

Kapitel 6

Kooperativität

Im vorigen Kapitel wurden die Auswirkungen einer stationären Temperaturinhomogenität auf die Musterbildung bei der CO-Oxidation auf Pt(110) in verschiedenen Zuständen – anregbar, bistabil bzw. doppelt metastabil und oszillatorisch – dargestellt. Außerdem konnte bestimmt werden, welche kritische Größe ein solcher „Temperaturdefekt“ haben muß, um auf einer CO-bedeckten Fläche eine Sauerstoffwelle auszulösen (Abschnitt 5.1). In diesem Kapitel geht es darum zu untersuchen, inwieweit *unterkritische* Störungen zusammenwirken können, um kooperativ den gleichen Effekt (Auslösung einer Sauerstoffwelle) zu erzeugen wie eine einzelne *überkritische* Störung. Wenn man sich Abbildung 5.6 auf Seite 47 noch einmal vor Augen führt, so wird deutlich, daß zur Erzeugung eines subkritischen Temperaturdefekts einfach nur eine kürzere Verweildauer des Lasers an der Meßposition genügt. In den folgenden drei Abschnitten wird die Zusammenwirkung zweier subkritischer Erwärmungsvorgänge („Laserschüsse“) in der Zeit (Abschnitt 6.1), im Raum (Abschnitt 6.2) und in Zeit und Raum (Abschnitt 6.3) untersucht. In den Abschnitten 6.4 und 6.5 werden zwei zeitlich bzw. räumlich komplexere Arten der Kooperation untersucht.

6.1 Zwei Punkte in der Zeit, einer im Raum

Die Experimente in den ersten drei Abschnitten (6.1–6.3) wurden alle auf sehr ähnliche Weise durchgeführt: Der Laserspot wurde anfangs in seiner „Ruheposition“ am Rande des Bildbereichs positioniert, so daß die Temperatur der Probe konstant gehalten werden konnte. Die Probe ist anfangs mit CO bedeckt. Der CO-Partialdruck wird konstant gehalten. Zu Beginn eines jeden Versuchs wird der Sauerstoffdruck sprunghaft von unter 10^{-7} mbar auf 3×10^{-4} mbar erhöht; 10 s später wird das Bewegungsprogramm des

Laserspots ausgeführt. Für die Experimente, bei denen das Zusammenspiel zweier subkritischer Störungen in der Zeit, die aber am gleichen Ort im Raum erfolgen, untersucht werden, führt der fokussierte Laserstrahl folgende Bewegungsanweisungen aus:

1. Gehe zum Meßpunkt und verweile dort eine Zeit t_1 .
2. Gehe zurück zur Ruheposition und verweile dort eine Zeit t_{delay} .
3. Gehe wiederum zum Meßpunkt und verweile dort eine Zeit t_2 .
4. Gehe zurück zur Ruheposition.

Wird nach einer solchen Abfolge eine Sauerstoffwelle ausgelöst, so haben die beiden subkritischen Störungen gemeinsam die gleiche Wirkung erzielt, wie eine einzelne kritische Störung. Die Ergebnisse dieser Messungen für verschiedene Parameter sind in Abbildung 6.1 zusammengefaßt, wobei t_1 und t_2 jeweils auf die kritische Verweildauer t_{crit} normiert wurden.

In allen Abbildungen ist die Diagonale mit eingezeichnet, welche das gedachte Ergebnis für eine Wartezeit von 0 ms in der Ruheposition darstellt, was nichts anderes bedeutet, als daß der Laser die Meßposition nicht verläßt. Dann ergibt $t_1 + t_2 = t_{crit}$. Man kann die Diagonale auch als eine Angabe bezüglich der „Erinnerung“ des Mediums an die Störung verstehen. Die Diagonale stellt die perfekte Erinnerung dar. Je näher eine Messung an dieser Diagonalen liegt, desto stärker erinnert sich das Medium an die erste Störung, wenn die zweite auftritt. Mit zunehmender Wartezeit zwischen den beiden Einwirkungen des Laserstrahls nimmt die Erinnerung des Mediums an die erste Störung ab, wie man an den immer weiter entfernt von der Diagonalen liegenden Meßkurven für größere Wartezeiten erkennen kann.

Die Abbildungen 6.1a-c zeigen Messungen für verschiedene Parameterwerte, Abbildungen 6.1d und 6.1e vergleichen 6.1a mit jeweils 6.1b und 6.1c, während Abbildung 6.1f die Ergebnisse von Computersimulationen¹ zeigt.

Zwischen den Messungen in Abbildung 6.1a und 6.1b wurde der CO-Partialdruck leicht von $5,2 \times 10^{-5}$ mbar auf $5,3 \times 10^{-5}$ mbar erhöht. Abbildung 6.1d zeigt, daß es im Rahmen der Meßgenauigkeit keinen Unterschied für die Erinnerung des Mediums macht, wenn der CO-Partialdruck geringfügig verändert wird, obwohl die kritische Zeit t_{crit} sich natürlich ändert (von 80 ms auf 95 ms). Ähnliches gilt, wenn man den CO-Partialdruck erniedrigt und mit deutlich geringerer Laserleistung das Experiment wiederholt, wie man an den Abbildungen 6.1c und 6.1e erkennen kann. Trotz des deutlich niedrigeren CO-Partialdrucks und der leicht erhöhten Temperatur betrug t_{crit}

¹X. Li, Princeton.

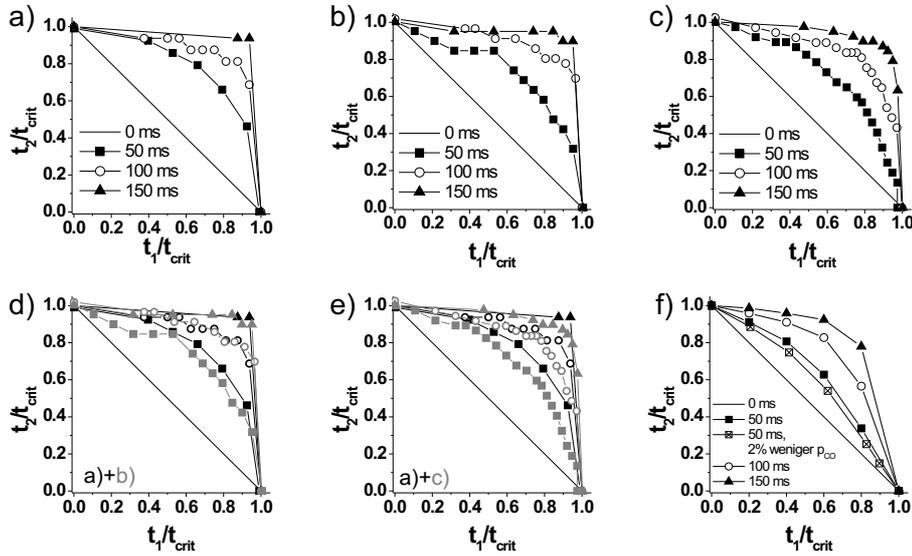


Abbildung 6.1: (a)-(c) zeigen Messungen bezüglich der Kooperativität subkritischer Störungen bei verschiedenen Parameterwerten. (a) und (b) unterscheiden sich durch leicht unterschiedliche CO-Partialdrücke ($p_{\text{CO}} = 5,2 \times 10^{-5}$ mbar respektive $p_{\text{CO}} = 5,3 \times 10^{-5}$ mbar) bei gleichen sonstigen Parametern ($p_{\text{O}_2} = 3,0 \times 10^{-4}$ mbar, $L_p = 2,0$ W, $T = 473$ K). In (c) wird zusätzlich mit einer anderen Laserleistung ($L_p = 1,2$ W) gemessen ($p_{\text{O}_2} = 3,0 \times 10^{-4}$ mbar, $p_{\text{CO}} = 4,2 \times 10^{-5}$ mbar, $T = 476$ K). Die Graphen (d) und (e) stellen die Ergebnisse von (a) und (b) bzw. (a) und (c) gegenüber. (f) ist das Ergebnis einer Computersimulation von X. Li (Parameter: $p_{\text{CO}} = 4,95 \times 10^{-5}$ mbar, $p_{\text{O}_2} = 2,0 \times 10^{-4}$ mbar, $T = 535,5$ K, $\Delta T = 3,5$ K, teilweise aus [116]).

bei dieser Messung 185 ms, also deutlich mehr als in 6.1a und 6.1b. Trotzdem scheint sich das Erinnerungsvermögen des Mediums nicht wesentlich zu ändern: Nach ca. 100 ms ist der erste Laserschuss fast „vergessen“, so daß bei einer Wartezeit von 150 ms nur noch eine geringe Nachwirkung gemessen wird.

In Abbildung 6.1f zeigt das Ergebnis der Computersimulation ein qualitativ gleiches Verhalten. Die Simulation scheint darauf hinzudeuten, daß bei geringerem CO-Partialdruck das „Gedächtnis“ des Mediums etwas besser ist als bei höherem CO-Partialdruck. Man könnte das darauf zurückführen, daß eine durch den ersten Laserschuss erzeugte geringere CO-Bedeckung bei höherem CO-Partialdruck tendenziell schneller „heilen“ sollte, wodurch das Medium den ersten Schuss schneller „vergißt“.

Messungen im bistabilen Bereich

Wie wir aus Kapitel 5 wissen, kann der Laserspot nicht nur Sauerstoffwellen auslösen, sondern im bistabilen Bereich auch Sauerstoffinseln erzeugen. In Abbildung 6.2b sind die gemittelten Meßkurven der entsprechenden Experimente gezeigt. Abbildung 6.2a zeigt die Entwicklung der Sauerstoffbedeckung bei der Simulation² eines solchen Experiments (rote Linien während der Einwirkzeit des Laserspots, blaue Linien, wenn sich der Laserspot an seiner Ruheposition befindet), und Abbildung 6.2c zeigt die Ergebnisse der Simulationen.

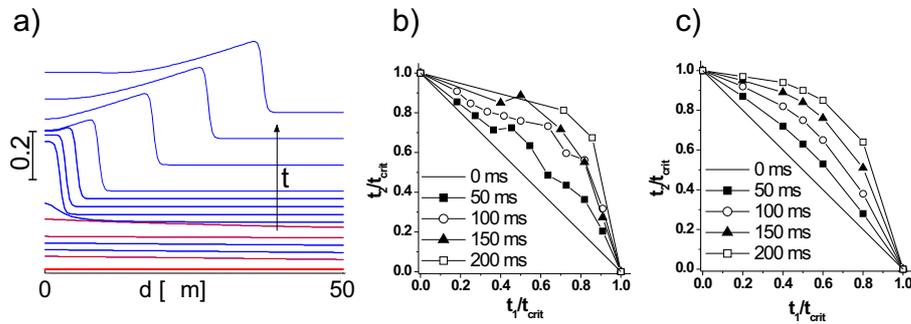


Abbildung 6.2: a) Simulierte Sauerstoffprofile, die das Erzeugen einer Sauerstoffinsel durch zwei zeitlich versetzte Laserschüsse bei $d = 0 \mu\text{m}$ zeigen. Die Profile sind während der Einwirkzeit des Lasers rot gezeichnet, sonst blau. b) Gemittelte Meßkurven, die analog zu Abbildung 6.1 die Kooperation zweier unterkritischer Erwärmungsereignisse zeigen. Parameter: $T = 429 \text{ K}$, $p_{\text{O}_2} = 3,0 \times 10^{-4} \text{ mbar}$, $p_{\text{CO}} = 2,1 \times 10^{-5} \text{ mbar}$, $L_p = 3 \text{ W}$. c) Simulation der Kooperation zweier unterkritischer Erwärmungsereignisse. Parameter für a) und c): $T = 535,5 \text{ K}$, $\Delta T = 3,5 \text{ K}$, $p_{\text{O}_2} = 2,0 \times 10^{-4} \text{ mbar}$, $p_{\text{CO}} = 4,8 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ (aus [116]).

Die Experimente waren deutlich schwieriger durchzuführen als im anregbaren Bereich, da nach jedem Auslösen einer Sauerstoffinsel sich die Probe an dieser Stelle veränderte und somit sich t_{crit} änderte. Um einigermaßen vergleichbare Bedingungen zu haben, mußte für jedes t_1 eine neue Stelle auf der Probe benutzt werden. Es änderte sich t_{crit} zwar immer noch von Versuch zu Versuch³, aber diese Streuung hielt sich in Grenzen. Insgesamt führte dieser Umstand aber zu einer größeren Streuung der Ergebnisse, was sich in den

²X. Li, Princeton.

³ t_{crit} lag ähnlich den Messungen im anregbaren Bereich zwischen 75 ms und 130 ms.

Rohdaten widerspiegelt. Erst die Mittelung über mehrere Messungen ergab die in Abbildung 6.2b dargestellten Kurven.

Auffällig gegenüber den im anregbaren Bereich gewonnenen Ergebnissen ist das deutlich bessere Erinnerungsvermögen des Mediums: Selbst bei einer Zeit von 200 ms zwischen den beiden Laserschüssen kann man noch von deutlichen Spuren sprechen, die der erste Schuß hinterlassen hat.

Da die Messungen im bistabilen Bereich naturgemäß bei geringeren Temperaturen durchgeführt wurden, stellt sich die Frage, ob das Erinnerungsvermögen vielleicht stärker von der Temperatur abhängt als vom CO-Partialdruck und der verwendeten Laserleistung, die – wie gesehen – keinen nennenswerten Einfluß zu haben scheinen.

Temperaturabhängigkeit des Erinnerungsvermögens des Mediums

Die Messung, die diese Frage beantworten sollte, wurde folgendermaßen durchgeführt: Für die verschiedenen Meßtemperaturen wurden jeweils solche Bedingungen eingestellt, daß Musterbildung möglich war, d.h., daß der Laserspot in der Lage war, Sauerstoffinseln oder Sauerstoffwellen zu erzeugen. Dann wurde jeweils die kritische Zeit t_{crit} bestimmt. Bei dem Experiment wurde dann t_1 fest auf $0,8 t_{crit}$ gesetzt und der Zeitraum t_2 bestimmt, der nötig war, um eine Sauerstoffinsel oder -welle auszulösen (jeweils für eine Wartezeit t_{delay} von 50 ms und 100 ms). Das Ergebnis ist in Abbildung 6.3 zu sehen.

Da alle Messungen bei unterschiedlichen Bedingungen (CO-Partialdruck, Laserleistung sowie anregbares oder bistabiles Medium) durchgeführt wurden (siehe Tabelle in Abbildung 6.3), streuen die Meßwerte nicht unerheblich. Trotzdem ist es interessant, jeweils eine Ausgleichsgerade zu berechnen. Kurioserweise schneiden sich die beiden berechneten Geraden bei einer Temperatur von ca. 390 K in der Nähe des Wertes 0,2 für t_2/t_{crit} . Dieser Wert würde aber gerade eine „perfekte“ Erinnerung des Mediums bedeuten. Nun ist nicht anzunehmen, daß das Medium eine noch bessere Erinnerung als die perfekte für noch tiefere Temperaturen zeigt, da das bedeuten würde, daß zwei unterkritische Anregungen, die in ihrer Summe immer noch weniger als eine kritische Anregung ergeben, dann, wenn sie nur zeitlich genügend weit auseinander liegen, trotzdem eine Anregung verursachen könnten. Der lineare Fit ist in der Nähe von $t_2/t_{crit} = 0,2$ also nicht korrekt. Es ist eher zu vermuten, daß die Kurven dort abflachen.

Angenommen, die Erinnerung bzw. der Verlust der Information über den ersten Laserschuß wäre auf einen thermisch angeregten Prozeß zurückzuführen, so könnte man versuchen, eine Aktivierungsenergie zu bestimmen.

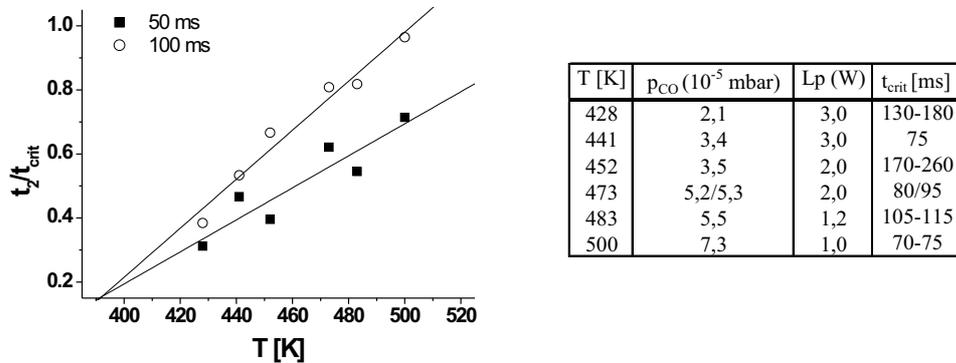


Abbildung 6.3: Erinnerungsvermögen des Mediums für verschiedene Temperaturen. Für geringere Temperaturen scheint der Prozeß des „Vergessens“ des ersten Laserschusses langsamer abzulaufen. Die Parameter für die einzelnen Messungen sind in der Tabelle aufgeführt. Zusätzlich ist die Streuung von t_{crit} angegeben. Da insbesondere bei tiefen Temperaturen die Probe sich mit jeder Messung änderte, mußte t_{crit} jeweils vor und nach der eigentlichen Messung bestimmt werden. Die Werte in der Tabelle geben die Spannweiten der t_{crit} an, die gemessen wurden, bis bei einer Messung $t_1 = 0,8 t_{crit}$ erreicht wurde. Bei 441 K war zufällig nur eine Messung vonnöten. Unter 473 K ist die Schwankungsbreite von t_{crit} deutlich größer als über 473 K.

Da aber die Parameter CO-Partialdruck und Laserleistung für jeden Meßpunkt unterschiedlich waren (und die einzelnen Punkte auf ihre individuell bestimmten t_{crit} normiert wurden), ist eine solche Auswertung unmöglich.

Eine alternative Erklärungsmöglichkeit beruht auf der Tatsache, daß die Gleichgewichtsbedeckung mit CO bei tieferen Temperaturen höher ist als bei höheren Temperaturen. Wenn man zur Veranschaulichung allgemein *tiefere* mit *höheren* Temperaturen vergleicht, so kann man folgendermaßen argumentieren: Angenommen, die maximale absolute CO-Bedeckung, bei der gerade eine Sauerstoffinsel bzw. -welle ausgelöst wird, wäre ungefähr die gleiche bei allen Temperaturen, dann müßte bei tieferen Temperaturen eine größere Menge von CO mit Hilfe des Lasers desorbiert werden. Dafür spricht, daß bei niedrigeren Temperaturen höhere Laserleistungen benutzt werden müssen, um den gewünschten Effekt zu erzielen. Es wird ein größerer Temperaturunterschied zwischen dem erwärmten Bereich und dem „normalen“ Bereich erzeugt. Wird bei tieferen Temperaturen bei einem Laserschuß mit t_{crit} nun eine größere Menge von CO desorbiert, so gilt das auch für eine Verweildauer von $0,8 t_{crit}$. Das *Vergessen* des Mediums entspricht der *Heilung* dieses er-

zeugten Defektes. Bei den verwendeten Drücken und absoluten Zeiten kann man davon ausgehen, daß die Heilung hauptsächlich durch Readsorption von CO aus der Gasphase geschieht. Die Diffusion ist auf einer Zeitskala von 50–100 ms einfach zu langsam⁴, um nennenswert zur Heilung beitragen zu können.

Diese Annahmen führen zu zwei Schlußfolgerungen, die beide die richtige Tendenz zeigen, um die beobachtete Abhängigkeit des Erinnerungsvermögens von der Temperatur zu erklären:

1. Da bei niedrigeren Temperaturen mehr CO benötigt wird, um die erzeugte Bedeckungsinhomogenität zu beseitigen, dauert bei ansonsten gleichen Parametern die Heilung länger.
2. Da bei niedrigen Temperaturen mit geringerem CO-Partialdruck gearbeitet wird, treffen weniger CO-Moleküle pro Zeiteinheit auf die Pt-Oberfläche, so daß die Heilung zusätzlich verlangsamt wird. Während in den Messungen geringe CO-Partialdruck-Unterschiede keine nennenswerte Auswirkung auf den Verlauf der Kurven zu haben schienen (Abbildung 6.1d), deuten aber gerade die Ergebnisse der Simulationen einen solchen Effekt an.

Eine weitergehende Analyse der Meßdaten anhand dieser These scheitert leider daran, daß die Daten zu sehr fehlerbehaftet sind: Mehr, als einen grundsätzlichen Trend zu bestimmen, lassen sie nicht zu.

6.2 Zwei Punkte im Raum, einer in der Zeit

Analog zum letzten Abschnitt, in dem zwei Laserschüsse zeitlich versetzt an einem Punkt auf das Medium einwirkten, kann man auch zwei Punkte betrachten, die zum gleichen Zeitpunkt aber räumlich getrennt durch den fokussierten Laser erwärmt werden. Statt einer zeitlichen Kooperation geht es in diesem Abschnitt also ausschließlich um die räumliche Kooperation zweier *gleicher* Störungen. Prinzipiell wäre es möglich, zwei fokussierte Laserstrahlen zu benutzen, um ein entsprechendes Experiment durchzuführen. Allerdings ist es in der Praxis ausgesprochen schwierig, wenn nicht gar unmöglich, zwei tatsächlich gleich starke Laserstrahlen in genau gleich großen Bereichen auf der Probe zu fokussieren. Daher wurde dieser Fall nur mit

⁴Die Diffusionskonstante von CO ist etwa $D_{CO} \approx 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, was auf einer Zeitskala von 100 ms eine Distanz von $0,1 \mu\text{m}$ entsprechen würde.

Hilfe von Simulationen⁵ untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.4 zusammengefaßt.

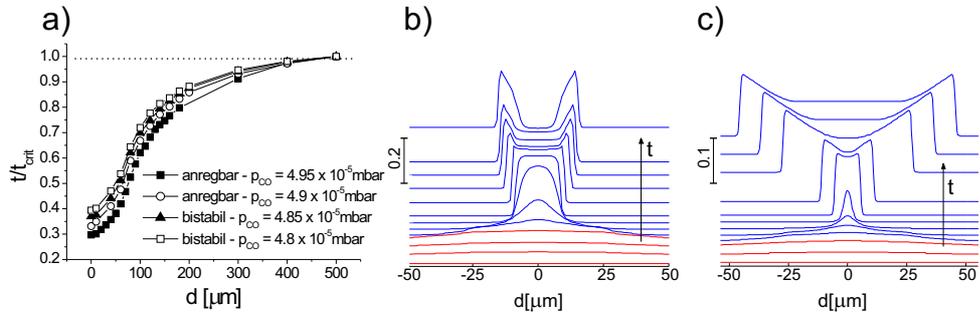


Abbildung 6.4: a) Resultate der Simulationen für das simultane Erwärmen der Probe an zwei Positionen. Der Abstand zwischen den beiden Punkten ist auf der x-Achse aufgetragen, die Verweildauer, die wiederum auf die kritische Verweildauer eines einzelnen Schusses t_{crit} normiert wurde, ist auf der y-Achse aufgetragen. Es sind die Daten von vier verschiedenen Simulationen mit jeweils unterschiedlichen CO-Partialdrücken dargestellt. Der Zustand des Mediums (anregbar oder bistabil) ist jeweils angegeben. Die übrigen Parameter waren $p_{O_2} = 2,0 \times 10^{-4}$ mbar, $T = 535,5\text{K}$, $\Delta T = 3,5$ K in der Mitte des Laserspots. b) und c) Sauerstoffprofile, die die Erzeugung einer Welle ($p_{CO} = 4,95 \times 10^{-5}$ mbar) bzw. Insel ($p_{CO} = 4,8 \times 10^{-5}$ mbar) zwischen den beiden Laserspots ($x = \pm 25 \mu\text{m}$) zeigen. Während der Verweildauer des Lasers sind die Profile rot gezeichnet, danach blau (aus [116]).

In Abbildung 6.4a sind die Resultate für den Fall dargestellt, wenn zwei identische Laserspots in einem Abstand d einmalig für einen Zeitraum t/t_{crit} die Probe lokal erwärmen. Anhand der gestrichelten Linie erkennt man, daß bei einem Abstand von $d = 500 \mu\text{m}$ die beiden Laserspots keine kooperative Wirkung mehr entfalten: Beide brauchen nun die kritische Zeit t_{crit} , um eine Sauerstoffwelle bzw. -insel zu erzeugen. Dies gilt für alle vier untersuchten Partialdrücke von CO, sowohl für den anregbaren als auch für den bistabilen Bereich. Außerdem erkennt man, daß für den Fall, daß beide Laserspots den gleichen Punkt erwärmen, nicht $0,5 t_{crit}$ benötigt werden, um eine Sauerstoffwelle zu erzeugen, sondern weniger. Das liegt an der nichtlinearen Temperaturabhängigkeit (Arrhenius) der kinetischen Raten.

In Abbildung 6.4b und 6.4c sind für den anregbaren respektive bistabilen Fall die Sauerstoffbedeckungsprofile für einen erfolgreichen Versuch gezeigt,

⁵X. Li, Princeton.

bei dem das Medium zwischen den beiden Laserspots kritisch wird und eine Welle bzw. eine Front aussendet. Wie schon in den bisher gezeigten Beispielen entwickelt sich die eigentliche Welle bzw. Insel erst, nachdem der Laser seine Meßposition bereits wieder verlassen hat.

Bei größeren Abständen ($d = 45 \mu\text{m}$) wird das Medium nicht mehr zwischen den beiden erwärmten Punkten kritisch sondern symmetrisch an beiden Meßpositionen.

6.3 Zwei Punkte in Raum und Zeit

Nach einem Punkt in Raum und Zeit (Kapitel 5), zwei Punkten in der Zeit aber nur einem im Raum und zwei Punkten im Raum aber nur einem in der Zeit (simultane Erwärmung) wird in diesem Abschnitt nun der letzte Schritt hin zu größerer Komplexität der Anregung mit zwei Laserschüssen getan: zwei Punkte in Raum und Zeit. Nun erwärmt der Laserspot nacheinander zwei verschiedene Positionen der Probe, wobei der Zeitraum zwischen den beiden Schüssen zwischen 0 ms (der Laserspot wird direkt von einer Meßposition zur anderen bewegt) und 100 ms variiert wurde. Bei diesen Messungen mischen sich also die beiden zuvor studierten Eigenschaften *zeitliche* Kooperation (Erinnerungsvermögen) und *räumliche* Kooperation.

In Abbildung 6.5 sind die Ergebnisse der Experimente zusammengefaßt, bei denen der Laser direkt von einer Meßposition zur anderen bewegt wurde. Die Meßvorschrift für diese Experimente lautete:

1. Ausgehend von einer CO-bedeckten Fläche und einem Sauerstoffpartialdruck von unter 10^{-7} mbar wird dieser bei konstantem CO-Partialdruck auf $p_{\text{O}_2} = 3,0 \times 10^{-4}$ mbar erhöht. Der Laserspot befindet sich in seiner Ruheposition.
2. Nach 10 s wird der Laserspot zu seiner ersten Meßposition bewegt, wo er die Zeitdauer t_1 verweilt.
3. Anschließend wird er direkt zur zweiten Meßposition bewegt, wo er die Zeitdauer t_2 verbringt. Die Bewegung ist innerhalb von 1–2 ms abgeschlossen.
4. Abschließend wird der fokussierte Laser wieder zu seiner Ruheposition am Rande des Beobachtungsfeldes – weit entfernt von der Meßposition – bewegt, und es wird beobachtet, ob eine Sauerstoffwelle entsteht.

In dem Moment, in dem bei Experimenten die räumliche Kooperation zweier subkritischer thermischer Anregungen untersucht wird, muß beachtet werden, daß die Diffusion von CO räumlich anisotrop ist (siehe Abschnitt 2.2.4): In Richtung der kristallographischen Achse [001] ist sie deutlich langsamer als senkrecht zu dieser Richtung. Dementsprechend wurden die Experimente einmal hauptsächlich in Richtung der langsamen und einmal mehr in Richtung der schnellen Diffusion durchgeführt. Die beiden experimentell benutzten Richtungen waren die Vertikale und die Horizontale. Die Vertikale unterschied sich um 18° von der Richtung langsamer CO-Diffusion. Die verschiedenen Richtungen sind in einem Pfeildiagramm in Abbildung 6.5a zwischen den Graphen, die die Meßergebnisse zeigen, noch einmal verdeutlicht.

Die Meßergebnisse in Abbildung 6.5a zeigen, daß eine Verschiebung der zweiten Anregung im Raum eine ähnliche Wirkung wie eine Verschiebung in der Zeit hat. Es fällt allerdings sofort auf, daß die Abstände, für die die Probe bei der zweiten subkritischen Anregung noch ein nennenswertes Gedächtnis des ersten Ereignisses hat, sehr klein sind. Sie entsprechen ungefähr dem Radius des Laserflecks, der bei ca. $25 \mu\text{m}$ lag. Zusätzlich ist aber ein deutlicher Unterschied zwischen Experimenten, die in x-Richtung durchgeführt wurde, und solchen, die in y-Richtung durchgeführt wurden, festzustellen: Bei den Versuchen, die mehr entlang der langsamen Richtung der CO-Diffusion (y) durchgeführt wurden, ist die Kooperation der beiden Erwärmungsereignisse bereits bei einem Abstand von ca. $18 \mu\text{m}$ stark abgeschwächt. Für die dazu senkrechte Richtung (x) ist dies erst bei einer Distanz von ca. $26 \mu\text{m}$ zu beobachten.

Grundsätzlich ist die geringe Reichweite der ersten Anregung nicht verwunderlich. Wie bereits auf Seite 63 bei der Interpretation der Temperaturabhängigkeit des Erinnerungsvermögens des Mediums beschrieben, ist die Distanz, über die die Diffusion eine Rolle spielen kann, bei den experimentellen Zeitskalen gering. Dementsprechend findet man im Gegensatz zu den Simulationen keine Reichweiten von hunderten von Mikrometern (siehe Abbildung 6.4). In diesem Zusammenhang muß allerdings betont werden, daß die Simulationen mit einem Temperaturprofil arbeiteten, welches durchaus geringe Temperaturerhöhungen auch in weiteren Entfernungen vom eigentlichen Laserspot berücksichtigte. Da in den Simulationen generell bereits geringere Temperaturerhöhungen als im Experiment ausreichten, um Sauerstoffwellen auszulösen, ist es plausibel, daß somit auch die Reichweite der Laserschüsse größer wurde.

Es bleibt aber zu klären, warum die Richtung, in der die zweite Meßposition liegt, einen Einfluß auf die Fähigkeit zur Kooperation der beiden un-

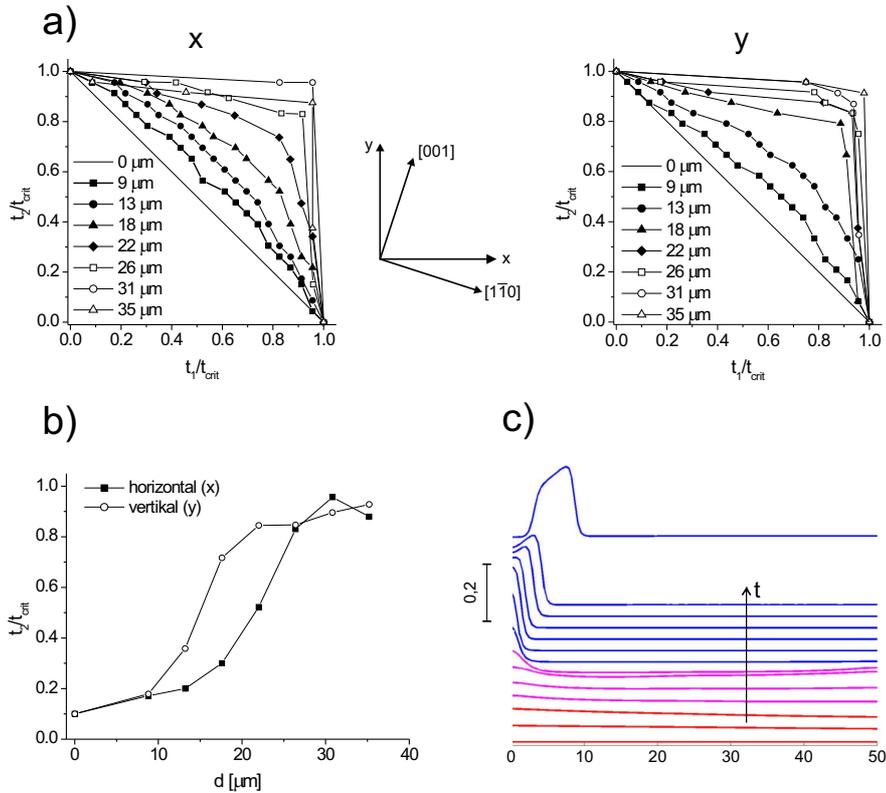


Abbildung 6.5: a) Ergebnisse der Messungen zur Kooperativität zweier unmittelbar hintereinander ausgeführter, aber im Raum leicht horizontal (x) oder vertikal (y) verschobener unterkritischer Anregungen. Zwischen den beiden Graphen für die x- und die y-Richtung, ist die relative Lage der kristallographischen Achsen $[001]$ und $[1\bar{1}0]$ zur Horizontalen und Vertikalen dargestellt. b) Vergleich der räumlichen Kooperativität in x- und y-Richtung. Bei festem $t_1 = 0,9 t_{crit}$ wird t_2 gegen die Entfernung d aufgetragen. Experimentelle Bedingungen von (a) und (b): $T = 467$ K, $p_{CO} = 4,9 \times 10^{-5}$ mbar, $p_{O_2} = 3,0 \times 10^{-4}$ mbar, $L_p = 2$ W. c) Simulation der zeitlichen Entwicklung der Sauerstoffbedeckung für zwei unmittelbar hintereinander ausgeführte Erwärmungsereignisse bei $x = 0 \mu\text{m}$ (rot) und $x = 50 \mu\text{m}$ (violett). Die blauen Linien beschreiben die weitere Entwicklung nach der Einwirkung des Lasers (teilweise aus [116]).

terkritischen Ereignisse hat. Zur Illustration des Effektes der Richtung wird in Abbildung 6.5b die Zeit t_2/t_{crit} , die bei einer ersten Beleuchtungszeit von $t_1 = 0,9 t_{crit}$ benötigt wird, um eine Sauerstoffwelle zu erzeugen, gegen die Entfernung der zweiten Anregung von der ersten aufgetragen. Während in

y-Richtung der stärkste Anstieg von t_2 zwischen $13 \mu\text{m}$ und $18 \mu\text{m}$ auftritt, ist das für die x-Richtung erst zwischen $22 \mu\text{m}$ und $26 \mu\text{m}$ der Fall.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse kann zum einen auf diesen kurzen Entfernungen ein Einfluß der Diffusion nicht ausgeschlossen werden. Zum anderen darf aber auch nicht vernachlässigt werden, daß der Laser nicht völlig kreisförmig fokussiert wird. In Kapitel 4 wurden für die beiden Achsen des Lasers Längen von $45 \pm 6 \mu\text{m}$ in x-Richtung und $38 \pm 7 \mu\text{m}$ in y-Richtung gemessen. Die beiden Ergebnisse sind zwar im Rahmen des Fehlers gleich groß, deuten aber doch auf eine leichte Elongation in der Horizontalen hin. Ausgehend von der Länge der beiden Achsen, $45 \mu\text{m}$ und $38 \mu\text{m}$, fällt auf, daß die Reichweite des ersten Laserschusses bis über die Länge eines Radius in der Horizontalen hinausreicht, während das in der Vertikalen nicht der Fall ist. Es ist also anzunehmen, daß auch der Unterschied in der CO-Diffusion eine Rolle spielt.

In Abbildung 6.5c ist mit Hilfe der Sauerstoffbedeckungsprofile ein Beispiel für ein „Feuern“ des Mediums nach zwei aufeinanderfolgenden Laserschüssen (bei $x = 0 \mu\text{m}$, rot, und bei $x = 50 \mu\text{m}$, violett) gezeigt. Der Sauerstoffpuls wird bei diesen Parametern an der Stelle der ersten unterkritischen Anregung erzeugt. Die anderen Fälle, die bei anderen Parametern (insbesondere der Variation von t_1 und des Abstandes d) beobachtet werden können, sind in Abbildung 6.6 abgebildet: a) Feuern des Mediums an der zweiten Meßposition, b) Feuern des Mediums in der Mitte zwischen beiden Meßpositionen und c) Feuern an beiden Meßpositionen. Das gleichzeitige Feuern an beiden Meßpositionen stellt einen Übergangszustand zwischen dem Feuern an der ersten und dem Feuern an der zweiten Position dar. Ein einziges Mal wurde dies auch im Experiment beobachtet. Bei mehreren hundert Versuchen wurde sonst immer nur eine der beiden Meßpositionen kritisch angeregt.

Verzögerung des zweiten Laserschusses

Bisher wurde der Laserspot direkt von seiner ersten Meßposition zur zweiten bewegt. In den im Folgenden vorgestellten Messungen (Abbildung 6.7) wird zusätzlich eine Verzögerung vor der zweiten Anregung benutzt, um die Kooperation der beiden Ereignisse sowohl in der Zeit als auch im Raum zu studieren. In diesem Fall sind die Meßergebnisse so zusammengefaßt, daß für gleiche räumliche Abstände jeweils die Ergebnisse verschiedener Verzögerungszeiten sowohl für die horizontalen als auch für die vertikalen Messungen in einem Graphen gezeigt sind. Als Referenzmessung ist jeweils noch das entsprechende Meßergebnis aus Abbildung 6.5 mit eingezeichnet. Auf diese Art kann man den Einfluß der Entfernung der beiden Anregungen auf ihre

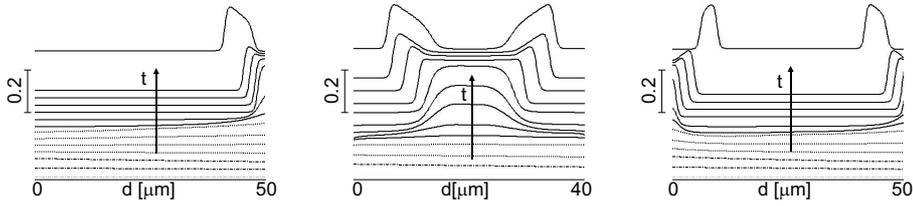


Abbildung 6.6: a) Feuern des Mediums an der zweiten Meßposition, b) Feuern des Mediums in der Mitte zwischen beiden Meßpositionen und c) Feuern an beiden Meßpositionen. Die zeitliche Entwicklung der Sauerstoffbedeckung während des ersten Laserschusses ist mit gestrichelten Linien angeben, die während des zweiten mit gepunkteten und die nachfolgende Entwicklung mit durchgezogenen Linien. Parameter der Simulationen: $T = 535,5 \text{ K}$, $p_{\text{CO}} = 4,95 \times 10^{-5} \text{ mbar}$, $p_{\text{O}_2} = 2,0 \times 10^{-4} \text{ mbar}$. Die maximale Temperaturerhöhung war $3,5 \text{ K}$ in (a) und (c) und 5 K in (b) (aus [115]).

Kooperation – insbesondere mit Augenmerk auf die Unterschiede in x- und y-Richtung – erkennen.

Bei einem Abstand von $9 \mu\text{m}$ (Abbildung 6.5a) ist noch kein großer Unterschied zwischen den beiden Richtungen zu erkennen. Zwar liegen die Werte für die y-Richtung meist oberhalb derer der x-Richtung, deuten also eine geringere Kooperation an. Aber im großen und ganzen sind sie im Rahmen des Meßfehlers gleich.

Bei einem Abstand von $13 \mu\text{m}$ (Abbildung 6.5b) lassen sich erste deutlichere Abweichungen erkennen: Während die Messungen mit einer Verzögerungszeit von 0 ms noch fast identisch sind und diejenigen mit 100 ms beide effektiv keine nennenswerte Kooperation mehr zeigen, ist selbige bei $t_{\text{delay}} = 50 \text{ ms}$ bei den Messungen in x-Richtung noch deutlich stärker vorhanden als bei denen in y-Richtung. Dieser Trend verstärkt sich noch, wenn man die beiden Meßpunkte noch ein wenig weiter auseinanderrückt, auf ca. $18 \mu\text{m}$ (Abbildung 6.7c). Nun zeigt die y-Kurve, die bei einer Verzögerungszeit von 50 ms aufgenommen wurde, praktisch keine Kooperation mehr, während die entsprechende x-Kurve immer noch einen signifikanten Einfluß des ersten Laserschusses auf den zweiten anzeigt. Die Kooperation bei den y-Messungen ist sogar so schwach, daß die Messung mit 0 ms Verzögerungszeit in y-Richtung nahezu der 50 ms -Messung in x-Richtung entspricht. Die Messung in x-Richtung mit 0 ms Verzögerung zeigt mit Abstand die stärkste Kooperation.

Bei noch größeren Abständen (ca. $22 \mu\text{m}$) zeigt nur noch die Kurve, welche der Messung in x-Richtung ohne Verzögerungszeit entspricht, ein nennens-

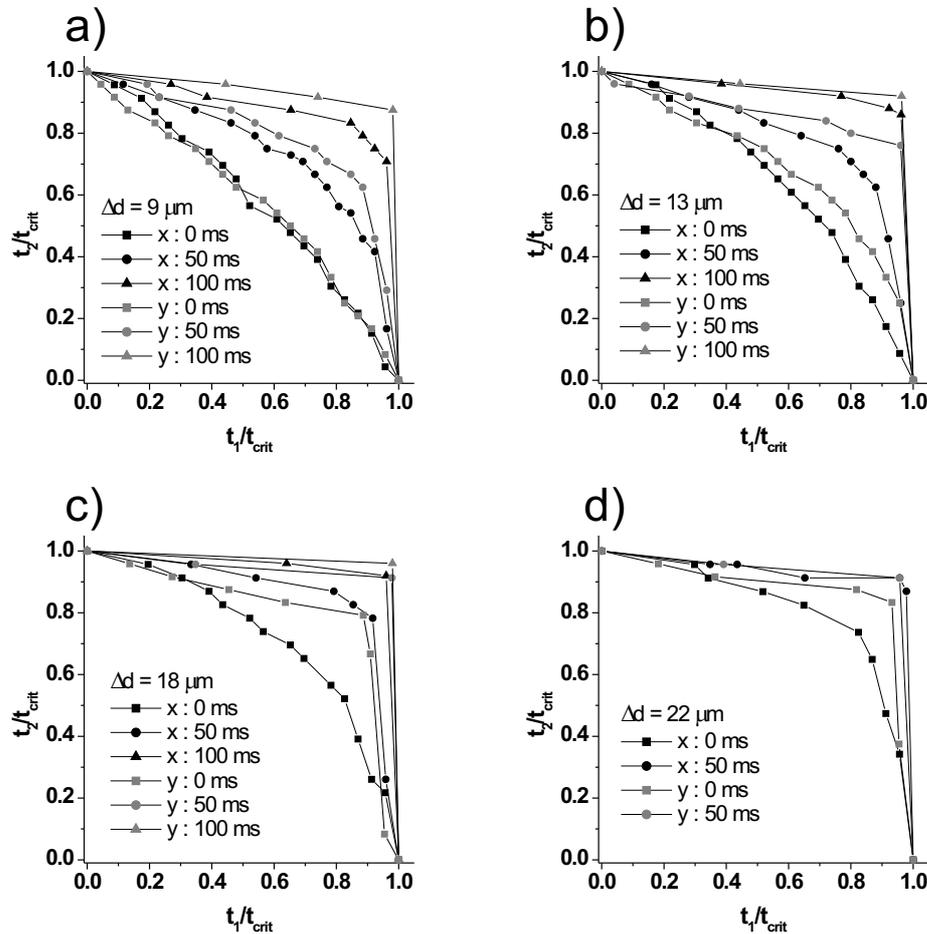


Abbildung 6.7: Messungen zur Kooperation in Raum und Zeit. Dargestellt sind jeweils Messungen bei konstantem räumlichen Abstand entweder in horizontaler Richtung (x, schwarz) oder vertikaler Richtung (y, grau). Zur Lage der kristallographischen Achsen relativ zur x- und y-Achse siehe Abbildung 6.5a. Experimentelle Parameter: $T = 466 \text{ K}$, $p_{\text{CO}} = 4,9 \times 10^{-5} \text{ mbar}$, $p_{\text{O}_2} = 3,0 \times 10^{-4} \text{ mbar}$, $L_p = 2,0 \text{ W}$. Die räumlichen Abstände der Meßpunkte sind in a)-d) angegeben.

wertes Zusammenwirken von erstem und zweitem Laserschuß.

Auch diese Messungen können mit der oben (Seite 68) vorgestellten Interpretation erklärt werden. Beide Effekte, die räumliche und die zeitliche Kooperation, wirken in diesen Messungen zusammen, so daß ähnliche Wirkungen mit Hilfe verschiedener Mechanismen erzeugt werden können, wie die sehr ähnlichen Kurven in Abbildung 6.5c ($\Delta x = 18 \mu\text{m}$, $t_{\text{delay}} = 50 \text{ ms}$

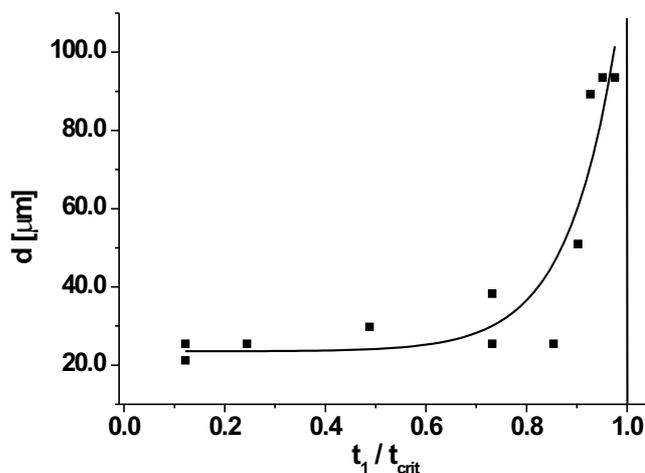


Abbildung 6.8: Maximale Distanz d zweier Punkte (horizontal), die dazu führt, daß beim wiederholenden Erwärmen – jeweils für den Zeitraum t_1 – eine Sauerstoffwelle erzeugt wird. Die Linie ist ein exponentieller Fit an die Daten. Die Zeit $t_1 = t_{crit}$ ist zusätzlich durch eine senkrechte Linie markiert, da bei dieser Erwärmungsdauer an beliebig weit entfernten Meßpunkten Sauerstoffwellen ausgelöst werden können. Weitere experimentelle Parameter: $T = 455$ K, $p_{CO} = 4,6 \times 10^{-5}$ mbar, $p_{O_2} = 3,0 \times 10^{-4}$ mbar, $L_p = 1,5$ W.

und $\Delta y = 18 \mu\text{m}$, $t_{delay} = 0$ ms) zeigen: Eine Verschiebung der zweiten Anregung in eine andere Richtung wird durch eine größere Wartezeit an der Ruheposition ausgeglichen.

6.4 Zwei Punkte im Raum, viele in der Zeit

Der nächste Schritt hin zu größerer Komplexität der Anregung besteht darin, die Beschränkung auf zwei Ereignisse fallen zu lassen. In diesem Abschnitt geschieht dies dadurch, daß der Laser jetzt zwischen zwei Punkten direkt hin- und herbewegt wird, wobei er an beiden Meßpunkten die gleiche Zeit verbringt. Eine Verzögerungszeit besteht nur aus der Zeit, die für die Bewegung benötigt wird, und kann vernachlässigt werden. Die maximale Distanz zwischen zwei wiederholten unterkritischen Anregungen, bei der noch Sauerstoffwellen ausgelöst werden, ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

Bei geringen Zeiträumen t_1/t_{crit} ist die Reichweite der Kooperation wie

schon bei den Messungen in Abschnitt 6.3 ungefähr auf eine Radiuslänge des Lasers beschränkt. Erst bei Zeiten t_1 , die nahe der kritischen Zeit t_{crit} liegen, ist eine deutliche Zunahme der maximalen Entfernung, bei der Sauerstoffwellen ausgelöst werden können, zu verzeichnen. Obwohl, bedingt durch die Meßvorschrift bei größeren t_1 , der Zeitraum zwischen zwei Laserschüssen an jedem einzelnen Punkt zunimmt, führt die längere Einwirkdauer dazu, daß sich im Laufe der Zeit die Auswirkungen der einzelnen Anregungen ansammeln und verstärken können, so daß sie gemeinsam mit ihrem Nachbarn zur Auslösung von Sauerstoffwellen ausreichen. Bei kürzeren Einwirkzeiten des Laser, ca. $t_1 < 0,8 t_{crit}$, ist das nicht möglich. Die erzeugten unterkritischen Anregungen erreichen aufsummiert selbst nach häufiger Wiederholung nur dann ein kritisches Niveau, wenn sie so nahe beieinander liegen, daß die erzeugten Temperaturinhomogenitäten sich überlappen.

6.5 Bewegung des Lasers entlang einer Linie

In diesem letzten Abschnitt des Kapitels wird auch die Beschränkung auf zwei Orte im Raum aufgegeben. Es wird untersucht, inwieweit ein über die Probe in einer geraden Linie bewegter fokussierter Laserstrahl in der Lage ist, Sauerstoffwellen zu erzeugen. Da er nun nicht mehr eine gewisse Zeit t an einem Ort verbringt, gibt es jetzt auch keine kritische Zeit t_{crit} mehr.

Bei den hier vorgestellten Versuchen wird – wie schon bei den anderen Experimenten in diesem Kapitel – von einer CO-bedeckten Fläche ausgegangen. Nach wie vor wird die Intensität des Lasers so gewählt, daß er, wenn er sich nicht bewegt, Sauerstoffwellen auslöst. Der Sauerstoffpartialdruck wird schlagartig zu Beginn des Experiments erhöht. Ca. 10 s später, nachdem der noch stationäre Laser eine Sauerstoffwelle ausgelöst hat, wird der Laserspot mit konstanter Geschwindigkeit entlang einer geraden Linie auf der Probe geführt. Man beobachtet dabei drei mögliche Szenarien:

- Wenn der Laserspot zu schnell über die Oberfläche bewegt wird, so daß er die überstrichene Fläche in zu geringem Maße erwärmt, so kommt es an keiner Stelle zur Ausbildung einer Sauerstoffwelle.
- Wenn der Laser mit einer mittleren Geschwindigkeit über die Oberfläche bewegt wird, so erzeugt er an einigen Stellen Sauerstoffwellen. Je nach Geschwindigkeit sind es mehr oder weniger (siehe Abbildung 6.9a).
- Wird der Laserspot mit einer langsamen Geschwindigkeit über die Oberfläche bewegt, so reicht die differentielle Erwärmung aus, um entlang seines gesamten Weges genügend CO zu desorbieren, so daß er eine

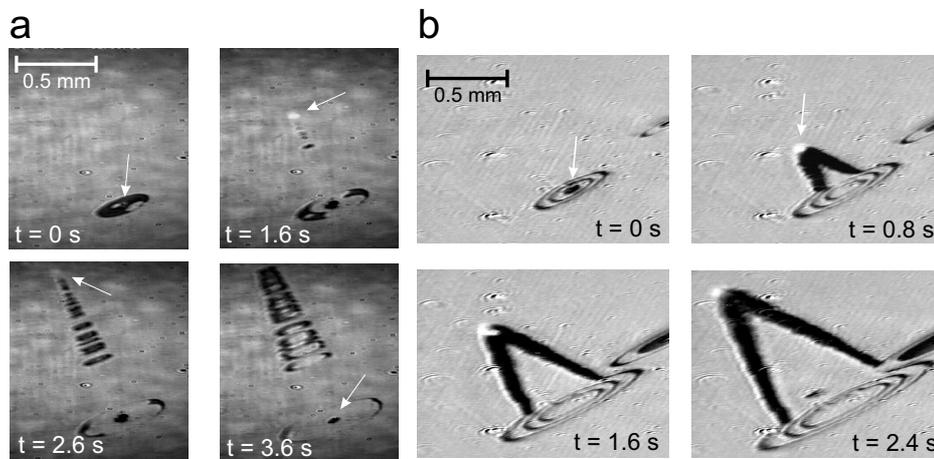


Abbildung 6.9: Beispiele für beobachtbare Phänomene, wenn der Laser-spot sich mit konstanter Geschwindigkeit entlang einer Linie bewegt. a) Partielles Erzeugen von Sauerstoffwellen: $T = 493 \text{ K}$, $p_{\text{CO}} = 7 \times 10^{-5} \text{ mbar}$, $p_{\text{O}_2} = 3,0 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ (aus [120]). b) Kontinuierliches Erzeugen von Sauerstoffwellen: $T = 515 \text{ K}$, $p_{\text{CO}} = 9 \times 10^{-5} \text{ mbar}$, $p_{\text{O}_2} = 3,0 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ (aus [121]).

durchgängig gezogene Spur sauerstoffbedeckter (reaktiver) Fläche hinterläßt. Je nachdem, wie sich seine Geschwindigkeit im Verhältnis zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der Sauerstoffwellen verhält, kann es sich bei dem beobachteten Bild um eine Linie (schnelle Laserspotgeschwindigkeit) oder aber auch um ein „V“ mit einem gewissen Öffnungswinkel handeln, welcher vom Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten (Laserspot, Welle) abhängt. Insbesondere im letzten Fall erinnert die Form der Welle an den Machkegel bei einem Überschallflugzeug (siehe Abbildung 6.9b).

Aus den beschriebenen drei Möglichkeiten ergeben sich zwei Übergänge, die bestimmt werden können:

1. Übergang zwischen kontinuierlichem und partiellem Erzeugen von Sauerstoffwellen (Übergang 1).
2. Übergang zwischen partiellem und keinem Erzeugen von Sauerstoffwellen (Übergang 2).

Diese beiden Grenzen wurden für verschiedene Laserleistungen und verschiedene CO-Partialdrücke vermessen. Außerdem wurde noch die Richtung der

Linie variiert, die der Laserspot abfährt. Sie wurde für jede Laserleistung und jeden CO-Partialdruck einmal in Richtung der langsamen, einmal in Richtung der schnellen CO-Diffusion⁶ und einmal in eine andere (beliebige aber feste) Richtung zwischen den beiden vorherigen gewählt. Die Resultate sind in Abbildung 6.10 zusammengefaßt. Es ist zu erkennen, daß die beiden Übergänge sich bei einer Änderung der Laserleistung unterschiedlich verhalten. Folgendes kann an den Graphen abgelesen werden:

1. Beim zweiten Übergang, dem vom partiellen Erzeugen von Sauerstoffwellen zu keiner Erzeugung, kann mit Ausnahme der Messung bei 4 W kaum ein Unterschied zwischen den verschiedenen Richtungen, in denen der Laser bewegt wird, ausgemacht werden. Für den ersten Übergang hingegen gilt, daß meist die Meßkurve, die einer Bewegung des Laserspots in Richtung der langsamen CO-Diffusion entspricht, deutlich unterhalb der anderen beiden Meßkurven liegt. Die 1 W-Messung bildet hierbei eine Ausnahme.
2. Der Abstand zwischen den Kurven der Richtung langsamer Diffusion und den beiden anderen Richtungen wird für den ersten Übergang mit Zunahme der Laserleistung größer.
3. Die Übergänge besitzen eine exponentielle Abhängigkeit vom CO-Partialdruck, was man in den Abbildungen 6.11a und 6.11b erkennen kann, in welchen die identischen Daten aus Abbildung 6.10 in einer veränderten Darstellung wiedergegeben werden.

Diese Ergebnisse lassen sich wie folgt interpretieren: Der zweite Übergang stellt ein Analogon zur kritischen Einwirkungszeit der anderen Abschnitte dieses Kapitels dar: Entweder es wird (mindestens) eine Sauerstoffwelle ausgelöst oder eben nicht. Anders formuliert bedeutet dies, daß der Laserspot sozusagen an jedem Punkt entlang seines Pfades ein Experiment durchführt, welches denen aus Abbildung 5.6 entspricht. Der einzige Unterschied besteht darin, daß er nicht an einem einzelnen Punkt verweilt, sondern jeden Punkt „nur“ überstreicht. Prinzipiell geht es aber auch hier darum, eine kritische Anregung in einer gewissen Zeit zu erzeugen, nur daß in diesem Experiment die Intensität der Anregung über die Zeit nicht konstant ist, sondern, dadurch daß der Laserspot sich bewegt, einen Anstieg und einen Abfall hat. Genau genommen hatte die Anregung auch vorher einen Anstieg und einen Abfall ihrer Intensität gehabt, da die Aufheizung der Probe lokal auch eine

⁶Die Richtungen der langsamen und der schnellen CO-Diffusion wurden mit einer Genauigkeit von $\pm 2^\circ$ eingestellt.

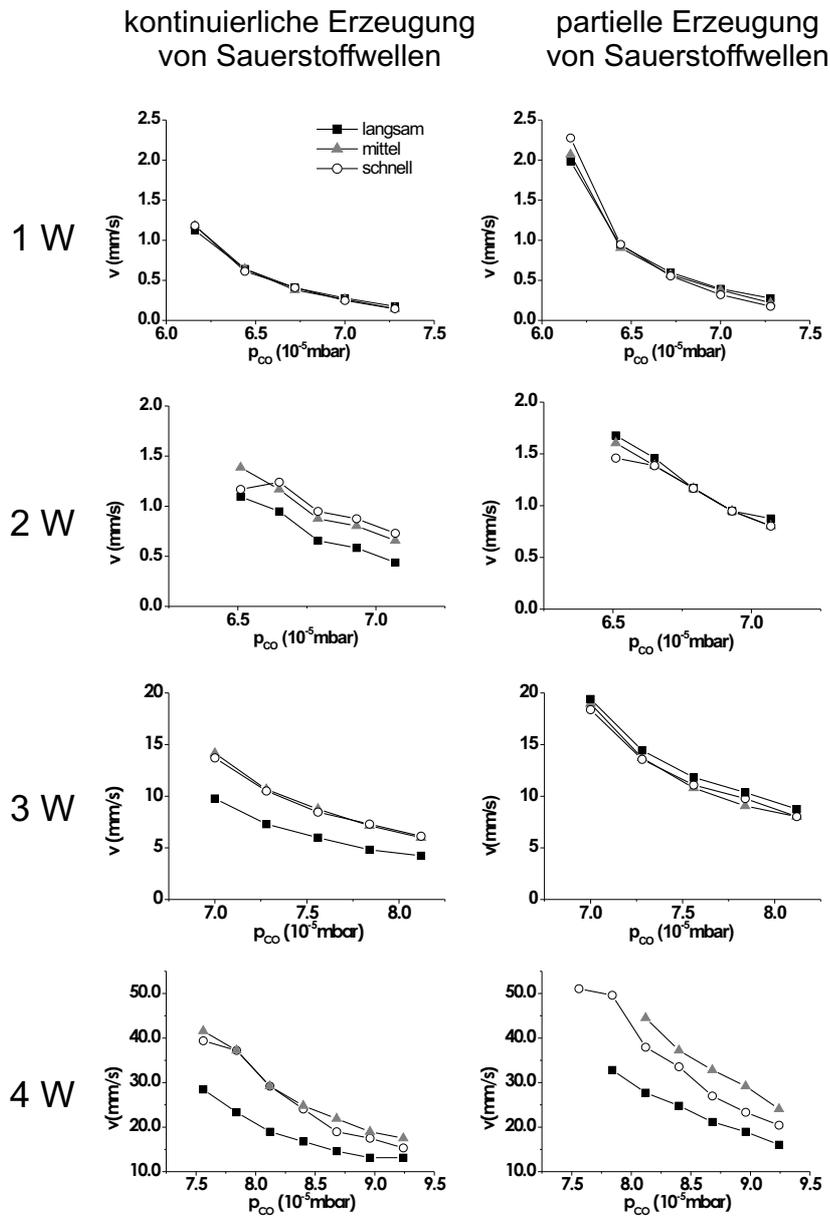


Abbildung 6.10: Messungen des ersten und zweiten Übergangs (siehe Text) in verschiedenen Bewegungsrichtungen des Lasers (Richtung langsamer und schneller CO-Diffusion sowie einer mittleren Richtung). Im ersten Graphen ist die Bedeutung der Symbole angegeben ($T = 495$ K, $p_{O_2} = 3,0 \times 10^{-4}$ mbar).

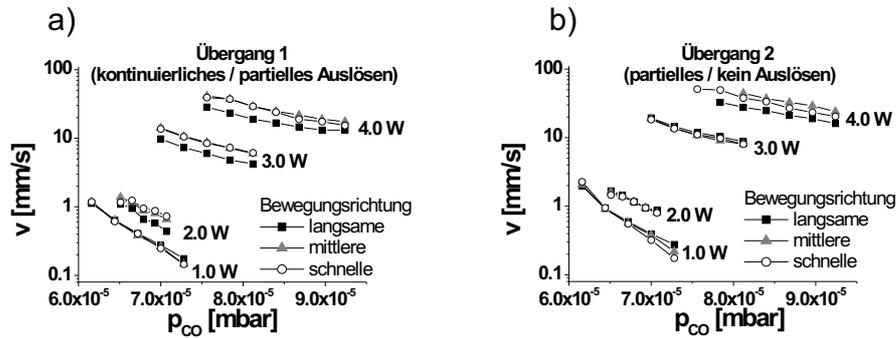


Abbildung 6.11: Halblogarithmische Darstellung aller Ergebnisse aus Abbildung 6.10. Die exponentielle Abhängigkeit der Übergänge vom CO-Partialdruck wird in dieser Darstellung besser sichtbar.

gewisse, wenn auch sehr kurze Zeit beansprucht (siehe Kapitel 4). Bedenkt man nun noch, daß eine reale Probe niemals völlig gleichförmig innerhalb des beträchtlichen Beobachtungsfensters und somit auch entlang des Pfades des fokussierten Lasers ist, so wird klar, daß bei dem zweiten Übergang der „empfindlichste“ Punkt entlang des gewählten Weges vermessen wird. Abbildung 6.12a verdeutlicht dies schematisch.

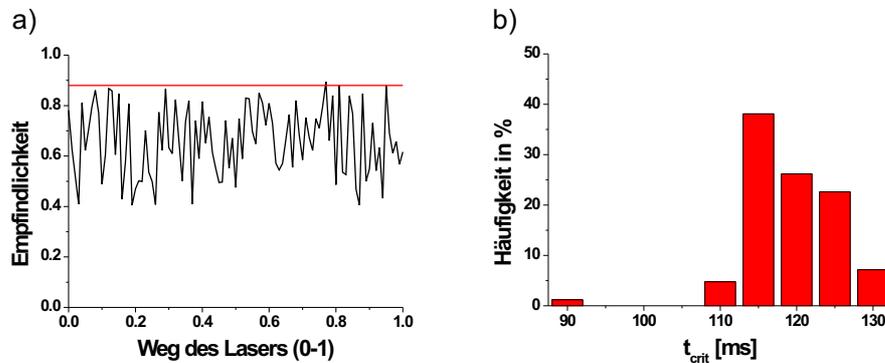


Abbildung 6.12: a) Schematische Darstellung möglicher „Empfindlichkeiten“ (Zufallszahlen zwischen 0,4 und 0,9) entlang der Wegstrecke (0-1) des Lasers. b) Gemessene Verteilung (84 Messungen) von t_{crit} für $T = 468$ K, $p_{CO} = 4,9 \times 10^{-5}$ mbar, $p_{O_2} = 3,0 \times 10^{-4}$ mbar und $L_p = 2,0$ W.

Die Wegstrecke des Lasers ist willkürlich auf 1 normiert worden. Die „Empfindlichkeit“ der Probe entlang des Weges wurde hier exemplarisch

durch Zufallszahlen zwischen 0,4 und 0,9 dargestellt, dabei sollen höhere Werte einer höheren Empfindlichkeit entsprechen. Die waagerechte Linie deutet die Geschwindigkeit des fokussierten Lasers auf der Probe an: Je schneller er sich bewegt, desto höher verläuft diese Linie. Das bedeutet in dem Bild, daß er an weniger Stellen der Probe auf solche Punkte trifft, die empfindlich genug sind, um das Auslösen einer Sauerstoffwelle bei der gegebenen Anregungsintensität zu erlauben. Die Höhe bzw. die Geschwindigkeit, bei der er gerade keine ausreichend empfindliche Stelle auf der Probe mehr trifft, ist die Schwelle, die mit dem zweiten Übergang vermessen wird. Im Rahmen dieser Interpretation ist auch die exponentielle Abhängigkeit des zweiten Übergangs vom CO-Partialdruck verständlich. Das Verhalten sollte das gleiche wie in Abbildung 5.6 sein, welches ebenfalls exponentiell ist, und hängt mit dem Prozeß des Aufheizens und der Desorption zusammen.

Auch die Messungen des ersten Übergangs lassen sich mit Hilfe des vorgestellten Bildes erklären. Der Laserspot bewegt sich nun deutlich langsamer über die Probe, d.h., die waagerechte Linie in Abbildung 6.12a verläuft deutlich niedriger, was bedeutet, daß der Laser an vielen, evtl. sogar an fast allen Stellen auf ausreichende Empfindlichkeit trifft, um dort Sauerstoffwellen auszulösen. Unterschreitet die Linie (die Geschwindigkeit des fokussierten Lasers) das absolute Minimum der Empfindlichkeitskurve, so werden überall entlang seines Weges Sauerstoffwellen ausgelöst (Übergang 1). Er erzeugt sie kontinuierlich, so daß die machkegelähnlichen Muster ohne Unterbrechungen beobachtet werden können. Während also der zweite Übergang den empfindlichsten Punkt vermißt, ist der erste Übergang ein Maß für den *am wenigsten empfindlichen* Punkt entlang des gewählten Weges.

Eine statistische Auswertung von an 84 Stellen gemessenen Werten für t_{crit} bei konstanten Bedingungen ist in Abbildung 6.12b dargestellt. Mit einer Ausnahme streuen die Werte in einem relativ engen Bereich um 120 ms. Die Tatsache, daß sie streuen, unterstützt die Interpretation der Übergänge als Ober- und Untergrenze der Empfindlichkeit der Probe gegenüber der Anregung durch den Laser.

Es bleibt zu klären, warum beim ersten Übergang die Richtung der Laserbewegung einen Einfluß zu haben scheint. Wenn auch ein Einfluß der unterschiedlichen CO-Diffusion in den drei vermessenen Richtungen nicht ausgeschlossen werden kann, so scheint doch eine andere Erklärung plausibler: Betrachtet man das EMSI-Bild ohne irgendwelche Musterbildung einmal genauer, so erkennt man Polierspuren, die hauptsächlich senkrecht zur langsamen Diffusionsrichtung verlaufen. Das bedeutet, daß gerade in Richtung der langsamen CO-Diffusion der Weg des Laserspots besonders viele Rillen kreuzt und somit auf besonders viele potentiell unempfindliche Stellen trifft.

Eine kurze Anmerkung zum Schluß dieses Kapitels: Da der Laserspot einen Durchmesser von ca. 40–50 μm hat, ist davon auszugehen, daß er zu jedem Zeitpunkt eine große Zahl struktureller Defekte beleuchtet. Die Empfindlichkeit der Probe wird also nicht von dem Vorhandensein eines einzelnen Defektes abhängen. Ein Möglichkeit wäre aber, daß eine unterschiedliche *Defektdichte* die Sensibilität der Probe bezüglich des Auslösens einer Sauerstoffwelle durch den Laserspot beeinflußt.