improvement of time-delayed feedback control by spatio-temporal filtering using Floquet eigenmodes	E	Workshop on "Control, Communication and Synchronization in Chaotic Dynamical Systems"	Dresden Okt. 2001
E. Schöll	Spatio-temporal pattern formation in globally coupled reaction-diffusion systems	E	Mathematical Symposium in Honor of Professor Mark Vishik	Berlin Dez. 2001
E. Schöll	Transport in Nanostructures - a Paradigm for Complex Nonlinear Dynamics and Pattern Formation	E	Kolloquium am Max-Planck-Instituts für Physik komplexer Systeme	Dresden Dez. 2001
E. Schöll	Transport in Nanostrukturen - ein Paradigma für komplexe nichtlineare Dynamik und Strukturbildung	E	Physikalisches Kolloquium	Magdeburg Dez. 2001
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
<u>O. Beck</u> A. Amann W. Just E. Schöll	Effizienz verschiedener Kontrollverfahren zur zeitverzögerten Au- tosynchronisation in Reaktions-Diffusions Systemen	V	Frühjahrstagung der DPG	Hamburg März 2001
<u>F. Plenge</u> P. Rodin E. Schöll K. Krischer	Raumzeitliche Insta- bilitäten in elektro- chemischen Systeme- men mit S-förmiger Strom-Spannungs- Charakteristik: Vergleich mit einem Halbleitermo- dell	V	Frühjahrstagung der DPG	Hamburg März 2001
<u>N. Baba</u> A. Amann W. Just E. Schöll	Chaoskontrolle räum- licher Muster durch zeitverzögerte Rück- kopplung	V	Frühjahrstagung der DPG	Hamburg März 2001
<u>A.-K. Jappsen</u> A. Wacker A. Amann E. Schöll E. Schomburg K. F. Renk	Selbstgenerierte Strom- oszillationen in Halb- leiterübergittern unter Wechselspannung	V	Frühjahrstagung der DPG	Hamburg März 2001
<u>A. Amann</u> N. Baba W. Just E. Schöll	Large improvement of time-delayed feedback control by spatio- temporal filtering using Floquet eigenmodes	V	2. Dresdner Herbstse- minar des Arbeitskrei- ses Nichtlineare Phy- sik	Dresden Nov. 2001
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
<u>N. Baba</u> A. Amann W. Just E. Schöll	Chaoskontrolle räum- licher Muster durch zeitverzögerte Rück- kopplung	P	253. WE-Heraeus- Seminar <i>Dynamische Strukturbildung in komplexen Systemen</i>	Bad Honnef März 2001
S. Bose P. Rodin <u>E. Schöll</u>	Competing spatial and temporal instabilities in reaction-diffusion systems with subcritical spatial bifurcation	P	Frühjahrstagung der DPG	Hamburg März 2001
<u>M. Rudolf</u> A. Amann E. Schöll	Laterale raum-zeitliche Instabilitäten in einer resonanten Tunnelodiode	P	Frühjahrstagung der DPG	Hamburg März 2001
M. Bose S. Bose H. Engel <u>E. Schöll</u> W. Just	Spatio-temporal dyna- mics in semiconductor heterostructures: a case study based on a two-dimensional reaction-diffusion model	P	Frühjahrstagung der DPG	Hamburg März 2001
<u>N. Baba</u> A. Amann W. Just E. Schöll	Control of chaotic spatio- temporal patterns using time-delayed feedback with eigenmodes	P	Dynamics Days	Dresden Juni 2001
O. Beck <u>A. Amann</u> W. Just E. Schöll	Bifurcation scenarios for time-delayed feedback control	P	Dynamics Days	Dresden Juni 2001

Fortsetzung auf nächster Seite...

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
M. Bose S. Bose H. Engel <u>E. Schöll</u> W. Just	Spatio-temporal dynamics in semiconductor heterostructures: a case study based on a 2D reaction-diffusion model	P	Dynamics Days	Dresden Juni 2001
O. Beck <u>A. Amann</u> W. Just E. Schöll	Bifurcation scenarios for time-delayed feedback control	P	Workshop on "Control, Communication and Synchronization in Chaotic Dynamical Systems"	Dresden Aug. 2001
<u>E. Schöll</u> A. Amann M. Rudolf J. Unkelbach	Transverse spatio-temporal instabilities in the double barrier resonant tunneling diode	P	2. Dresdner Herbstseminar des Arbeitskreises Nichtlineare Physik	Dresden Nov. 2001
O. Beck A. Amann W. Just <u>E. Schöll</u>	Bifurcation scenarios for time-delayed feedback control	P	2. Dresdner Herbstseminar des Arbeitskreises Nichtlineare Physik	Dresden Nov. 2001
A. Amann	Chaotic front dynamics in semiconductor superlattices	E	Workshop on <i>Quantum Heterostructures and THz Electronics</i>	Regensburg Jan. 2002
A. Amann	Efficient time-delayed feedback control using spatio-temporal Floquet eigenmodes	E	Sfb 555 Symposium "Complex spatiotemporal dynamics"	Berlin Jan. 2002
J. Schlesner	Chaotic front dynamics in semiconductor superlattices	E	Frühjahrsschule des Sfb 555	Wittenberg April 2002
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
J. Unkelbach	Chaos control of spatio-temporal current density oscillations in semiconductors by delayed feedback	E	Frühjahrsschule des Sfb 555	Wittenberg April 2002
A. Amann	Efficient time-delayed feedback control using spatio-temporal Floquet eigenmodes	E	Oberseminar am Weierstrass-Institut	Berlin April 2002
E. Schöll	Transport in Nanostrukturen - ein Paradigma für komplexe nichtlineare Dynamik und Strukturbildung	E	Physikalisches Kolloquium	Saarbrücken Apr. 2002
E. Schöll	Controlling chaos in reaction-diffusion systems by time-delayed feedback schemes	E	2nd Symposium of Engineering of Chemical Complexity	Berlin Juni 2002
E. Schöll	Nichtlineare Dynamik und Musterbildung in Halbleitersystemen	E	Heraeus-Schule "Kollektive Dynamik nichtlinearer und ungeordneter Systeme"	Chemnitz Aug. 2002
P. Rodin	Moving filaments in semiconductor devices	E	Infineon AG	München Sept. 2002
E. Schöll	Chaos control in reaction-diffusion systems	E	Workshop on Dynamics and Control	Berlin Nov. 2002
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
P. Rodin	Lateral current density fronts in double-barrier resonant tunneling diode Meeting on moving filaments in semiconductor devices	E	Institute for Solid State Electronics	Wien Nov. 2002
E. Schöll	Chaos control of spatio-temporal patterns	E	3. Herbstseminar des Arbeitskreises Nichtlineare Physik	Dresden Dez. 2002
E. Schöll	Chaos-Kontrolle – wie man instabile raumzeitliche Strukturen sichtbar macht	E	Physikalisches Kolloquium der Freien Universität	Berlin Dez. 2002
<u>N. Baba</u> A. Amann E. Schöll W. Just	Effiziente Chaostkontrolle durch Synchronisation in Delay-Systemen	V	Frühjahrstagung der DPG	Regensburg März 2002
<u>E. Schomburg</u> K. Hofbeck R. Scheuerer M. Häussler K.F. Renk A.-K. Jappsen A. Amann A. Wacker E. Schöll D.G. Pavelev Y. Koschurinov	Hochfrequenzkontrollierte Wanderung von Dipoldomänen in einem Halbleiterübergitter	V	Frühjahrstagung der DPG	Regensburg März 2002
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
<u>J. Schlesner</u> A. Amann A. Wacker E. Schöll	Chaotische Frontdynamik in Halbleiterübergittern	V	Frühjahrstagung der DPG	Regensburg März 2002
<u>J. Unkelbach</u> A. Amann P. Rodin E. Schöll	Chaotic spatio-temporal scenarios in a globally coupled reaction-diffusion system	V	Frühjahrstagung der DPG	Regensburg März 2002
A. Amann J. Schlesner J. Unkelbach W. Just <u>E. Schöll</u>	Chaos control of spatio-temporal dynamics in semiconductor systems	V	Dynamics Days	Heidelberg Juli 2002
<u>A. Amann</u> N. Baba W. Just S. Popovych E. Schöll	Giant improvement of time-delayed feedback control through synchronization between controller and target orbit	P	Dynamics Days	Heidelberg Juli 2002
A. Amann J. Schlesner A. Wacker <u>E. Schöll</u>	Self-generated chaotic dynamics of field domains in superlattices	P	26th Int. Conference on the Physics of Semiconductor	Edinburgh Juli 2002
E. Schomburg A.-K. Jappsen A. Amann A. Wacker R. Scheuerer <u>E. Schöll</u> K. F. Renk	Control of domain propagation in a semiconductor superlattice by a microwave field	P	26 th Int. Conference on the Physics of Semiconductor	Edinburgh Juli 2002
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
A. Amann	Chaotic bifurcations in semiconductor superlattices	E	Workshop on <i>Quantum Heterostructures and THz Electronics</i>	Regensburg Jan. 2003
E. Schöll	Prinzipien der Selbstorganisation	E	BMBF-Fachgespräch über Kontrollierte Selbstorganisation	Düsseldorf Juni 2003
E. Schöll	Chaos control of spatiotemporal patterns	E	Seminar Chaos - Ordnung - Komplexität	Potsdam Juli 2003
N. Janson <u>A. Balanov</u> E. Schöll	Time-delayed feedback control of noise-induced motion	E	Workshop on Complex Nonlinear Processes	Berlin Sep. 2003
<u>N. Janson</u> A. Balanov E. Schöll	Control of noise-induced motion by delayed feedback	E	Workshop on Trends in Pattern Formation	Dresden Sep. 2003
P. Rodin	Traveling filaments in bistable semiconductors	E	Workshop on Trends in Pattern Formation	Dresden Sep. 2003
A. Amann	Chaotic front dynamics: from semiconductors to water tanks	E	4. Dresdner Herbstseminar des Arbeitskreises Nichtlineare Physik	Dresden Nov. 2003
A. Amann	Chaotic front dynamics: from semiconductors to water tanks	E	Sfb 555 Symposium "Complex spatiotemporal dynamics"	Berlin Nov. 2003
E. Schöll	Controlling noise-induced motion by time-delayed feedback	E	Physikalisches Kolloquium	Kiel Nov. 2003
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
<u>A. Amann</u> K. Peters U. Parlitz A. Wacker E. Schöll	A tank model for chaotic front dynamics in semiconductor superlattices	V	Frühjahrstagung der DPG	Dresden März 2003
<u>J. Schlesner</u> A. Amann N. Janson W. Just N. Kilic E. Schöll	Chaos control of high frequency oscillations in semiconductor superlattices	V	Frühjahrstagung der DPG	Dresden März 2003
N. Janson A. Balanov <u>E. Schöll</u>	Controlling noise-induced motion by time-delayed feedback	V	Dynamics Days	Palma de Mallorca Sept. 2003
<u>S. Popovich</u> A. Amann N. Baba E. Schöll W. Just	Giant improvement of time-delayed feedback control by periodic modulation	P	Frühjahrstagung der DPG	Dresden März 2003
J. Schlesner A. Amann N. Janson W. Just <u>E. Schöll</u>	Self-stabilization of chaotic domain oscillations in semiconductor superlattices by time-delay auto-synchronization	P	Int. Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-13)	Modena Juni 2003
<u>G. Stegemann</u> J. Unkelbach A. Amann W. Just E. Schöll	Control of spatiotemporal patterns in resonant tunneling diodes	P	Workshop on Trends in Pattern Formation	Dresden Sept. 2003
Fortsetzung auf nächster Seite...				

... Fortsetzung von vorheriger Seite				
Name	Titel		Konferenztitel	Ort, Datum
<u>O. Holzner</u> E. Schöll	Clusters of phase oscillators with time-delayed feedback and noise	P	Workshop on Trends in Pattern Formation	Dresden Sept. 2003

2.5 (B1) Habilitationen, Dissertationen, Diplomarbeiten

Name	Thema	Datum
Schwarz, Georg	Current Filamentation in Doped GaAs Corbino Disks (Dissertation)	Jan. 2001
Amann, Andreas	Nonlinear and chaotic front dynamics in semiconductor superlattices (Dissertation)	Dez. 2003
Beck, Oliver	Zeitverzögerte Autosynchronisation in Reaktions-Diffusions-Systemen mit unterschiedlicher Kopplung (Diplomarbeit)	Jan. 2001
Baba, Nilüfer	Stabilisierung instabiler räumlicher Muster durch zeitverzögerte Rückkopplung mit räumlichen Filtern (Diplomarbeit)	Feb. 2001
Murawski, Jens	Nichtlineare Oszillationen von Stromfilamenten in Punktkontaktgeometrien (Diplomarbeit)	Apr. 2001
Rudolf, Marc	Raum-zeitliche laterale Instabilitäten in einer resonanten Tunnel-diode (Diplomarbeit)	Juli 2001
Jappsen, Anne-Katharina	Modellierung von Halbleiterübergittern im äußeren Stromkreis (Diplomarbeit)	Aug. 2001
Fortsetzung auf nächster Seite...		

... Fortsetzung von vorheriger Seite		
Name	Thema	Datum
Unkelbach, Jan	Rückkopplungsgesteuerte transversale Dynamik der resonanten Tunnel-diode (Diplomarbeit)	Mai 2002
Schlesner, Jan Henning	Nichtlineare Oszillationen in Halbleiterübergittern unter zeitverzögerter Rückkopplung (Diplomarbeit)	Juni 2002
Kilic, Nursel	Chaotische Dynamik in Halbleiterübergittern und ihre Kontrolle (Diplomarbeit)	Sep. 2003

Literaturverzeichnis

- [1] K. Pyragas: *Continuous control of chaos by self-controlling feedback*, Phys. Lett. A **170**, 421 (1992).
- [2] J. E. S. Socolar, D. W. Sukow, and D. J. Gauthier: *Stabilizing unstable periodic orbits in fast dynamical systems*, Phys. Rev. E **50**, 3245 (1994).
- [3] M. E. Bleich and J. E. S. Socolar: *Stability of periodic orbits controlled by time-delay feedback*, Phys. Lett. A **210**, 87 (1996).
- [4] W. Just, T. Bernard, M. Ostheimer, E. Reibold, and H. Benner: *Mechanism of time-delayed feedback control*, Phys. Rev. Lett. **78**, 203 (1997).
- [5] M. Rogozia, S. W. Teitsworth, H. T. Grahn, and K. H. Ploog: *Relocation dynamics of domain boundaries in semiconductor superlattices*, Phys. Rev. B **65**, 205303 (2002).

Eigene Publikationen zum Projektthema

a) Originalarbeiten in rezensierten Zeitschriften

- [6] M. Meixner, P. Rodin, E. Schöll, and A. Wacker: *Lateral current density fronts in globally coupled bistable semiconductors with S- or Z-shaped current voltage characteristic*, Eur. Phys. J. B **13**, 157 (2000).
- [7] S. Bose, P. Rodin, and E. Schöll: *Competing spatial and temporal instabilities in a globally coupled bistable semiconductor system near a codimension-two bifurcation*, Phys. Rev. E **62**, 1778 (2000).
- [8] V. Cheianov, P. Rodin, and E. Schöll: *Transverse coupling in bistable resonant-tunneling structures*, Phys. Rev. B **62**, 9966 (2000).
- [9] A. Amann, A. Wacker, L. L. Bonilla, and E. Schöll: *Dynamic scenarios of multi-stable switching in semiconductor superlattices*, Phys. Rev. E **63**, 066207 (2001).

- [10] W. Just, M. Bose, S. Bose, H. Engel, and E. Schöll: *Spatio-temporal dynamics near a supercritical Turing-Hopf bifurcation in a two-dimensional reaction-diffusion system*, Phys. Rev. E **64**, 026219 (2001).
- [11] F. Plenge, P. Rodin, E. Schöll, and K. Krischer: *Breathing current domains in globally coupled electrochemical systems: A comparison with a semiconductor model*, Phys. Rev. E **64**, 056229 (2001).
- [12] F. Elsholz, A. Wacker, E. Schöll, M. Kast, G. Strasser, and E. Gornik: *Magnetotransport through semiconductor superlattices*, Phys. Rev. B **63**, 033312 (2001).
- [13] C. Pacher, C. Rauch, G. Strasser, E. Gornik, F. Elsholz, A. Wacker, G. Kießlich, and E. Schöll: *Anti-reflection coating for miniband transport and Fabry-Perot resonances in GaAs/AlGaAs superlattices*, Appl. Phys. Lett. **79**, 1486 (2001).
- [14] N. Baba, A. Amann, E. Schöll, and W. Just: *Giant improvement of time-delayed feedback control by spatio-temporal filtering*, Phys. Rev. Lett. **89**, 074101 (2002).
- [15] O. Beck, A. Amann, E. Schöll, J. E. S. Socolar, and W. Just: *Comparison of time-delayed feedback schemes for spatio-temporal control of chaos in a reaction-diffusion system with global coupling*, Phys. Rev. E **66**, 016213 (2002).
- [16] E. Schöll, A. Amann, M. Rudolf, and J. Unkelbach: *Transverse spatio-temporal instabilities in the double barrier resonant tunneling diode*, Physica B **314**, 113 (2002).
- [17] A. Wacker: *Semiconductor superlattices: A model system for nonlinear transport*, Phys. Rep. **357**, 1 (2002).
- [18] A. Amann, J. Schlesner, A. Wacker, and E. Schöll: *Chaotic front dynamics in semiconductor superlattices*, Phys. Rev. B **65**, 193313 (2002).
- [19] A. Amann, A. Wacker, and E. Schöll: *Tripole current oscillations in superlattices*, Physica B **314**, 404 (2002).
- [20] E. Schomburg, K. Hofbeck, R. Scheuerer, M. Haeussler, K. F. Renk, A.-K. Jappsen, A. Amann, A. Wacker, E. Schöll, D. G. Pavel'ev, and Y. Koschurinov: *Control of the dipole domain propagation in a GaAs/AlAs superlattice with a high-frequency field*, Phys. Rev. B **65**, 155320 (2002).
- [21] A.-K. Jappsen, A. Amann, A. Wacker, E. Schomburg, and E. Schöll: *High frequency impedance of driven superlattices*, J. Appl. Phys. **92**, 3137 (2002).
- [22] R. Scheuerer, E. Schomburg, K. F. Renk, A. Wacker, and E. Schöll: *Feasibility of a semiconductor superlattice oscillator based on quenched domains for the generation of sub-millimeter waves*, Appl. Phys. Lett. **81**, 1515 (2002).

- [23] G. Schwarz, E. Schöll, V. Novák, and W. Prettl: *Streamer motion in Hall effect Corbino geometries*, Physica E **12**, 182 (2002).
- [24] W. Just, S. Popovich, A. Amann, N. Baba, and E. Schöll: *Improvement of time-delayed feedback control by periodic modulation: analytical theory of Floquet mode control scheme*, Phys. Rev. E **67**, 026222 (2003).
- [25] J. Unkelbach, A. Amann, W. Just, and E. Schöll: *Time-delay autosynchronization of the spatio-temporal dynamics in resonant tunneling diodes*, Phys. Rev. E **68**, 026204 (2003).
- [26] P. Rodin and E. Schöll: *Lateral current density fronts in asymmetric double-barrier resonant-tunneling structures*, J. Appl. Phys. **93**, 6347 (2003).
- [27] P. Rodin: *Theory of traveling filaments in bistable semiconductor structures*, Phys. Rev. B **68** (2003).
- [28] A. Amann, K. Peters, U. Parlitz, A. Wacker, and E. Schöll: *A hybrid model for chaotic front dynamics: From semiconductors to water tanks*, Phys. Rev. Lett. **91**, 066601 (2003).
- [29] J. Schlesner, A. Amann, N. B. Janson, W. Just, and E. Schöll: *Self-stabilization of high frequency oscillations in semiconductor superlattices by time-delay autosynchronization*, Phys. Rev. E (2003), in print, cond-mat/0303462.
- [30] J. Schlesner, A. Amann, N. B. Janson, W. Just, and E. Schöll: *Self-stabilization of chaotic domain oscillations in superlattices by time-delayed feedback control*, Semicond. Sci. Technol. (2004), in print.

b) Bücher, Konferenzbeiträge und sonstige Publikationen

- [31] E. Schöll: *Nonequilibrium Phase Transitions in Semiconductors* (Springer, Berlin, 1987).
- [32] M. P. Shaw, V. V. Mitin, E. Schöll, and H. L. Grubin: *The Physics of Instabilities in Solid State Electron Devices* (Plenum Press, New York, 1992).
- [33] E. Schöll (Editor): *Theory of Transport Properties of Semiconductor Nanostructures*, vol. 4 of *Electronic Materials Series* (Chapman and Hall, London, 1998).
- [34] E. Schöll: *Nonlinear spatio-temporal dynamics and chaos in semiconductors* (Cambridge University Press, Cambridge, 2001), Nonlinear Science Series, Vol. 10.
- [35] E. Schöll: *Field domains and current filaments*, in *Survey of semiconductor physics Vol. II*, edited by K. W. Böer (Plenum, New York, 2002), pp. 737–804, 2nd ed.

- [36] A. Amann, A. Wacker, L. L. Bonilla, and E. Schöll: *Field domains in semiconductor superlattices: Dynamic scenarios of multistable switching*, in *Proc. 25th International Conference on the Physics of Semiconductors*, edited by N. Miura and T. Ando (Springer, Berlin, 2001), p. 801.
- [37] J. Unkelbach, A. Amann, P. Rodin, and E. Schöll: *From bistability to spatio-temporal chaos in a resonant-tunneling diode*, in *Proceedings of the 10th International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology* (Ioffe Institute, St. Petersburg, 2002), p. 371.
- [38] A.-K. Jappsen, A. Amann, A. Wacker, E. Schomburg, and E. Schöll: *Synchronization of dipole domains in GHz driven superlattices*, in *Proceedings of the 10th International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology* (Ioffe Institute, St. Petersburg, 2002), p. 245.
- [39] A. Amann, J. Schlesner, A. Wacker, and E. Schöll: *Self-generated chaotic dynamics of field domains in superlattices*, in *Proc. 26th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-26), Edinburgh 2002*, edited by J. H. Davies and A. R. Long (2003).
- [40] W. Just, H. Benner, and E. Schöll: *Control of chaos by time-delayed feedback: a survey of theoretical and experimental aspects*, in *Advances in Solid State Physics*, edited by B. Kramer (Springer, Berlin, 2003).
- [41] E. Schöll: *Nonlinear dynamics and pattern formation in semiconductor systems*, in *Collective Dynamics of Nonlinear and Disordered Systems*, edited by W. Häussler, W. Just, and G. Radons (Springer, Berlin, 2003).
- [42] E. Schöll, in *Encyclopedia of Nonlinear Science*, edited by A. Scott (Fitzroy Dearborn, London, 2004).

Längerfristige Gäste

Dr. Pavel Rodin vom Ioffe Physico-Technical Institute der Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russland (Juli 2001 - August 2003, Alexander-von-Humboldt-Stipendiat)
Wissenschaftliche Zusammenarbeit über komplexe raum-zeitliche Dynamik in Reaktions-Diffusionssystemen zur Beschreibung von Halbleiternanostrukturen und resonanten Tunneldioden mit globaler Kopplung.

Dr. Wolfram Just vom Queen Mary College, London (September 2001 Oktober/November 2002, Mai + Juli/August 2003)
Wissenschaftliche Zusammenarbeit über Chaotikontrolle durch zeitverzögerte Auto-synchronisation in global gekoppelten Reaktions-Diffusions-Systemen.

Dr. Natalia Janson von Lancaster University und Loughborough University, GB (Oktober/November 2002, Mai + Juli/August 2003)

Wissenschaftliche Zusammenarbeit über zeitverzögerte Rückkopplungskontrolle von deterministischem Chaos in Halbleiterübergittern sowie von rauschinduzierten Oszillationen.

Dr. Alexander Balanov von der Saratov State University, Russland (Mai + Juli/August + Oktober/November 2003)

Wissenschaftliche Zusammenarbeit über zeitverzögerte Rückkopplungskontrolle von rauschinduzierten Oszillationen.