

Graduate School of Production
Engineering and Logistics

**Untersuchungen zur Bildung und Ausbreitung von Ver-
formungsbändern und ihre Simulation**

an der Fakultät Maschinenbau
der TU Dortmund
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

M.Sc. Xiaoqun Feng
aus Hunan, V.R. China

Berichter:	Prof. Dr.-Ing. H.-A. Crostack
Mitberichter:	Prof. Dr. rer. nat. B. Svendsen
Tag der mündlichen Prüfung:	05.12.2008

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Stipendiat am Lehrstuhl für Qualitätswesen (LQW) an der Universität Dortmund von Oktober 2004 bis 2007 im Rahmen der „Graduate School of Production and Engineering and Logistics“ NRW.

Dem Inhaber des Lehrstuhls für Qualitätswesen, Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-A. Crostack, danke ich für die ausgezeichnete Förderung, die stete Unterstützung und die wertvollen Diskussionen während der Entstehung dieser Arbeit.

Für die Übernahme des Korreferates und die eingehende Durchsicht dieser Arbeit gilt mein Dank dem Leiter des Lehrstuhls für Mechanik, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Bob Svendsen.

Mein besonderer Dank gilt Dr. rer.nat. G. Fischer für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit und die kompetente wissenschaftliche Unterstützung. Seine stets vorhandene Bereitschaft zur Diskussion hat mir immer wieder bei der Klärung von wichtigen Detailfragen geholfen. Darüber hinaus gilt mein Dank allen Mitarbeitern des LQWs. Erwähnen möchte ich Dr. Refflinghaus, Dr. Zielke, Jens Nellesen, Carsten Müller und Wolfgang Czayka.

Mein Dank gilt auch der Graduate School of Production Engineering and Logistics der Universität Dortmund, da meine Forschungstätigkeit nur mit der gewährten finanziellen Unterstützung möglich war.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meinen Eltern, die mir diesen beruflichen Werdegang überhaupt ermöglicht und mich bis heute stets gefördert haben. In besonderer Weise möchte ich mich bei meiner Frau Li Zhang bedanken. Ihre Geduld und die liebevolle Unterstützung während meines Studiums haben schließlich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit geführt.

Kurzfassung

Die durch den sogenannten Portevin-Le Châtelier (PLC)-Effekt hervorgerufene, inhomogene und instabile plastische Verformung von metallischen Werkstoffen verursacht eine erhöhte Oberflächenrauheit und kann die Duktilität und Umformbarkeit beeinträchtigen. Dadurch ist der Einsatz dieser Werkstoffe in solchen Bereichen nur eingeschränkt möglich, in denen es auf eine gute Oberflächenqualität ankommt (z.B. Bleche der PKW-Außenhaut). Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, durch die experimentelle Untersuchung des Mechanismus der Bandbildung und -ausbreitung und deren Simulation einen Beitrag zu einem verbesserten Verständnis dieser Prozesse zu leisten.

Dazu werden in dieser Arbeit zunächst verschiedene experimentelle Methoden entwickelt. Dazu gehören die Aufnahme und Auswertung von Thermokamerabildserien, eine Bildkorrelationsmethode zur Bestimmung von Dehnungsfeldern auf Basis von Infrarot- und CCD-Kamerabildern und der Aufbau eines Versuchstands zur Analyse des PLC-Verhaltens bei lokaler Lasererwärmung. Auf Basis dieser Methoden werden dann die Entstehung und Ausbreitung von PLC- und Lüdersbändern sowie der Wechselwirkung zwischen PLC- und Scherbändern im Probensteg und im Übergangsbereich zwischen Steg und Kopf der Zugproben experimentell untersucht. In diesem Zusammenhang wird auch der Einfluss von Temperaturgradienten auf das Ausbreitungsverhalten der PLC-Bänder betrachtet. Parallel zu den Experimenten wird das Verhalten der PLC-Bänder auf Basis der Modelle von Estrin/McCormick und Hähner simuliert. Dabei wird erstmalig die thermomechanische Kopplung in das Modell eingeführt, um die Rückwirkung der durch die plastische Verformung freigesetzten Wärme bzw. Temperaturerhöhung auf das Bandverhalten zu berücksichtigen.

Der Vergleich von Experiment und Simulation zeigt eine qualitativ gute Übereinstimmung bei der Morphologie und Kinematik der PLC-Bänder sowie bei der Scherband-PLC-Band-Wechselwirkung. Durch Berücksichtigung der Temperaturkopplung werden der Ort der Bandbildung und die Spannungs-Dehnungs-Kurve besser vorhergesagt. Der quantitative Vergleich offenbart aber auch Diskrepanzen zwischen dem experimentell beobachteten und dem simulierten Bandverhalten. Sowohl unzutreffend gewählte Werte für die Modellparameter bei der Simulation als auch noch bestehende Schwächen der Modelle selbst sind als Ursache hierfür in Betracht zu ziehen. Darauf weist auch die Tatsache hin, dass einige der experimentell beobachteten Phänomene bisher mit keinem der beiden Modelle simuliert werden konnte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Stand der Forschung	4
2.1	Phänomenologie des PLC-Effekts und technische Relevanz.....	4
2.2	Werkstoffkundliche Grundlagen	5
2.2.1	Ursachen im mikroskopischen Aufbau metallischer Werkstoffe.....	5
2.2.2	Versetzungshindernisse	6
2.2.3	Wechselwirkung zwischen Fremdatomen und Gleitversetzungen.....	7
2.2.4	Thermisch aktivierte Diffusionsvorgänge	8
2.2.5	Thermisch aktivierte Versetzungsbewegung.....	8
2.2.6	Dynamische Reckalterung (DSA)	9
2.2.7	Dehnratenempfindlichkeit (SRS)	10
2.2.8	Wechselwirkung zwischen den Versetzungen	12
2.3	Experimentelle Untersuchungen zum PLC Effekt	14
2.3.1	Untersuchte Werkstoffe.....	14
2.3.2	Eingesetzte Untersuchungsverfahren	14
2.4	Modelle zum PLC-Effekt	17
2.4.1	Das Model von Estrin und McCormick	17
2.4.2	Das PLC-Model von Hähner.....	19
2.4.3	Modellvergleich für Simulation	23
2.5	Fazit.....	24
3	Methodenentwicklung	25
3.1	Experiment	25
3.1.1	Werkstoffe, Probepreparation und Versuchsaufbau.....	25
3.1.2	Festlegung der Probengeometrie	26
3.1.3	Probenbelastung	27
3.1.4	Methode zur Aufbereitung und Visualisierung der Messdaten.....	28
3.1.5	Bildkorrelationsalgorithmus.....	31
3.1.6	Einsatz des Korrelationsalgorithmus zur Auswertung von Bildserien.....	36
3.1.7	Messung der Bandparameter	38
3.2	Simulation	39
3.2.1	Die Finite-Elemente-Methode.....	39
3.2.2	Werkstoffmodellierung und User Material Subroutine (UMAT)	39
3.2.3	Modellrealisierung in UMAT.....	39
3.2.4	3D-FE-Simulation mit dem Estrin-Cormick-Modell	41

3.2.5	3D-FE-Simulation mit Hähner-Modell ohne Kopplung	43
3.2.6	1D-FD-Simulation mit räumlicher Kopplung auf Basis des Hähner-Modells.	45
4	Ergebnisse	48
4.1	Experiment	48
4.1.1	Das Verhalten der PLC-Bänder im Probensteg.....	48
4.1.2	Vergleich des Ausbreitungsverhaltens von PLC- und Lüdersbändern	56
4.1.3	Bildung und Ausbreitung der Bänder im Übergang vom Probensteg zum Probenkopf	60
4.1.4	Einfluss der Scherbänder auf das Bandbildungs- und Bandausbreitungsverhalten	64
4.1.5	Einfluss von Kerben bzw. Spannungsgradienten.....	69
4.1.6	Der Einfluss einer lokalen Erwärmung auf das Bandverhalten	72
4.1.7	Messung des Taylor-Quinny-Koeffizienten.....	75
4.2	Simulationen und Vergleich mit Experiment.....	76
4.2.1	3D-FE-Simulation mit Estrin-McCormick-Modell.....	76
4.2.2	Vergleich von Experiment und Simulation mit dem Estrinmodell.....	89
4.2.3	1D-FD-Simulation mit Hähner-Modell und räumlicher Kopplung	97
4.2.4	Vergleich von Experiment und Simulation mit dem 1D-Hähnermodell.....	107
4.2.5	3D-FE-Simulation mit Hähner-Modell ohne Kopplung	109
5	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick.....	113
5.1	Zusammenfassung.....	113
5.1.1	Experimentelle Ergebnisse.....	113
5.1.2	Simulationsergebnisse.....	114
5.1.3	Vergleich Experiment - Simulation.....	114
5.2	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	115
6	Literaturverzeichnis.....	116
7	Liste der verwendeten Zeichen und Symbole	122
	Anhang I: Jacoby-Matrix $\nabla L(X_i)$ bei der 1D-FD Simulation.....	125
	Anhang II: Parameter zur Simulation der PLC-Bänder	126

1 Einleitung

In gewissen Metalllegierungen (z.B. Al-Mg-Legierungen) wird bei verschiebungs- oder spannungsgesteuerter Umformung ein oszillierendes Spannungs-Dehnungsverhalten beobachtet, das auf eine dynamische Wechselwirkung zwischen mobilen Versetzungen und im Gitter aufgelösten diffundierenden Fremdatomen zurückzuführen ist. Diese durch den sogenannten Portevin–Le Châtelier (PLC)-Effekt hervorgerufene, inhomogene und instabile plastische Verformung von metallischen Werkstoffen ist von großer praktischer Bedeutung, da sie eine erhöhte Oberflächenrauheit (Fließfiguren) zur Folge hat, die in vielen Fällen unerwünscht ist. Dies trifft beispielsweise für die zur Herstellung der Außenhaut von Pkws eingesetzten Bleche aus Al-Legierungen zu. Außerdem führt der PLC-Effekt unter Umständen zur Beeinträchtigung der Duktilität und damit der Umformbarkeit. Damit beim Umformen solcher Bleche keine Fließfiguren entstehen, werden vergleichsweise teure, aushärtbare Legierungen als Blechmaterial verwendet, da diese im Gegensatz zu den kostengünstigeren, naturharten Legierungen nicht zur Fließfigurenbildung neigen. Es besteht deshalb ein Bedarf an einer grundlegenden Untersuchung der Frage, welche Maßnahmen zur Unterdrückung des PLC-Effekts geeignet sind.

Um gezielt auf die lokalisierte Verformung und die Verformungsinstabilität Einfluss nehmen zu können, ist es unumgänglich die Entstehung und Ausbreitung der PLC-Bänder besser zu verstehen. Hierzu sind sowohl Experimente als auch Simulationen erforderlich. Bei diesen Simulationen müssen verschiedene innere (Legierungszusammensetzung, Typ und Anteil der Fremdatome, Dichte der mobilen Versetzungen, Typ der Versetzungshindernisse, Korngröße, ...) und äußere Parameter (Dehnung, Dehnrage, Temperatur, Mehrachsigkeit, Regelungsart, Nachgiebigkeit der Prüfmaschine, Probengeometrie, Oberflächenrauheit, ...) berücksichtigt werden, um Möglichkeiten einer Einflussnahme auf die lokalisierte Verformung und Verformungsinstabilität erkunden zu können. In der vorliegenden Arbeit soll hierzu einen Beitrag geleistet werden.

2 Stand der Forschung

Am Anfang dieses Abschnitts wird der PLC-Effekt phänomenologisch eingeführt und auf seine technische Relevanz hingewiesen. Danach werden die Grundlagen der plastischen Verformung in Metallen, die für spätere Modellierung notwendig sind, zusammenfassend dargestellt. Anschließend folgen die bis heute durchgeführten experimentellen Untersuchungen und Modellentwicklungen zum PLC-Effekt.

2.1 Phänomenologie des PLC-Effekts und technische Relevanz

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus einem Zugversuch nimmt eine besonders herausragende Stellung zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens ein. Abb. 2.1 zeigt Kurven von dehnratengesteuerten Zugversuchen an einer Al-Mg Legierung, die bei verschiedenen Dehnraten durchgeführt wurden. Ab der kritischen Fließspannung am Ende des elastischen Verformungsbereichs erfolgt die plastische Verformung der Probe, die durch den nicht-linearen Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung gekennzeichnet ist. Den mit zunehmender plastischer Verformung zu beobachtenden Anstieg der Spannung (in diesem Bereich Fließspannung genannt) bezeichnet man als Verfestigung. Abb. 2.1 zeigt den Einfluss von Dehnraten und Dehnung auf das Verformungsverhalten des Legierungswerkstoffs. Während für eine Dehnraten von 1,01%/s zunächst eine relativ glatte Spannungs-Zeit-Kurve beobachtet wird, weist die Kurve für die Dehnraten von 0,00931%/s bei weitaus geringerer Dehnung Instabilitäten auf, die Serrations genannt werden. Ein solches Verhalten wird auch als Sägezahnfließen bezeichnet. Charakteristisch für das Sägezahnfließen beim PLC-Effekt ist die Bildung und Ausbreitung von Verformungsinhomogenitäten – den sogenannten PLC-Bändern, die in bestimmten Bereichen von Temperatur und Dehnraten auftreten. Verschiedene Typen von PLC-Bändern lassen sich einerseits durch die Form der Zacken im Spannungs-Dehnungs-Diagramm unterscheiden [1][2]. Andererseits führen die in jüngster Zeit durch Kamera aufgefassten Bildern ebenfalls zur Klassifizierung von PLC-Typen [3][4].

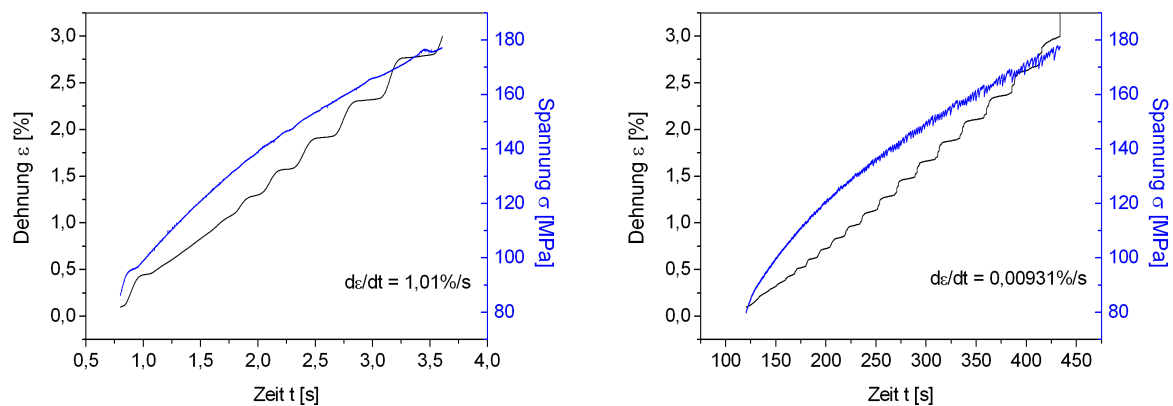


Abb. 2.1: Spannungs-Dehnungs-Zeit-Kurven für zwei unterschiedliche externe Dehnraten (AlMg3)

Die technische Relevanz des Sägezahnfließens bzw. der dadurch entstehenden Fließfiguren wird in Abb. 2.2 anhand einer umgeformten Motorhaube verdeutlicht. Die vor dem Experiment polierte Probenoberfläche weist eine starke, bereits mit dem bloßen Auge erkennbare Rauheit auf. Ursache hierfür sind durch die Oberfläche austretende PLC-Bänder. Damit ist die Verwendung dieses Leichtbauwerkstoffs als Autokarosserieblech stark eingeschränkt. Auch die Bruchzähigkeit wird durch den PLC-Effekt herabgesetzt [5][6].

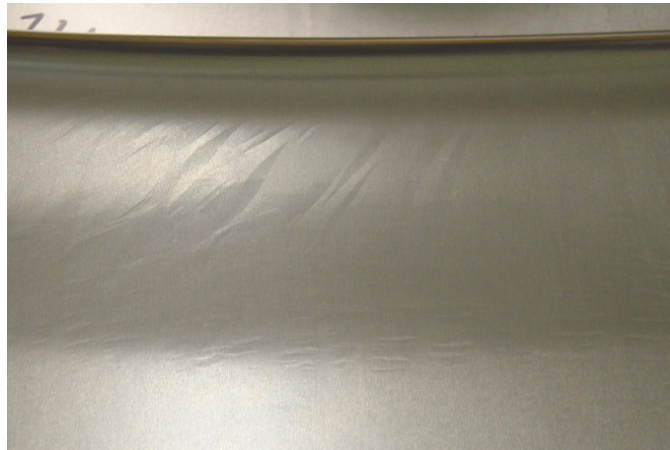


Abb. 2.2: Fließfiguren auf der Oberfläche einer umgeformten Motorhaube, Quelle: Hydro Aluminium Bonn, IFU Stuttgart

Die relevanten Grundlagen für diese Erscheinung stellen sich wie folgt dar:

2.2 Werkstoffkundliche Grundlagen

2.2.1 Ursachen im mikroskopischen Aufbau metallischer Werkstoffe

Auch reine Metalle weisen Fehler im Gitteraufbau auf, deren Art durch Herstellung, Behandlung und Beanspruchung des Werkstoffs bestimmt wird. Die Gitterfehlertypen lassen sich nach geometrischen Gesichtspunkten gemäß Tab. 2.1 klassifizieren. Für das Verständnis des PLC-Effekts sind insbesondere Fremdatome und Versetzungen von herausragender Bedeutung.

Geometrische Bezeichnung	Beispiele
0-dimensional, punktförmig	Leerstelle, Fremdatom
1-dimensional, linienförmig	Versetzung, Kleinwinkelkorngrenze, Zwillingsgrenze
2-dimensional, flächenförmig	Leerstellenzone, Fremdatomzone, Großwinkelkorngrenze
3-dimensional, räumlich	Ausscheidung, Einschluss, Mikroriss, Pore

Tab. 2.1 Gitterstörungen

Die Träger der plastischen Verformung in kristallinen Werkstoffen sind Versetzungen. Die enge Nachbarschaft der Versetzungslinie wird als Versetzungskern bezeichnet. Die ortsabhängige Größe der Verzerrung wird durch den Schubmodul G und den Burgersvektor b festgelegt [7]. Es gibt zwei Arten von Versetzungen, die sich in ihrer Struktur voneinander unterscheiden - die Stufenversetzungen (Abb. 2.3a) und die Schraubenversetzungen (Abb. 2.3b). Die Verzerrungen des Kristalls um eine Versetzung führen zu weiterreichenden Spannungen. Gelangt beispielsweise eine sich bewegende Stufenversetzung, die ebenfalls von einem Spannungsfeld umgeben ist, in die Nähe der Fremdatome, werden sich die Spannungsfelder gegenseitig beeinflussen. Bei höheren Temperaturen entspricht die Diffusionsgeschwindigkeit der Fremdatome etwa der Geschwindigkeit der bewegten Versetzungen, so dass sie von den Fremdatomen zeitweilig blockiert werden [8]. Dies Phänomen ist für die Entstehung und Ausbreitung von PLC-Bändern von grundlegender Bedeutung.

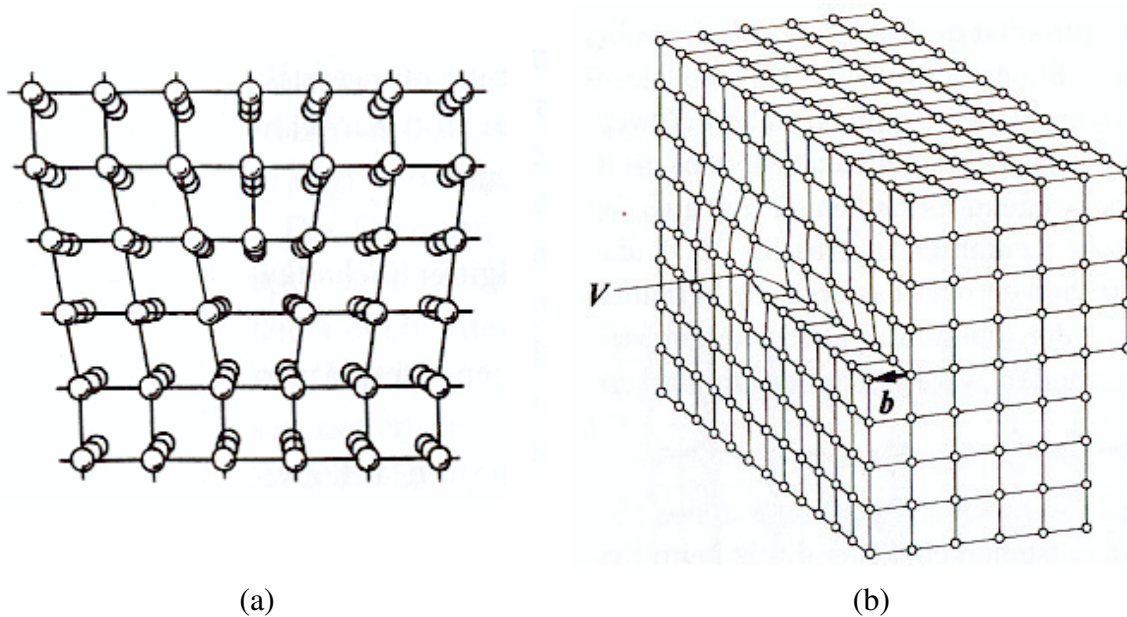


Abb. 2.3: Stufenversetzung in einem kubisch primitiven Gitter (a), Schraubenversetzung im kubisch primitiven Gitter und die Darstellung des Verlaufes der Versetzungslinie V und des Burgersvektors b (b) [7]

2.2.2 Versetzungshindernisse

Generell werden Versetzungshindernisse in kurz- und weitreichende unterteilt, da sie unterschiedlich wirken und verschiedene Mechanismen an ihrer Überwindung beteiligt sind [8].

Infolge der elastischen Verzerrungen um die Versetzungslinie können Versetzungen untereinander über weite Distanzen wechselwirken. Für den Fall, dass sich eine Gleitversetzung durch ein Feld paralleler Versetzungen bewegt, wirken diese als Hindernisse. Die notwendige Passierspannung τ_{pass} kann gemäß Gleichung (2.1) mit der Dichte der parallelen Stufenversetzungen ρ_p , dem Burgersvektor b , dem Schubmodul μ und einem Geometriefaktor $\alpha = 0,1 \dots 1$ abgeschätzt werden [9].

$$\tau_{pass} = \alpha \mu b \sqrt{\rho_p} \quad (2.1)$$

Aufgrund des langsamen Abklingverhaltens der Spannungsfelder wird die elastische Wechselwirkung mit anderen Versetzungen als weitreichendes Hindernis bezeichnet.

Bei der Verschiebung einer Versetzungslinie um einen atomaren Schritt in einem sonst ungestörten Gitter muss eine Reibspannung überwunden werden. Diese wird dadurch hervorgerufen, dass sich die Atome um den Versetzungskern während des Gleitvorgangs aus einer Lage minimaler Energie in eine benachbarte Lage minimaler Energie begeben und dabei eine Energiebarriere überwinden müssen. Diese Energiebarriere wird als Peierls-Potential bezeichnet. Die entsprechende Peierls-Spannung τ_p liegt nach Nadgornyi [10] für verschiedene Kristalle im Bereich

$$\tau_p = 1 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-2} \mu \quad (2.2)$$

wobei μ den Schubmodul des jeweiligen Materials symbolisiert. Die Peierls-Spannung wirkt nur auf einen Raum von zwei Atomabständen und fällt deshalb in die Klasse der kurzreichenden Hindernisse.

Ebenfalls in die Gruppe der kurzreichenden Hindernisse fallen Waldversetzungen, deren Dichte mit ρ_f bezeichnet wird. Das Kristallgitter eines realen Werkstoffs ist durchsetzt von Versetzungen auf verschiedenen, sich schneidenden Ebenen. Als Waldversetzungen werden diejenigen bezeichnet, deren Linien die Gleitebenen der aktiven Gleitsysteme durchstoßen. Sie müssen von den Gleitversetzungen bei der Überquerung geschnitten werden. Gottstein [9][11] schätzt die Schneidspannung τ_s durch

$$\tau_s = 1/2 \mu b \sqrt{\rho_f} \quad (2.3)$$

ab. Die kritische Schubspannung τ_0 ist abhängig von den Hindernissen gegen das Versetzungsgleiten. Als Richtwert der kritischen Schubspannung für einkristalline Mischkristalle dient die Summe von Peierls-, Passier-, Schneid- und Mischkristallspannung τ_{MK} aus der Gleichung,

$$\tau_0 = \tau_p + \tau_{pass} + \tau_s + \tau_{MK} \quad (2.4)$$

die der notwendigen Schubspannung am absoluten Nullpunkt bei $T = 0^\circ\text{K}$ entspricht. Die Überwindung von Hindernissen unterhalb der nach Gleichung (2.4) berechneten kritischen Schubspannung wird als thermische Aktivierung bezeichnet.

2.2.3 Wechselwirkung zwischen Fremdatomen und Gleitversetzungen

In Mischkristallen wechselwirken Fremdatome mit den Gleitversetzungen und behindern diese in ihrer Bewegung, wobei zwischen zwei unterschiedlichen Mechanismen der Interaktion unterschieden wird [8]:

Paraelastische Wechselwirkungen

Paraelastische Wechselwirkungen beruhen auf der Reduzierung der elastisch gespeicherten Energie durch das Zusammenspiel der Verzerrungen um das Fremdatom mit dem Spannungsfeld der Versetzung, das auf die kugelsymmetrischen Gitterverzerrungen eines substitutionellen Fremdatoms (Volumenabweichung) und den Druck um eine Stufenversetzung zurückzuführen ist. Interstitielle Fremdatome wie etwa Kohlenstoff in Eisen rufen eine anisotrope, tetragonale Gitterverzerrung hervor, deren Scheranteil neben Stufenversetzungen auch Schraubenversetzungen beeinflusst. Daher zeigt die Mischkristallverfestigung eine stärkere Wirkung in Einlagerungsmischkristallen als in Austauschmischkristallen.

Diaelastische Wechselwirkungen

Diese Form der Wechselwirkungen ist unabhängig von einer Volumendifferenz zwischen den Legierungspartnern. Die gegenseitigen Einflüsse werden durch die unterschiedlichen Bindungskräfte zwischen Fremd- und Wirtsatomen hervorgerufen, die zu einer lokalen Änderung des Schubmoduls und damit zu einer Änderung der Linienenergie der Versetzung führen.

Diese Faktoren gestalten die Berechnung der maximalen Überwindungskraft sehr komplex. Zusätzlich muss für höhere Fremdatomkonzentrationen die Wechselwirkung zwischen den Fremdatomen berücksichtigt werden, die oberhalb der Löslichkeitsgrenze zu Phasenseparationen und Ausscheidungen führt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass sich die obigen Überlegungen auf ein statisches Hindernisfeld beziehen. Im realen Werkstoff jedoch wechseln die Fremdatome durch Diffusion die Plätze. Es kommt zu Wechselwirkungen zwischen dem Versetzungsgleiten und den Diffusionsprozessen. Diese Interaktion ist von herausragender Bedeutung für das Auftreten des PLC-Effekts.

2.2.4 Thermisch aktivierte Diffusionsvorgänge

Als Diffusion im Gitter werden in erster Linie die durch thermische Fluktuationen bedingten Platzwechsel von Atomen, Ionen oder niedermolekularen Bestandteilen bezeichnet. Die Anzahl der Platzwechsel pro Zeitintervall steigt bei all diesen Vorgängen mit der Temperatur an. Thermodynamisch gesehen wird während dieser irreversiblen Prozesse kommt es zu einem Abfall der freien Energie. Der Teilchentransport im Gitter ist nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich und die denkbaren Mechanismen des Platzwechsels sind der direkte Platzwechsel, der Leerstellen- und der Zwischengittermechanismus. Der Leerstellenmechanismus ist wirksam in reinen Metallen und Austauschmischkristallen, vorherrschend in kubisch-flächenzentrierten (kfz) Gittern. Als Aktivierungsenthalpie dieses Prozesses muss deren Ablösungsenergie aufgebracht werden. Dies kann beispielweise durch Temperaturerhöhung, durch mechanische Verformung oder durch das Einwirken elektrischer oder magnetischer Felder erfolgen.

In kristallin aufgebauten Metallen kommt es neben einer konzentrationsabhängigen auch zu einer spannungsinduzierten gerichteten Teilchenbewegung im Gitter. Grund hierfür ist die Anhebung der elastisch gespeicherten Energie im Kristall durch die Einlagerung von Atomen, deren Volumen vom vorhandenen Platz im Gitter abweicht. Das betrifft substitutionell eingelagerte Fremdatome, deren Atomradien sich von denen der Wirtsatome unterscheiden, sowie interstitielle Fremdatome, deren Volumen den verfügbaren Raum eines Zwischengitterplatzes übertrifft. Diese Verzerrungen befinden sich mit anderen, räumlich verteilten Spannungsfeldern in Wechselwirkung. Die Fremdatome bevorzugen Plätze, an denen sich ihre Eigenspannungen mit den übrigen inneren Spannungen aufheben. Die Möglichkeit, die freie Energie im Kristall zu minimieren, ruft eine gerichtete Teilchenbewegung entlang des Gefälles der freien Energie hervor.

Die Diffusion der Fremdatome führt zu einem Zuwachs der Linienkonzentration Δc , der vom Diffusionsmechanismus abhängig ist. Dabei konkurrieren Volumendiffusion und Pipe-Diffusion [12]. Im ersten Fall gelangen alle Fremdatome, die sich in einem Zylinder mit dem Radius r_0 befinden, zur Versetzung, so dass die Proportionalität

$$\Delta c_{vol} \propto r_0^2 \propto (Dt_a)^{2/3} \quad (2.5)$$

besteht, wobei t_a Alterungszeit ist und D Diffusionskoeffizient ist. Im Fall der Pipe-Diffusion, bei der sich die Fremdatome entlang von Waldversetzungslinien zur Gleitversetzung bewegen [13], ist die Linienkonzentrationsänderung eine Funktion der Anzahl der Diffusionspfade N :

$$\Delta c_{pipe} \propto Nr_0 \propto N(Dt_a)^{1/3} \quad (2.6)$$

Die Anzahl der Diffusionspfade hängt wiederum von der Mikrostruktur und damit vom Verformungszustand gemäß der Gleichung $N = f(\varepsilon)$ ab. Dieser Zusammenhang wird vereinfacht durch die Verknüpfung der Anzahl der Pfade mit der Waldversetzungsdichte $N \approx \sqrt{\rho_f}$ beschrieben.

2.2.5 Thermisch aktivierte Versetzungsbewegung

Die für die thermisch aktivierte Versetzungsbewegung maßgebliche, d.h. effektive Schubspannung τ_{eff} ist die angelegte Schubspannung τ abzüglich der weitreichenden, internen Schubspannungen $\bar{\tau}$

$$\tau_{eff} = \tau - \tau_i \quad (2.7)$$

Die Aktivierungswahrscheinlichkeit P in einem Zeitintervall Δt bei einer Anlauffrequenz ν_0 , unter der effektiven Schubspannung τ_{eff} beträgt nach [14]:

$$P = \nu_0 \Delta t \exp\left\{-\frac{G_0 - V\tau_{eff}}{kT}\right\} \quad (2.8)$$

Die sogenannte Anlauffrequenz ν_0 ist die Frequenz, mit der eine Versetzung gegen ein Hindernis anläuft. Sie wird mit 1/100 der Debye-Frequenz abgeschätzt. G_0 ist statische Aktivierungsenthalpie und V ist das Aktivierungsvolumen.

Im Falle des Jerky Glide mit sehr kleinen Flugzeiten t_g gegenüber den Wartezeiten t_w lässt sich der Ansatz der thermischen Aktivierung zur Gleichung

$$\dot{\epsilon}^p = \frac{\Omega}{t_w} = \Omega \nu_0 \exp\left\{-\frac{G - V'\sigma_{eff}}{kT}\right\} \quad (2.9)$$

zusammenfassen, wobei V' das makroskopische, auf effektive Spannungen σ_{eff} bezogene Aktivierungsvolumen ist, das über den Taylor-Faktor M durch Beziehung $V' = M^J V$ mit den Aktivierungsvolumen V verknüpft ist. Ω ist die Elementardehnung und G ist die Gesamtaktivierungsenthalpie. Diese Gleichung beschreibt die plastische Dehnrates $\dot{\epsilon}^p$ unter der Annahme, dass der Mittelwert der Wartezeiten charakteristisch für das Versetzungsensemble ist. Eine Umformung von Gleichung (2.9) liefert die effektive Spannung σ_{eff} , die sich bei Vorgabe der plastischen Dehnrates $\dot{\epsilon}^p$ einstellt.

$$\sigma_{eff} = \frac{kT}{V'} \left(\ln \frac{\dot{\epsilon}^p}{\Omega \nu_0} + \frac{G}{kT} \right) \quad (2.10)$$

2.2.6 Dynamische Reckalterung (DSA)

In der Literatur herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass die dynamische Reckalterung (DSA) einen entscheidenden Einfluss auf den PLC-Effekt ausübt. Unter der dynamischen Reckalterung ist das dynamische Zusammenspiel von Versetzungs- und Fremdatombewegung zu verstehen. Durch spannungsinduzierte Diffusion streben Fremdatome zu den Versetzungen. Sie bilden sogenannte Cottrell-Wolken höherer Fremdatomkonzentration um den Versetzungskern und führen so zu einer Anhebung der Aktivierungsenthalpie um einen Anteil ΔG_{DRA} . Springer et al. [15] finden in allen Experimenten einen linearen Zusammenhang zwischen der Reckalterungsenthalpie ΔG_{DRA} und der Konzentrationsveränderung der Fremdatome Δc , so dass allgemein

$$\Delta G_{DRA} \propto N(Dt_a)^n \quad (2.11)$$

mit $N = 1$ und $n = 2/3$ für Volumendiffusion oder $N = f(\epsilon)$ und $n = 1/3$ für Pipe-Diffusion gilt. Der Einfluss der Reckalterung für lange Wartezeiten ist begrenzt. Als Ursache nennen Schlipf [16] und Springer et al. [15] einen Erschopfungseffekt, der bewirkt, dass eine Versetzung alle greifbaren Fremdatome in ihrer Umgebung anzieht, bis der Vorrat erschöpft ist. Louat [17] hingegen erklärt den limitierten Einfluss durch die begrenzte Anzahl von Plätzen für Fremdatome an der Versetzung, so dass für die Linienkonzentration ein Sättigungswert c_{max} existiert.

tiert. Beide Varianten alterungsabhängiger Reckalterungsenthalpie werden mit dem Sättigungswert der Reckalterungsenthalpie ΔG_∞ durch eine Exponentialgleichung der Form

$$\Delta G_{DRA}(t_a) = \Delta G_\infty \left(1 - \exp\left\{-\left(\eta t_a\right)^n\right\}\right) \quad (2.12)$$

beschrieben, wobei η die Diffusionsrate der Fremdatome ist. Der Diffusionsexponent n bestimmt die Alterungsdynamik für kleine Alterungszeiten t_a entsprechend dem zugrundeliegenden Diffusionsmechanismus [8].

Der reckalterungsbedingte Zuwachs der Aktivierungsenthalpie erfordert höhere Spannungen, um gleiche Aktivierungswahrscheinlichkeiten zu erzielen. Die effektive Spannung steigt nach Gleichung (2.10) mit der zunehmenden Aktivierungsenthalpie um

$$\Delta \sigma_{DRA} = \frac{\Delta G_{DRA}}{V'} \quad (2.13)$$

unter der Voraussetzung, dass alle Versetzungen einen ähnlichen Alterungszustand aufweisen [8].

2.2.7 Dehnratenempfindlichkeit (SRS)

Die effektive Spannung steigt mit der vorgegebenen Dehnrade. Diese intuitive wahre Aussage bestätigt sich für reine Metalle im Experiment und Modelle nach Gleichung (2.10) spiegeln dieses Verhalten ebenfalls wider. Eine höhere Dehnrade erfordert die häufigere Aktivierung der Gleitversetzungen pro Zeiteinheit. Dies ist bei konstanter Temperatur nur unter höheren Spannungen möglich, wobei Verfestigungsprozesse bei diesen Überlegungen nicht berücksichtigt werden.

In Legierungen ist die Aktivierungsenthalpie jedoch wartezeitabhängig und damit ebenfalls abhängig von der plastischen Dehnrade. Höhere Dehnraten erfordern höhere Aktivierungsraaten, wodurch die Wartezeiten sinken. Mit dem Rückgang der Wartezeit erniedrigt sich gleichzeitig die Aktivierungsenthalpie. Dieser komplexe Zusammenhang zwischen Fließspannung und Dehnrade ist kaum intuitiv zu erfassen.

Zur Beschreibung der Abhängigkeit der Fließspannung von der Dehnrade wird der Begriff der Dehnraten- oder Geschwindigkeitsempfindlichkeit eingeführt, wobei zwischen zwei Empfindlichkeiten unterschieden wird.

Instantane Dehnratenempfindlichkeit

Die instantane Dehnratenempfindlichkeit beschreibt die Änderung der Fließspannung σ_y bei Änderung der Dehnrade unter der Voraussetzung einer konstanten Aktivierungsenthalpie G . Dies entspricht dem Verhalten von reinen Metallen. Sie ist nach Hähner et al. [18] durch die Gleichung

$$S'_i = \left. \frac{\partial \sigma_y}{\partial \ln \dot{\epsilon}^p} \right|_{\epsilon, \Delta G} = \dot{\epsilon}^p \left. \frac{\partial \sigma_y}{\partial \dot{\epsilon}^p} \right|_{\epsilon, \Delta G} \quad (2.14)$$

definiert. Hierbei wird auch ein konstanter Verfestigungszustand angenommen, der durch den Index ϵ gekennzeichnet ist. Das Symbol für die instantane Dehnratenempfindlichkeit wird mit einem Strich versehen, da es sich um eine makroskopische Größe handelt. Mit Gleichung (2.10) berechnet sich S'_i analytisch zu

$$S'_i = \frac{kT}{V'} \quad (2.15)$$

Asymptotische Dehnratenempfindlichkeit

Unter Berücksichtigung von Alterungsvorgängen hängt die Fließspannung nicht nur direkt sondern über die Reckalterungsenthalpie ΔG_{DRA} auch indirekt von der Dehnrade ab. Beide Abhängigkeiten sind durch die asymptotische Dehnratenempfindlichkeit

$$S'_\infty = \left. \frac{\partial \sigma_y}{\partial \ln \dot{\epsilon}^p} \right|_\epsilon = S'_i + \left. \frac{\partial \sigma_y}{\partial \Delta G_{DRA}} \right|_\epsilon \frac{d\Delta G_{DRA}}{d \ln \dot{\epsilon}^p} \quad (2.16)$$

definiert. Parallel zu den makroskopischen Größen existieren mesoskopische Geschwindigkeitsempfindlichkeiten, die den Einfluss der Scherrate auf die effektive Schubspannung beschreiben. Die Umrechnung zwischen makro- und mesoskopischen Größen geschieht nach Zaiser & Hähner [19] durch den Taylor-Faktor M .

$$S'_i = MS_i \quad S'_\infty = MS_\infty \quad (2.17)$$

Die Bedeutung der Bezeichnungen *instantan* und *asymptotisch* wird in Abb.2.4 verdeutlicht. Gezeigt sind qualitative Verläufe der plastischen Dehnrade und der effektiven Spannung über der Zeit, wie sie SPRINGER [13] in seinem Experiment gefunden hat. Sie zeigen, dass es bei einem plötzlichen Dehnratenwechsel von einem Wert $\dot{\epsilon}_1^p$ zu einem höheren Wert $\dot{\epsilon}_2^p$ zu einem ebenso plötzlichen (instantanen) Anstieg der Fließspannung kommt, der der Höhe der stets positiven instantanen Dehnratenempfindlichkeit entspricht. Anschließend setzt ein kontinuierlicher Fließspannungsabfall ein. Dabei nähert sich die Fließspannung asymptotisch einem Endwert an. Je nachdem, ob dieser Endwert oberhalb oder unterhalb der anfänglichen Fließspannung liegt, ist die asymptotische Dehnratenempfindlichkeit $\Delta\sigma_\infty$ positiv bzw. negativ.

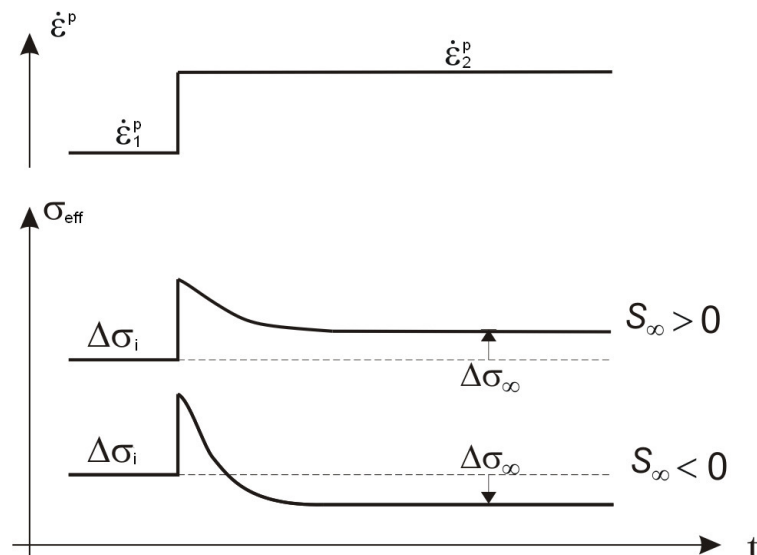


Abb.2.4: Asymptotische Dehnratenempfindlichkeit S_∞ bei Experimenten mit einem plötzlichen Dehnratenwechsel

2.2.8 Wechselwirkung zwischen den Versetzungen

Aus heutiger Sicht ist die dynamische Reckalterung (DSA) eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für die instabile Verformung beim PLC-Effekt. Makroskopische Instabilitäten erfordern eine Synchronisation der Versetzungen. Sie "kommunizieren" miteinander mittels ihrer weitreichenden Spannungsfelder. Diese führen zu einer korrelierten Bewegung und Erzeugung von Versetzungslawinen, sofern die Wechselwirkungsspannung σ_{int} zwischen zwei Versetzungen größer als der lokale, statistisch schwankende Spannungsuntergrund $\sqrt{\langle \sigma_{eff}^2 \rangle}$ ist, der durch alle anderen Versetzungen der Umgebung hervorgerufen wird. Die

Auslösung von stark korreliert gleitenden Versetzungen ergibt sich aus einer steigenden Synchronisation der Versetzungswartezeiten, die sich im Modell als eine Einengung des Wartezeitenspektrums äußert. Dies führt zu einer Dirac-Funktion, die der von McCormick postulierten ähnelt, im Modell von Hähner [20] aber erstmalig physikalisch begründet worden ist. Kobel et al. [21][22][23] führen die PLC-Versetzungslawinen auf Massenkarambolagestrukturen von Versetzungsgruppen innerhalb einer Gleitebene zurück. Hähner [24][25] beschreibt das räumlich-zeitliche korrelierte Verhalten der Versetzungen mit der mechanischen Wechselwirkung während ihrer Bewegungen in mehreren benachbarten Gleitebenen, deren gegenseitiger Abstand der Korrelationslänge $\xi = \frac{\mu b}{4\pi\sqrt{S_\infty}\langle\sigma_{int}\rangle}$ folgt. Die eckigen Klammern beschreiben einen

Durchschnitt über ein sich bewegendes Versetzungsensemble oder - äquivalent - den zeitlichen Mittelwert, den eine typische Gleitversetzung besitzt.

Die für die Synchronisation der Wartezeiten erforderliche Zeit wird Kondensationszeit t_{cond} genannt.

$$t_{cond} = \frac{8\pi\sqrt{S_\infty}\langle\sigma_{int}\rangle}{\mu\langle\dot{\epsilon}^p\rangle} \quad (2.18)$$

Die Dauer des Synchronisierzustands ist die Korrelationszeit t_{corr} mit

$$t_{corr} = \frac{b\rho_m L}{\langle\dot{\epsilon}^p\rangle} \quad (2.19)$$

Hierbei bezeichnet L die freie Weglänge der Versetzungen bis zur Immobilisierung und ρ_m ist die Dichte der mobilen Versetzungen. Die Effizienz der Versetzungsinteraktion wird durch das Verhältnis $A = t_{corr}/t_{cond}$ ausgedrückt.

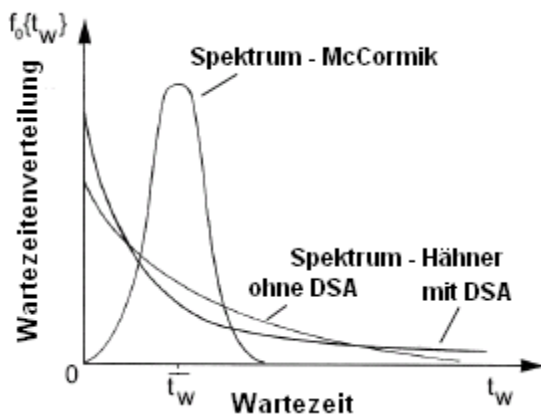


Abb. 2.5: Verschiedene Verteilungen der Wartezeit [24] mit und ohne die dynamische Reckalterung (DSA) sowie die Verteilungsfunktion des McCormick Modells, in dem eine Versetzungswechselwirkung nicht berücksichtigt worden ist.

Ohne Versetzungswechselwirkung ist die entstehende instantane Dehnratenempfindlichkeit S_i positiv und die asymptotische SRS S_∞ fällt nicht unter Null ab. Deshalb ist die DSA allein nicht hinreichend für die instabile Verformung beim PLC-Effekt [26].

In Abb. 2.5 sind verschiedene Verteilungen der Wartezeit dargestellt, die alle ohne Berücksichtigung der Versetzungswechselwirkung erstellt worden sind. Die zeitliche Entwicklung der Wartezeitenverteilung $f_1(t_w, t)$ für mechanisch wechselwirkende Versetzungen ist in Abb. 2.6 schematisch dargestellt. Für schwach korrelierte Versetzungen ($A = t_{\text{corr}} / t_{\text{cond}} \ll 1$) nähert sich die Verteilung dem Fall einzelner Versetzungen an, die durch $f_0(t_w)$ in Abb. 2.5 dargestellt ist. Für $A \approx 1$ konzentriert sich die Verteilung stärker bei der durchschnittlichen Wartezeit \bar{t}_w und die stark korrelierten Versetzungen ($A \gg 1$) zeigen eine immer schmalere Verteilung.

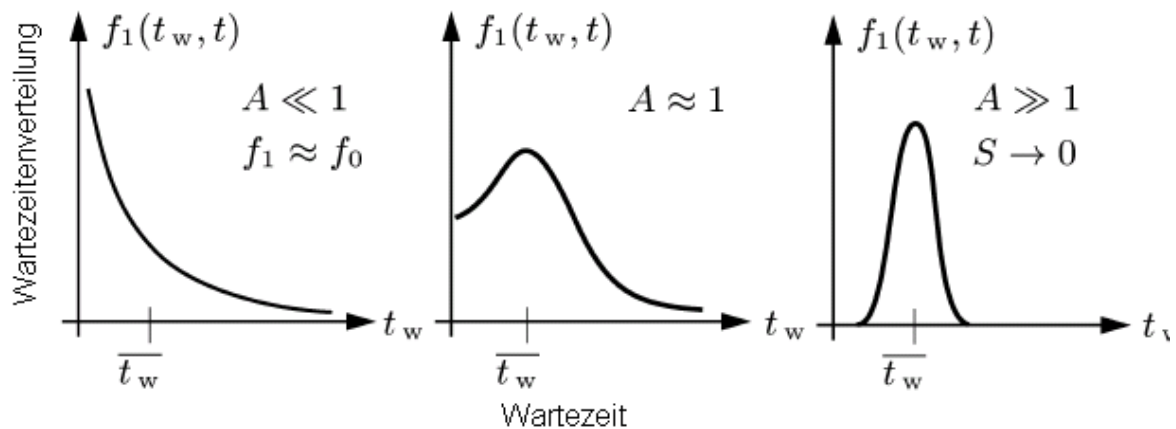


Abb. 2.6: Schematische Darstellung von Wartezeitverteilungen mechanisch wechselwirkender Versetzungen. Der Parameter $A = t_{\text{corr}} / t_{\text{cond}}$ charakterisiert den Grad der Korrelation [8].

Das Zusammenspiel von DSA, Dehnratenempfindlichkeit und Versetzungsinteraktion, das in Abb. 2.7 veranschaulicht wird, entspricht einem selbstorganisierten Rückkopplungsprozess [24]. Die dynamische Reckalterung (DSA) reduziert die Dehnratenempfindlichkeit (SRS). Dies führt zu einer Verringerung der Kondensationszeit, wodurch sich die Korrelation der Versetzungen, d.h. die Synchronisation der Versetzungswartezeit, erhöht (Tendenz zur δ -Verteilung der Versetzungswartezeit). In Folge dessen wird die Wirksamkeit der DSA weiter gesteigert und die SRS folglich vermindert. Innerhalb dieses sich verstärkenden Rückkopplungsmechanismus tendiert die SRS dazu, unter bestimmten Umständen (der Temperatur, Dehnraten, Lösungskonzentration, usw.) zu verschwinden, und sogar negativ zu werden. Bei negativer Dehnratenempfindlichkeit kommt es zu einer Instabilität (Dehnraterweichungsinstabilität), die im Rahmen dieses Modells erstmals mit der zeitlichen Entwicklung der Wartezeitenverteilung $f_1(t_w, t)$ in Zusammenhang gebracht wird.

Die Einbeziehung der Versetzungswechselwirkungen ermöglicht es, eine negative Dehnratenempfindlichkeit SRS zu erreichen. Dies wäre durch den Prozess der dynamischen Reckalterung allein nicht möglich gewesen. Auf Grund der guten Übereinstimmung der Wartezeiten der Versetzungen, die durch weitreichende mechanischen Wechselwirkungen verursacht wird und einem ähnlichen Alterungszustand der Versetzungen entspricht, löst die dynamische Reckalterung eine kollektive Versetzungsbewegung aus. Ohne Reckalterung ist die Versetzungswechselwirkung auf merklich kleinere Bereiche beschränkt.



Abb. 2.7: Das Zusammenspiel von DSA, Dehnratenempfindlichkeit und Versetzungswechselwirkung führt zu einem selbstorganisierten Rückkopplungsprozess [24].

2.3 Experimentelle Untersuchungen zum PLC Effekt

Der Literatur ist eine Fülle von Arbeiten zu entnehmen, in denen die Entstehung und Ausbreitung von PLC-Bändern vorwiegend experimentell untersucht wird.

Bei den Experimenten ist diese Vielfalt auch dadurch bedingt, dass der untersuchte Werkstoff und seine thermo-mechanische Vorbehandlung, die Probengeometrie, die Belastungsbedingungen, die zur PLC-Bandanalyse eingesetzten Verfahren und die ermittelten Bandparameter sehr unterschiedlich sind.

2.3.1 Untersuchte Werkstoffe

In den experimentellen Arbeiten werden vorrangig Al-Legierungen der Typen Al-Mg [27][28][29][30][31][32][33][34][35][36][37][38][39][40][41][42][43][44], Al-Cu [45][46][47][48][49][50][51][52][53][54][55] und Al-Li [56][57][58][59] untersucht. In den meisten Fällen handelt es sich um kommerzielle Legierungen, z.B. um AA 5052, AA 5086, AA 5182, AA 5251 und AA 5754 im System Al-Mg, A 2017 im System Al-Cu sowie A 2090 und A 2091 im System Al-Li. In der Forschergruppe FOR 258 wurde erstmalig eine mit Al_2O_3 -Partikeln verstärkte Legierung betrachtet (AA 5754 [32]). Magnesiumlegierungen spielen in der jüngeren Literatur zum PLC-Effekt nur eine geringe Rolle.

Die Reckalterungsmodelle zur Dehnratenempfindlichkeit wurden experimentell durch Versuche begründet und überprüft [60][61][62]. Diese Experimente haben insofern nur Teilaspekte des PLC-Effektes zum Gegenstand, als sie sich auf die Spannungsinstabilität und die dynamische Reckalterung konzentrieren. Räumliche Korrelationen von PLC-Bändern können mit Einzelextensometern nicht untersucht werden. Neben Einzelextensometern wurden neue Methoden entwickelt, um PLC-Bänder zeitlich und räumlich aufzuzeichnen. Dadurch wurde es möglich, nicht nur aus den charakteristischen Merkmalen der Spannungs-Dehnungs-Kurve sondern auch aus den Ergebnissen mit CCD- und Infrarotkameras durchgeführter flächenhafter Untersuchungen auf das generelle Verhalten von PLC-Bändern zu schließen.

2.3.2 Eingesetzte Untersuchungsverfahren

2.3.2.1 Analyse der Spannungs-Dehnungs-Kurven

Die einfachste Methode zur Untersuchung des PLC-Effektes besteht in der Aufnahme der Spannungs-Dehnungs-Kurve unter Variation der Regelungsart (Weg, Kraft, Dehnung), der Verformungsgeschwindigkeit, der Temperatur, der Probendicke sowie der Korngröße und des Wärmebehandlungszustands des Werkstoffs. Auf Basis der Spannungs-Dehnungs-Kurve werden die wichtigsten elastischen und plastischen Eigenschaften der Probe ermittelt. Anhand der Spannungs-Dehnungs-Kurve lässt sich feststellen, in welchem Bereich der Verformung

die PLC-Bänder aufgetreten, wie stark die lokale Dehnung in den propagierenden Bändern ansteigt und wie groß der Spannungsabfall bzw. die kritische Spannung ist. Die Instabilität der Verformung ist das augenfälligste Merkmal der Spannungs-Dehnungs-Kurve. Allerdings lässt die Spannungs-Dehnungs-Kurve allein noch keine zuverlässige Zuordnung der Bänder zu den PLC-Bandtypen zu.

2.3.2.2 Schallemissionsanalyse (AE)

Um Aussagen über das mikrostrukturelle Verhalten auf Versetzungsebene zu erhalten, ist die Messung der akustischen Emissionen während der Verformung eine geeignete Methode. Hierbei handelt es sich um Schallwellen, die durch die diskontinuierliche Bewegung der Versetzungen im Kristallgitter verursacht werden [63][64][31][65]. Die Bewegung einer einzelnen Versetzung reicht allerdings nicht aus, um eine messbare akustische Emission zu erzeugen. Es kann jedoch die für den PLC-Effekt charakteristische kollektive Versetzungsbewegung beobachtet werden.

Es ist gut bekannt [63], dass vor allem dynamische Versetzungsprozesse Schallemissionen in plastisch deformierenden Metallen verursachen. Drei Hauptprozesse, die gewöhnlich als potentielle Versetzungsmechanismen für die Emission von Schallwellen angesehen werden, sind:

- Die Relaxation von Gitterspannungsfeldern, ausgelöst von vorbeigleitenden Versetzungen
- Die Annihilation von Versetzungen
- Beschleunigung von Versetzungen

Die wichtigste Voraussetzung für das Auftreten nachweisbarer Schallemissionssignale ist jedoch der kollektive Charakter der Versetzungsprozesse. Beispiele hierfür sind intensiv arbeitende Frank-Read-Quellen in der Anfangsphase der plastischen Verformung und Versetzungslawinen, die durch Abreißen von kohärenten Ausscheidungen entstehen.

2.3.2.3 Laserextensometer

Die Laserextensometer wurden erstmalig von einer Gruppe in Braunschweig zur Untersuchung der PLC-Bildung und -Ausbreitung eingesetzt [66][67]. Das Prinzip dieser Methode besteht darin, dass ein Laserstrahl während der Verformung in Längsrichtung über den parallelen Steg einer Zugprobe, die mit einem Liniengitter versehen ist, geführt wird.

Der Messbereich auf der Probe ist 50 mm lang und enthält 20-30 weiße Linien (Breite 1 mm) [67]. Wenn der Laserstrahl die weißen Linien trifft, wird das Laserlicht reflektiert und gelangt, gebündelt durch eine Linse, auf einen Detektor. Ein Scan über die Messlänge von 50 mm dauert ungefähr 5 ms. Das von den weißen Linien reflektierte Licht erscheint als ein Peak des Photospannungs-Zeit-Signals. Im Laufe der Verformung ändert sich der zeitliche Abstand zwischen benachbarten Peaks, woraus der örtliche Linienabstand und damit die lokalen Dehnungen bestimmt werden können. Dadurch kann die Inhomogenität der Verformung in eine Richtung analysiert werden. Die Dehnungsauflösung liegt bei etwa 0,05%. Der hierbei gewählte Gitterabstand (typischerweise 1 mm) ist allerdings recht hoch im Vergleich zur Breite der PLC-Bänder. Auch ist ein solches linear arbeitendes Verfahren nicht geeignet, 2D-Dehnungsfelder und Parameter wie den Bandorientierungswinkel α_B zu messen. Der Prozess der Bandbildung kann nicht analysiert werden, wenn dieser nicht in Zugbelastungsrichtung verläuft.

2.3.2.4 Hochgeschwindigkeitskamera

Für 2-dimensionale Untersuchungen werden Flächensensoren auf CCD-, CMOS- und IR-Basis eingesetzt, wobei die mit diesen Sensoren aufgenommenen Bilder entweder visuell [27], mittels digitaler Speckle-Interferometrie [43][42][47][48][49][50][54][55] oder mit der digitalen Bildkorrelationstechnik [28][33][35][36][4] ausgewertet werden. Die mit den Sensoren realisierte Bildrate entscheidet darüber, in wieweit es möglich ist, schnelle Prozesse wie die Bandbildung oder die Bandausbreitung bei hoher globaler Dehnrates zeitlich aufzulösen. Die Größe des auf den Sensor abgebildeten Messfelds und die Pixelauflösung des Sensors geben die Ortsauflösung vor, mit der geometrische Größen wie z. B. die PLC-Bandbreite gemessen werden können. Flächensensoren auf IR-Basis kommen in Thermokameras zum Einsatz [38][51][52]. In diesem Fall können die PLC-Bänder anhand des lokalen Temperaturanstiegs identifiziert und charakterisiert werden, der durch den Anstieg der plastischen Verformung im Bandbereich $\Delta\varepsilon_b$ verursacht wird (Dissipation von mechanischer Arbeit in Wärme).

In den Arbeiten [51] und [52] wurde z.B. das PLC-Bandverhalten einer Al-Legierung mit 4% Cu auf diese Weise analysiert. Während für die Bandorientierung nur Einzelwerte ermittelt wurden, ist der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Bändern t_{mb} , die Bandgeschwindigkeit c_b und die Dauer der Bandbildung t_f sehr intensiv - bei 4 Dehnrates im Bereich von $2,38 \times 10^{-4}$ und $2,14 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ und als Funktion der globalen Dehnung - untersucht worden. In der Arbeit [38] wurde für die Legierung AA 5086 (4 Gew.-%Mg) bei zwei Dehnrates (nominell $1,2 \times 10^{-4}$ und $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) die Bandgeschwindigkeit und -breite gemessen. In Übereinstimmung mit entsprechenden eigenen Ergebnissen kommen alle drei Arbeiten zur Feststellung, dass Typ-A-Bänder stets einzeln auftreten, anfänglich eine Vorzugsausbreitungsrichtung aufweisen, ihre Bandgeschwindigkeit mit zunehmender globaler Dehnung abnimmt und mit zunehmender globaler Dehnrates anwächst.

Beim Einsatz von Thermokameras ist die Höhe der Bildrate besonders wichtig, weil sich die Temperaturverteilung nicht nur durch den fortschreitenden Verformungsprozess sondern auch durch Wärmeleitung schnell verändert. Die Bildrate ist darüber hinaus ein limitierender Faktor, wenn es um die Analyse schneller Prozesse wie die Bandbildung geht. Die Autoren der Veröffentlichung [51] und [52] haben eine Thermokamera mit einer maximalen Vollbildrate von 60 Hz eingesetzt. Bei der Arbeit [38] lag die maximale Vollbildrate bereits bei 145 Hz. Diese Bildrate liegt jedoch deutlich unter dem Wert der Thermokamera, die in vorliegenden Arbeit verwendet wurde (885 Hz). Mit einer so hohen Frequenz ist es möglich, das dynamische Verhalten der Bänder besser zu analysieren. Auch ist es schwierig, aus den mittels Thermokamera gemessenen Temperaturfeldern und deren zeitlicher Veränderung bandspezifische Größen wie das Inkrement der plastischen Dehnung $\Delta\varepsilon^p$ oder die Dehnrates im Band zu erhalten. In diesem Zusammenhang ist es problematisch, wenn das Dehnungsinkrement $\Delta\varepsilon^p$ in der Arbeit [51] auf Basis der gemessenen lokalen Temperaturänderung ΔT , der Spannung σ und unter Annahme adiabatischen Verhaltens mit der Gleichung

$$\Delta\varepsilon^p = \frac{\rho c_p}{\beta \sigma} \Delta T$$

berechnet wird, weil ΔT bei geringer Frequenz nur ungenau gemessen wird und adiabatische Bedingungen nur bei hoher Dehnrates vorausgesetzt werden können. In dieser Gleichung sind ρ die Dichte, β der Taylor-Quinney-Koeffizient und c_p die spezifische Wärme.

Vorteilhafter wäre eine unabhängige Messung des Dehnungsfelds. Dies ist deshalb anzustreben, weil die Auswertung der von den Thermokameras ermittelten Temperaturveränderungen bei kleiner werdender globaler Dehnrates zunehmend schwieriger wird (das Verhältnis von Wärmefreisetzungsrates und Wärmeabfluss wird immer ungünstiger). Für Untersuchungen, die

einen großen Bereich der globalen Dehnraten abdecken sollen, ist es deshalb nicht sinnvoll, allein auf Thermokameras bzw. die Auswertung der Temperaturfelder zu setzen.

Die digitale Bildkorrelation und die Speckle-Interferometrie liefern Verschiebungs-, Dehnungs- und Dehnratenfelder. In diesen können PLC-Bänder identifiziert und Bandparameter ermittelt werden. In den Arbeiten, in denen diese Methoden zum Einsatz gekommen sind, wurden Bildraten im Bereich von einigen Hz bis zu 5 kHz realisiert, wobei der Höchstwert mit einer Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kamera erzielt wurde [4]. Berücksichtigt man ferner, dass diese Kameras sowohl höhere Bildraten als auch höhere Pixelauflösungen als Thermokameras erreichen, erscheinen sie als besonders geeignet, für eine örtlich und zeitlich hochauflösende Analyse des Bandbildungs- und Ausbreitungsprozesses eingesetzt zu werden.

2.4 Modelle zum PLC-Effekt

Teilaspekte des PLC-Effektes, wie z.B. die negative Dehnratenempfindlichkeit und eine Verformungsabhängigkeit der dynamischen Reckalterung können mit Reckalterungsmodellen [68][69][70][71] erklärt werden. Das inhomogene Verformungsverhalten, etwa die Ausbreitung von PLC-Bändern, wird in Gradientenmodellen berücksichtigt, die eine diffusionsartige Ausbreitung plastischer Wellen beschreiben [72][73]. In weiteren Arbeiten wurde versucht, diesen zunächst phänomenologischen Ansatz physikalisch zu begründen [74][75][76]. In neueren Modellen werden Ergebnisse aus der Theorie nichtlinearer dynamischer Systeme berücksichtigt [18][19][77] und der Nachweis erbracht, dass sich dynamische Reckalterung und hochkorrelierte Versetzungsdynamik im Bereich des PLC-Effektes gegenseitig bedingen [24][25]. Damit ist es gelungen, die Selbstorganisationsphänomene beim PLC-Effekt von der Mikroskala auf die Makroskala zu übertragen.

2.4.1 Das Model von Estrin und McCormick

Im Modell von Estrin und McCormick wird davon ausgegangen, dass die Fließspannung σ_y durch die folgende Gleichung ausgedrückt werden kann:

$$\sigma_y = \sigma_i + S_i \cdot \left\{ \ln \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} + P_1 C_s \right\} \quad (2.20)$$

Die in diese Gleichung eingehende innere Spannung σ_i repräsentiert den Verfestigungseffekt, der mit der verformungsbedingten Entwicklung der Versetzungsdichte verbunden ist und als Funktion der plastischen Dehnung $\Delta \epsilon^p$ durch

$$\sigma_i = d_1 + d_2 \left[1 - \exp \left(- \frac{\epsilon^p}{d_3} \right) \right] \quad (2.21)$$

beschrieben wird. Die eingehenden Größen d_1 , d_2 und d_3 sind Materialkonstanten. $\dot{\epsilon}_0$ ist ein präexponentieller Faktor.

Der zweite Term in Gleichung (2.20) ist ein Produkt aus der instantanen Dehnratenempfindlichkeit S_i und dem in Gleichung (2.20) in geschweifte Klammern gesetzten Term. Im Allgemeinen ist die Dehnratenempfindlichkeit spannungs- und damit auch dehnungsabhängig [60]. In der unten beschriebenen Simulation wurde S_i als Funktion der plastischen Dehnung ϵ^p in der Form

$$S_i = s_1 + s_2 (\epsilon^p)^{1/2} \quad (2.22)$$

angenommen. Die Größen s_1 und s_2 sind wiederum Materialkonstanten.

Der in geschweifte Klammern gesetzte Term in Gleichung (2.20) besteht aus zwei Summanden. In den ersten Summanden geht die Rate der plastischen Vergleichsdehnung $\dot{\epsilon}^p$ ein, die durch

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(\frac{\sigma_{eff}}{S_i} - P_1 C_s\right) \quad (2.23)$$

beschrieben wird. Die in Gleichung (2.23) vorkommende effektive Spannung σ_{eff} , die verankerte mobile Versetzungen dazu bringt, Hindernisse wie Waldversetzungen und Ausscheidungen zu überwinden, errechnet sich aus der Fließspannung σ_y , indem die innere Spannung σ_i abgezogen wird.

$$\sigma_{eff} = \sigma_y - \sigma_i \quad (2.24)$$

Der im zweiten Summanden vorkommende Faktor P_1 wurde in der Form

$$P_1 = \frac{1}{kT} \frac{\partial G}{\partial C_s} \quad (2.25)$$

angesetzt. Hierbei ist G die Aktivierungsenthalpie für die Versetzungsbewegung.

Die Konzentration der an den Versetzungen arretierten Fremdatome C_s , die in der Gleichung (2.20) auftritt, wird im Modell von Estrin und McCormick auf die folgende Weise als Funktion der Alterungszeit t_a beschrieben [60]:

$$C_s = C_m \left\{ 1 - \exp\left[-C_0 (K D t_a)^n / C_m\right] \right\} \quad (2.26)$$

In Gleichung (2.26) sind C_m der Sättigungswert von C_s , C_0 die Konzentration der Fremdatome in der Legierung und D der Diffusionskoeffizient der Fremdatome. K ist eine Konstante.

Wenn angenommen wird, dass die Pipediffusion den Diffusionsprozess der Fremdatome dominiert, sollte n auf $1/3$ gesetzt werden. Da die Diffusion ein thermisch aktivierter Prozess ist, gilt

$$D = C_v D_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right), \quad C_v = K_1 (\epsilon^p)^m \quad (2.27)$$

In Gleichung (2.27) ist berücksichtigt, dass der Diffusionskoeffizient bei ansteigender Leerstellenanzahl C_v zunimmt und die Leerstellenzahl mit der plastischen Dehnung anwächst. Der dehnungsinduzierte Anstieg der Leerstellenzahl wird durch ein Potenzgesetz mit dem Vorfaktor K_1 und dem Exponenten m beschrieben. D_0 ist der Diffusionsfrequenzfaktor, $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ die Boltzmann-Konstante und T die absolute Temperatur.

Um die Gleichung (2.26) für die Konzentration der an den Versetzungen arretierten Fremdatome C_s zu vereinfachen, wird der temperaturabhängige Parameter P_2

$$P_2 = \frac{C_0}{C_m} \left[K K_1 D_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \right]^n \quad (2.28)$$

eingeführt. Mit $\alpha = mn$ und Gleichung (2.28) geht Gleichung (2.26) über in

$$C_s = \left\{ 1 - \exp\left[-P_2 (\epsilon^p)^\alpha (t_a^n)\right] \right\} C_m \quad (2.29)$$

Von der Alterungszeit t_a wird angenommen, dass sie zur mittleren Wartezeit der Versetzungen t_w relaxiert. Dieser Relaxationsprozess wird durch die folgende Differentialgleichung für t_a

$$\frac{dt_a}{dt} = 1 - \frac{t_a}{t_w} \quad (2.30)$$

beschrieben.

Die Wartezeit t_w wird wiederum über die Gleichung

$$t_w = \Omega / \dot{\epsilon}^p \quad (2.31)$$

mit der Rate der plastischen Vergleichsdehnung verknüpft.

Die in Gleichung (2.31) eingehende Elementardehnung Ω entspricht dem Dehnungszinkrement, das erzeugt wird, wenn alle arretierten Versetzungen ihre lokalen Hindernisse überwinden und sich zur nächsten Verankerung bewegen. Die Dehnungsabhängigkeit von Ω kann unter Verwendung des in der Arbeit [78] vorgeschlagenen Versetzungsmodells gemäß der Gleichung

$$\Omega = \omega_1 + \omega_2 (\epsilon^p)^\beta \quad (2.32)$$

angesetzt werden. Hierbei sind ω_1 , ω_2 und β Materialkonstanten.

2.4.2 Das PLC-Model von Hähner

Das Modell von Hähner zeichnet sich dadurch aus, dass es eine direkte Verbindung zwischen der DSA-Kinetik und den Versetzungswechselwirkungen herstellt. Es ähnelt dem Modell von McCormick darin, wie das plastische Fließen mit dem thermisch aktivierten Versetzungsgleiten in Verbindung gebracht wird. Dieser Zusammenhang wird durch die folgende konstitutive Fließregel vom Arrhenius-Typ für die plastische Dehnrates $\dot{\epsilon}^p$ ausgedrückt,

$$\dot{\epsilon}^p = \nu_0 \Omega \exp\left(-\frac{G_0 + \Delta G}{kT} + \frac{\sigma_y - \sigma_i}{S_i}\right) \quad (2.33)$$

In dieser Gleichung sind ν_0 die Anlauffrequenz der thermischen Aktivierung und Ω die Elementardehnung, die dann realisiert wird, wenn alle mobilen Versetzungen einmal aktiviert werden. Die Gibbs'sche Aktivierungsenthalpie $G = G_0 + \Delta G$ definiert die Energie, die aufzubringen ist, um die Hindernisse zu überwinden. Hierbei ist G_0 die statische Aktivierungsenthalpie, die ohne dynamische Reckalterung erforderlich ist, und ΔG die zusätzliche, durch die dynamischen Reckalterung bedingte Reckalterungsenthalpie. Letztere stellt eine interne dynamische Variable des Modells dar.

In Gleichung (2.33) hängt die plastische Dehnrates exponentiell von der effektiven Spannung ($\sigma_{eff} = \sigma_y - \sigma_i$) ab. Das ist die Spannung, die lokal zum Antrieb der Versetzungen zur Verfügung steht, wobei S_i die bereits in Abschnitt 2.2.7 eingeführte, instantane Dehnratesempfindlichkeit der Fließspannung

$$S_i = \left. \frac{\partial \sigma_y}{\partial \ln \dot{\epsilon}^p} \right|_{\epsilon, \Delta G} \quad (2.34)$$

darstellt. Für die interne dynamische Variable ΔG wird die Evolutionsregel

$$(\Delta G)_{,t} = \underbrace{\eta(\Delta G_{\infty} - \Delta G)}_{\text{ageing (disloc. pinning)}} - \underbrace{\frac{\dot{\epsilon}^p}{\Omega} \Delta G}_{\text{disloc. unpinning}} = \frac{(\Delta G_{\infty} - \Delta G)}{\eta^{-1}} - \frac{\Delta G}{\frac{\Omega}{\dot{\epsilon}^p}} = \frac{(\Delta G_{\infty} - \Delta G)}{\eta^{-1}} - \frac{\Delta G}{t_w} \quad (2.35)$$

angenommen.

Die zwei Terme auf der rechten Seite beschreiben die Mechanismen der dynamischen Reckalterung DSA. Der erste Term steht für den Alterungsprozess (Versetzungsverankerung), der abläuft, wenn die Versetzungen an lokalisierten Hindernissen arretiert sind und die Fremdatome in die oder zur Umgebung der Versetzungskerne diffundieren. Da $\Delta G \leq \Delta G_{\infty}$ gilt, führt dieser Term zu einer Erhöhung der Reckalterungsenthalpie. Allerdings verringert sich der Anstieg ständig, da sich der Wert von ΔG dem Sättigungswert ΔG_{∞} im Verlauf der Zeit annähert. Der Kehrwert der Alterungsrate η^{-1} ist die charakteristische Zeit des Alterungsprozesses.

Für den Fall der statischen Alterung ($\dot{\epsilon}^p = 0$) liefert die Integration von Gleichung (2.35) die Reckalterungsenthalpie als Funktion der Zeit (Alterungszeit)

$$\Delta G = \Delta G_{\infty} (1 - \exp[-\eta t]) \quad (2.36)$$

Dieser Gleichung zufolge nähert sich die Reckalterungsenthalpie ΔG nach langer Alterungszeit ($t \gg \eta^{-1}$) dem Maximumwert ΔG_{∞} an (Sättigung der Fremdatome im Versetzungskern). Für kurze Alterungszeiten ($t \ll \eta^{-1}$) wächst die Reckalterungsenthalpie linear mit der Zeit gemäß der Gleichung $\Delta G \approx \Delta G_{\infty} \eta t$.

Der zweite Term in Gleichung (2.35) beschreibt die Änderung der Reckalterungsenthalpie, die eintritt, wenn sich die Versetzungen von den Hindernissen losreißen. Da die Reckalterungsenthalpie zu diesem Zeitpunkt von dem aktuellen (stets positiven) Wert ΔG auf Null abfällt und dieser Prozess in einem zeitlichen Abstand stattfindet, der etwa der mittleren Wartezeit der Versetzungen an Hindernissen t_w entspricht, wird die Rate dieses Prozesses mit $\Delta G / t_w$ beschrieben. Die Zeit t_w ist eine charakteristische Zeit dieses Prozesses, die über die Beziehung $t_w = \Omega / \dot{\epsilon}^p$ mit der Rate der plastischen Vergleichsdehnung verknüpft ist.

Die zwei Zeitskalen η^{-1} und t_w beherrschen die Konkurrenz zwischen dem Versetzungsverankerungsprozess und dem Prozess des Loslösen der Versetzungen und damit die Kinetik der dynamischen Reckalterung.

Für den Spezialfall $\Delta G_{,t} = 0$ ist die Differentialgleichung (2.35) analytisch lösbar und man erhält den folgenden stationären Wert $\Delta G = \Delta G_s$ der Reckalterungsenthalpie:

$$\Delta G_s = \frac{\Delta G_{\infty}}{1 + \frac{\dot{\epsilon}^p}{\eta \Omega}} \quad (2.37)$$

Andererseits liefert die Auflösung der Arrheniusgleichung (2.33) nach der Fließspannung σ_y :

$$\sigma_y(\epsilon^p, \dot{\epsilon}^p, \Delta G) = \sigma_i(\epsilon^p) + S_i \frac{G_0}{kT} + S_i \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\nu_0 \Omega} \right) + S_i \frac{\Delta G}{kT} \quad (2.38)$$

Aus den zwei Gleichungen (2.37) und (2.38) ergibt sich die folgende Gleichung für die asymptotische Dehnratenempfindlichkeit S_{∞} (auch stationäre Dehnratenempfindlichkeit genannt):

$$\begin{aligned}
S_\infty &= \left. \frac{\partial \sigma_y}{\partial \ln \dot{\epsilon}^p} \right|_\epsilon = \left. \frac{\partial \sigma_y}{\partial \ln \dot{\epsilon}^p} \right|_{\epsilon, \Delta G} + \left. \frac{\partial \sigma_y}{\partial \Delta G} \right|_\epsilon \frac{d\Delta G}{d \ln \dot{\epsilon}^p} \\
&= S_i \left(1 + \frac{1}{kT} \frac{d\Delta G}{d \ln \dot{\epsilon}^p} \right) = S_i \left(1 - \frac{G_\infty}{kT} \frac{\dot{\epsilon}^p / (\eta\Omega)}{(1 + \dot{\epsilon}^p / (\eta\Omega))^2} \right)
\end{aligned} \tag{2.39}$$

Anhand von Gleichung (2.39) lässt sich die Reaktion des Materials erklären, die zu beobachten ist, wenn die mit der DSA verknüpften inneren Freiheitsgrade zu einem neuen stabilen Zustand übergehen. S_∞ beschreibt die Wirkung der DSA unter stationären Verformungsbedingungen. Die plastische Instabilität ist dann begleitet von einem negativen Wert von S_∞ (Dehnrateerweichungsinstabilität). Der Instabilitätsbereich wird durch das Verhältnis der zwei charakteristischen Zeitskalen

$$\eta^{-1} / (\Omega / \dot{\epsilon}^p) = \dot{\epsilon}^p / \eta\Omega \tag{2.40}$$

und den Sättigungswert der normierten Reckalterungsenthalpie

$$g_\infty = \Delta G_\infty / kT$$

beschrieben. Für $\dot{\epsilon}^p / \eta\Omega \approx 1$ und $g_\infty > 4$ führt eine lineare Analyse der Stabilität gegenüber geringen Änderung δg und δf von g bzw. f ein Instabilitätsgebiet, das innerhalb des folgenden Intervalls liegt:

$$\frac{g_\infty - 2 - \theta - \sqrt{(g_\infty - \theta)^2 - 4g_\infty}}{2} < \frac{\dot{\epsilon}^p}{\eta\Omega} < \frac{g_\infty - 2 - \theta + \sqrt{(g_\infty - \theta)^2 - 4g_\infty}}{2} \tag{2.41}$$

Der Dehnungsverfestigungskoeffizient h , der in die Berechnung von θ eingeht, ist als

$$h = \left. \frac{\partial \sigma_y}{\partial \epsilon^p} \right|_{\epsilon^p, \Delta G}$$

definiert. Die Ergebnisse der linearen Stabilitätsanalyse werden in Abb. 2.8 gezeigt.

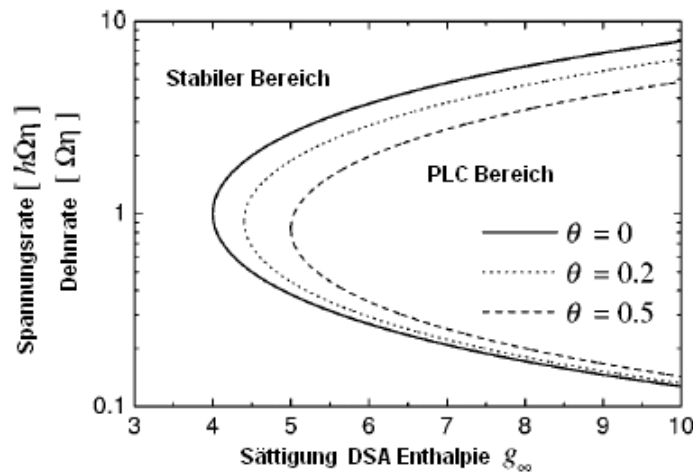


Abb. 2.8 Halblogarithmische Darstellung des durch Gleichung (2.41) definierten, instabilen Bereichs (PLC Bereich) als Funktion der normierten Sättigungsenthalpie $g_\infty = \Delta G_\infty / kT$ für verschiedene Werte des normierten Dehnungsverfestigungskoeffizienten θ

Bei Einführung der Abkürzungen $f_0 \equiv v_0/\eta \exp(-G_0/kT)$ und $f \equiv f_0 \exp(\sigma_{eff}/S_0)$ nimmt die plastische Fließregel (2.33) folgende Form an:

$$\dot{\epsilon}^p = \eta \Omega \exp\left(-\frac{\Delta G}{kT}\right) f \quad (2.42)$$

Wird f nach der Zeit abgeleitet und angenommen, dass die innere Spannung σ_i nur von der verformungsbedingten Verfestigung bestimmt ist, erhält man:

$$f_{,t} = \left(\frac{\sigma_{y,t}}{S_0}\right) f = \left(\frac{\sigma_{y,t}}{S_0} - \frac{h \dot{\epsilon}^p}{S_0}\right) f \quad (2.43)$$

Wenn die plastische Dehnungsrate in den Gleichungen (2.35) und (2.43) gemäß Gleichung (2.42) ersetzt und zusätzlich die diffusionsartige räumliche Kopplung in Gleichung (2.35) berücksichtigt wird, erhält man nach Einführung der dimensionslosen Variablen $g = \Delta G / kT$, $\tau = \eta t$, $\sigma_{,\tau} = \sigma_{y,t} / \eta S_0$ die folgende konstitutive Gleichung für die Reckalterungsenthalpie ΔG :

$$(\Delta G)_{,t} = D_g \Delta G_{,xx} + \eta (\Delta G_\infty - \Delta G) - \eta f \exp\left(-\frac{\Delta G}{kT}\right) \Delta G \quad (2.44)$$

Die weitreichende Versetzungswechselwirkung, die zu einer räumlichen Kopplung führt, ist in dieser Gleichung dadurch berücksichtigt, dass der Pseudodiffusionskoeffizient D_g eingeführt wurde, wobei $\tilde{x} = \sqrt{\eta/D_g} x$ die dimensionslose räumliche Koordinate ist.

$$\begin{cases} f_{,\tau} = \sigma_{,\tau} f - \theta \exp(-g) f^2 \\ g_{,\tau} = g'' + g_\infty - g - f \exp(-g) g \end{cases} \quad (2.45)$$

Die obengenannten Gleichungen sind ausreichend zur Beschreibung eines spannungsgeregelten Zugversuchs (Spannungsrate $\sigma_{y,t} = \text{const}$). Im Fall einer Wegregelung müssen die konstitutiven Gleichungen um die Maschinengleichung ergänzt werden, in die die Vorschubgeschwindigkeit v , der effektive E-Modul E_{eff} und Probenlänge l eingehen.

$$\frac{\sigma_{y,t}}{E_{eff}} = \frac{v}{l} - \frac{1}{l} \int_0^l \dot{\epsilon}^p dx \quad (2.46)$$

Um die Kinematikmerkmale einzelner plastischer Wellen (PLC-Bänder von Typ A) abzuschätzen, können die zwei folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen werden:

(a) Die gesamte aufgebrachte Dehnrate v/l der Probe wird praktisch vollständig als plastische Dehnung des Bands $\Delta \epsilon_b$ umgesetzt. Dann verbinden die Beziehungen $v = \Delta \epsilon_b c_b$ und $v = \epsilon_{b,t} w_b$ die aufgebrachte Vorschubgeschwindigkeit v mit der Bandausbreitungsgeschwindigkeit c_b , der lokalen plastischen Dehnrate $\epsilon_{b,t}$ und der Bänderbreite w_b . Dies bedeutet, dass von den drei Bändermerkmalen c_b , w_b und $\Delta \epsilon_b$ nur zwei voneinander unabhängig sind;

(b) Der dimensionslose Spannungsrateterm $\sigma_{,\tau}$ in Gleichung (2.45) nimmt nur während der quasielastischen Verformung vor der Entstehung eines neuen Bands einen beträchtlichen Wert an, kann aber während der Ausbreitung eines vollständig entwickelten Bands vernachlässigt werden. Da die einzelnen Wellenlösungen den Gleichungen $\dot{f} = -cf'$ und $\dot{g} = -cg'$ mit der dimensionslosen Bandgeschwindigkeit $c = c_b / \sqrt{\eta D_g}$ genügen, kann aus Gleichung (2.45) für den einschränkenden Fall ($\theta \ll 1$) ein Satz von Bandparametern abgeleitet werden.

Diese Herleitung wurde erstmalig in [79] und [20] vorgestellt und führte zu folgenden Schätzwerten für die Bandparameter, die in Abb. 2.9 definiert sind:

$$c_b = \left(\frac{D}{\eta} \right)^{1/4} \frac{\sqrt{(1+g_{\min})/2}}{g_{\max} - g_{\min}} \sqrt{\theta} \frac{v}{\Omega \sqrt{w_b}}$$

$$w_b = 2 \sqrt{\frac{D}{\eta}} + \frac{g_{\min}}{g_{\infty} - g_{\min}} \frac{v}{\eta \Omega}$$

$$\Delta \varepsilon_b = \frac{v}{c_b} = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{\sqrt{(1+g_{\min})/2}} \frac{\Omega}{(D/\eta)^{1/4}} \frac{\sqrt{w_b}}{\sqrt{\theta}}$$

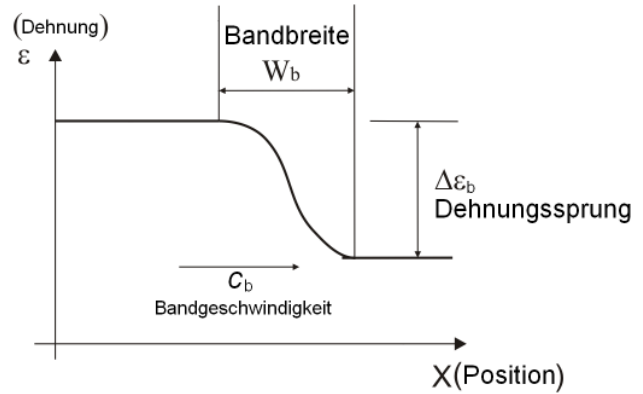


Abb. 2.9: Definition von Bandparametern

2.4.3 Modellvergleich für Simulation

Zusammenfassend sind die auf dynamischer Dehnungsalterung basierenden konstitutiven Gleichungen, die gegenwärtig aktuell sind (Estrin und Hähner), in Tab. 2.2 aufgelistet. Diese Gleichungen werden dann auch bei der Simulation im Abschnitt 3.2 verwendet.

	Estrin-McCormick-Modell	Hähner-Modell
Rate der plastischen Vergleichsdehnung	$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\varepsilon}_0 \exp\left(\frac{\sigma_{eff}}{S_i} - P_1 C_s\right)$	$\dot{\varepsilon}^p = v_0 \Omega \exp\left(\frac{\sigma_{eff}}{S_i} - \frac{G_0 + \Delta G}{kT}\right)$
Zustandsvariable zur Beschreibung der DSA	$\frac{dt_a}{dt} = 1 - \frac{t_a}{t_w}$	$(\Delta G)_{,t} = \underbrace{D_g \Delta G_{,xx}}_{\text{spatial coupling}} +$ $\underbrace{\eta(\Delta G_{\infty} - \Delta G)}_{\text{ageing (disloc. pinning)}} - \underbrace{\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\Omega} \Delta G}_{\text{disloc. unpinning}}$
	$t_w = \Omega / \dot{\varepsilon}^p$	
	$C_s = \left\{ 1 - \exp\left[-P_2 (\varepsilon^p)^\alpha (t_a^n)\right] \right\} C_m$	

Tab. 2.2 Gegenüberstellung der für die makroskopische Simulation verwendeten konstitutiven Gleichungen der Modelle von Estrin-McCormick und Hähner

Gemeinsames Merkmal beider Modelle ist, dass die Versetzungsbewegung als ein thermisch aktivierter Prozess beschrieben wird, der dem ARRHENINUS-Ansatz folgt. Unterschiedlich ist die Zustandsvariable, die zur Beschreibung der dynamischen Reckalterung ausgewählt worden ist. Im Modell von Estrin und McCormick wird angenommen, dass die Entwicklung der Fremdatomkonzentrationen auf mikroskopischer Skala den PLC-Effekt beherrscht, während Hähner explizit die Kinetik der dynamischen Reckalterung bei der Evolution der Zustandsvariablen seines Modells sowie die räumliche Kopplung berücksichtigt, die zu einer kollektiven Versetzungsbewegung führt [79].

2.5 Fazit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es bereits eine Vielzahl experimenteller Ergebnisse zum PLC-Effekt gibt. Auch liegen zwei Modelle vor, mit denen die Entstehung und Ausbreitung der PLC-Bänder im Prinzip beschrieben werden können. Die Literatur ist aber bisher nicht zu entnehmen, dass es gelungen sei, experimentelle Ergebnisse sowohl zu Morphologie und als auch zur Kinematik der PLC-Bänder durch Modellrechnungen zu simulieren. In diesem Zusammenhang ist ungeklärt, ob die fehlende Kenntnis der jeweils zutreffenden Materialparameter die Ursache hierfür ist oder die Qualität der Modelle. In diese Hinsicht besteht noch Handlungsbedarf. Die vorliegende Arbeit will zur Klärung der noch offenen Fragen beitragen.

3 Methodenentwicklung

In diesem Kapitel werden experimentelle und Simulationsmethoden beschrieben, die zur Untersuchung der Bildung und Ausbreitung von Verformungsbändern eingesetzt werden. Diese Untersuchungen sollen zu einem vertieften Verständnis der dem PLC-Effekt zugrunde liegenden Prozesse beitragen und eine Vorhersage des Bandverhaltens durch Simulationsrechnungen ermöglichen. Eine Grundvoraussetzung für einen Erkenntnisfortschritt auf diesem Gebiet sind fortgeschrittene Mess- und Simulationsmethoden. In diesem Kapitel werden die Methoden beschrieben, die in diese Arbeit entwickelt und eingesetzt worden sind.

3.1 Experiment

Experimentell werden Scher-, PLC- und Lüders-Bänder untersucht. Zur kompletten Beschreibung solcher Bänder sind sowohl zeitliche als auch räumliche Messungen erforderlich. Die zeitlichen Messungen liefern Parameter der Spannungs-Dehnungs-Kurven und der Kinematik der PLC-Bänder. Durch räumliche Messungen erhält man Informationen über die Morphologie der Bänder.

3.1.1 Werkstoffe, Probepreparation und Versuchsaufbau

Der Gegenstand der Untersuchung des PLC-Effekts war die Legierung AlMg3 (AA5754), die neben Aluminium 3,11 % Mg, 0,26 % Si, 0,22 % Fe und 0,18 % Mn (jeweils in Gew-%) enthält. Das Material wurde in Form kaltgewalzter Aluminiumbleche einer Dicke von ca. 1,5 mm angeliefert.

Aus diesen Werkstoffen wurden Zugproben gefertigt, die standardmäßig die in Abb. 3.1 angegebenen Abmessungen aufwiesen. Daneben wurden Zugproben hergestellt und untersucht, bei denen durch das Einbringen von Bohrungen und Kerben und die Variation von Krümmungsradien gezielte Änderungen gegenüber der symmetrischen Standardgeometrie vorgenommen wurden (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Die Zugproben wurden in den meisten Fällen an einer Probenoberfläche geschliffen und poliert. Danach folgte stets eine 2-stündige Lösungsglühbehandlung bei 400°C, die mit einem Abschrecken in Wasser abschloss.

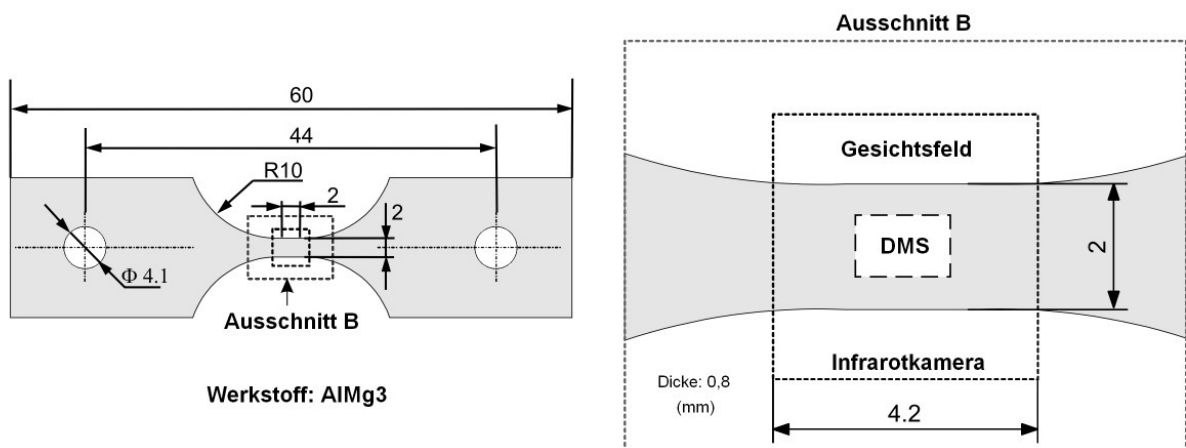


Abb. 3.1: Geometrie der Standardproben und Gesichtsfeld der Infrarotkamera

Die bei allen Verformungsanalysen verwendete und am LQW entwickelte Zugverformungseinrichtung ist in Abb. 3.2 dargestellt. Die Zugprobe ist in zwei Gabeln eingehängt und mit diesen verstiftet. Die Zugversuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. In den meisten Fällen war ein Dehnungsmessstreifen (DMS) auf die Probenrückseite aufgebracht, um die Dehnung des parallelen Teils des Probenstegs zu messen. Das Kraft- und Weg- sowie das Dehnungssignal werden digital aufgezeichnet. Die maximale Verfahrlänge beträgt 10 mm und die maximale Vorschubgeschwindigkeit kann durch den Einsatz verschiedener Elektromotoren und über die Motorspeisespannung verändert werden. Die Dehnrates lässt sich dadurch über mehr als zwei Größenordnungen variieren.

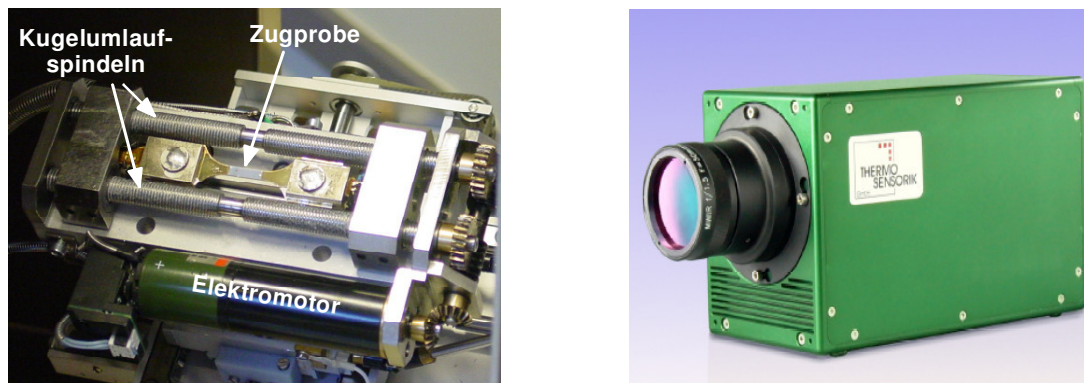


Abb. 3.2: Die für die Verformungsmessungen und thermographischen Analysen eingesetzte Zugverformungseinrichtung (links) und Thermokamera (rechts)

Für die thermische Analyse der Bänder wurde eine neu entwickelte, schnelle und temperatur-empfindliche Thermokamera verwendet. Die Thermokamera, die maximal 885 Bilder/s einer Größe von 256×256 Pixel aufzeichnen kann und eine Temperaturempfindlichkeit von 12 mK (Schwarzkörper) aufweist, wurde in Kombination mit einem Makroobjektiv bei 2,5-facher Vergrößerung eingesetzt. Die Thermokamera arbeitet im mittleren infraroten Spektralbereich (3.4-5.1µm) unter Verwendung eines Cadmium-Mercury-Telluride- (CMT) Flächendetektors. Das Analyseverfahren beruht auf dem Nachweis der Temperaturverteilung, die sich infolge der PLC-Bandausbreitung an der Probenoberfläche ausbildet.

3.1.2 Festlegung der Probengeometrie

Die in Abb. 3.1 dargestellte symmetrische Standardprobe wurde bereits von Ognjenovic [3] für die Untersuchung des PLC-Effekts verwendet. In der vorliegenden Arbeit wurden neben diesen Standardproben auch Proben mit veränderter Geometrie untersucht (vgl. Abb. 3.3). Dies war verbunden mit einer Variation des Analysebereichs auf der Probe. Neben dem Probensteg in der Mitte der Probe wurde auch der Übergang vom Steg zum Probenkopf beobachtet.

Die Proben wurden mit einer zentralen Bohrung (Abb. 3.3a), einem halbkreisförmigen Kerb (Abb. 3.3b) und zwei halbkreisförmigen Kerben (Abb. 3.3c) versehen, um starke Scherbänder hervorzurufen und um deren Wechselwirkung mit PLC-Bändern untersuchen zu können. Darüber hinaus wurden der Radius am Übergang vom Probensteg zum Probenkopf gegenüber dem Standardradius verändert (Abb. 3.3d-f). Diese Veränderungen wurden vorgenommen, um unterschiedlich starke Spannungsgradient einzustellen und damit den Einfluss der Spannungsgradient auf den PLC-Effekt erforschen zu können.

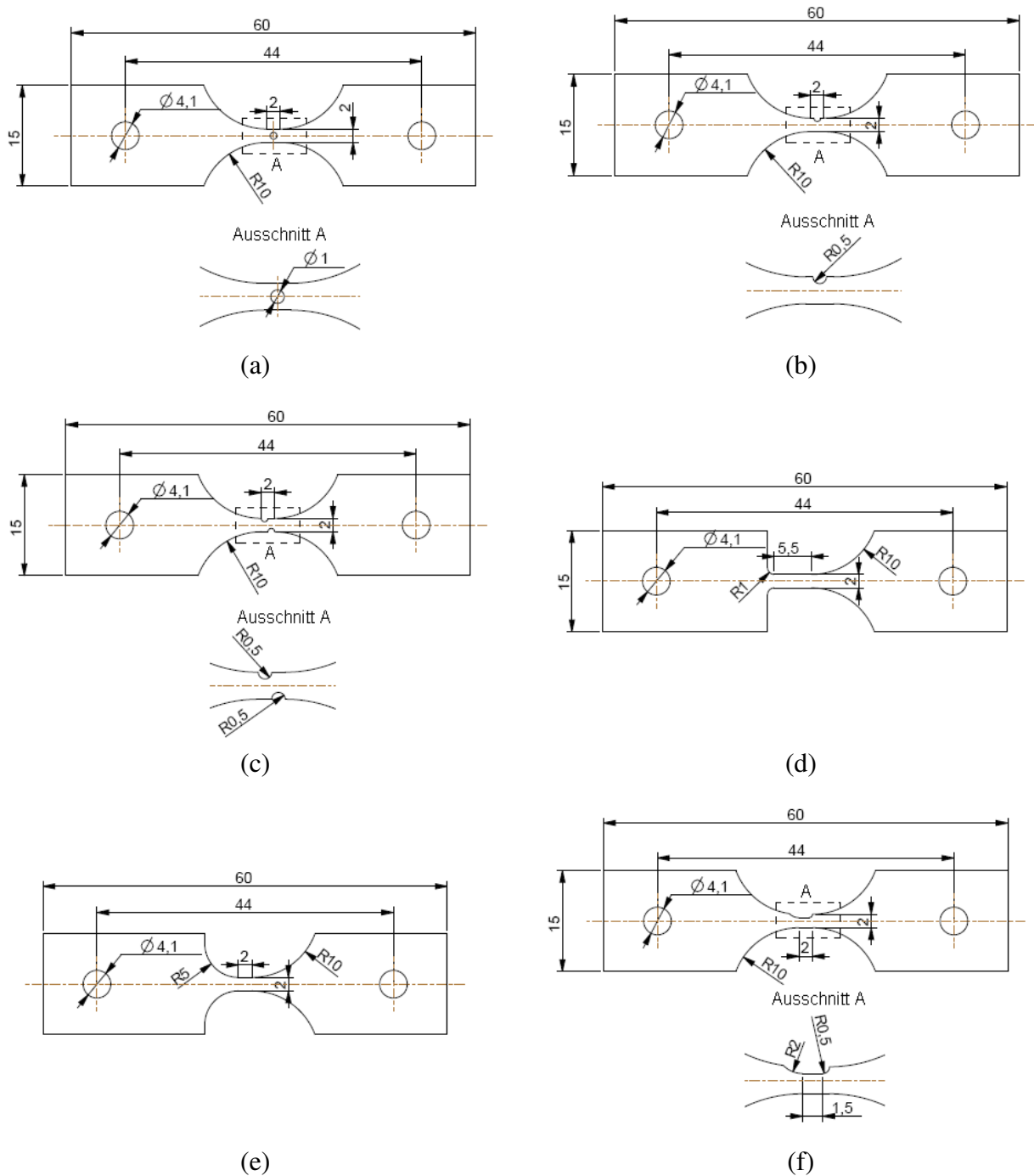


Abb. 3.3: Gegenüber der Standardform (Abb. 3.1) variierte Probengeometrien

3.1.3 Probenbelastung

Für die Zugbelastung der Proben unter der Hochgeschwindigkeitsthermokamera oder -CCD-Kamera wurde die in Abb. 3.2 dargestellte Verformungseinrichtung verwendet. Um die Proben mit einer über mehr als zwei Größenordnungen variierten Vorschubgeschwindigkeit dl/dt verformen zu können, wurden zum Antrieb der Verformungseinrichtung Elektromotoren unterschiedlichen Drehmoments eingesetzt. In Tab. 3.1 sind die eingestellten Vorschubgeschwindigkeiten und die dabei erzielten Dehnraten $\dot{\epsilon}$ aufgeführt. Darüber hinaus sind die

Probengeometrie und die Abschnittsnummern aufgelistet, in denen die mit diesen Proben erzielten Ergebnisse vorgestellt werden.

Probenindex	Proben-Nr.	Vorschubgeschwindigkeit [$\mu\text{m/s}$]	Globale Dehnrate [% $\cdot\text{s}^{-1}$]	Geometrie	Ergebnisse in Abschnitt
1	13	111,68	1,01	Abb. 3.1	4.1.2.1
2	7	28,63	0,27	Abb. 3.1	4.1.1.2
3	6	7,15	0,061	Abb. 3.1	4.1.1.3
4	19	0,954	0,0093	Abb. 3.1	4.1.1.4
5	39	28,63	-	Abb. 3.3 (e)	4.1.2.2;4.1.3
6	37	20,15	-	Abb. 3.3 (b)	4.1.4.1
7	42	4,64	-	Abb. 3.3 (c)	4.1.4.2
8	32	34,4	-	Abb. 3.1	4.1.6
9	33	34,4	-	Abb. 3.1	4.1.6
10	34	34,4	-	Abb. 3.1	4.1.6
11	44, 45, 46	20,15	-	Abb. 3.3 (f)	4.1.5.1
12	47	20,15	-	Abb. 3.3 (d)	4.1.5.2
13	49	4,64	-	Abb. 3.3 (d)	4.1.5.2;4.1.5.3
14	140	34,4	-	Abb. 3.1	4.1.1.6
15	22	27,83	-	Abb. 3.1	4.1.1.6

Tab. 3.1 Übersicht über die im Verlauf dieser Arbeit untersuchten Proben und die Belastungsbedingungen bei den Thermokameraexperimenten.

3.1.4 Methode zur Aufbereitung und Visualisierung der Messdaten

3.1.4.1 Kalibrierung der Thermokamera

Für die Kalibrierung der Thermokamera wurden nicht geschwärzte Proben verwendet, die aus der Legierung AlMg3 hergestellt waren. Die Proben wurden in einem Ofen auf über 100°C erhitzt und anschließend von einem unter der Probe befindlichen Rohr, das von kaltem Wasser durchflossen wurde, langsam auf Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur abgekühlt. In dieser Abkühlungsphase wurde die tatsächliche Probentemperatur mit einem Thermoelement vom Typ PT100 gemessen und synchron mit den gleichzeitig von der Probenoberfläche aufgenommenen Thermokamerabildern aufgezeichnet.

In Abb. 3.4 ist die Beziehung zwischen dem Messwert der Thermokamera, einem Mittelwert über einen geeignet gewählten Bildausschnitt, und der tatsächlichen, vom Thermoelement erfassten Temperatur dargestellt. Der Kurvenverlauf ist dort durch eine nichtlineare, parabolische Funktion ausgeglichen.

Für diese Art der Oberflächenbedingung (nicht geschwärzt) liegt die Temperaturauflösung bei etwa 50 mK. Für geschwärzten Probenoberflächen (z.B. mit Photolack, Graphitspray) wurde

keine Kalibrierfunktion ermittelt, da die PLC-Bänder nach einer solchen Oberflächenbehandlung nicht so empfindlich nachgewiesen werden konnten.

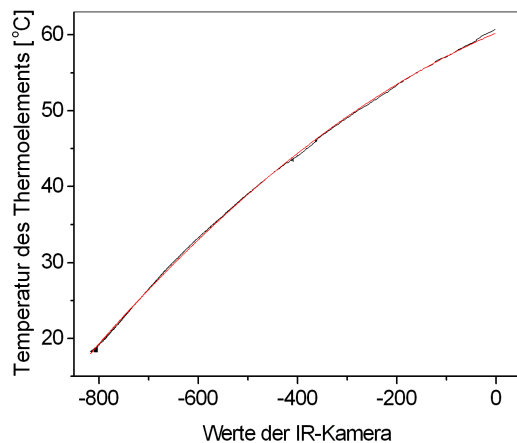


Abb. 3.4: Die Kalibrierung der Thermokamera (rot-Ausgleichskurve, schwarz-Messpunkte)

3.1.4.2 Berechnung von Temperaturratebildern durch Bildsubtraktion

Die PLC-Bänder sind in den original aufgezeichneten Thermokamerabildern i. allg. nicht sichtbar. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Signalunterschiede, die auf eine bandbedingte Probenerwärmung zurückgehen, vergleichsweise klein gegenüber den Signalunterschieden sind, die von einer stark inhomogenen Emissivität verursacht werden und den Bildern in einigen Fällen (Oberfläche nicht geschliffen und poliert) eine kontrastreiche Struktur verleihen. Deshalb war es sinnvoll, eine Differenzbildung zwischen den beiden Bildern von Bildpaaren vorzunehmen, bei der sich die störende Bildstruktur heraushebt. Die Vorgehensweise ist in Abb. 3.5 beschrieben.

Bei dieser Bildverarbeitungsmethode wird von den Grauwerten aller Pixel eines Bildes P_n (Vergleichsbild) der Grauwert des entsprechenden Pixels im Bild P_{n-l} (Referenzbild) abgezogen. Die Größe l bezeichnet den Abstand der Bilder, die paarweise ausgewertet werden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass im Bereich eines Bands eine gegenüber der Umgebung erhöhte Temperatur vorliegt, kann ein Band aus zwei Gründen durch eine derartige Differenzbildung sichtbar werden – das Band weist in Referenz- und Vergleichsbild eine unterschiedliche Position oder eine unterschiedliche Temperatur auf. Im Fall einer durch Bandausbreitung bedingten Positionsveränderung führt eine Intensitätssubtraktion $P_n - P_{n-l}$ dazu, dass die Bereiche des Differenzbildes dunkel werden, die sich hinter dem Band in P_{n-l} und vor dem Vorderrand des Bands in P_n befinden. Der Grund dafür ist, dass die Intensitäten in diesen Bereichen der beiden Bilder P_n und P_{n-l} gleich sind, wenn die durch die Zugbeanspruchung bedingte Starrkörperverschiebung und Verformung ignoriert werden. Nur die Region dazwischen zeigt einen Kontrast, der es ermöglicht, die Bänder anhand des Profils zu erkennen, zu lokalisieren und Bänderparameter zu messen. Diese Methode hat den großen Vorteil, dass die Datenaufbereitung sehr einfach und die Ortsauflösung relativ gut ist. Sie setzt jedoch voraus, dass die Probenoberflächen geschliffen und poliert sind, da nur dann die durch Oberflächenrauheit bedingten Emissivitätsunterschiede ausreichend gering sind.

Der Subtraktionsprozess führt zu einer leicht höheren Bandbreite, da Intensitätsunterschiede in einem Bereich auftreten, der sich von der Rückseite (in Bezug auf die Ausbreitungsrichtung) des Referenzbands bis zur Vorderseite des Vergleichsbands erstreckt. Werden die Differenzen, die sich bei der Subtraktion ergeben, mit der Kalibrierfunktion in Temperaturdifferenzen umgerechnet und das Ergebnis durch den zeitlichen Abstand der Bilder geteilt, erhält man die Temperaturrate.

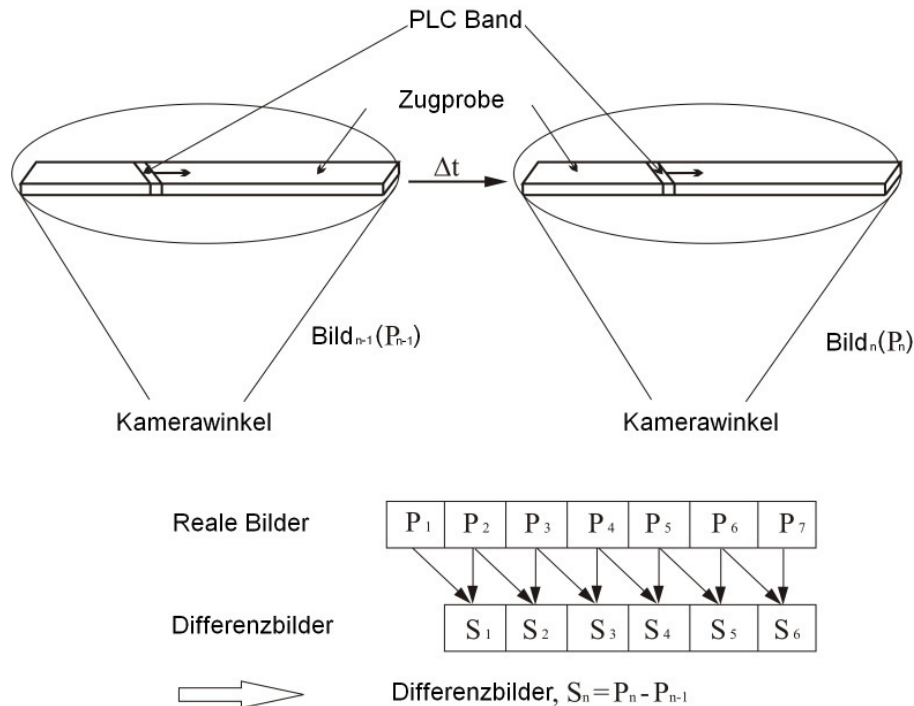


Abb. 3.5: Bilddifferenzbildung zum Nachweis von PLC-Bändern

3.1.4.3 Berechnung der Dehnungs- und Temperaturrate durch Bildkorrelation

Die Methode der Bildkorrelation kann eingesetzt werden, wenn die Wärmebilder kontrastreiche Strukturen aufweisen. Diese Voraussetzung ist bei Oberflächen, die weder geschliffen noch poliert sind, meist erfüllt. Die Verwendung des Bildkorrelationsalgorithmus hat zwei herausragende Vorteile. Einerseits werden Informationen über die Dehnungsänderung und die Temperaturänderung simultan erfasst, woraus sich die Möglichkeit ergibt, die Bänder sowohl mittels des Dehnungszuwachses als auch des Temperaturzuwachses zu beobachten. Andererseits wird der Fehler eliminiert, der beim Berechnen der Temperaturdifferenz bzw. der Temperaturrate im Bildsubtraktionsprozess gemacht wird, indem die belastungsbedingte Starrkörperverschiebung und Verformung zwischen den beiden Bildern des jeweils verwendeten Bildpaares unberücksichtigt bleibt. Ein Nachteil dieser Bildkorrelationsmethode ist, dass das Berechnen des Felds der Dehnungs- und Temperaturdifferenz (bzw. Rate) zeitaufwendig ist. Des Weiteren kann die Auswertung nicht für jedes Pixel sondern für Pixelgruppen (Facetten), die in der vorliegenden Arbeit aus 24×24 Pixeln bestanden, durchgeführt werden. D.h. es werden Mittelwerte für die Facetten berechnet. Deswegen ist die Ortsauflösung bei der Berechnung der Dehnungs- und Temperaturrate stark von der Auflösung der Thermokamera abhängig. In dieser Arbeit liegt diese Auflösung bei $167 \mu\text{m} \times 167 \mu\text{m}$ (2mm/12Facetten). Der Algorithmus wird in Abschnitt 3.1.5 noch ausführlicher erklärt.

3.1.4.4 Erstellung von Trajektorien der PLC-Bänder

Um die PLC-Bandkinematik zu veranschaulichen, wurden Trajektorien der Bandbewegung erstellt. Die dabei gewählte Vorgehensweise ist in Abb.3.6 dargestellt.

Zunächst wird ein schmaler vertikaler Streifen im Mittelbereich der Proben ausgewählt (Abb.3.6a), wobei angenommen wird, dass der Schnittpunkt dieses Streifens mit dem Band die Bandposition zum jeweiligen Zeitpunkt repräsentiert. Anschließend werden die Streifen aus den Bildern ausgeschnitten und zusammengestellt (Abb.3.6b). Dadurch ergibt sich ein neues Bild, das eine Spur des PLC-Bands enthält, die nachfolgend als Bandtrajektorie be-

zeichnet wird. Die x-Achse des Bildkoordinatensystems entspricht der Zeit- und die y-Achse der Ortsachse des Bands. Auf diese Art und Weise kann die Position der Bänder simultan mit Spannung und Dehnung als Funktion der Zeit dargestellt werden (Abb.3.6c).

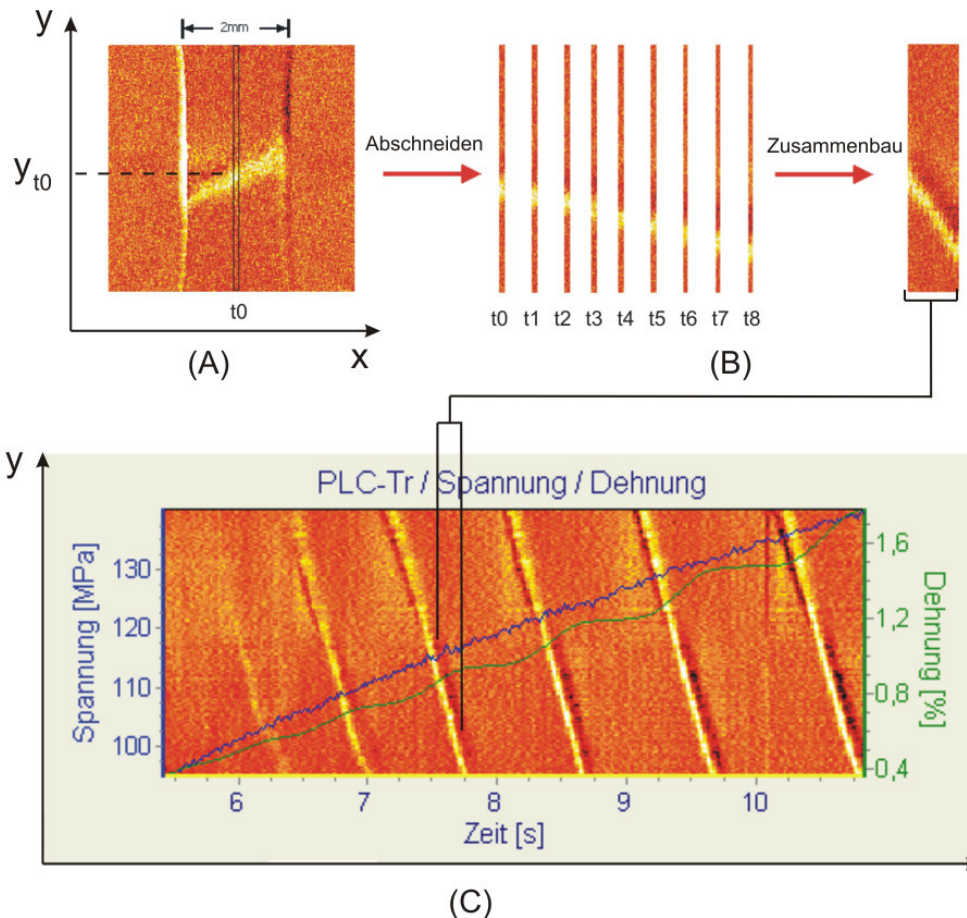


Abb.3.6: Erstellung von Band-Trajektorien zur Veranschaulichung der PLC-Bandkinematik

3.1.5 Bildkorrelationsalgorithmus

3.1.5.1 Mathematische Beschreibung der Verformung

Grundlage des in dieser Arbeit verwendeten Bildkorrelationsalgorithmus ist eine mathematische Beschreibung der Verformung [80][81][82], die zunächst 3-dimensional formuliert ist. Später erfolgt der Übergang auf den 2-dimensionalen Fall, da mit diesem Algorithmus Bildserien der in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Thermokamera, d. h. Messdaten aus der Ebene der Probenoberfläche, ausgewertet werden.

Die Verformung eines Körpers wird bereits vollständig durch die Verschiebung $u(X,t)$ beschrieben. Die Verschiebung ist ein Vektorfeld, das gemäß

$$x = X + u(X, t) \quad (3.1)$$

die Ortsveränderung angibt, die ein Teilchen an der aktuellen Position x gegenüber seiner Position X im unverformten Ausgangszustand erfahren hat (Abb. 3.7).

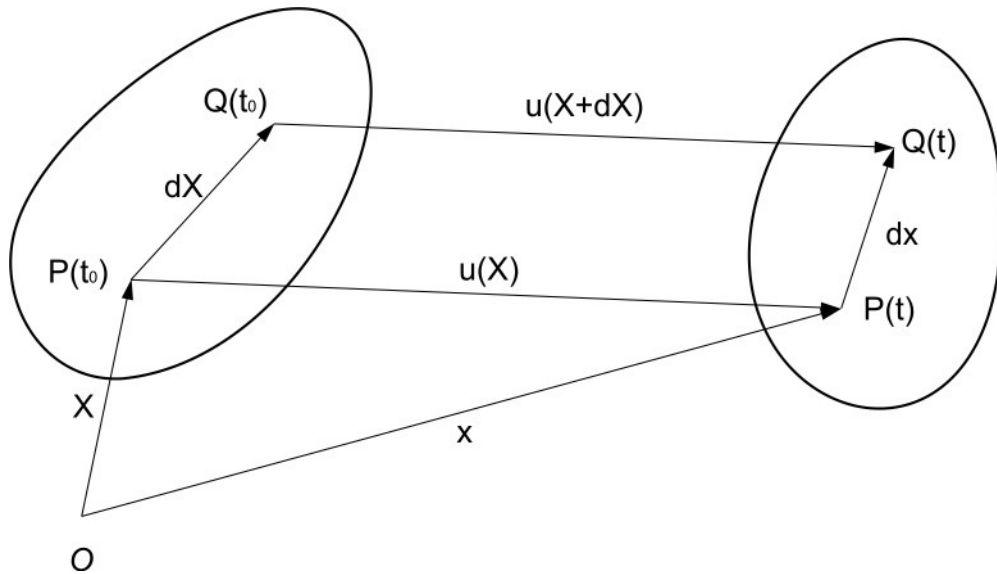


Abb. 3.7: Definition der Verschiebung als Ortsveränderung von Punkten im Raum

In der Mehrzahl der Fälle enthält das gemessene Verschiebungsfeld eine Starrkörperverschiebung und Starrkörperrotation, die keine Gestalt- oder Volumenänderung bewirken. Dadurch ist der Grad der Verformung nicht unmittelbar anhand des Verschiebungsfelds ablesbar. Es werden deshalb alternativ zur Verschiebung andere Feldgrößen zur Beschreibung der Verformung verwendet, die nicht von Starrkörperbewegungen überlagert sind.

Ein Ansatz besteht in der Angabe der Längen- und Richtungsänderung eines zufällig gewählten Abstandsvektors dX , der ausgehend von einem Punkt $P(t_0)$ an der Position X zu einem zweiten Punkt $Q(t_0)$ in seiner Nachbarschaft weist (vgl. Abb. 3.7). Nachfolgend wird angenommen, dass $P(t_0)$ und $Q(t_0)$ beim Verformen in die Punkte $P(t)$ bei x bzw. $Q(t)$ bei $x + dx$ übergehen. Unter der Annahme, dass sich die Ortsveränderung in der Umgebung von $P(t_0)$ durch eine Transformationsfunktion

$$x = \phi(X) \quad (3.2)$$

beschrieben wird, erhält man über das totale Differential dx von x

$$dx = \frac{\partial \phi}{\partial X} \cdot dX = F \cdot dX, \quad F = \frac{\partial \phi}{\partial X} = \text{Grad} \phi, \quad F_{iA} = \frac{\partial \phi_i}{\partial X_A} = \phi_{i,A} \quad (3.3)$$

einen Zusammenhang zwischen dem Abstandsvektor vor und nach dem Verformen dX bzw. dx . Der neu eingeführte Tensor F wird Deformationsgradient genannt. Er enthält alle Informationen über die Richtungs- und Betragsänderung, die der Abstandsvektor dX erfährt. F ist aufgrund seiner Definition als Gradient von Starrkörperverschiebungen unabhängig.

Ein zweiter Ansatz zur Beschreibung der Verformung besteht in der Angabe der relativen Längenänderung

$$\frac{ds - dS}{dS} \quad (3.4)$$

die der Vektor dX beim Übergang in den Vektor dx unterworfen sind. dS und ds sind die Beträge (Längen) dieser beiden Vektoren. Um diese relative Längenänderung angeben zu können, wird zunächst der Verschiebungsunterschied zwischen den Punkten P und Q

$$dx = dX + u(X + dX, t) - u(X, t) \quad (3.5)$$

betrachtet.

Nach einer Entwicklung des Term $u(X + dX, t)$ in eine Taylorreihe, die nach dem linearen Term abgebrochen wird, erhält man unter Verwendung des in Gleichung 3.4 eingeführten Deformationsgradienten F

$$dx = dX + (\nabla u) \cdot dX = (I + (\nabla u)) \cdot dX = F \cdot dX \quad (3.6)$$

∇u wird als Verschiebungsgradient bezeichnet.

Für zwei verschiedene, von P in Abb. 3.7 ausgehende Vektoren dX^1 and dX^2 lauten die entsprechenden Gleichungen

$$dx^1 = dX^1 + (\nabla u) \cdot dX^1 \quad dx^2 = dX^2 + (\nabla u) \cdot dX^2 \quad (3.7)$$

Das Skalarprodukt von dx^1 und dx^2 führt zu:

$$dx^1 \cdot dx^2 = dX^1 \cdot dX^2 + dX^1 \cdot \{(\nabla u) + (\nabla u)^T + (\nabla u)^T (\nabla u)\} dX^2 \quad (3.8)$$

Dieser Ausdruck kann unter Verwendung des Lagrangeschen Verzerrungstensors E^*

$$E^* = \frac{1}{2} \{(\nabla u) + (\nabla u)^T + (\nabla u)^T (\nabla u)\}, \text{ i.e. } E^* = \frac{1}{2} (F^T F - I) = \frac{1}{2} (C - I) \quad (3.9)$$

verkürzt in der Form

$$dx^1 \cdot dx^2 = dX^1 \cdot dX^2 + 2dX^1 \cdot E^* dX^2 \quad (3.10)$$

geschrieben werden.

Der Lagrangeschen Verzerrungstensor E^* ist ein Tensor zweiter Ordnung, der die endliche Verformung in der Nachbarschaft des Punktes P beschreibt.

Um den Zusammenhang zwischen der gesuchten relativen Längenänderung und dem Lagrangeschen Verzerrungstensor herzustellen, wird ein einzelner Vektor $dX = dX^1 = dX^2 = (dS)n$ betrachtet. Er hat die Länge dS und die Richtung n . Dieser Vektor habe nach der Verformung die Länge ds , d. h. es gilt $ds = |dx|$. Gleichung (3.10) führt dann auf

$$(ds)^2 - (dS)^2 = 2(dS)^2 n \cdot E^* n \quad (3.11)$$

bzw. auf die folgende Gleichung für die relative Längenänderung

$$\frac{ds - dS}{dS} = \sqrt{2n \cdot E^* n + 1} - 1 \quad (3.12)$$

Um ein Feld der relativen Längenänderung im Rahmen der Bildauswertung zu erhalten, ist es somit erforderlich, den Lagrangeschen Verzerrungstensor E^* für den ebenen Fall ortabhängig zu ermitteln.

3.1.5.2 Bildauswertung mittels Bildkorrelation

Gemäß Gleichung (3.9) wird zur Ermittlung des Lagrangeschen Verzerrungstensors der Deformationsgradient F benötigt. Dem in dieser Arbeit verwendeten Algorithmus zur Bestim-

mung von F liegt die Annahme zugrunde, dass die in Gleichung (3.2) eingeführte vektorielle Ortsfunktion $x = \phi(X)$ in der Umgebung eines Punktes durch die affine Transformation

$$x_i = a_{i0} + a_{ij}X_j \quad i, j = 1 \dots 2 \quad (3.13)$$

hinreichend gut abgebildet wird. Von den 6 in (3.13) vorkommenden Transformationsparametern a_{ij} beschreiben zwei die Verschiebung des jeweiligen Punktes (a_{10} und a_{20}) und die restlichen vier (a_{11} , a_{12} , a_{21} , und a_{22}) die Verformung und Rotation in der Punktumgebung. Deformationsgradienten F nach Gleichung (3.3) nehmen mit dem ebenen Verschiebungsvektor von Gleichung (3.13) die relativ einfache Form

$$F_{ij} = \frac{\partial \phi_i}{\partial X_j} = a_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

an. D. h., für die Ermittlung des Deformationsgradienten F und aller aus F abgeleiteten Verformungsgrößen müssen nur die Transformationsparameter a_{11} , a_{12} , a_{21} und a_{22} bekannt sein.

Der Bildkorrelationsalgorithmus, der zum Deformationsgradienten F führt, wertet stets Bildpaare aus, die aus einem Referenz- und einem Vergleichsbild bestehen. Ist eine ganze Bildserie auszuwerten, kommen zwei Varianten der Festlegung des Referenzbildes zur Anwendung. In dem einen Fall wird das Referenzbild unverändert gelassen und nur das Vergleichsbild so variiert, dass der Referenz-Vergleichsbild-Abstand schrittweise zunimmt. Wenn das fixe Referenzbild dem Bild entspricht, das im unverformten Zustand der Probe aufgenommen worden ist, liefert der Auswertealgorithmus die Ortsverteilungen (Felder) des Dehnungstensors in verschiedenen Verformungsstadien.

Im zweiten Fall wird der Referenz-Vergleichsbild-Abstand unverändert gelassen. Das Referenzbild gleitet durch die Bildserie. Der Auswertungsalgorithmus liefert dann Felder von Dehnungsinkrementen. Diese beschreiben die örtliche Veränderung des Dehnungstensors für einander entsprechende Ausschnitte im Referenz- und im Vergleichsbild. Werden die Dehnungsinkremente auf die Zeitdifferenzen bezogen, die zwischen der Aufnahme von Referenz- und Vergleichsbild verstrichen sind, erhält man Tensoren der Dehnrates. In der vorliegenden Arbeit wurden vorrangig Felder der Dehnrates ermittelt.

Die Auswertung der Bildpaare besteht aus zwei Schritten. Zunächst wird das Referenzbild in regelmäßig angeordnete Bildausschnitte (nachfolgend Facetten genannt) eingeteilt. Dadurch ergibt sich eine Facettenmatrix, die durch einen einheitlichen Abstand der Mittelpunkte benachbarter Facetten und durch eine einheitliche Facettengröße in x- und y-Richtung gekennzeichnet ist. In dieser Arbeit lagen der Mittelpunktsabstand bei 8 und die Facettengröße bei 24 Pixeln. Benachbarte Facetten überlappten sich somit gegenseitig.

Im zweiten Schritt werden für jede Facette die Parameter zweier Transformationen ermittelt, mit deren Hilfe die Grauwertverteilung der Facette möglichst gut an die Grauwertverteilung des entsprechenden Bereichs im Vergleichsbild angepasst ist. Die für diese Anpassung erforderliche geometrische Transformation ist bereits in Gleichung (3.13) angegeben. Zusätzlich ist eine Grauwerttransformation notwendig, um Helligkeits- und Kontrastunterschiede zwischen den Facetten im Referenzbild und den jeweils korrespondierenden Bereichen im Vergleichsbild berücksichtigen zu können.

Zur Ermittlung der Parameter der geometrischen und Grauwerttransformation wird in dieser Arbeit ein Ausgleichproblem nach der Methode der kleinsten Quadrate gelöst.

3.1.5.3 Formulierung und Lösung des Ausgleichproblems

Um die Grauwertverteilungen korrespondierender Bildbereiche in Referenz- und Vergleichsbild einander durch eine Transformation angleichen zu können, werden sie als Bildfunktionen aufgefasst. So beschreibt die Bildfunktion $gu(x, y)$ die Grauwertverteilung einer Facette aus dem Referenzbild. Die Bildfunktion $gv(x_t, y_t)$ ist die Grauwertverteilung, die man erhält, wenn die Grauwertverteilung der Facette in das Koordinatensystem des Vergleichsbildes rein geometrisch gemäß Gleichung (3.15) transformiert wird.

$$x_t = a_{10} + a_{11} \cdot x + a_{12} \cdot y \quad y_t = a_{20} + a_{21} \cdot x + a_{22} \cdot y \quad (3.15)$$

Gleichung (3.15), die der Gleichung (3.13) entspricht, ist eine affine Transformation.

Unterwirft man die geometrisch transformierte Bildfunktion $gv(x_t, y_t)$ zusätzlich einer Grauwerttransformation, indem mit dem Kontrastparameter r_1 multipliziert, der Helligkeitsparameter r_0 addiert, und vom Ergebnis die Bildfunktion $gu(x, y)$ subtrahiert wird, erhält man die sogenannte Residuumsfunktion $v(x, y)$

$$v(x, y) = r_0 + r_1 \cdot gv(x_t, y_t) - gu(x, y) \quad (3.16)$$

Durch Einführung eines Parametervektors \bar{p} mit

$$\bar{p} = (r_0 \quad r_1 \quad a_{10} \quad a_{11} \quad a_{12} \quad a_{20} \quad a_{21} \quad a_{22})^T = (p_0 \quad p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4 \quad p_5 \quad p_6 \quad p_7)^T \quad (3.17)$$

kann die Abhängigkeit der Residuumsfunktion von den Ortkoordinaten (x, y) im Referenzsystem und den 8 Komponenten des Parametervektors \bar{p} in folgender Weise formuliert werden:

$$v(\bar{p}, x, y) = p_1 + p_2 \cdot gv(x_t(p_3, p_4, p_5, x, y), y_t(p_6, p_7, p_8, x, y)) - gu(x, y) \quad (3.18)$$

Für die weiteren Betrachtungen wird angenommen, dass bereits ein Näherungswert \bar{p}_0 für den Parametervektor \bar{p} vorliegt. Unter diesen Bedingungen kann die Residuumsfunktion bei $\bar{p} = \bar{p}_0$ und unter Konstanthalten der Ortkoordinaten (x, y) in eine Taylorreihe entwickelt werden. Wird die Taylorreihe nach dem linearen Term abgebrochen, erhält man für die Residuumsfunktion näherungsweise:

$$v(\bar{p}, x, y) = v(\bar{p}_0, x, y) + \left. \frac{dv}{d\bar{p}} \right|_{\bar{p}=\bar{p}_0} d\bar{p} \quad (3.19)$$

Der Vektor $d\bar{p}$ in Gleichung (3.19) lässt sich gemäß

$$\bar{p} = \bar{p}_0 + d\bar{p} \quad (3.20)$$

auch als eine Verbesserung von \bar{p}_0 betrachten, was für die iterative Lösung des Ausgleichproblems von Bedeutung ist.

Der Vektor der Parameterverbesserung $d\bar{p}$ wird durch eine Ausgleichung über alle n Bildpunkte der Facette berechnet. Dazu werden alle n Werte der Residuumsfunktion $\bar{v}(\bar{p}_0, x, y)$ in einem Anfangsfehlervektor $-\bar{l}$ mit n Elementen gemäß

$$-\bar{l} = \bar{v}(\bar{p}_0, x, y) \quad (3.21)$$

zusammengefasst. Die $n \times 8$ – Matrix der Ableitungen von $\bar{v}(\bar{p}, x, y)$ erhält gemäß

$$\left. \frac{d\bar{v}}{d\bar{p}} \right|_{\bar{p}=\bar{p}_0} = A_{n \times 8} \quad (3.22)$$

die Bezeichnung $A_{n \times 8}$. Damit kann die Residuums- bzw. Fehlerfunktion von Gleichung (3.19) als Fehlervektor \bar{v} mit

$$\bar{v}(\bar{p}, x, y) = \bar{v}(\bar{p}_0, x, y) + \left. \frac{d\bar{v}}{d\bar{p}} \right|_{\bar{p}=\bar{p}_0} d\bar{p} = A \cdot d\bar{p} - \bar{l} \quad (3.23)$$

betrachtet werden.

Dem Prinzip der Methode der kleinsten Quadrate folgend wird das gewichtete Skalarprodukt des Fehlervektors v mit sich selbst

$$S = \bar{v}^T(\bar{p}, x, y) \cdot W \cdot \bar{v}(\bar{p}, x, y) = (A \cdot d\bar{p} - \bar{l})^T \cdot W \cdot (A \cdot d\bar{p} - \bar{l}) \quad (3.24)$$

minimiert. Dies führt auf das folgende lineare System von 8 Gleichungen für die 8 Komponenten des Vektors $d\bar{p}$:

$$A^T \cdot W \cdot A \cdot d\bar{p} = A^T \cdot W \cdot \bar{l} \quad (3.25)$$

Da die Matrix $A^T W A$ symmetrisch und positiv definit ist, konnte das Cholevskiverfahren im Rahmen dieser Arbeit zur Lösung des Gleichungssystems eingesetzt werden. Mit dem Lösungsvektor $d\bar{p}$ wird der Parametervektor \bar{p} - bei einem Startwert beginnend - schrittweise gemäß Gleichung (3.20) verbessert, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist

Da der Lösungsvektor $d\bar{p}$ neben den Grauwertverteilungen $gu(x, y)$ und $gv(x_t, y_t)$ von den Ableitungen $\partial gv / \partial x_t$ und $\partial gv / \partial y_t$ bestimmt wird, tragen Bildpunkte mit besonders großen Ableitungswerten (Bildpunkte an Grauwertkanten) besonders stark zur Lösung bei. Das bedeutet einerseits, dass für Facetten, in denen viele steile Grauwertkanten vorkommen, besonders zuverlässige Lösungen zu erwarten sind. Andererseits folgt daraus, dass Facetten, die keine solchen Grauwertkanten enthalten, nicht auswertbar sind. In diesem Fall ist es sinnvoll, Grauwertkanten in den Bildern durch ein kontrastreiches künstliches Strukturieren der Probenoberflächen zu erzeugen.

3.1.6 Einsatz des Korrelationsalgorithmus zur Auswertung von Bildserien

3.1.6.1 Auswertung von Bildserien einer Hochgeschwindigkeits-CCD-Kamera

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in einem Fall während der Zugbelastung Bilder der Probenoberfläche mit einer Hochgeschwindigkeits-CCD-Kamera aufgezeichnet. Die Bildrate betrug 1000 Hz und die Bildauflösung 512×512 Pixel. Die Probenoberfläche war zuvor geschliffen,

poliert und zur Gewährleistung vieler Grauwertkanten in den Bildern mit einem Punktgitter künstlich strukturiert worden.

Bei der Auswertung dieser Bildserien wurde das Referenzbild durch die Bildserie verschoben (gleitendes Referenzbild) und der Referenzbild-Vergleichsbild-Abstand festgehalten. Zur Berechnung des Dehnungsinkrements wurde der Deformationsgradient F gemäß Gleichung (3.14) verwendet. D.h. es gingen nur die Parameter a_{11} , a_{12} , a_{21} und a_{22} in die Dehnung ein. Die Parameter a_0 und b_0 (Verschiebung des Facettenmittelpunkts) sowie r_0 und r_1 , die dem Helligkeit- bzw. Kontrastunterschied entsprechen, sind ohne Bedeutung.

3.1.6.2 Auswertung von Bildserien einer Hochgeschwindigkeitsthermokamera

Der in Abschnitt 3.1.5 beschriebene Bildkorrelationsalgorithmus ist auch für die Auswertung der von der Thermokamera aufgezeichneten Bilder geeignet, sofern diese eine inhomogene und ausreichend kontrastreiche Grauwertverteilung enthalten. Dies ist z.B. dann gegeben, wenn die Infrarotemissivität aufgrund einer rauhen Probenoberfläche inhomogen ist. Der Bildkorrelationsalgorithmus kann dann ohne Einschränkungen angewandt werden. Im Unterschied zur Auswertung der CCD-Kamera-Bilder haben die Parameter r_0 und r_1 jetzt eine besondere Bedeutung: Unter der Voraussetzung, dass während des Experiments keine von außen hervorgerufenen Helligkeits- und Kontrastveränderungen aufgetreten sind, enthalten die Parameter r_0 und r_1 eine Information über die Temperaturänderung, die die jeweilige Facette durch den thermo-elastischen Effekt oder durch plastische Verformung im Mittel erfahren hat. Die Temperaturveränderung kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

Für das Flächenintegral über die Residuumsfunktion gilt nach dem erfolgreichen Abschluss des Iterationsverfahrens näherungsweise:

$$\iint v(p, x, y) dx dy = r_0 \cdot \iint dx dy + r_1 \cdot \iint gv(x_t(p, x, y), y_t(p, x, y)) dx dy - \iint gu(x, y) dx dy = 0 \quad (3.26)$$

Bezeichnet man die mittlere Temperatur einer Facette des Referenzbilds und die mittlere Temperatur des entsprechenden Bereichs im Vergleichsbild mit T_u bzw. T_v und berücksichtigt die Beziehungen

$$T_u = \frac{\iint gu(x, y) dx dy}{\iint dx dy} \quad T_v = \frac{\iint gv(x_t(p, x, y), y_t(p, x, y)) dx dy}{\iint dx dy} \quad (3.27)$$

erhält man für die Differenz ΔT dieser beiden Temperaturmittelwerte:

$$\Delta T = T_v - T_u = \frac{T_u - r_0}{r_1} - T_u \quad (3.28)$$

Diese Form der Temperaturdifferenzberechnung für die Facetten des Referenzbilds wurde in das Programm integriert, das die Dehnungsänderung facettenweise berechnet. Dadurch wurde es - unter Berücksichtigung der Zeitdifferenz der Bilder - möglich, aus identischen Thermokamerabildpaaren sowohl ein Feld der Dehnungs- als auch ein Feld der Temperaturrate zu berechnen.

3.1.7 Messung der Bandparameter

In Abb. 3.8 werden die drei Bandparameter Bandbreite w_b , Bandgeschwindigkeit c_b und Dehnungssprung $\Delta\varepsilon_b$ veranschaulicht. Die Bandbreite ist der Bereich, in dem zu einem Zeitpunkt t die Verformung konzentriert ist. Die Bänder bewegen sich mit einer von der externen Dehnung abhängigen Geschwindigkeit c_b durch die Probe. Ein Problem besteht darin, dass das Abtastintervall Δt , mit dem die Bilder aufgezeichnet werden, einen großen Einfluss auf die Messungsgenauigkeit der PLC-Bandparameter besitzt. In Abb. 3.8 wird am Beispiel von drei verschiedenen Abtastintervallen $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ ($\Delta t_3 > \Delta t_2 > \Delta t_1$) veranschaulicht, welchen Einfluss die Größe des Abtastintervalls auf das gemessene Dehnungssinkrement ausübt. Dabei wird deutlich, dass die PLC-Bänder im Dehnungssinkrementbild (unten) umso breiter und höher erscheinen je länger das Abtastintervall Δt ist. Die gemessene Bandgeschwindigkeit wird dagegen von Δt nicht beeinflusst. Deshalb kann auch angenommen werden, zwischen der gemessenen Geschwindigkeit der PLC-Bänder (mit Obennotation t) und der tatsächlichen PLC-Bandgeschwindigkeit (ohne Obennotation) die Beziehung

$$c_b = c_b^t \quad (3.29)$$

besteht.

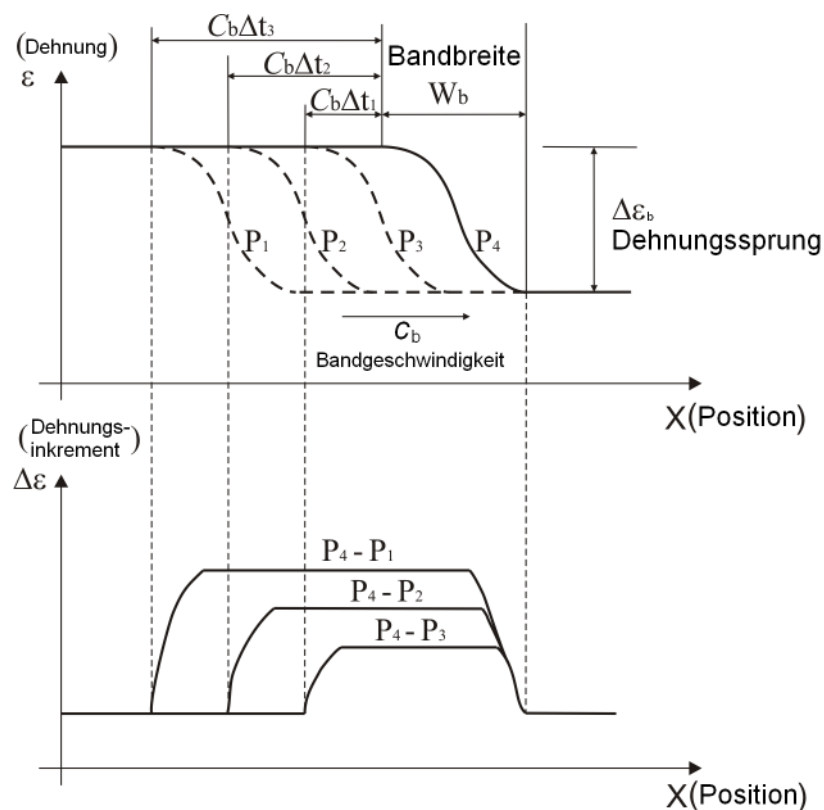


Abb. 3.8: Einfluss des Abtastintervalls Δt auf die Bandparameter bei einer diskreten Messung

Da sich das PLC-Band im Abtastintervall Δt um den Betrag $c_b \Delta t$ fortbewegt, besteht der folgende Zusammenhang zwischen der gemessenen und der wahren Bandbreite w_b :

$$c_b \Delta t + w_b = w_b^t \quad (3.30)$$

Daraus folgt die Beziehung

$$w_b = w_b^t - c_b \Delta t \quad (3.31)$$

3.2 Simulation

In dieser Arbeit wurde zur Simulation sowohl die FE- als auch die FD-Methode eingesetzt. Die FD-Methode wurde ausschließlich bei dem 1-dimensionalen Modell verwendet, während die FE-Methode bei den 3-dimensionalen Modellen zum Einsatz kam.

3.2.1 Die Finite-Elemente-Methode

Im Rahmen der Anwendung der Finite-Elemente-Methode wird das der jeweiligen Struktur zugrundeliegende Gebiet in finite Elemente aufgeteilt. Ausgehend von einem vorgegebenen Verschiebungsfeld werden dann die Feldgrößen des Problems näherungsweise berechnet. Die dabei angewendeten Variationsprinzipien (in der Regel das Prinzip der virtuellen Verschiebungen) werden dabei im Mittel für jedes Elementvolumen erfüllt, wobei bei der durchzuführenden numerischen Integration über das Elementvolumen eine weitere numerische Näherung des abzubildenden Zustands vorgenommen wird. Ausgehend von der Unterteilung der Belastungen in diskrete Zeitschritte wird anschließend ein Spannungsalgorithmus zur numerisch effizienten Integration der Materialgleichungen hergeleitet. Die Lösung des daraus entstehenden nichtlinearen Gleichungssystems erfolgt mit dem Newton-Verfahren.

3.2.2 Werkstoffmodellierung und User Material Subroutine (UMAT)

Die Finite-Elemente-Methode wird häufig zur Simulation des Werkstoffverhaltens verwendet. Allerdings werden komplexe Werkstoffmodelle meist nicht von den Standardmodulen kommerzieller FE-Software unterstützt. Die kommerzielle Software ABAQUS, die im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kam, stellt aber eine Schnittstelle zur Verfügung, über die benutzerdefinierte Werkstoffmodelle (UMAT) realisiert werden können. Diese Schnittstelle wurde in der vorliegenden Arbeit dafür genutzt, das spezifisch mechanische konstitutive Verhalten des hier betrachteten Werkstoffs zu definieren. Hierfür war es erforderlich, die materielle Jacoby-Matrix $\partial \Delta \sigma / \partial \Delta \epsilon$ für das mechanische konstitutive Modell in die UMAT eingegeben.

3.2.3 Modellrealisierung in UMAT

In den meisten Fällen wird das elastische Verhalten in visko-plastischen Modellen vernachlässigt. Im Modell des PLC-Effekts ist die Berücksichtigung der Elastizität jedoch notwendig, weil die Reaktion des Werkstoffs durch elastische Belastungs- und plastische Relaxationseignisse gekennzeichnet ist.

Die Elastizität ist durch das Hooke-Gesetz

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk}^e + 2\mu \epsilon_{ij}^e \quad (3.32)$$

beschrieben. In inkrementeller Form lautet es:

$$\Delta \sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \Delta \epsilon_{kk}^e + 2\mu \Delta \epsilon_{ij}^e \quad (3.33)$$

Bei der hier angenommenen isotropen Verfestigung lautet die Fließfunktion (yield function):

$$\sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} - \sigma_y(\varepsilon^p) = 0, \quad S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (3.34)$$

S_{ij} ist der deviatorische Anteil des Spannungstensors σ_{ij} . Die in Gleichung (3.34) vorkommende plastische Vergleichsdehnung berechnet sich als Zeitintegral über der Rate der plastischen Vergleichsdehnung und diese wiederum aus dem plastischen Dehnratetensor:

$$\varepsilon^p = \int_0^t \dot{\varepsilon}^p dt, \quad \dot{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p} \quad (3.35)$$

Für die Simulation des Verhaltens der PLC-Bänder muss die Fließregel

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{\sigma_y} \dot{\varepsilon}^p \quad (3.36)$$

integriert werden. Das hierbei angewandte Verfahren wird nachfolgend beschrieben.

Zuerst wird die von-Mises-Spannung auf Basis des reinen elastischen Verhaltens (elastische Prädiktor) berechnet.

$$\bar{\sigma}^{pr} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij}^{pr} S_{ij}^{pr}}, \quad S_{ij}^{pr} = S_{ij}^0 + 2\mu \Delta e_{ij} \quad (3.37)$$

In Gleichung (3.37) sind S_{ij}^0 und Δe_{ij} der Anfangswert von S_{ij} bzw. das Inkrement des deviatorischen Anteils des Tensors der elastischen Dehnung

Wenn der elastische Prädiktor größer als die aktuelle Fließspannung ist, tritt das plastische Fließen auf. Nach mehreren mathematischen Transformationen [83] ist das isotrope Verfestigungsproblem auf eine Plastizitätsgleichung reduziert, die in Bezug auf die inkrementale plastische Vergleichsdehnung durch

$$\bar{\sigma}^{pr} - 3\mu \Delta \varepsilon^p = \sigma_y(\varepsilon^p) \quad (3.38)$$

ausgedrückt wird. Diese Gleichung wird mit den in Tab. 2.2 beschriebenen konstitutiven Gleichungen kombiniert. Das sich dabei ergebende Gleichungssystem wird mit dem Newton-Raphson-Integrationsverfahren gelöst. Diese Vorgehensweise wird in den nächsten Abschnitten 3.2.4 und 3.2.5 ausführlich diskutiert. Nachdem dieses Gleichungssystem gelöst ist, können die folgenden Aktualisierungsgleichungen für die Spannung und die plastische Dehnung in UMAT verwendet werden [83].

$$\sigma_{ij} = \eta_{ij} \sigma_y + \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk}^{pr}, \quad \Delta \varepsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \eta_{ij} \Delta \varepsilon^p, \quad \eta_{ij} = S_{ij}^{pr} / \bar{\sigma}^{pr} \quad (3.39)$$

Zusätzlich muss die konsistente Jacoby-Matrix in UMAT gemäß der Gleichungen

$$\Delta\dot{\sigma}_{ij} = \lambda^* \delta_{ij} \Delta\dot{\epsilon}_{kk} + 2\mu^* \Delta\dot{\epsilon}_{ij} + \left(\frac{h}{1+h/3\mu} - 3\mu^* \right) \eta_{ij} \eta_{kl} \Delta\dot{\epsilon}_{kl} \quad (3.40)$$

$$\mu^* = \mu \sigma_y / \bar{\sigma}^{pr}, \lambda^* = k - \frac{2}{3} \mu^*, h = d\sigma_y / d\epsilon^p$$

aktualisiert werden.

3.2.4 3D-FE-Simulation mit dem Estrin-Cormick-Modell

Um die 3D-FE-Simulation mit dem Estrin-Cormick-Modell im Rahmen dieser Arbeit zu realisieren, werden die konstitutiven Gleichungen und Gleichung (3.38), welche die isotrope Verfestigung beschreibt, in UMAT eingegeben. Die konstitutiven Gleichungen werden mit der Rückwärts-Euler-Methode folgendermaßen zeitlich integriert.

$$f_1 = \sigma_{ir} - 3\mu(\epsilon^p - \epsilon_n^p) - \sigma_y = 0$$

$$f_2 = \epsilon^p - \epsilon_n^p - \Delta t \dot{\epsilon}_0 \exp \left[\frac{\sigma_y - \sigma_{int}}{S_i} - P_1 C_s(\epsilon^p, t_a) \right] = 0 \quad (3.41)$$

$$f_3 = t_a - t_{an} + \frac{t_a \Delta t}{t_w} - \Delta t = 0$$

Hier hängt die Verformung von der Verformungsgeschichte (ϵ_n^p) und der Evolution der Alterungszeit (t_{an}) an jedem Gaußpunkt ab. Es wird in UMAT durch Definieren der modellgebundenen lösungsabhängigen Zustandsgröße (SDV) realisiert. Die dehnratebezogenen Merkmale des konstitutiven Modells machen es erforderlich, das Zeitinkrement Δt zu berücksichtigen. Δt ist von Faktoren wie der externen Dehnrate, dem instabilen Charakter des konstitutiven Modells sowie vom numerischen Fehler abhängig.

Die in Gleichung (3.41) vorkommenden drei inneren Zustandsgrößen werden in einem Zustandsvektor X :

$$X = \begin{pmatrix} \epsilon^p \\ \sigma_y \\ t_a \end{pmatrix} \quad (3.42)$$

zusammengefasst. Um das nicht-lineare Gleichungssystem (3.41) numerisch zu lösen, kommt das Newton-Raphson-Verfahren zur Anwendung. Die notwendige Aktualisierung des Zustandsvektors X im Verlauf eines Iterationsschritts (Newton-Raphson-Aktualisierung) wird mit der Inversen der Jacobi-Matrix durchgeführt:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon^p \\ \sigma_y \\ t_a \end{pmatrix}_{i+1} = \begin{pmatrix} \varepsilon^p \\ \sigma_y \\ t_a \end{pmatrix}_i - \begin{pmatrix} \partial f_1 / \partial \varepsilon^p & \partial f_1 / \partial \sigma_y & \partial f_1 / \partial t_a \\ \partial f_2 / \partial \varepsilon^p & \partial f_2 / \partial \sigma_y & \partial f_2 / \partial t_a \\ \partial f_3 / \partial \varepsilon^p & \partial f_3 / \partial \sigma_y & \partial f_3 / \partial t_a \end{pmatrix}_i^{-1} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}_i \quad (3.43)$$

Die Jacobi-Matrix selbst ergibt sich aus den Ableitungen der drei Funktionen f_1, f_2 und f_3 nach den drei Komponenten des Zustandsvektors:

$$J = \begin{pmatrix} \partial f_1 / \partial \varepsilon^p & \partial f_1 / \partial \sigma_y & \partial f_1 / \partial t_a \\ \partial f_2 / \partial \varepsilon^p & \partial f_2 / \partial \sigma_y & \partial f_2 / \partial t_a \\ \partial f_3 / \partial \varepsilon^p & \partial f_3 / \partial \sigma_y & \partial f_3 / \partial t_a \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

Für die Berechnung der Jacobi-Matrix aus den Gleichungen (3.41) wird zur Vereinfachung der Schreibweise die Größe ϕ

$$\phi = \frac{\sigma_y - \sigma_{\text{int}}}{S_i} - P_1 C_s(\varepsilon^p, t_a) \quad (3.45)$$

eingeführt. Die 9 Elemente der Jacobi-Matrix J lauten damit:

$$J_{11} = \partial f_1 / \partial \varepsilon^p = -3\mu$$

$$J_{12} = \partial f_1 / \partial \sigma_y = -1$$

$$J_{13} = \partial f_1 / \partial t_a = 0$$

$$J_{21} = \partial f_2 / \partial \varepsilon^p = 1 - \Delta t \dot{\varepsilon}_0 \exp(\phi) \left[\left(\frac{-\sigma_{\text{int}, \varepsilon^p} S_i - (\sigma_y - \sigma_{\text{int}}) S_{i, \varepsilon^p}}{S_i^2} \right) - P_1 C_{s, \varepsilon^p} \right]$$

$$J_{22} = \partial f_2 / \partial \sigma_y = -\Delta t \dot{\varepsilon}_0 \exp(\phi) \frac{1}{S_i}$$

$$J_{23} = \partial f_2 / \partial t_a = \Delta t \dot{\varepsilon}_0 \exp(\phi) P_1 C_{s, t_a}$$

$$J_{31} = \partial f_3 / \partial \varepsilon^p = -\frac{\Delta t t_w \varepsilon^p}{t_w^2}$$

$$J_{32} = \partial f_3 / \partial \sigma_y = 0$$

$$J_{33} = \partial f_3 / \partial t_a = 1 + \frac{\Delta t}{t_w}$$

mit

$$C_{s,\varepsilon^p} = C_m P_2 \exp\left[-P_2 (\varepsilon^p)^\alpha t_a^n\right] \alpha (\varepsilon^p)^{\alpha-1} t_a^n$$

$$C_{s,t_a} = C_m P_2 \exp\left[-P_2 (\varepsilon^p)^\alpha t_a^n\right] (\varepsilon^p)^\alpha n t_a^{n-1}$$

$$t_{w,\varepsilon^p} = \Delta t \left[\Omega_{,\varepsilon^p} (\varepsilon^p - \varepsilon_n^p) - \Omega \right] / (\varepsilon^p - \varepsilon_n^p)^2$$

Nachdem das System gelöst ist, wird der in Gleichung (3.39) auftretende Dehnungsverfestigungskoeffizient h gemäß der Gleichung

$$h = \frac{d\sigma_y}{d\varepsilon^p} = \frac{d\sigma_{\text{int}}}{d\varepsilon^p} + \frac{S_2}{2\sqrt{\varepsilon^p}} \left[\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) + P_1 C_s \right] + S_i \left(\frac{1}{\varepsilon^p - \varepsilon_n^p} + P_1 \frac{dC_s}{d\varepsilon^p} \right)$$

mit

$$\frac{dC_s}{d\varepsilon^p} = C_m P_2 \exp\left[-P_2 (\varepsilon^p)^\alpha t_a^n\right] \left[\alpha (\varepsilon^p)^{\alpha-1} t_a^n + (\varepsilon^p)^\alpha n t_a^{n-1} t_{a,\varepsilon^p} \right]$$

und

$$t_{a,\varepsilon^p} = (t_{an} + \Delta t) \left[\Omega_{,\varepsilon^p} (\varepsilon^p - \varepsilon_n^p) - \Omega \right] / (\varepsilon^p - \varepsilon_n^p + \Omega)^2$$

aktualisiert.

3.2.5 3D-FE-Simulation mit Hähner-Modell ohne Kopplung

Die Umsetzung dieses Modells als UMAT in ABAQUS ähnelt der in vorangehenden Abschnitt beschriebenen Vorgehensweise. Ausgangspunkt sind die folgenden, ohne räumliche Kopplung formulierten konstitutiven Gleichungen:

$$\dot{\varepsilon}^p = \nu_0 \Omega \exp\left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{S_i} - \frac{G_0 + \Delta G}{kT}\right) \quad (3.46)$$

$$(\Delta G)_{,t} = \eta(\Delta G_{\infty} - \Delta G) - \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\Omega} \Delta G \quad (3.47)$$

Mit $g = \Delta G / kT$, $g_0 = G_0 / kT$ und $g_{\infty} = \Delta G_{\infty} / kT$ kann Gleichung (3.47) in der Form (3.48) geschrieben werden.

$$g_{,t} = \eta(g_{\infty} - g) - \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\Omega} g \quad (3.48)$$

Die in Tab. 2.2 angegebenen konstitutiven Gleichungen des Hähner-Modells gehen nach Anwendung der Rückwärts-Euler-Methode in das folgende Gleichungssystem über:

$$\begin{aligned} f_1 &= \sigma_{rr} - 3\mu(\varepsilon^p - \varepsilon_n^p) - \sigma_y = 0 \\ f_2 &= \varepsilon^p - \varepsilon_n^p - \Delta t v_0 \Omega \exp\left(-g_0 - g + \frac{\sigma_y - \sigma_i}{S_i}\right) = 0 \\ f_3 &= \Delta g - \Delta g_n - \eta \Delta t (\Delta g_{\infty} - g) + \frac{\varepsilon^p - \varepsilon_n^p}{\Omega} \Delta g = 0 \end{aligned} \quad (3.49)$$

Mit der Abkürzung $\phi = -g_0 - g + \frac{\sigma_y - \sigma_{\text{int}}}{S_i}$ und der Einführung des Vektors X interner Zustandsgröße

$$X = \begin{pmatrix} \varepsilon^p \\ \sigma_y \\ g \end{pmatrix}$$

erhält man die folgende, für die Newton-Raphson-Aktualisierung erforderliche Jacoby-Matrix:

$$J = \begin{pmatrix} -3\mu & -1 & 0 \\ 1 - \Delta t v_0 \Omega \exp(\phi) & -\frac{\Delta t v_0 \Omega \exp(\phi)}{S_0} & \Delta t v_0 \Omega \exp(\phi) \\ \frac{\Delta g}{\Omega} & 0 & 1 + \eta \Delta t + \frac{\varepsilon^p - \varepsilon_n^p}{\Omega} \end{pmatrix}$$

Der Dehnungsverfestigungskoeffizient h in (3.40) wird nach den folgenden Gleichungen aktualisiert:

$$\begin{aligned} h &= \frac{d\sigma_y}{d\varepsilon^p} = \sigma_{d,\varepsilon^p} + \frac{S_0}{(\varepsilon^p - \varepsilon_n^p)} + S_0 \frac{dg}{d\varepsilon^p} \\ \frac{dg}{d\varepsilon^p} &= -\frac{g}{\Omega + \eta \Omega \Delta t + \varepsilon^p - \varepsilon_n^p} \end{aligned}$$

Damit sind alle für die Simulation erforderlichen Gleichungen zusammengestellt.

3.2.6 1D-FD-Simulation mit räumlicher Kopplung auf Basis des Hähner-Modells

Um eine Simulation auf Basis des Hähnermodells mit räumlicher Kopplung zu realisieren, musste auf den 1-dimensionalen Fall reduziert und die Finite-Differenzen-Methode eingesetzt werden. Eine Simulation in ABAQUS war im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich.

3.2.6.1 Einachsige Zugversuchsimulation unter konstanter externer Dehnrage

Bei Berücksichtigung der diffusionsartigen Kopplung in der Evolutionsgleichung für die normierte Reckalterungsenthalpie g unter Verwendung des Pseudodiffusionskoeffizienten D_g geht das System von gewöhnlichen Differenzialgleichungen (ODE) zu partiellen Differenzialgleichungen (PDE), das Anfangs- und Randbedingungen benötigt, über. Zur Lösung eines solchen Differenzialgleichungssystems ist die Finite-Differenzen-Methode geeignet. Bei Problemen mit regulärer Geometrie, wie einem 1D-Intervall, einer 2D rechteckigen Domäne und einem 3D-Würfel, ist es im Allgemeinen einfach, Lösungen mit dieser Methode zu finden.

Die Finite-Differenzen-Methode umfasst typischerweise die folgenden Schritte:

1. Gitter generieren, zum Beispiel $(x_i, t^{(k)})$, für das eine Näherungslösung gesucht wird.
2. Die Ableitungen in den Differenzialgleichungen durch Differenzenquotienten ersetzen, um ein lineares/nicht-lineares algebraisches Gleichungssystem zu bekommen.
3. Das algebraische Gleichungssystem lösen.

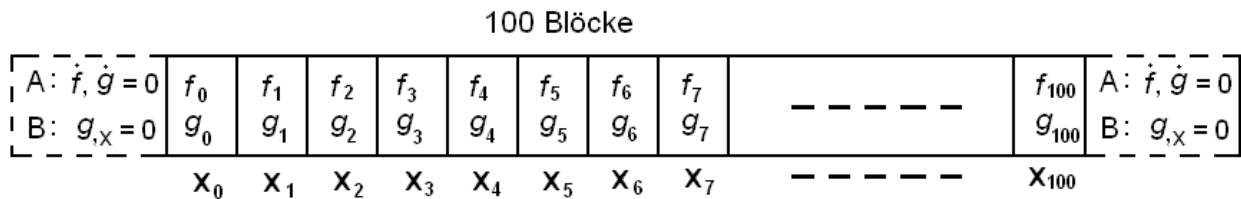


Abb. 3.9: 1D-Gitter zum Hähner-Modell mit räumlicher Kopplung.

In der vorliegenden Arbeit werden ein dimensionsloser Zeitschritt $\Delta\tau$ und eine Gruppe von 100 Blöcken entlang der Probenlänge in Abb. 3.9 festgelegt. Das konstitutive Gleichungssystem lautet:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(\tilde{x}, \tau)}{\partial \tau} &= \dot{\sigma}f(\tilde{x}, \tau) - \theta \exp[-g(\tilde{x}, \tau)] f^2(\tilde{x}, \tau) \\ \frac{\partial g(\tilde{x}, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 g(\tilde{x}, \tau)}{\partial \tilde{x}^2} + g_\infty - g(\tilde{x}, \tau) - f(\tilde{x}, \tau) \exp[-g(\tilde{x}, \tau)] g(\tilde{x}, \tau) \\ \frac{\dot{\sigma}}{E_{eff}/S_i} &= \frac{v}{\eta l} - \frac{\Omega}{l} \int_0^l f(\tilde{x}, \tau) \exp[-g(\tilde{x}, \tau)] d\tilde{x} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Wobei $E_{eff} = E_m E_s / (E_m + E_s)$ die Effektivsteifigkeit, E_s die Probensteifigkeit und E_m die Maschinensteifigkeit ist. Die Gleichungssysteme werden zeitlich und räumlich diskretisiert und durch ein vollständig implizites Finite-Differenz-Integrationschema an den räumlichen Koordinaten zu jedem Zeitschritt gelöst.

$$\tau_0 : f(\tilde{x}_n, \tau_0), \quad g(\tilde{x}_n, \tau_0), \quad \tilde{x}_n = \tilde{x}_0, \tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_{99}$$

$$\tau_1 : f(\tilde{x}_n, \tau_1), \quad g(\tilde{x}_1, \tau_1), \quad \tilde{x}_n = \tilde{x}_0, \tilde{x}_1 \cdots \tilde{x}_{99}$$

Für jeden Block werden die konstitutiven Gleichungen in Bezug auf die finite Differenz $\Delta\tilde{x}$ diskretisiert, wobei das zentrale Finite-Differenz-Schema für die zweite Ableitung benutzt wird:

$$\frac{\partial^2 g(\tilde{x}, \tau)}{\partial \tilde{x}^2} = \frac{g(\tilde{x} + \Delta\tilde{x}, \tau) + g(\tilde{x} - \Delta\tilde{x}, \tau) - 2g(\tilde{x}, \tau)}{\Delta\tilde{x}^2}$$

Die Diskretisierungsform für den n -ten Block lautet:

$$\begin{aligned} M_n &= f(\tilde{x}_n, \tau_1) - f(\tilde{x}_n, \tau_0) - \Delta\tau \{ \dot{\sigma}f(\tilde{x}_n, \tau_1) - \theta \exp[-g(\tilde{x}_n, \tau_1)] f^2(\tilde{x}_n, \tau_1) \} = 0 \\ N_n &= g(\tilde{x}_n, \tau_1) - g(\tilde{x}_n, \tau_0) - \Delta\tau \{ (g(\tilde{x}_{n+1}, \tau_1) + g(\tilde{x}_{n-1}, \tau_1) - 2g(\tilde{x}_n, \tau_1)) / \Delta\tilde{x}^2 \\ &+ g_\infty - g(\tilde{x}_n, \tau_1) - f(\tilde{x}_n, \tau_1) \exp[-g(\tilde{x}_n, \tau_1)] g(\tilde{x}_n, \tau_1) \} = 0 \end{aligned} \quad (3.39)$$

Für alle 100 Blöcke gibt es 200 Variable (f, g in Abb. 3.9), die hier in einem Vektor X zusammengefasst sind. Das Gleichungssystem $L(X)$ wird durch die Newton-Raphson-Aktualisierungsmethode gelöst, für die in diesem Fall eine aus 200×200 Elementen bestehende Jacoby-Matrix $\nabla L(X_i)$ benötigt wird.

$$X_{i+1} = X_i - \nabla L(X_i)^{-1} L(X_i)$$

$$X = \begin{pmatrix} f(\tilde{x}_0, \tau_1) \\ g(\tilde{x}_0, \tau_1) \\ f(\tilde{x}_1, \tau_1) \\ g(\tilde{x}_1, \tau_1) \\ \vdots \\ \vdots \\ f(\tilde{x}_{99}, \tau_1) \\ g(\tilde{x}_{99}, \tau_1) \end{pmatrix} \quad L(X) = \begin{pmatrix} M_1 \\ N_1 \\ M_2 \\ N_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ M_{99} \\ N_{99} \end{pmatrix}$$

3.2.6.2 Die Anfangs- und Randbedingung für die Simulation

Die Anfangsbedingung für f ist: $f_{(0)} = f_0 = 1,713 \times 10^{44}$, was einer Anfangsfließspannung von ca. 105 MPa entspricht. Als Anfangsbedingung für g wurde $g_{(0)} = g_\infty = 7$ angenommen. Das bedeutet, dass die Reckalterungsenthalpie vor dem Versuch seinen Sättigungswert erreicht hat bzw. die Versetzungen bereits eine hohe Wartezeit aufweisen, d.h. stark gealtert sind. Um die PLC-Instabilität auszulösen, wird die Anfangsbedingung für einen zufällig ausgewählten Block abweichend von der Standardanfangsbedingung $f_{(0)}$ gewählt, indem diese durch einen Multiplikator (zwischen 1 und 190) gestört wird, der höchstens eine 5%-ige Änderung der lokalen Anfangsfließspannung herbeiführt.

Hinsichtlich der Randbedingen ist zwischen den festen (vgl. A in Abb. 3.9) und den freien Randbedingungen (vgl. B in Abb. 3.9) zu unterscheiden. Feste Randbedingungen bedeuten, dass zu jedem Zeitpunkt am linken und rechten Rand des Modells die Bedingung $\dot{f} = \dot{g} = 0$ erfüllt ist. Damit wird festgelegt, dass sich an den Rändern die effektive Spannung und die Reckalterungsenthalpie im Verlauf der Zeit nicht verändern. Freie Randbedingungen bedeuten, dass es keine Vorgabe für die normierte Reckalterungsenthalpie g gibt. Der Unterschied wird mit der Notation* in der Jacoby-Matrix $\nabla L(X_i)$ gekennzeichnet. Die Werte der linken und rechten Blöcke werden auf 1 für die freie Randbedingungen und auf 2 für die feste Rand-

bedingung eingestellt. Die Jacoby-Matrix $\nabla L(X_i)$ in Anhang I aufgelistet. Die Ergebnisse der durchgeführten Simulation werden im Kapitel 4 vorgestellt.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zunächst experimentelle Ergebnisse zur Bandmorphologie und zum Bandausbreitungsverhalten im Probensteg vorgestellt, wo annähernd ein einachsiger Spannungszustand vorliegt (4.1.1). Anschließend werden Situationen betrachtet, bei denen ein mehrachsiger Spannungszustand gegeben ist: Dies trifft zu für den Übergang zwischen Probensteg und Probenkopf sowie für den Bereich von eingebrachten Kerben (4.1.3). Zusätzlich wird untersucht, welche Auswirkung eine Erwärmung der Probe auf die Bandausbreitung hat. Nach den experimentellen Ergebnissen werden die Simulationen vorgestellt (4.2).

4.1 Experiment

4.1.1 Das Verhalten der PLC-Bänder im Probensteg

In diesem Abschnitt wird zunächst der Zusammenhang zwischen den in Abb. 3.1 eingeführten Parametern propagierender lokaler Bänder und der Vorschubgeschwindigkeit, der eine wichtige Rolle bei der Auswertung der Ergebnisse spielt, kurz diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse auf Basis der Arbeit von Ognjenovic [3] mit der in Abschnitt 3.1.4 dargestellten Methode weiter diskutiert.

4.1.1.1 Vorbetrachtung zur Messung der Bandparameter

Für ein einzelnes propagierendes Typ-A-PLC- oder Lüdersband gilt folgender Zusammenhang zwischen den Bandparametern c_b , $\Delta\epsilon_b$, $\epsilon_{b,t}$ (lokale plastische Dehnrate in einem PLC Band) und w_b auf der einen und der Vorschubgeschwindigkeit v auf der anderen Seite.

$$c_b \Delta\epsilon_b = w_b \epsilon_{b,t} = v \quad (4.1)$$

Gleichung (4.1) trifft allerdings nur dann zu, wenn sich während der Bandausbreitung die gesamte Verformung auf den Bereich des Bands konzentriert. Propagieren mehrere PLC- oder Lüdersbänder gleichzeitig, trägt jedes Band - unabhängig von der Ausbreitungsrichtung - additiv zur Vorschubgeschwindigkeit bei,

$$\sum_{n=1}^{n=k} c_b^n \Delta\epsilon_b^n = \sum_{n=1}^{n=k} w_b^n \epsilon_{b,t}^n = v \quad (4.2)$$

wobei k die Anzahl der Bänder ist. Die anderen Variablen sind schon in Abschnitt 3.1.7 definiert worden.

Wenn z.B. zwei Bänder auf der Probe propagieren, gilt

$$c_b^1 \Delta\epsilon_b^1 + c_b^2 \Delta\epsilon_b^2 = w_b^1 \epsilon_{b,t}^1 + w_b^2 \epsilon_{b,t}^2 = v \quad (4.3)$$

Führt man anstelle der beiden Bänder ein dazu äquivalentes Einzelband mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit $v = c_b^{eq} \Delta\bar{\epsilon}_b^{eq}$ ein und geht von der Gültigkeit der Beziehung $\Delta\epsilon_b^1 = \Delta\epsilon_b^2 = \Delta\epsilon_b^{eq}$ aus, bedeutet dies, dass die Geschwindigkeit des äquivalenten Bands gleich der Summe der Geschwindigkeit der beiden Bänder ist ($c_b^1 + c_b^2 = c_b^{eq}$)

Unter der Annahme, dass die Geschwindigkeit der zwei Bänder identisch ist ($c_b^1 = c_b^2 = c_b^{eq}$), gilt dagegen die Beziehung $\Delta\varepsilon_b^1 + \Delta\varepsilon_b^2 = \Delta\varepsilon_b^{eq}$. Entsprechende Zusammenhänge ergeben sich zwischen der Breite der einzelnen Bänder und der des äquivalenten Bands.

Aus dieser Betrachtung ist zu schließen, dass man bei der gleichzeitigen Ausbreitung mehrerer Bänder unrealistische Bandparameter erhalten kann. Deswegen wurden in dieser Arbeit Proben mit einer sehr kurzen Messlänge (2mm) bevorzugt, bei denen die Wahrscheinlichkeit sehr gering ist, dass sich mehrere Bänder gleichzeitig ausbreiten.

Dennoch wurden mehrere, gleichzeitig propagierende Bänder beobachtet. Z.B. kam es bei einer Bandbildung in Probenmitte (Probe 3 in Arbeit [3]) zu einer Aufspaltung in zwei Bänder, die sich anschließend in entgegengesetzte Richtungen ausbreiteten. Falls die Geschwindigkeit gleich groß ist, sollte die effektive Bandbreite die Summe der Breite der beiden Einzelbänder sein.

4.1.1.2 Reines Typ-A-Band

In Abb. 4.1a ist der für Typ-A-Bänder typische Verlauf von Spannung und Dehnung während der Bandentstehung und -ausbreitung vor dem Hintergrund der Bandtrajektorien dargestellt. Die Oberseite der Trajektorien entspricht der linken und die Unterseite der rechten Seite von Probe bzw. Thermokamerabild. Die PLC-Bänder entstehen am Übergang vom Probenkopf zum Probensteg und breiten sich in diesem Beispiel von oben nach unten aus. Die bei höherer Dehnung entstehenden Bänder führen zu einem stärkeren Temperaturanstieg und erscheinen dadurch im Thermokamerabild heller. Dies bedeutet, dass das von einem Band verursachte Dehnungsinkrement mit ansteigender Dehnung zunimmt. Bei einer Dehnung von etwa 2,5% unterbricht ein Band erstmalig seine Ausbreitung (Abb. 4.1b). Nach einer kurzen Zeit nimmt es seine Bewegung an derselben Position (Gedächtniswirkung) wieder auf.

Während die Trajektorien anfänglich nahezu Geraden sind, nimmt ihre Neigung mit zunehmender Dehnung und Zeit exponentiell ab. Das bedeutet, dass sich die durchschnittliche Bändergeschwindigkeit verringert. Diese Tendenz ist auch gut in Abb. 4.2 zu erkennen. Andererseits nimmt die durchschnittliche Bandgeschwindigkeit mit der mittleren Dehnrates einem Potenzgesetz folgend zu (in einem gegebenen Bereich plastischer Dehnung). Der Exponent dieses Potenzgesetzes wurde in der Arbeit [3] experimentell mit 0,72 bestimmt.

Für die Messung der mittleren Dehnung und deren Rate war ein Dehnungsmessstreifen in Probemitte aufgebracht worden. Wie in Abb. 4.1a gezeigt, leitet ein PLC-Band einen Dehnungsanstieg ein, wenn es in den Bereich des Dehnungsmessstreifens einläuft. Zunächst sind die Dehnungsanstiege von nur geringen Spannungsschwankungen begleitet (Spannungskurve in Abb. 4.1a). Ihre Amplitude nimmt mit anwachsender Dehnung zu (vgl. Abb. 4.1b-d). Im Bereich des Maximums jeder Spannungsschwankung entsteht ein PLC-Band und beginnt sich entlang der Richtung auszubreiten, wo Spannungsgradienten vorhanden sind. In Abb. 4.1c wird die Bandausbreitung häufiger unterbrochen als in Abb. 4.1b. Beiden Teilbildern ist gemeinsam, dass die PLC-Bänder nach der Unterbrechung ihre Ausbreitung in die gleiche Richtung fortsetzen. Dies ändert sich in Abb. 4.1d. Hier entstehen neue PLC-Bänder in der Mitte der Probe, die sich in entgegengesetzten Richtungen ausbreiten. Diese Bänder unterbrechen ihre Ausbreitung häufiger und legen nur kurze Strecken zurück. Dementsprechend treten häufiger Spannungssprünge auf.

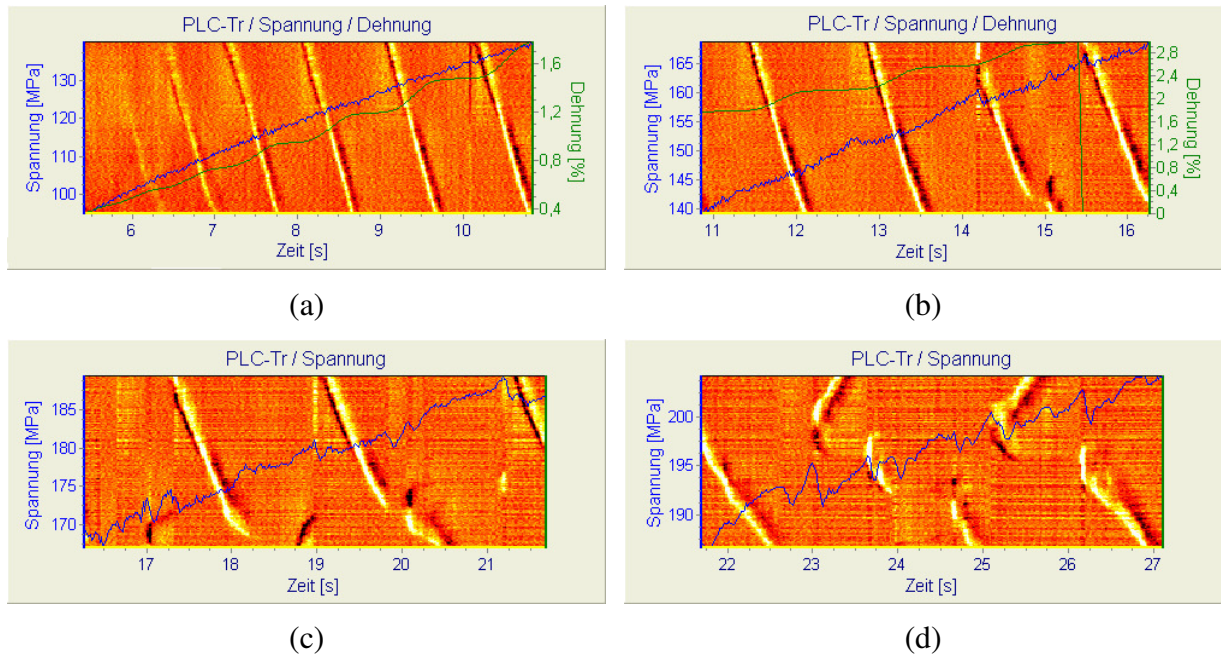


Abb. 4.1: Zeitlicher Verlauf von Spannung (blau) und Dehnung (grün) während der Entstehung und Ausbreitung von PLC-Bändern bei einer externen Dehnrates von $d\varepsilon/dt = 0,27 \text{ %/s}$, im Hintergrund Bilder der Bändertrajektorien

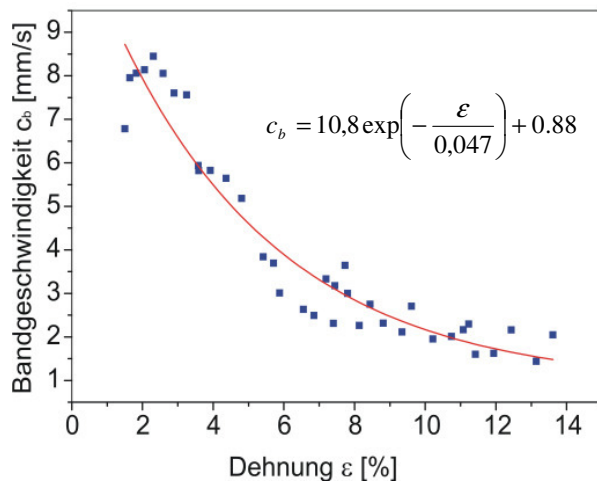
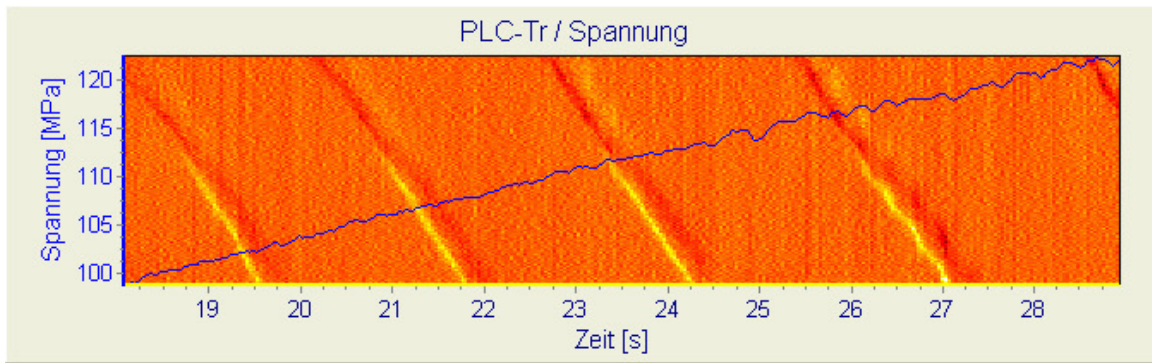


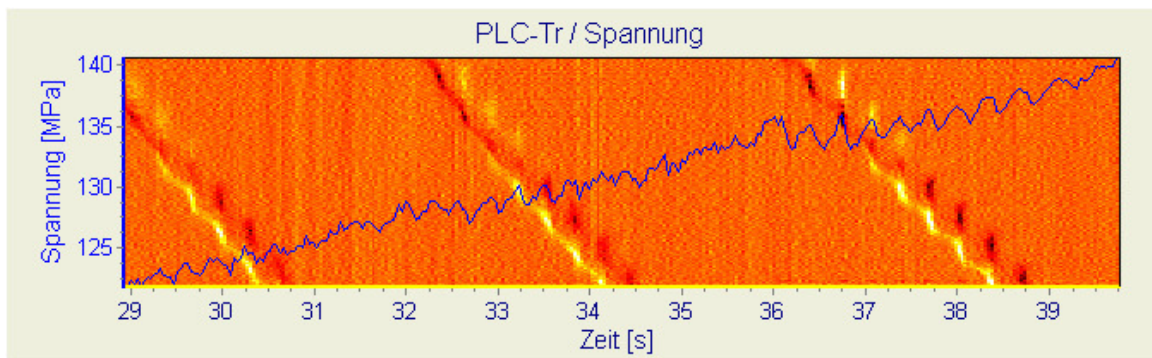
Abb. 4.2: Bandgeschwindigkeit als Funktion der Dehnung bei einer Dehnrates von $2,7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

4.1.1.3 Wechsel vom Typ-A- zum Typ-B-Band

Ein anderes Phänomen ist der Wechsel von Typ-A- zum Typ-B-Band. Dies ist in Abb. 4.3 am Beispiel einer Probe veranschaulicht, die mit einer mittleren Dehnrates von $d\varepsilon/dt = 6,1 \times 10^{-4} \text{ /s}$ verformt worden ist. In der Phase niedriger Dehnung (Abb. 4.3a) breiten sich nacheinander mehrere PLC-Bänder kontinuierlich aus. Das ist charakteristisch für die Typ-A-Bänder. Wird die Probe weiter gezogen, werden die propagierenden PLC-Bänder leicht instabil und ihre Geschwindigkeit beginnt zu oszillieren. In Abb. 4.3b ist dieser Oszillationsmodus mehr und mehr offensichtlich. Dort ist auch ersichtlich, dass die Geschwindigkeitsoszillation mit einer entsprechenden Oszillation der Spannung verbunden ist.



(a)



(b)

Abb. 4.3: Spannungs-Zeit-Kurven vor dem Hintergrund der Bandtrajektorien mit einem Wechsel vom Typ-A- (a) zum Typ-B-Band (b) bei einer Probe, die mit einer mittleren Dehnrate $d\varepsilon/dt = 6.1 \times 10^{-4}/s$ verformt worden ist

4.1.1.4 Reines Typ-B-Band

Reine Typ-B-PLC-Bänder entstehen, breiten sich über sehr kurze Distanzen aus und verschwinden danach wieder. In Abb. 4.4 wird dies anhand der Spannungs-Zeit- und Dehnungs-Zeit-Kurve sowie der Bandtrajektorien veranschaulicht. Die Spannung, die kontinuierlich aufgezeichnet wird, oszilliert praktisch ohne Unterbrechung. Dementsprechend findet ein

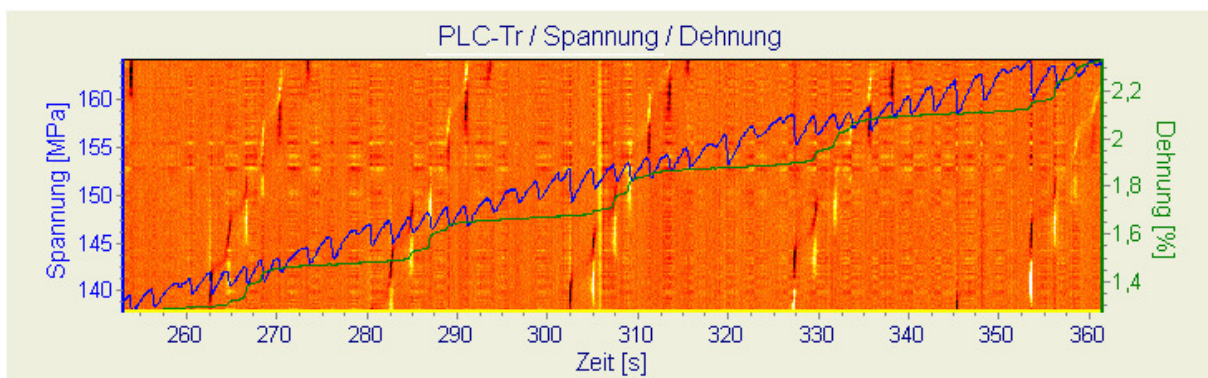


Abb. 4.4: Spannungs-Zeit- und Dehnungs-Zeit-Kurve vor dem Hintergrund der Bandtrajektorien bei der Entstehung und Ausbreitung reiner Typ-B-Bänder in einer Probe, die mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 0,954 \mu\text{m} / s$ verformt worden ist

ständiger Wechsel zwischen dem Entstehen, dem Ausbreiten und dem Verschwinden von Bändern statt. Jeder Spannungsoszillation entspricht eine Bandbildungs- und -

ausbreitungsphase. Zu jedem Spannungsabfall gibt es allerdings keine Dehnungsstufe und keine Bandtrajektorie. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nur diejenigen PLC-Bänder als Stufe der Dehnungskurve und Trajektorie erscheinen, die im Bereich des Dehnungsmessstreifens bzw. des Thermokamerabildausschnitts entstehen, sich ausbreiten oder verschwinden.

4.1.1.5 Eigenschaften unter verschiedenen Dehnraten

Der aus verschiedenen Experimenten unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeit ermittelte lineare Zusammenhang zwischen der globalen Dehnrates $d\varepsilon/dt$ und Vorschubgeschwindigkeit dl/dt ist in Abb. 4.5 dargestellt. Der Anstieg dieser Kurve ist ein Maß dafür, wie stark die Verformung in der Probe konzentriert ist. Der Kehrwert K dieses Anstiegs

$$K = \frac{dl/dt}{d\varepsilon/dt} = \frac{1}{0.0869} \text{ mm} = 11,51 \text{ mm}$$

wird hier als äquivalente Verformungslänge für die in den Experimenten angewandte Probeform eingeführt. Dieser Parameter reflektiert die Größe des sich vom linken zum rechten Übergang zwischen Probensteg und Probenkopf erstreckenden Verformungsgebiets. Da der parallele Steg nur eine Länge von 2 mm besitzt, reicht das Verformungsgebiet weit in die beiden Übergangsbereiche hinein. Dieser Parameter wird im Abschnitt 4.2.2.1.3 weiter diskutiert.

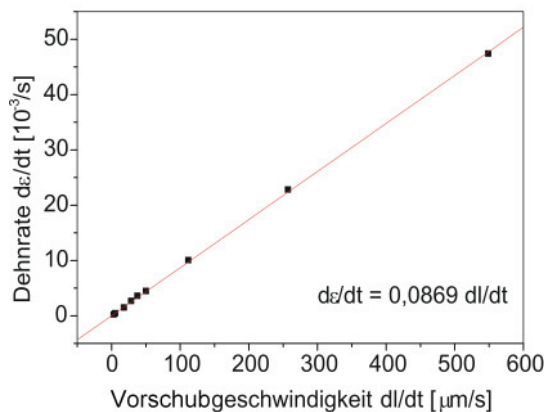


Abb. 4.5: Linearer Zusammenhang zwischen der globalen Dehnrates $d\varepsilon/dt$ und Vorschubgeschwindigkeit dl/dt

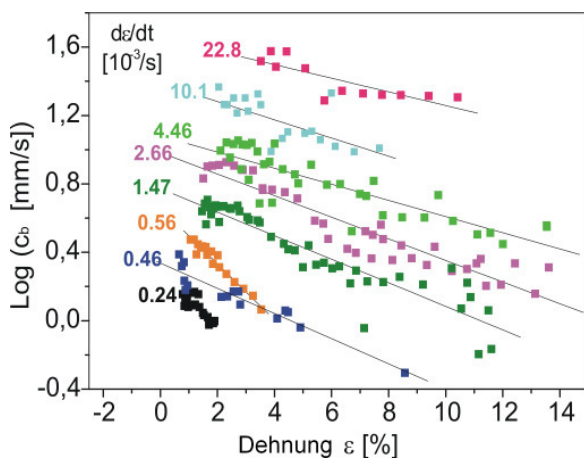


Abb. 4.6: Abhängigkeit der mittleren Bandgeschwindigkeit der Bänder von der Dehnung bei Experimenten unterschiedlicher Dehnraten.

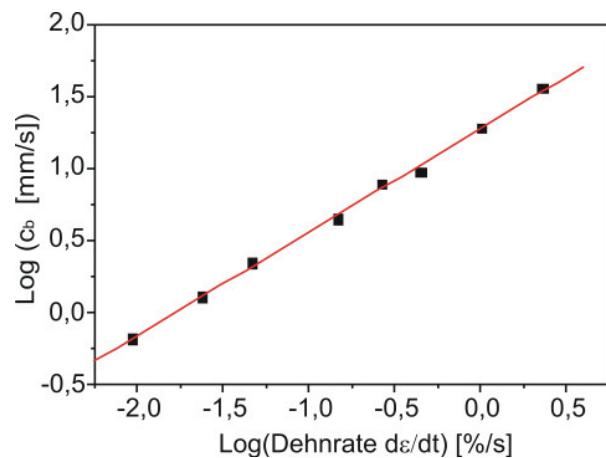


Abb. 4.7: Mittelwert der Geschwindigkeit c_b der ersten fünf Bänder jeder Probe als Funktion der Dehnrates, doppelt logarithmische Abtragung.

In Abb. 4.6 ist die Abhängigkeit der mittleren Bandgeschwindigkeit c_b aller Bänder der untersuchten Proben von der Dehnung dargestellt. Da die Dehnungsmessstreifen nur bis zum einem Dehnungsmaximalwert von 3% messen können, wird die in Abb. 4.5 dargestellte Beziehung zur Umwandlung der ebenfalls gemessenen Probeverlängerungswerte in Dehnungswerte benutzt.

Abb. 4.6 bestätigt die Feststellung, dass die mittlere Bandgeschwindigkeit generell im Verlauf der Dehnung abnimmt. Dies findet allerdings auf einem unterschiedlichen, von der Dehnrage abhängigen Bandgeschwindigkeitsniveau statt. Um diese Abhängigkeit der Bandgeschwindigkeit von der Dehnrage zu demonstrieren, wurde der Geschwindigkeitsmittelwert der ersten 5 nachweisbaren Bänder als Funktion der mittleren Dehnrage für alle Proben betrachtet, an denen die Dehnung mittels Dehnungsmessstreifen gemessen werden konnte (Abb. 4.7).

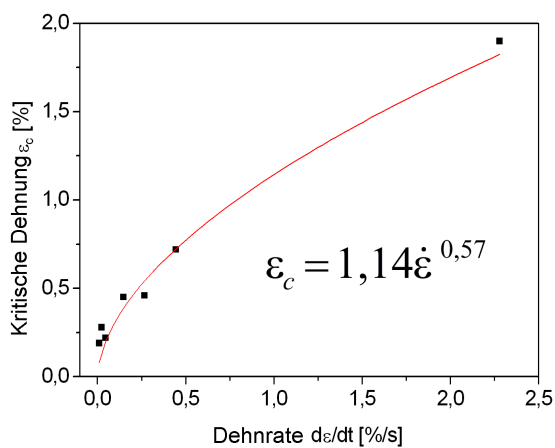


Abb. 4.8: Kritische Dehnung für das Einsetzen der PLC-Bandbildung als Funktion der Dehnrage

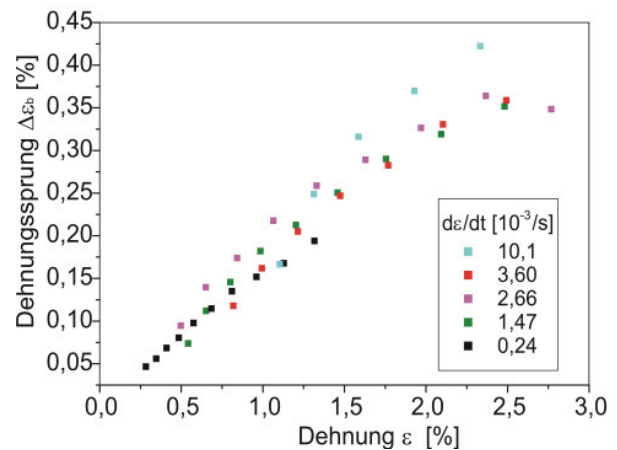


Abb. 4.9: Fünf für den untersuchten Bereich der globalen Dehnrage repräsentative Dehnungssprung-Dehnung-Kurven

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch die kritische Dehnung als Funktion der globalen Dehnrage in einem Dehnragebereich oberhalb von $10^{-4} s^{-1}$ untersucht. Hierbei handelt es sich um die Dehnung, bei der die ersten PLC-Bänder auftreten. Der in Abb. 4.8 dargestellte Anstieg der kritischen Dehnung bei zunehmender Dehnrage wird als „normales Verhalten“ bezeichnet. Der hier festgestellte Zusammenhang kann durch einen Potenzansatz mit dem Exponenten 0,57 beschrieben werden. In der Arbeit von Balik [84] wurde für die Al-Legierung AlMg3 eine Dehnrage von $2 \times 10^{-5} s^{-1}$ ermittelt. Unterschreitet die Dehnrage einen bestimmten Wert, nimmt die kritische Dehnung bei weiter abnehmender Dehnrage zu. Dies wird als „inverses Verhalten“ bezeichnet.

Eine Untersuchung zur Abhängigkeit des Dehnungssprungs $\Delta\epsilon_b$ von der globalen Dehnung ergab eine stetig mit der Dehnung ansteigende Kurve mit einer leicht konkaven Krümmung (Abb. 4.9). Die Anzahl der Messpunkte verringert sich mit zunehmender globaler Dehnrage. Dies ist auf eine Reduzierung der Zahl der entstehenden (nachweisbaren) Bänder und auf eine höhere kritische Dehnung zurückzuführen. Abb. 4.9 zeigt im Vergleich mit den Ergebnissen von Ziegenbein [67] eine geringe Abhängigkeit des Dehnungssprungs $\Delta\epsilon_b$ von der Dehnrage $d\epsilon/dt$. Bei Ziegenbein nimmt der Dehnungssprung $\Delta\epsilon_b$ im Dehnrageintervall von 7×10^{-4} bis $7 \times 10^{-2} \%/s$ um 0,35% zu. Die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen haben ebenfalls eine Zunahme des Dehnungssprungs $\Delta\epsilon_b$ mit der Dehnrage $d\epsilon/dt$ ergeben. Dieser Dehnungssprunganstieg ist bei einer Variation der Dehnrage $d\epsilon/dt$ um 2 Größenordnungen geringer als bei Ziegenbein. Eine mögliche Erklärung ist, dass Ziegenbein bei geringeren Dehnraten und an einem anderen Werkstoff (CuAl) gemessen hat.

4.1.1.6 Die Morphologie der PLC-Bänder

Zur Bewertung der Bandmorphologie und für die Untersuchungen der Bandbildung eignen sich am besten flächenhaft arbeitende Sensoren. In dieser Arbeit wurden zwei derartige Sensoren eingesetzt - die IR-Kamera und eine schnelle CCD-Kamera.

Die in Abschnitt 4.1.3.1 vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die PLC-Bandbildung häufig in Regionen beobachtet wird, in denen Spannungskonzentrationen oder hohe Spannungsgradienten vorhanden sind. In Abb. 4.10 ist ein PLC-Band zu sehen, welches sich von links nach rechts bei einer externen Dehnrates von $0,27\%/s$ ausbreitet. Der Winkel, den das Band mit der Probenlängsachse bildet, beträgt etwa 60° . Die in Abb. 4.10c, d sichtbare Änderung des Bandwinkels ist auf den Wettbewerb zwischen den beiden Richtungen maximaler Scherspannung zurückzuführen. Dies Phänomen wird häufig bei hoher Dehnung beobachtet.

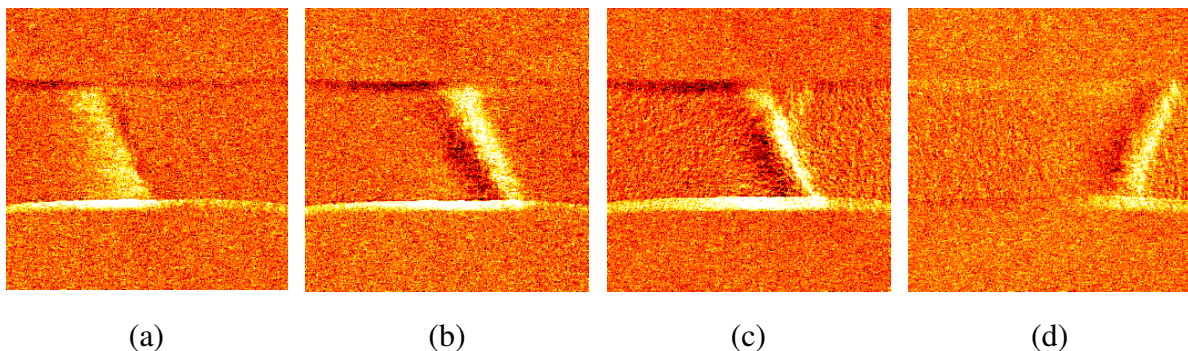


Abb. 4.10: PLC-Bandausbreitung mit Änderung des Bandwinkels bei einer externen Dehnrates von $d\varepsilon/dt = 0.27\%/s$.

In Abb. 4.11 sind Dehnungs- und Dehnratesverteilungen dargestellt, die aus Bildserien berechnet worden sind, die zuvor mit einer Hochgeschwindigkeits-CCD-Kamera aufgenommen wurden. Sichtbar ist ein von rechts nach links propagierendes PLC-Band. In Abb. 4.11a tritt das Band in den Beobachtungsbereich ein. Es wird deutlich, dass die Verformung innerhalb des PLC-Bands nicht gleichmäßig verteilt ist. Ursache hierfür ist die Werkstoffinhomogenität. An der Vorderseite des PLC-Bands treten Zonen elastischer Entlastung auf (blau und schwarz im Dehnratesbild). Bei $t = t_1$ ist das PLC-Band ein schmaler Bereich in der Mitte des Messfelds. Zum Zeitpunkte t_2 verschwindet das Band im Dehnratesbild, da sich die Dehnung nicht mehr verändert. Demgegenüber ist das Band zu diesem Zeit in der Dehnungsverteilung noch sichtbar, weil die vom Band verursachte Dehnung eine bleibende Dehnung ist. Anhand des Vergleichs von Dehnungs- und Dehnratesverteilung zum Zeitpunkt t_2 wird deutlich, dass die Dehnungsbilder nicht zur Identifizierung von Bändern und zur Vermessung von Bandmerkmalen geeignet sind.

Mit der in Abschnitt 3.1.6.2 beschriebenen Auswertemethode für Thermokamerabilder können sowohl Temperatur- als auch Dehnratesfelder ermittelt werden. Ein Beispiel dazu ist in Abb. 4.12 dargestellt. Es bezieht sich auf ein Typ-B-Band, das sich von links nach rechts ausbreitet. Die beiden Felder werden für drei Zeitpunkte t_0 , t_1 , t_2 veranschaulicht. Der Vergleich der beiden Felder zeigt für alle Zeitpunkte eine perfekte Übereinstimmung hinsichtlich der Bänderorientierung. Bei der Bandposition gibt es eine Phasendifferenz zwischen dem Dehnrates- und dem Temperaturratefeld. Die Erklärung dafür ist die Vorhandensein eines Temperaturprofils in Richtung der Probenlängsachse (horizontal im Bild). Die Temperatur im Mittelbereich ist höher als an den beiden Seiten, weil die Wärme zunächst zwar gleichmäßig, über den Probensteg verteilt entsteht, an den Rändern aber schneller abfließt. Dieser Trend wird bei höherer Verformung weiter verstärkt, da sich die plastische Verformung zunehmend in Probenmitte konzentriert. Befindet sich das PLC-Band in der linken Probenhälfte (t_0), bewegt sich das Band im Temperaturratebild langsamer als das PLC-Band, dessen tatsächliche Position

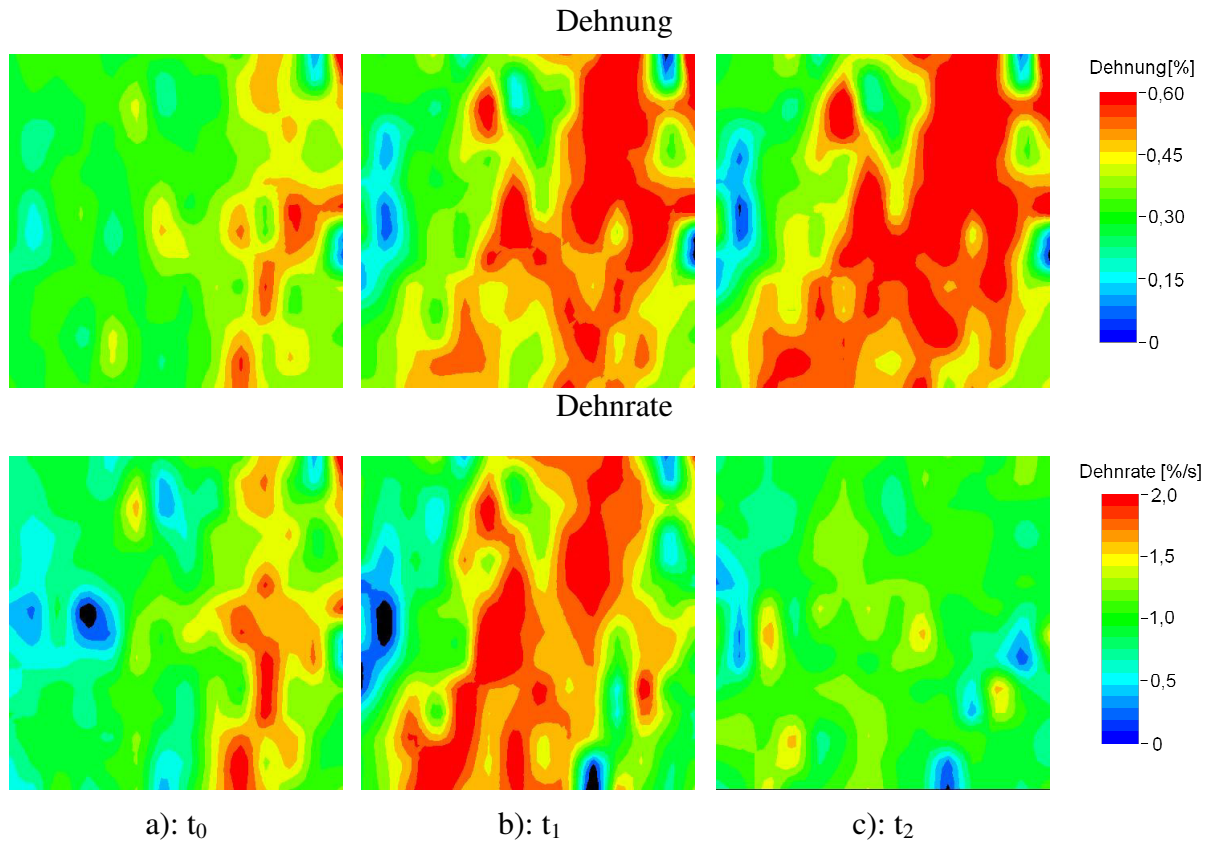


Abb. 4.11: Ermittlung von Dehnungs- und Dehnratenfeldern durch Anwendung des in Abschnitt 3.1.5 beschriebenen Bildkorrelationsalgorithmus auf Bildserien, die mit einer Hochgeschwindigkeits-CCD-Kamera aufgenommen worden sind (512×512, 1000Hz). Oben: die Dehnungsverteilung, unten: Dehnratenverteilung bei der ein von rechts nach links propagierendes PLC-Band sichtbar ist. (Probe 140)

nur im Dehnratenbild zu erkennen ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Ausbreitungsrichtung des PLC-Bands der Wärmeflussrichtung (von rechts nach links) entgegengesetzt ist. Befindet sich das PLC-Band in der rechten Probenhälfte (t_2), stimmen die Ausbreitungsrichtung des PLC-Bands und die Wärmeflussrichtung überein. In diesem Fall läuft das im Temperaturratebild sichtbare Band scheinbar schneller als das im Dehnratenbild dargestellte Band.

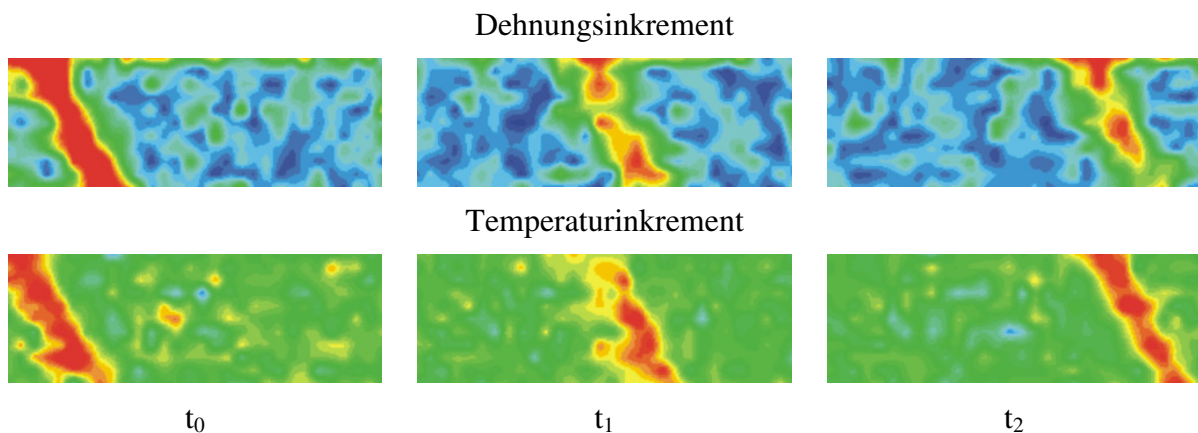


Abb. 4.12: Mit dem Bilderkorrelationsalgorithmus auf Basis von IR-Kamera-Bildserien berechnete Verteilungen der Dehnraten (oben) und der entsprechenden Verteilungen der Temperaturraten (unten) zu den Zeitpunkten t_0 , t_1 und t_2

Auch hier ist wiederum zu berücksichtigen, dass die Bandposition nur im Dehnratenbild richtig wiedergegeben wird. Für eine Berechnung der Phasendifferenz ist die Kenntnis verschiedener thermischer Parameter (spezifische Wärme ρc , Wärmeleitungskoeffizient k) und der Bandgeschwindigkeit erforderlich. Eine detaillierte Diskussion und Simulation dieses Sachverhalts findet in Abschnitt 4.2.1.4 statt. Im Experiment wird diese Phasendifferenz vernachlässigt.

4.1.2 Vergleich des Ausbreitungsverhaltens von PLC- und Lüdersbändern

4.1.2.1 Lüders-Band

Nach Erreichen der Elastizitätsgrenze beginnt die plastische Verformung bei kleinen Korngrößen mit der Entstehung und Ausbreitung eines Lüdersbands. Hierbei handelt es sich um eine einzelne Front der Verformung. Die Lüdersbänder propagieren entlang der Achse der Probe ohne Dehnungsverfestigung und generieren einen Lüdersbanddehnungssprung $\Delta \epsilon_{\text{Lüders}}$ innerhalb eines kleinen Bereichs hinter der Verformungsfront [66]. Phänomenologisch gesehen gehören die Lüdersbänder zu den Dehnungserweichungsinstabilitäten im Unterschied zur Dehnratenenerweichungsinstabilität der PLC-Bänder. Die signifikante Korngrößenabhängigkeit des Lüdersbandphänomens wird hauptsächlich auf ein einzelnes Gleitsystem zurückgeführt: Die Spannung, die überwiegend von einem einzelnen Gleitsystem in einzelnen bevorzugten Körnern generiert wird, wird auf die umliegenden Körner mittels Kompatibilitätsspannung übertragen [85][86]. Dies wird desto signifikanter, je kleiner die Korngröße ist. In der Arbeit von Ziegenbein [67] wird festgestellt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lüdersbänder bedeutend kleiner als die der PLC-Bänder ist, da das Dehnungssprung innerhalb des Lüdersbands größer ist.

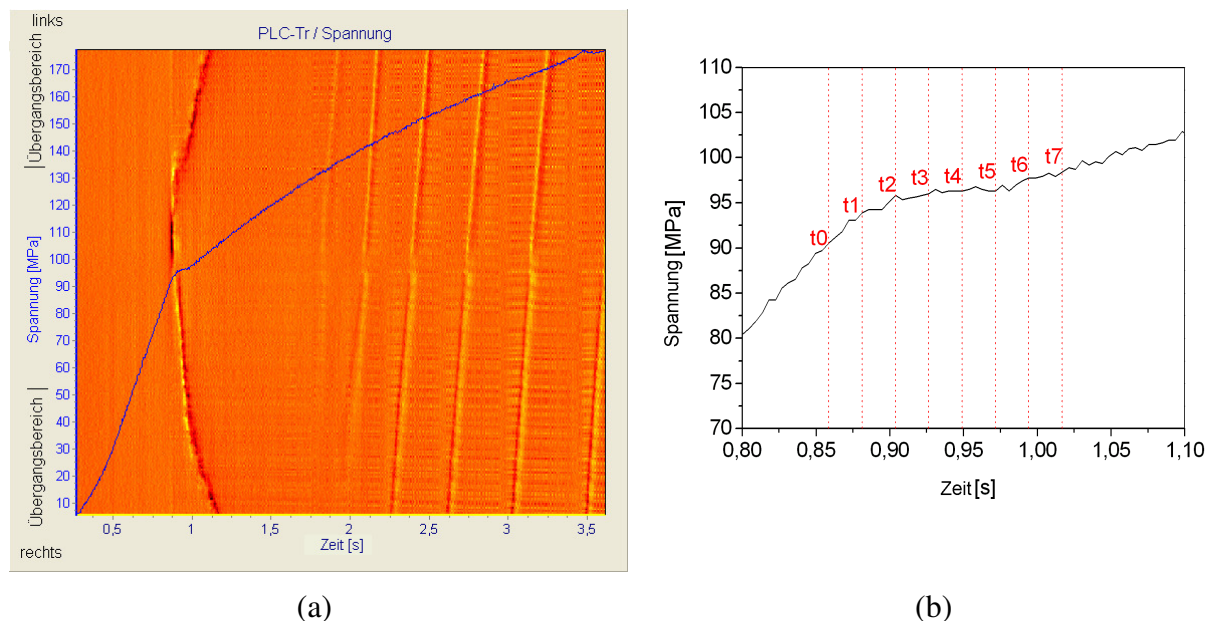


Abb. 4.13: Spannungs-Zeit-Kurve und Trajektorien der beiden Fronten eines Lüdersbands und mehrerer PLC-Bänder (a) sowie vergrößerter Ausschnitt der Spannungs-Zeit-Kurve für das Zeitintervall der Lüdersbandausbreitung (b), zu den dort markierten Zeitpunkte t_0 - t_7 wird in Abb. 4.14 die Morphologie der Lüdersbandfronten dargestellt, Vorschubgeschwindigkeit des Experiments bei $v = 111,68 \mu\text{m/s}$

In Abb. 4.13 sind die Bildung und Ausbreitung von einem Lüders- und mehreren PLC-Bändern anhand der Bandtrajektorien und der Spannungs-Zeit-Kurven dargestellt. Das Lüdersband wird am Fließplateau der Spannungs-Zeit-Kurve (Abb. 4.13a) bzw. links der Probenmitte im Zeitintervall t_0 - t_1 gebildet (Abb. 4.14a+b) und breitet sich in beide Richtungen

aus. Die Dehnungssprünge (auch Dehnungskonzentrationen genannt) sind größer als die Dehnungssprünge der PLC-Bänder. Ein Vergleich der Neigung der Trajektorien der beiden Lüdersbänder mit denen der PLC-Bänder zeigt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lüdersbänder bedeutend kleiner als die der PLC-Bänder ist. Wenn die Lüdersbänder den Übergang zum Probenkopf erreichen, nimmt die Geschwindigkeit weiter ab.

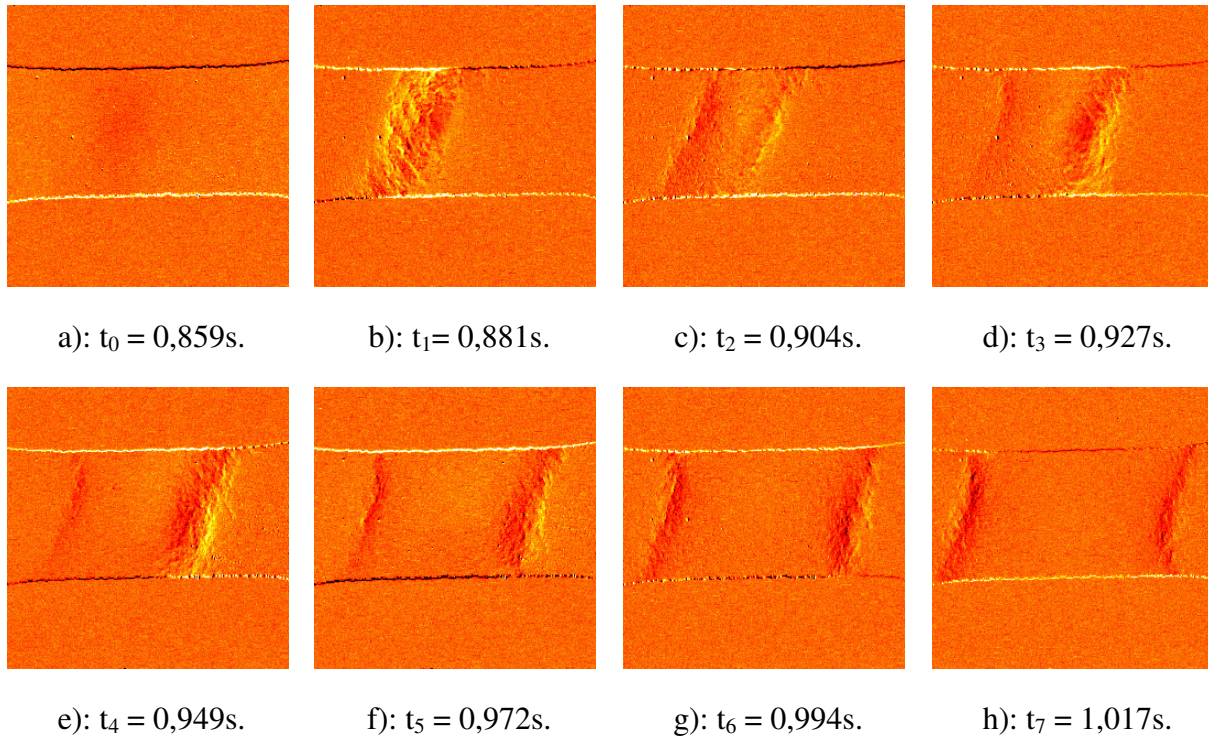


Abb. 4.14: Morphologie eines Lüdersbands und seiner beiden Fronten, die sich entgegengesetzt in Richtung der Probenköpfe ausbreiten, dargestellt zu den Zeitpunkten $t_0 - t_7$, vgl. Spannungs-Zeit-Kurve in Abb. 4.13b, Vorschubgeschwindigkeit des Experiments bei $v = 111,68 \mu\text{m/s}$

Abb. 4.14 stellt die Morphologie des Lüdersbands und seiner beiden Verformungsfronten zu den in Abb. 4.13b gekennzeichneten Zeitpunkten dar. Am Anfang (zum Zeitpunkt t_0 , Abb. 4.14a) konzentriert sich die Spannung im Lüdersbandbildungsbereich. Da die Spannungserhöhung aufgrund des thermo-elastischen Effekts zu einer Temperaturverringerung führt, ist dieser dunkler als seine Umgebung. Nachfolgend wird in diesem Bereich ein Lüdersband gebildet (Abb. 4.14b). Das Lüdersband ist breiter als die PLC-Bänder und spaltet sich schnell in zwei Verformungsfronten auf, die sich in entgegengesetzter Richtung ausbreiten (Abb. 4.14c~h). Es soll hervorgehoben werden, dass die Ausbreitung der beiden Fronten mit einer sich ständig verringernden Geschwindigkeit bis hin zum Übergangsbereich erfolgt und über den Zeitpunkt hinaus andauert, an dem die Fließspannung in die Phase der plastischen Verfestigung eintritt (zwischen t_5 und t_6 , vgl. Abb. 4.13b).

Die kritische Dehnung für die Bildung der ersten PLC-Bänder wurde sehr häufig in der Literatur diskutiert [87][88]. Aus den experimentellen Befunden dieser Arbeit ist zu schließen, dass die kritische Dehnung in starkem Maße von der Bildung und Ausbreitung der Lüdersbänder abhängt. Der Zusammenhang zwischen den Lüdersbändern und den PLC-Bändern wird in nächstem Abschnitt diskutiert.

4.1.2.2 Abspaltung mehrerer PLC-Bänder von einem Lüdersband

Bei dem in Abb. 4.14 dargestellten Experiment verlassen die beiden Lüdersbänder den Beobachtungsbereich, der in seiner Größe eingegrenzt und normalerweise in der Mitte des Probenstegs lokalisiert ist. Um die Ausbreitung der Lüdersbänder am Übergang zwischen Probensteg und Probenkopf beobachten zu können, wurde in dem jetzt diskutierten Experiment als Gesichtsfeld der Thermokamera ein Übergangsbereich ausgewählt. In Abb. 4.15 werden

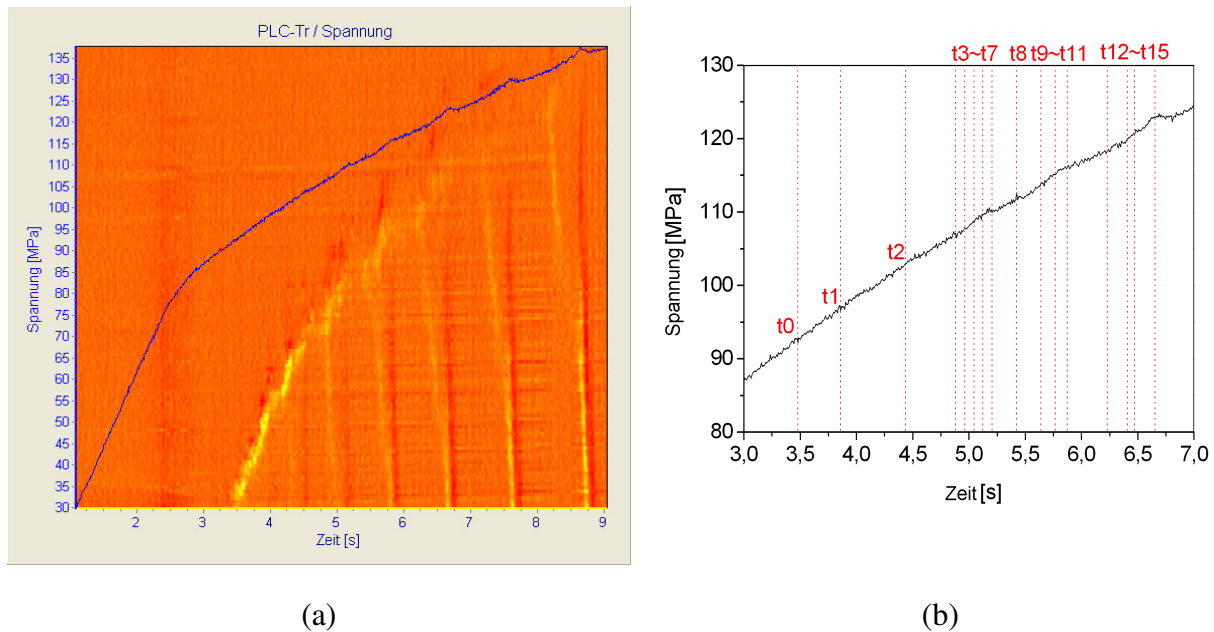


Abb. 4.15: Spannungs-Zeit-Kurve und Bandtrajektorien (a) sowie vergrößerter Ausschnitt der Spannungs-Zeit-Kurve für das Zeitintervall der Abspaltung mehrerer PLC-Bänder von einem Lüdersband (b), an den dort markierten Zeitpunkte $t_0 - t_{15}$ wird in Abb. 4.16 die Morphologie des Lüdersbands und der abgespaltenen PLC-Bänder dargestellt, Vorschubgeschwindigkeit des Experiments bei $v = 28.63 \mu\text{m/s}$

die Bandtrajektorien und die Spannungs-Zeit-Kurve gleichzeitig gezeigt. Dies hat den Vorteil, dass die Ausbreitungsposition der Bänder und die Spannungsentwicklung simultan betrachtet werden können. Die besonders intensive Trajektorie in Abb. 4.15a ist die des Lüdersbands. Es wird deutlich, dass während der Lebenszeit dieses Lüdersbands mehrere PLC-Bänder durch Abspaltung entstehen, sich ausbreiten und wieder verschwinden. Ihre Trajektorien sind wesentlich schwächer und steiler als die des Lüdersbands.

In Abb. 4.16a~p ist die Morphologie aller Bänder dargestellt. Die Teilbilder a~c zeigen zunächst die Ausbreitung des Lüdersbands, die - wengleich es sich um ein anderes Experiment handelt - als Fortsetzung der Ausbreitung eines in Abb. 4.14 dargestellten Lüdersbands betrachtet werden kann. Zum Zeitpunkt $t=t_3$ (Abb. 4.16d) beginnt der Abspaltungsprozess.

Erst nachdem sich diese PLC-Bänder für eine kurze Zeit ausgebreitet haben (Abb. 4.16d,e,f,g; j,k,l; m,n,o), erscheinen Sprünge in der Spannungs-Zeit-Kurve (Abb. 4.15b t_7 , t_{11} , t_{15}). Die Amplituden dieser Sprünge sind nicht sehr herausragend. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass der im Übergangsbereich vorhandene Spannungsgradient eine weniger empfindliche Änderung der globalen Spannung verursacht als im parallelen Probensteg.

Ein eindeutiges Indiz für ein derartiges Phänomen ist, dass die Lüdersbänder im Übergangsbereich, wo ein Spannungsgradient vorliegt, in negative Richtung dieses Spannungsgradienten propagieren und die PLC-Bänder in entgegengesetzter Richtung. Eine mögliche Erklärung hierfür soll nachfolgend formuliert werden.

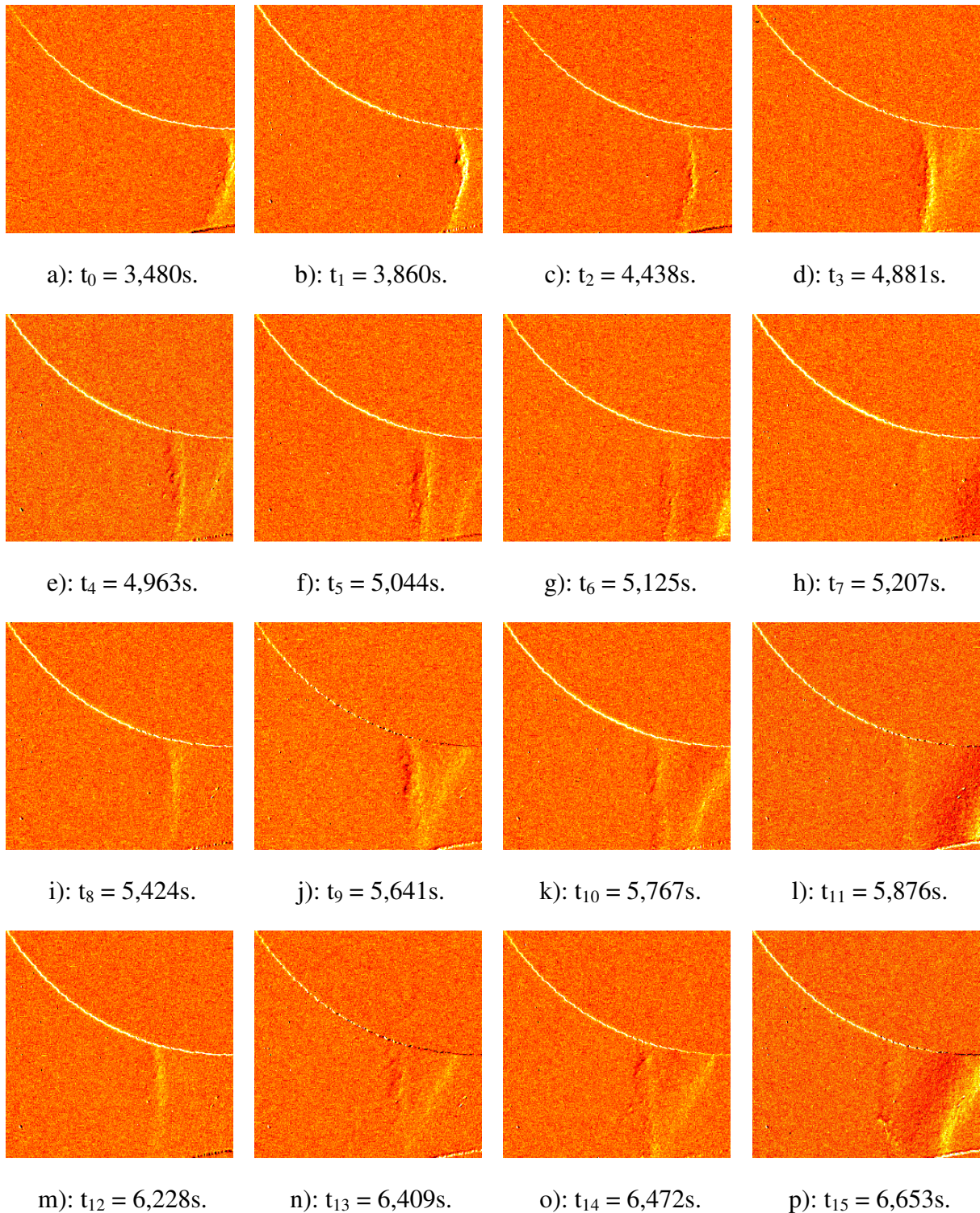


Abb. 4.16: Temperaturinkrementbilder zur Bildung und Ausbreitung eines Lüdersbands sowie zur Abspaltung mehrerer PLC-Bänder von diesem Lüdersband, dargestellt zu den Zeitpunkten $t_0 - t_{15}$, vgl. Spannungs-Zeit-Kurve in Abb. 4.15b

Wie Abb. 4.14 sichtbar, verlaufen die Fronten der Lüdersbänder, an denen die plastische Verformung vom Wert Null vor dem Lüdersband auf den Wert $\Delta \epsilon_{\text{Lüders}}$ (Lüdersbanddehnungssprung) hinter dem Lüdersband anwächst, unter einem Winkel von etwa 55° zur Zugspannungsrichtung (Abb. 4.14c). Nach dem Verlassen des parallelen Probenstegs ändert sich der

Winkel unter dem Einfluss der geänderten Geometrie in der unmittelbaren Umgebung auf nahezu 90° (Abb. 4.16a).

Während sich das Lüdersband ausbreitet, entsteht hinter dem Lüdersband die Verformungsfront eines PLC-Bands. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass an dieser Seite die notwendigen Bedingungen für das Auftreten und die Ausbreitung von PLC-Bändern erfüllt sind:

1. Es ist durch das Lüdersband eine Vielzahl, miteinander wechselwirkender, mobiler Versetzungen entstanden.
2. Dies führt zu einer ständig ansteigenden Spannung, die die *Entstehung* von PLC-Bändern fördert. Diese Phase wird als Nukleation bezeichnet.
3. Die Wartezeit dieser Versetzungen vor Hindernissen nimmt mit dem Abstand zum Lüdersband zu, wodurch sich ein Wartezeitengradient einstellt, der für die *Ausbreitung* des PLC-Bandes entgegen der Richtung des Lüdersbandes notwendig ist.

Wenn das PLC-Band am Lüdersband entsteht, wandelt sich das Phänomen, das der Bandbildung und -ausbreitung zugrunde liegt, von der Dehnungserweichung (Lüdersband) zur Dehnratenerweichung (PLC-Band).

4.1.3 Bildung und Ausbreitung der Bänder im Übergang vom Probensteg zum Probenkopf

Für die Vermeidung von PLC-Bändern ist es von großer Bedeutung zu verstehen, wie Bänder entstehen. An der ersten Phase der Verformung von Zugproben entstehen Bänder ausschließlich am Übergang zwischen Probensteg und Probenkopf. Deshalb wurde dieser Bereich besonders untersucht.

4.1.3.1 Die von Probekanten ausgehende Bildung der PLC-Bänder

In Abb. 4.17 ist die Spannungs-Zeit-Kurve Kurve einer Probe in der Phase des Auftretens eines PLC-Bands dargestellt, das an einer Kante im Bereich des Übergangs zwischen Probensteg und Probenkopf entsteht. Die Morphologie dieses Bands wird in Abb. 4.19 für die 4 Zeitpunkte t_0 - t_4 veranschaulicht, die in Abb. 4.17 markiert sind. Zu den Zeitpunkten t_0 und t_1 kommt es aufgrund der zunehmenden Spannung zur Vervielfältigung der Versetzungen und zu einer korrelierten Versetzungsbewegung entlang der Richtung der maximalen Schubspannung (ca. 50°). Die entsprechende makroskopische Erscheinung ist das schrittweise Wachstum des zunächst an der Probekante entstehenden Bands bis zur Probemitte. An dem Gipfel der Spannung (in der Nähe von t_2) erreicht das Band die andere Seite der Probe und der Bandbildungsprozess ist abgeschlossen. Anschließend beginnt das Band - begleitet von einem Intensitätsanstieg und einem Spannungsabfall - schnell nach rechts zu propagieren (vgl. Abb. 4.19d bei $t = t_3$). Diese Prozessfolge - bestehend aus einer Phase des Bandwachstums durch einen Querschnitt der Probe und der sich dann anschließenden Bandausbreitung quer zur Wachstumsrichtung - ist typisch für alle PLC-Bänder, die am Übergang zwischen Probensteg und Probenkopf entstehen. Nach dem Ende der Bandbildung kommt es ebenfalls zu einem kurzzeitigen Spannungsabfall. Im Verlauf der weiteren Bandausbreitung schließt sich dann ein erneuter Spannungsanstieg an. Nach dem Ende der Bandbildung kommt es ebenfalls zu einem kurzzeitigen Spannungsabfall. Im Verlauf der weiteren Bandausbreitung schließt sich dann ein erneuter Spannungsanstieg an.

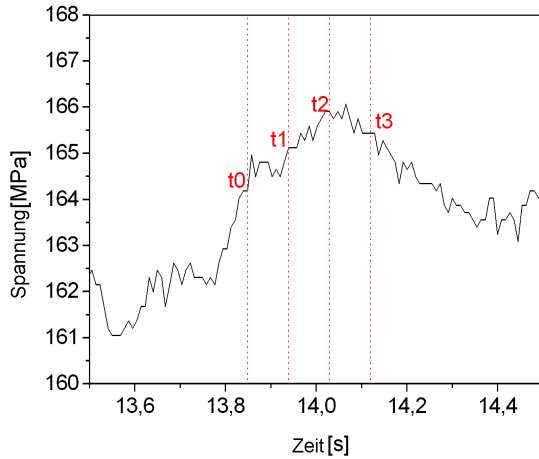


Abb. 4.17: Spannungs-Zeit-Kurve versehen mit den Zeitpunkten, für die in Abb. 4.19 die PLC-Band-Morphologie dargestellt ist

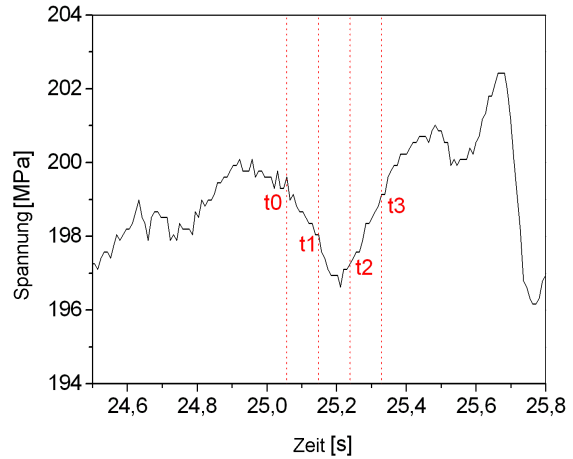
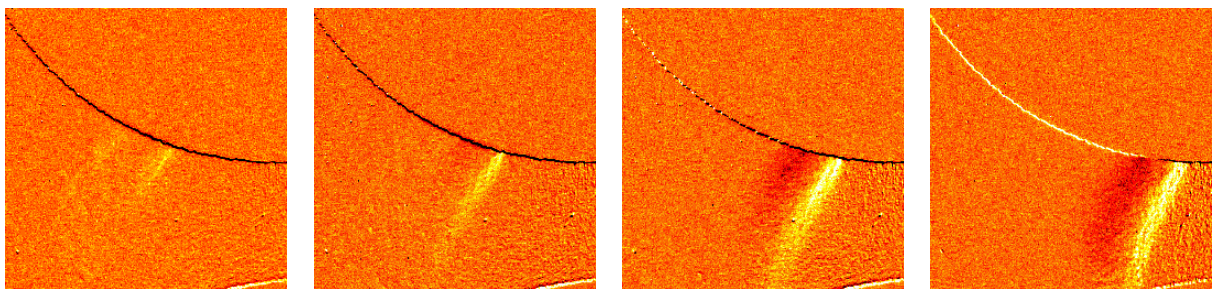


Abb. 4.18: Spannungs-Zeit-Kurve versehen mit den Zeitpunkten, für die in Abb. 4.20 die PLC-Band-Morphologie dargestellt ist



a): $t_0 = 13,85s$.

b): $t_1 = 13,94s$.

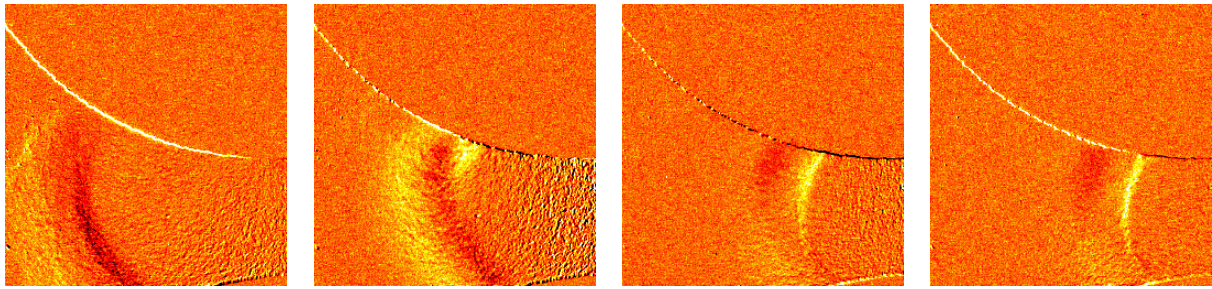
c): $t_2 = 14,03s$.

d): $t_3 = 14,12s$.

Abb. 4.19: Temperaturratebilder zur Bildung eines PLC-Bands quer zur Probenlängsrichtung und ausgehend von einer Probenkante, dargestellt zu den Zeitpunkten $t_0 - t_3$, vgl. Spannungs-Zeit-Kurve in Abb. 4.17

4.1.3.2 Bildung gekrümmter PLC-Bänder aufgrund des Dehnungsgradienten

In Abb. 4.20 wird die zeitlich versetzte Bildung zweier Bänder gezeigt, deren besonderes Merkmal ihre gekrümmte Form ist. Zum Zeitpunkt t_0 ist das Wachstum (die Bildung) des ersten Bands bereits abgeschlossen und seine Ausbreitung hat begonnen, wie der Spannungsabfall in Abb. 4.18 zeigt. Zum Zeitpunkt t_1 , bei dem das erste Band bereits eine größere Strecke zurückgelegt hat, beginnt sich ein zweites Band ausgehend von der oberen Probenkante zu bilden (Abb. 4.20b). Dadurch wird die Ausbreitung des ersten Bands gestoppt und der bis dahin stattfindende Spannungsabfall kehrt sich bis zum Zeitpunkt t_2 , bei dem das erste Band nahezu verschwunden, das neue Band aber noch nicht vollständig gebildet ist, in einen Spannungsanstieg um (Abb. 4.18). Da die Bildung (das Wachstum) des zweiten Bands bis zum Zeitpunkt t_3 noch nicht ganz abgeschlossen ist (Abb. 4.20d), hält der Spannungsanstieg über diesen Zeitpunkt hinaus an (Abb. 4.18).



a): $t_0 = 25,06s.$

b): $t_1 = 25,15s.$

c): $t_2 = 25,24s.$

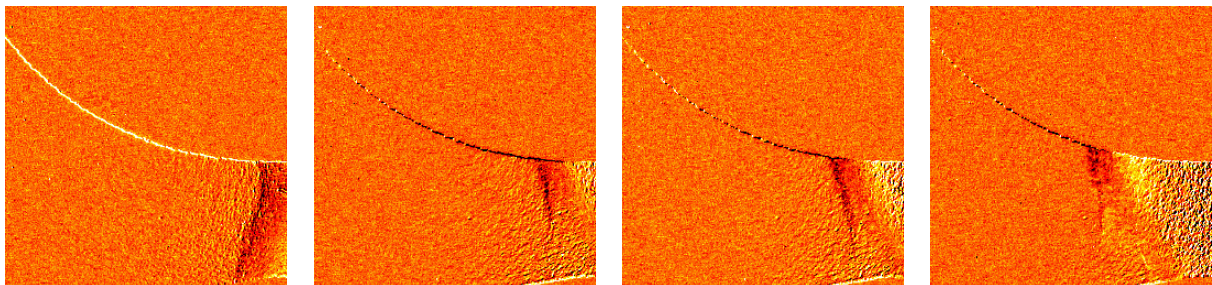
d): $t_3 = 25,33s.$

Abb. 4.20: Temperaturinkrementbilder zur Bildung zweier krummliniger PLC-Bänder quer zur Probenlängsrichtung und deren Ausbreitung, dargestellt zu den Zeitpunkten $t_0 - t_3$, vgl. Spannungs-Zeit-Kurve in Abb. 4.18. (Probe 39)

Als Ursache für den krummen Verlauf der beiden Bänder wird ein ausgeprägter, entsprechend gekrümmter Dehnungsgradient vermutet.

4.1.3.3 Verschwinden von PLC-Bändern am Übergang zwischen Kopf und Steg der Probe

In Abb. 4.21 ist die Ausbreitung eines Bands dargestellt, das rechts außerhalb des Beobachtungsbereichs entstanden ist und jetzt in den Übergang zwischen dem Probensteg und dem linken Probenkopf einläuft. Im Zeitintervall von t_0 bis t_2 verändert sich die Orientierung des Bands einmal (Abb. 4.21a-c). Anschließend breitet es sich außerhalb des Gesichtsfelds der Kamera weiter aus (Abb. 4.21d~g) und verschwindet schließlich (Abb. 4.21h).

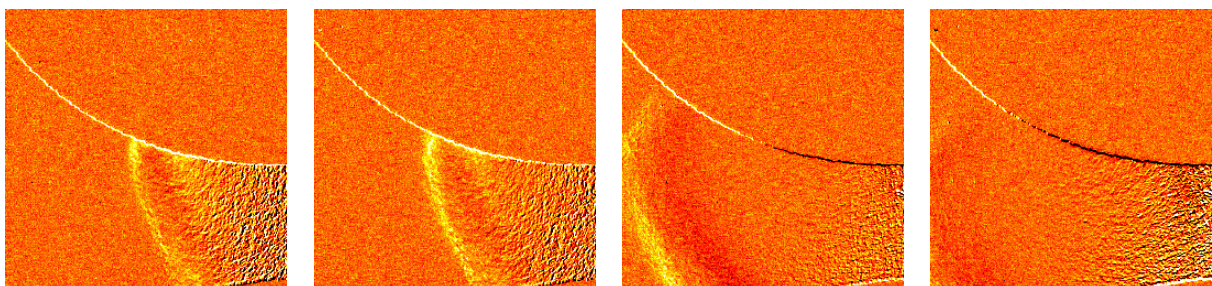


a): $t_0 = 33,83s.$

b): $t_1 = 33,99s.$

c): $t_2 = 34,06s.$

d): $t_3 = 34,34s.$



e): $t_4 = 34,50s.$

f): $t_5 = 34,73s.$

g): $t_6 = 34,86s.$

h): $t_7 = 34,94s.$

Abb. 4.21: Temperaturratebilder zum Verschwinden eines PLC-Bands nach dem Einlaufen in den Übergang zwischen Steg und Kopf der Probe, dargestellt zu den Zeitpunkten $t_0 - t_7$, vgl. Spannungs-Zeit-Kurve in Abb. 4.22

In diesem Fall (Abb. 4.21) breitet sich das Band - im Unterschied zu Abb. 4.16 - in Richtung des negativen Spannungsgradienten aus. Dies zeigt, dass der Spannungsgradient nicht für die Ausbreitungsrichtung der PLC-Bänder entscheidend ist.

Wie in Abschnitt 4.1.1 erwähnt, ist das Anhalten oder Verschwinden der PLC-Bänder in der Mitte der Probe von Spannungsgefälle begleitet. Das stimmt mit den hier diskutierten Beobachtungen vom Übergangsbereich insofern überein, als nach dem Zeitpunkt $t = t_7$ (Abb. 4.21h), bei dem das Band nahezu verschwunden ist, ein Spannungsabfall folgt (Abb. 4.22). Aus dem Vergleich des in Abb. 4.20 und in Abb. 4.21 dargestellten Bandverhaltens ist zu schlussfolgern, dass das Verschwinden der Bänder im Übergangsbereich gewissermaßen der inverse Prozess zur Bandentstehung in diesem Bereich ist.

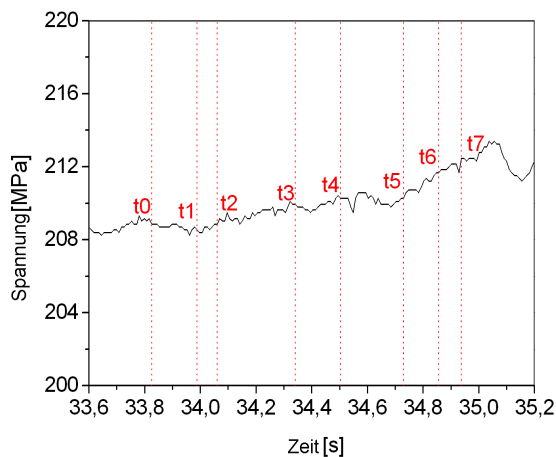


Abb. 4.22: Spannungs-Zeit-Kurve versehen mit den Zeitpunkten, für die in Abb. 4.21 die PLC-Band-Morphologie dargestellt ist

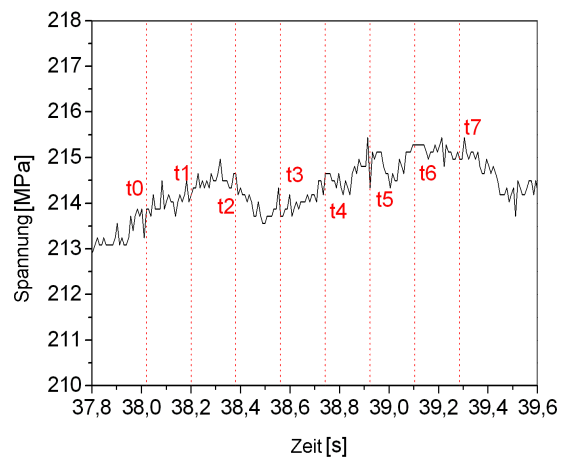
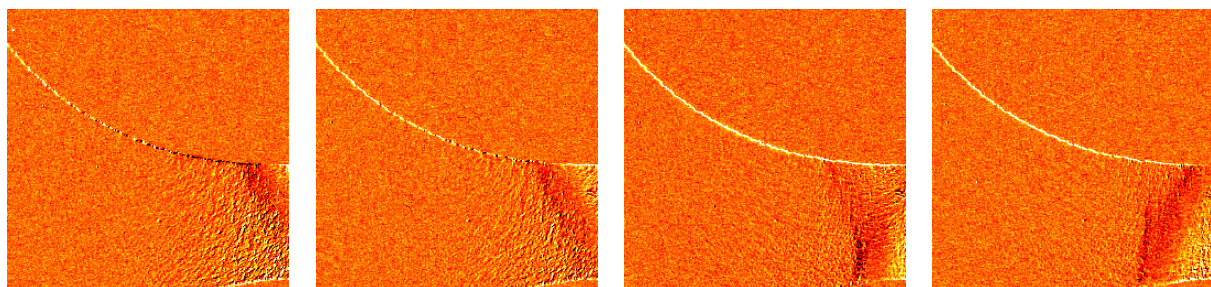


Abb. 4.23: Spannungs-Zeit-Kurve versehen mit den Zeitpunkten, für die in Abb. 4.24 die PLC-Band-Morphologie dargestellt ist

4.1.3.4 ‚Reflexion‘ von PLC-Bändern

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass PLC-Bänder am Übergang zwischen Kopf und Steg der Probe scheinbar reflektiert werden. Ein Beispiel hierfür wird in Abb. 4.23 (Spannungsverlauf) und Abb. 4.24 (Bandmorphologie) zu einander entsprechenden Zeitpunkten vorgestellt. Der betrachtete Band propagiert von rechts nach links.

Nach dem Einlaufen in das Beobachtungsfeld verändert das Band seine Orientierung zweimal (Abb. 4.24a~d, e~g). Vom Zeitpunkt t_4 an breitet sich ein PLC-Band in die Gegenrichtung aus. Es ist unklar, ob es sich bei diesem Band um das alte Band handelt und ob das alte Band verschwunden und ein neues Band entstanden ist. Dieser Veränderung entsprechend hat die Spannungs-Zeit-Kurve die Form des Buchstaben „m“ (Abb. 4.23).



a): $t_0 = 38,02\text{s}$.

b): $t_1 = 38,20\text{s}$.

c): $t_2 = 38,38\text{s}$.

d): $t_3 = 38,56\text{s}$.

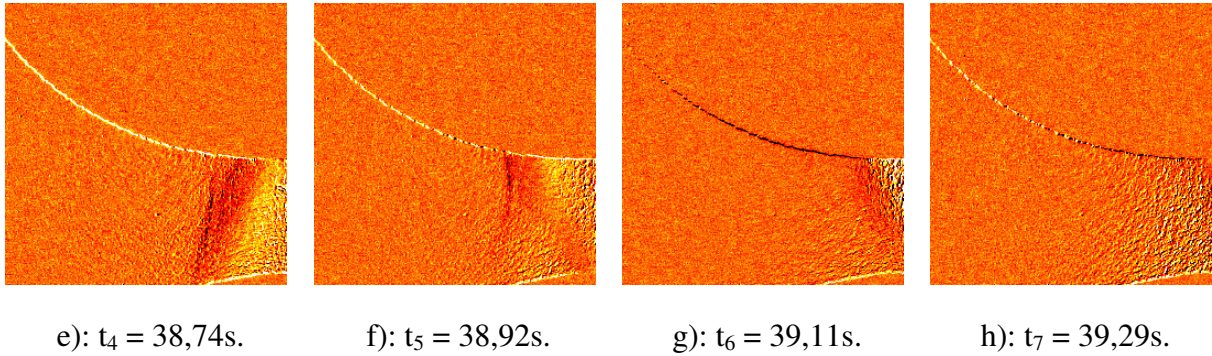


Abb. 4.24: Temperaturratebilder zur Reflektion eines PLC-Bands nach dem Einlaufen in den Übergang zwischen Steg und Kopf der Probe, dargestellt zu den Zeitpunkten $t_0 - t_7$, vgl. Spannungs-Zeit-Kurve in Abb. 4.23 (Probe39)

4.1.4 Einfluss der Scherbänder auf das Bandbildungs- und Bandausbreitungsverhalten

4.1.4.1 Zugprobe mit einem halbkreisförmigen Kerb

Wie bereits diskutiert, bilden sich die PLC-Bänder sowohl am Übergang zwischen Probensteg und Probenkopf als auch in der Mitte der Proben. In diesem Kapitel werden Untersuchungsergebnisse vorgestellt, die zeigen, welchen Einfluss geometriebedingte Scherbänder auf die Bildung und Ausbreitung der PLC-Bänder ausüben. In diesem Fall werden die Scherbänder durch einen einseitigen, halbkreisförmigen Kerb in Probenmitte verursacht.

In Abb. 4.25 ist dazu die mittels FE-Simulation berechnete Verteilung der plastischen Vergleichsdehnung in einer solchen Probe dargestellt. Dieser Simulation lag ein isotropes elastisch-plastisches Modell zu Grunde. Es ist deutlich zu sehen, dass vom halbkreisförmigen Kerb zwei Scherbänder emittiert werden.

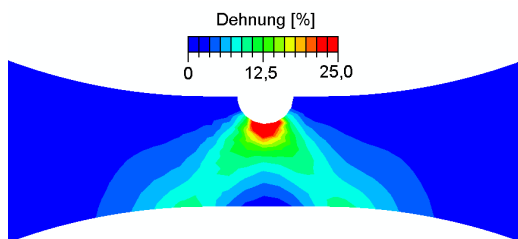


Abb. 4.25: Verteilung der plastischen Vergleichsdehnung in einer Zugprobe mit einem halbkreisförmigen Kerb, simuliert mit einem isotropen elasto-plastischen Modell ohne Berücksichtigung des PLC-Effekts

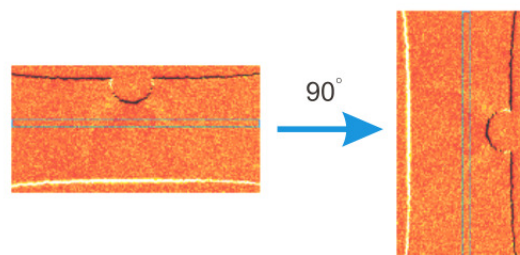


Abb. 4.26: Gebiet der mittels Thermokamera aufgezeichneten Temperaturbildserien auf der Oberfläche der halbkreisförmig gekerbten Probe, das schmale Rechteck wurde zur Erstellung der PLC-Bandtrajektorien verwendet, die in Abb. 4.27 dargestellt sind

Die aus den experimentellen Daten erstellten Trajektorien der PLC-Bänder zeigen, dass am Anfang fast alle Bänder an der Position der beiden Scherbänder entstehen Abb. 4.27 (oben). In Abb. 4.30 und Abb. 4.28 ist beispielhaft der Zusammenhang zwischen der Morphologie der PLC-Bänder und den Spannungsschwankungen veranschaulicht. In Abb. 4.27 (unten) erfolgt die Bandbildung sowohl im Bereich der Scherbänder als auch an einer der beiden Probensei-

ten. Die Bandmorphologie und der Spannungsverlauf hierzu sind in Abb. 4.31 bzw. Abb. 4.29 jeweils zu entsprechenden Zeitpunkten dargestellt.

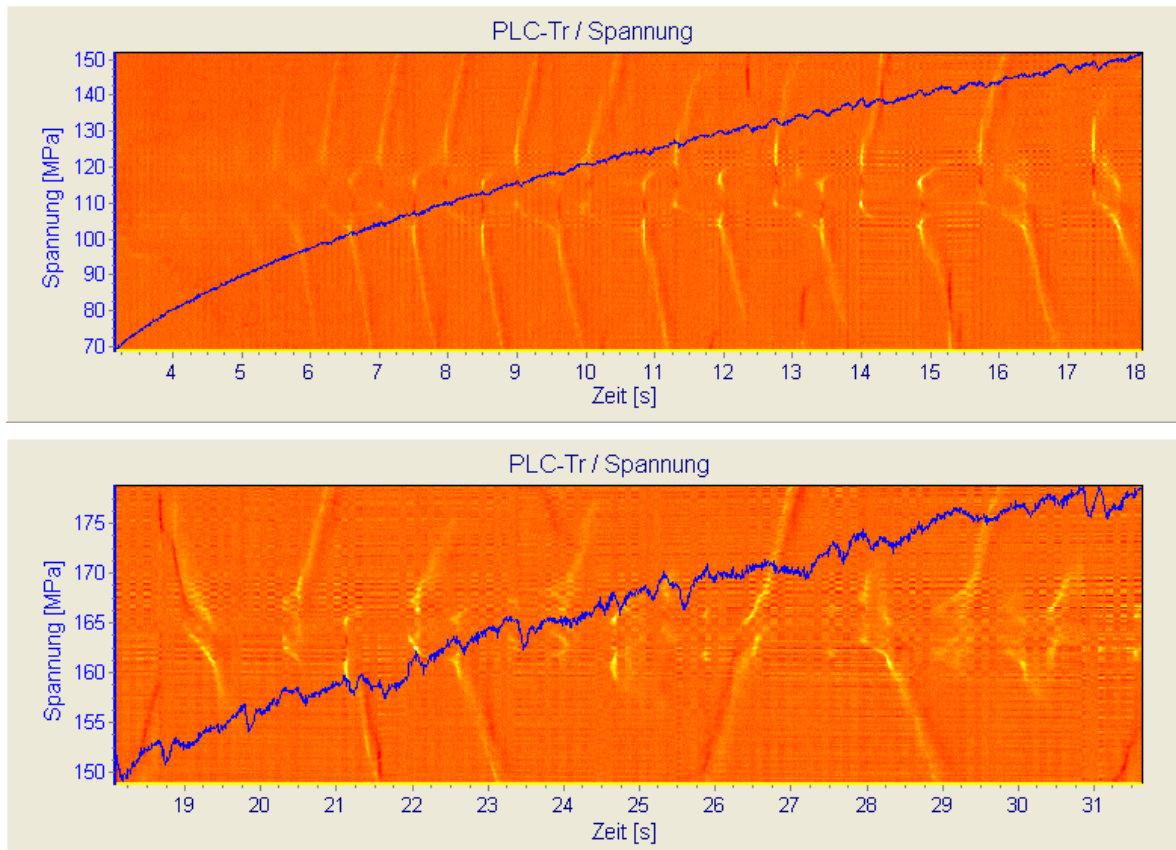


Abb. 4.27: Spannungs-Zeit-Kurve vor dem Hintergrund der PLC-Bandtrajektorien bei einer Zugprobe mit einem halbkreisförmigen Kerb, (Probe 37), vgl. Abb. 4.25 (Modellrechnung) und Abb. 4.26 (Messfeld)

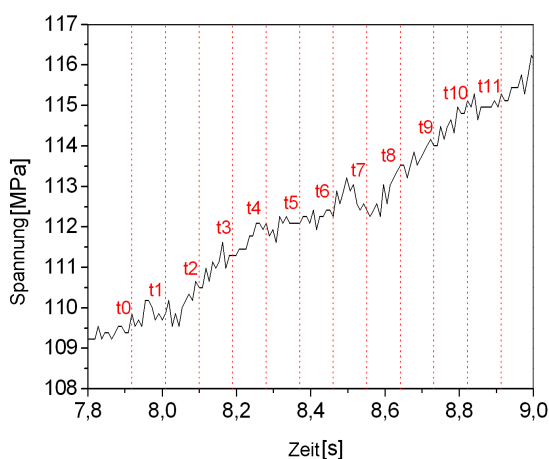


Abb. 4.28: Spannungs-Zeit-Kurve versehen mit den Zeitpunkten, für die in Abb. 4.30 die PLC-Band-Morphologie dargestellt ist

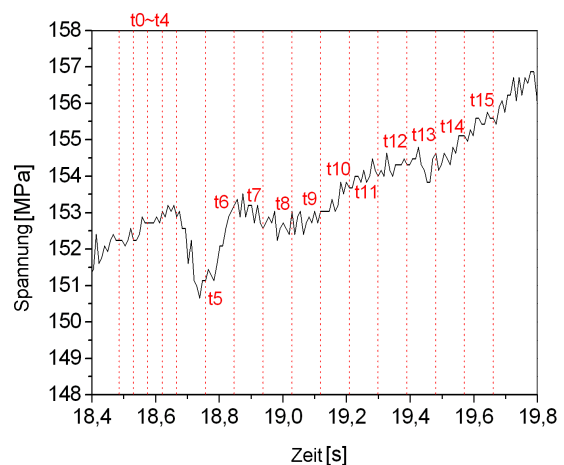


Abb. 4.29: Spannungs-Zeit-Kurve versehen mit den Zeitpunkten, für die in Abb. 4.31 die PLC-Band-Morphologie dargestellt ist

In Abb. 4.30 entsteht ein PLC-Band zuerst am linken Scherband und propagiert dann zur linken Seite der Probe (Abb. 4.30a~f). Zwischen t_0 und t_1 hat sich das PLC-Band unter Entste-

hung einer Spannungsserration (Spannungsanstieg gefolgt von Spannungsabfall, vgl. Abb. 4.28) gebildet, die zur Überwindung der Hindernisse notwendig ist. In Abb. 4.30g-l entsteht ein PLC-Band im Bereich des rechten Scherbands, das zur rechten Seite propagiert. Der hiermit verbundene Anstieg und anschließende Abfall der Spannung erfolgt zwischen t_6 und t_7 (siehe auch Abb. 4.28).

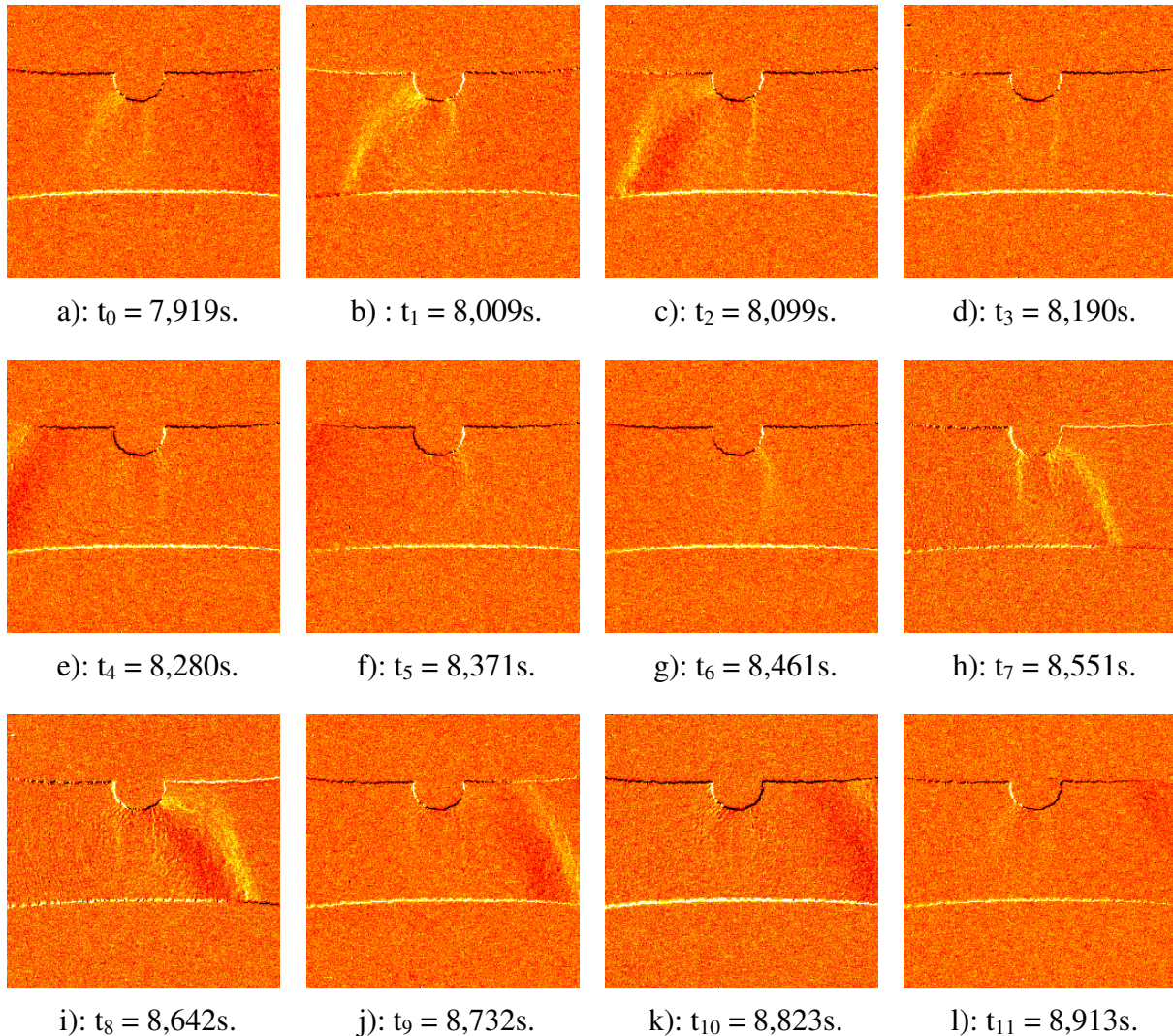


Abb. 4.30: Temperaturinkrementbilder zu den an den Scherbändern der halbkreisförmig gekerbten Probe (Probe 37) initiierten PLC-Bändern, Spannungs-Zeit-Kurve für das hier betrachtete Zeitintervall $t_0 - t_{11}$ in Abb. 4.28

Die Bereiche der Scherbänder sind aber nicht die einzigen Stellen, an denen PLC-Bänder entstehen. Obwohl aus der in Abb. 4.25 dargestellten Probenform und Dehnungsverteilung die Tatsache resultiert, dass die Spannungskonzentration um den halbkreisförmigen Kerb stärker ist als im Übergangsbereich zwischen dem parallelen Probesteg und dem Probenkopf, bilden sich auch in diesem Übergangsbereich neue Bänder, nachdem ein bestimmtes Dehnungs- bzw. Spannungsniveau erreicht ist. Sie propagieren in Richtung des Probestegs. Dies ist in Abb. 4.29 (Spannungsverlauf) und Abb. 4.31 (PLC-Bandmorphologie) dargestellt.

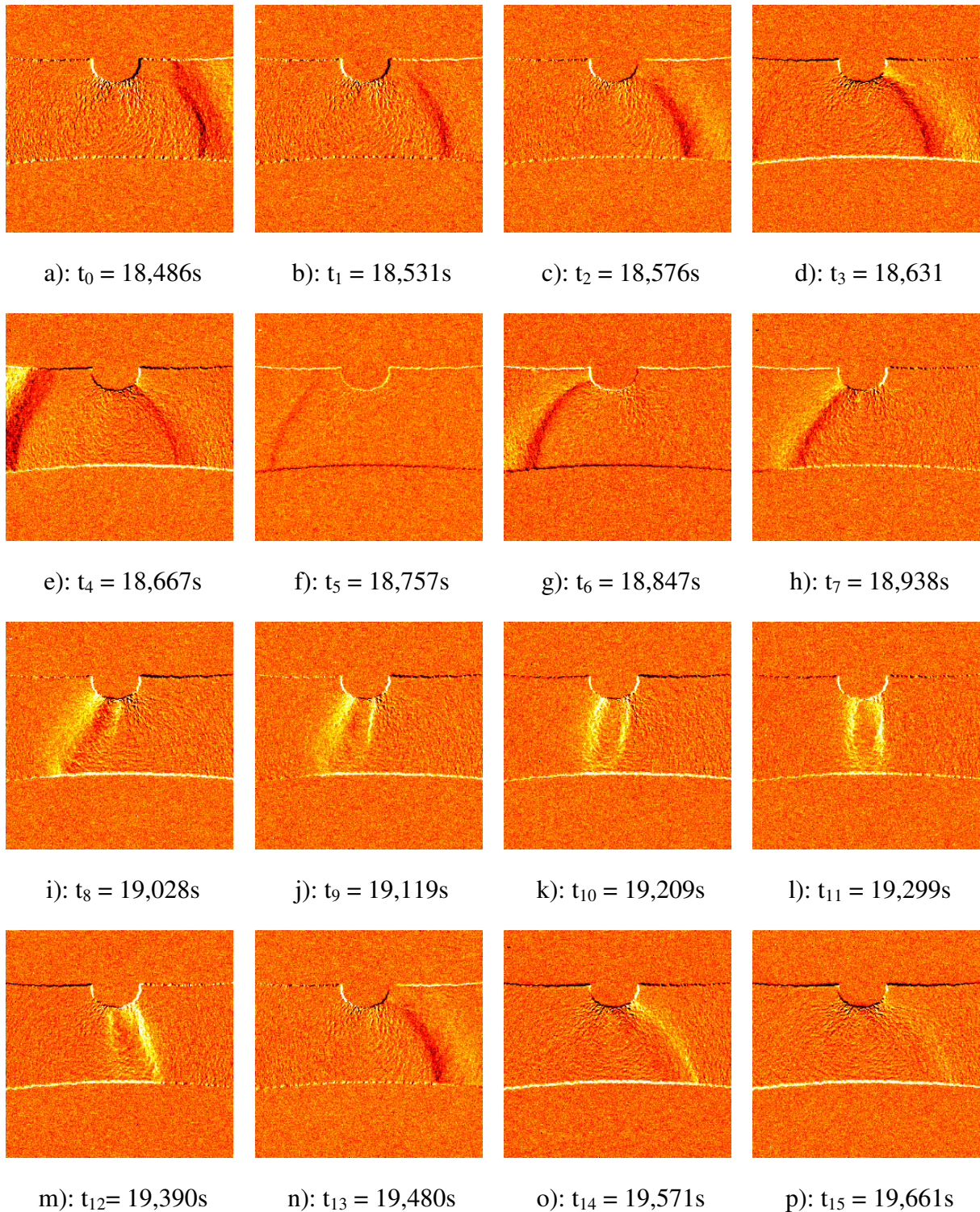


Abb. 4.31: Temperaturratebilder zu den PLC-Bändern, die in der halbkreisförmig gekerbten Probe (Probe 37) am Übergang zwischen Probenkopf und Probensteg initiiert werden, Spannungs-Zeit-Kurve für das hier betrachtete Zeitintervall $t_0 - t_{15}$ in Abb. 4.29

Von t_0 bis t_4 propagiert ein PLC-Band von rechts nach links und verschwindet an der Stelle des rechten Scherbands. Zum Zeitpunkt t_4 tritt auf der linken Seite ein ebenfalls im Übergangsbereich entstandenes PLC-Band mit hoher Intensität auf, das nach rechts propagiert. Die Entstehung dieses Bands ist wiederum von einem Spannungsanstieg begleitet, auf den ein starker Spannungsabfall folgt, nachdem sich das Band in Bewegung gesetzt hat (Abb. 4.29).

Als das PLC Band das Gebiet des linken Scherbands bei $t = t_7$ erreicht hat, verschwindet das Band im Gegensatz zum ersten Band ($t_0 \sim t_4$) nicht. Vielmehr entsteht zusätzlich ein drittes Band vor dem zweiten Band und zwar parallel dazu (t_8). Während das zweite PLC-Band das linke Scherband in der kurzen Zeit zwischen t_7 und t_8 durchläuft, kommt es zu einem Spannungsabfall. Die beiden Bänder rotieren anschließend gemeinsam um den halbkreisförmigen Kerb und verändern dabei ihre Orientierung ($t_9 \sim t_{12}$). In der Phase, in der das dritte PLC-Band das rechte Scherband durchläuft ($t_{12} \sim t_{13}$), erfolgt ein weiterer Spannungsabfall. Im Zeitintervall ($t_{12} \sim t_{13}$) unterbricht das dritte PLC-Band kurz seine Ausbreitung, propagiert dann aber weiter aus dem Bereich des rechten Scherbands heraus.

Die Entstehung der PLC-Bänder im Bereich von Scherbändern und deren Einfluss auf die PLC-Bandausbreitung können durch die Spannungskonzentrationen erklärt werden, die im Scherbandbereich vorliegen. Von der Simulation ist bekannt (Abschnitt 4.2.1), dass an der Vorderseite von PLC-Bändern Spannungskonzentrationen vorliegen müssen, um die Hindernisse (Waldversetzung, Ausscheidung, usw.) zu überwinden (instantane Dehnratenempfindlichkeit). Diese Bedingung für die PLC-Bandbildung ist im Bereich von Scherbändern erfüllt. Auf der anderen Seite verringert sich die benötigte externe Spannung, wenn sich ein PLC-Band durch den Bereich der Spannungskonzentration ausbreitet, weil die vorhandene Spannungskonzentration dem durch den Anstieg der Dehnraten bedingten Spannungsanstieg entgegenwirkt. Dies passt zu dem experimentellen Befund, dass in dieser Phase kurze Spannungsabfälle auftreten, die z.B. in Abb. 4.29 bei $t_7 \sim t_8$ und $t_{12} \sim t_{13}$ sichtbar sind. Die Absorption von PLC-Bändern in Scherbändern findet in zweierlei Varianten statt. Eine Variante ist die komplette Absorption, wie in Abb. 4.31 im Zeitintervall ($t_0 \sim t_4$) geschehen. Die andere Variante ist die Verminderung der Bandgeschwindigkeit bei dem Durchlaufen des Scherbandbereichs, die beispielsweise im Zeitintervall $t_5 \sim t_{15}$ von Abb. 4.31 stattgefunden hat. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass mehrere PLC-Bänder gleichzeitig aufgetreten sind. Eine mögliche Ursache für die Hinderniswirkung der Scherbänder, in deren Folge die PLC-Bänder ihre Geschwindigkeit vermindern, ist die hohe plastische Dehnung ϵ^p im Scherbandbereich. Diese führt zu einem Anstieg der internen Spannung σ_i (Gleichung (2.21)), der instantanen Dehnratenempfindlichkeit S_i (Gleichung (2.22)) und der Fremdatomkonzentration C_S in den Versetzungskernen (Gleichung (2.29)). Alle diese Veränderungen haben gemäß der Gleichung (2.23) die Tendenz, die Rate der plastischen Vergleichsdehnung herabzusetzen.

4.1.4.2 Zugprobe mit zwei halbkreisförmigen Kerben

Wenn eine Probe mit zwei halbkreisförmigen Kerben belastet wird, bildet sich zwischen den beiden Kerben ein viel intensiveres Scherband als bei einer Probe mit nur einem halbkreisförmigen Kerb. Die durch Finite-Element-Simulation ohne Berücksichtigung des PLC-Effekts berechnete und in Abb. 4.32 dargestellte Verteilung der plastischen Vergleichsdehnung weist dementsprechend eine sehr starke Dehnungskonzentration zwischen den beiden Halbkreiskerben auf. In dieser Arbeit wurde experimentell ein Werkstoff untersucht, der die bei der Simulation nicht berücksichtigte, dynamische Reckalterung aufweist. Trotz dieses Unterschieds konzentriert sich die plastische Verformung im Anfangsstadium des Experiments auch auf diesen Bereich. Allerdings oszilliert die im Mittel noch ansteigende Spannung stark (Abb. 4.33, t_0). Wie Abb. 4.34a (t_0) sichtbar, wird dabei viel Energie dissipiert. Zum Zeitpunkt t_0 fällt bereits die Spannung ab (Abb. 4.33, t_0), weil sich links von dem die beiden Kerben verbindenden Scherband ein neues Band bildet. Wie in Abb. 4.34b~d zu sehen ist, verlängert sich das neue Band unter Oszillationen während die Spannung - ebenfalls oszillierend - im Mittel ansteigt (vgl. Abb. 4.33, $t_1 \sim t_3$). Aus Abb. 4.34 geht hervor, dass während dieser Zeit die Rate der plastischen Vergleichsdehnung im Scherband nicht so hoch ist wie zum Zeitpunkt $t = t_0$ bzw. wie im neu entstehenden Band.

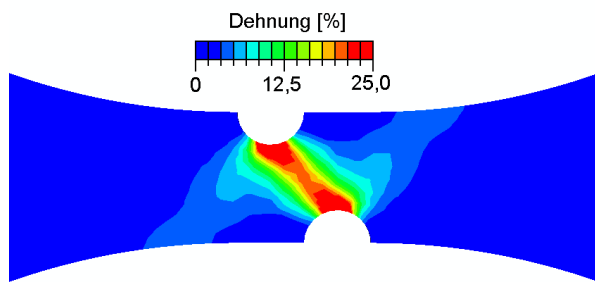


Abb. 4.32: Verteilung der plastischen Vergleichsdehnung in einer Zugprobe mit zwei halbkreisförmigen, gegeneinander versetzten Kerben, simuliert mit einem isotropen elasto-plastischen Modell ohne Berücksichtigung des PLC-Effekts.

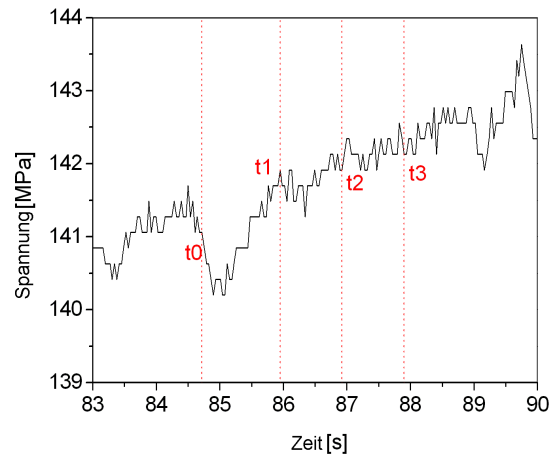
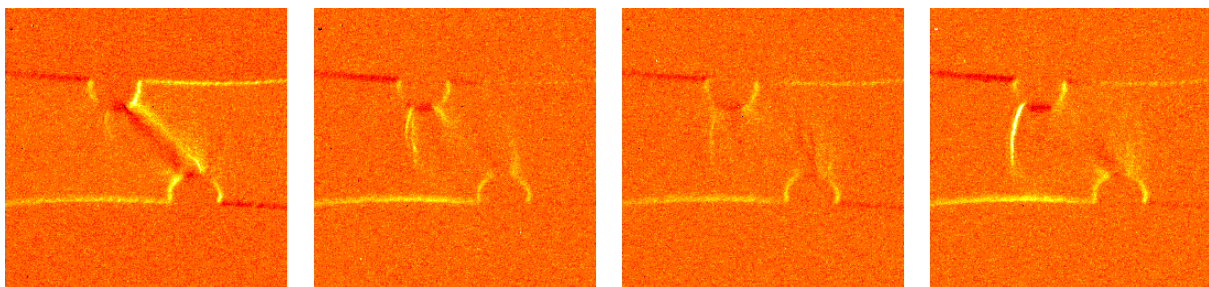


Abb. 4.33: Spannungs-Zeit-Kurve versehen mit den Zeitpunkten, für die in Abb. 4.34 die PLC-Bandmorphologie dargestellt ist.



a): $t_0 = 84,719\text{s}$

b): $t_1 = 85,948\text{s}$

c): $t_2 = 86,924\text{s}$

d): $t_3 = 87,901\text{s}$

Abb. 4.34: Temperaturratebilder mit den Bändern, die in der Probe mit den zwei halbkreisförmigen Kerben (Probe 42) initiiert werden, Spannungs-Zeit-Kurve für das hier betrachtete Zeitintervall $t_0 - t_3$ in Abb. 4.33

4.1.5 Einfluss von Kerben bzw. Spannungsgradienten

4.1.5.1 Untersuchung des Ort der Bandbildung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Spannungsgradienten auf den Entstehungsort der PLC-Bänder betrachtet. Hierfür kamen die in Abb. 4.35 dargestellten, asymmetrischen Zugproben zum Einsatz. Der Steg dieser Proben besteht aus drei Bereichen, die mit dem Buchstaben B, C, D markiert sind. Da der Krümmungsradius im Bereich B groß ist, liegt dort ein kleinerer Spannungsgradient vor als im Bereich D. Dort weist der Kerb einen geringeren Krümmungsradius auf. Im parallelen Bereich C ist der Spannungsgradient am kleinsten. Dafür ist dort die Spannung höher als in den Bereichen B und C. Das Gesichtsfeld der Thermokamera wurde für die Experimente so gewählt, dass alle drei Bereiche erfasst wurden.

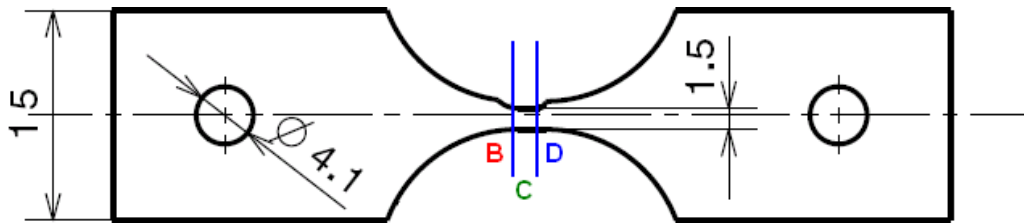


Abb. 4.35: Probengeometrie zur Untersuchung zum Einfluss des Spannungsgradienten auf die Entstehung der PLC-Bänder. Die vollständige Geometrie in Abb. 3.3 dargestellt.

Die Versuche wurden mit den Proben 44, 45, 46 bei einer einheitlichen Vorschubgeschwindigkeit $\dot{l}_1 = 20,15 \mu\text{m/s}$ durchgeführt. Anhand der aufgenommenen Thermokamerabilder ließ sich feststellen, wie häufig die PLC-Bänder in den drei Bereichen entstehen. In Abb. 4.36a ist ersichtlich, dass die absolute Häufigkeit für Bandentstehung in den Bereichen B (rot), C (grün) und D (blau) sehr unterschiedlich ist und mit zunehmender Dehnung (hier die Abbindeungsnummer) einer starken Veränderung unterworfen ist. Gleiches trifft für die in Abb. 4.36b dargestellte relative Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit) zu. Die Wahrscheinlichkeit für die PLC-Bandbildung ist am Anfang im Bereich B (mittlerer Spannungsgradient) am höchsten, nimmt aber stark bei ansteigender Dehnung ab, während gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit für eine Bandbildung im Bereich C zunimmt. Im Bereich D mit dem höchsten Spannungsgradienten ist die Entstehungswahrscheinlichkeit am Anfang sehr gering, wächst dann an, verändert sich danach aber kaum.

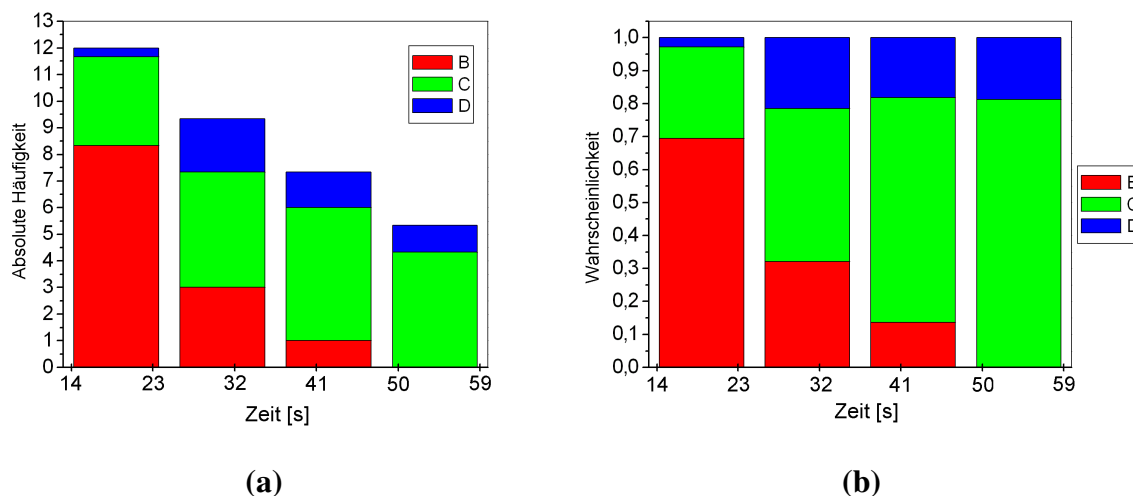


Abb. 4.36: Absolute und relative Häufigkeit der PLC-Bandbildung in den Probenbereichen B, C und D mit unterschiedlichem Spannungsgradient, Untersuchung an den gekerbten Probe 44, 45 und 46 mit der in Abb. 4.35 dargestellten Geometrie

4.1.5.2 Zusammenhang zwischen Dehnungssprung und Spannungsgradient

Um den Zusammenhang zwischen dem Dehnungssprung $\Delta \epsilon_b$ (vgl. Abb. 3.8) und der Spannungsgradient erforschen zu können, wurden Proben hergestellt, die am Übergang zwischen Steg und Kopf unterschiedliche Krümmungsradien aufweisen (Abb. 4.37). Die genaue Geometrie dieser Proben ist in Abb. 3.3d dargestellt. In beiden Übergangsbereichen wurden zwei DMS unterschiedlicher Länge appliziert (Abb. 4.37). Die mit diesen DMS aufgezeichneten Dehnungs-Zeit-Kurven sind in Abb. 4.38 für zwei unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten dargestellt.

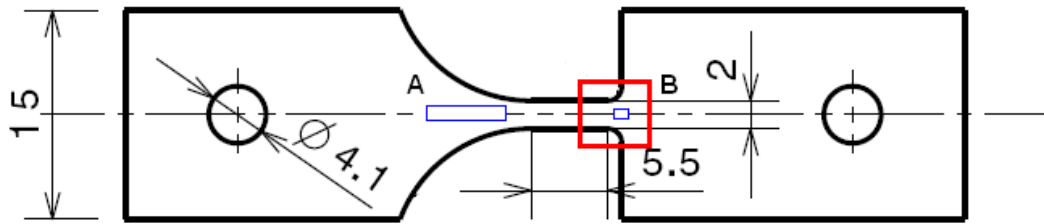


Abb. 4.37: Proben mit zwei unterschiedlichen Krümmungsradien im Übergang zwischen Kopf und Steg (genaue Geometrie in Abb. 3.3). Die zwei Übergangsbereiche sind mit DMS versehen (Länge: 3mm bzw. 0,6mm). Das rote Rechteck ist das Gesichtsfeld der Thermokamera, das dem Beobachtungsbereich in Abb. 4.39 entspricht.

Am Anfang der Verformung (elastischer Bereich) liegen die beiden für jede Vorschubgeschwindigkeit aufgenommenen Kurven übereinander. Nach dem Einsetzen der plastischen Verformung wächst die Dehnung im Bereich des kleineren Krümmungsradius viel schneller als im Bereich des größeren Krümmungsradius an, weil bei kleinerem Krümmungsradius die Spannungskonzentration höher ist. Darüber hinaus sind dort die Dehnungssprünge nach einer vorgegebenen Zeit größer, während der Dehnungssprung bei einer bestimmten Dehnung für beide Seiten etwa gleich ist. Dieses Phänomen ist mit dem vorherigen Ergebnis konsistent, dass der Dehnungssprung mit zunehmender externer Dehnung (Spannung) ansteigt, aber nicht von der Dehnrage abhängig ist (vgl. Abb. 4.9).

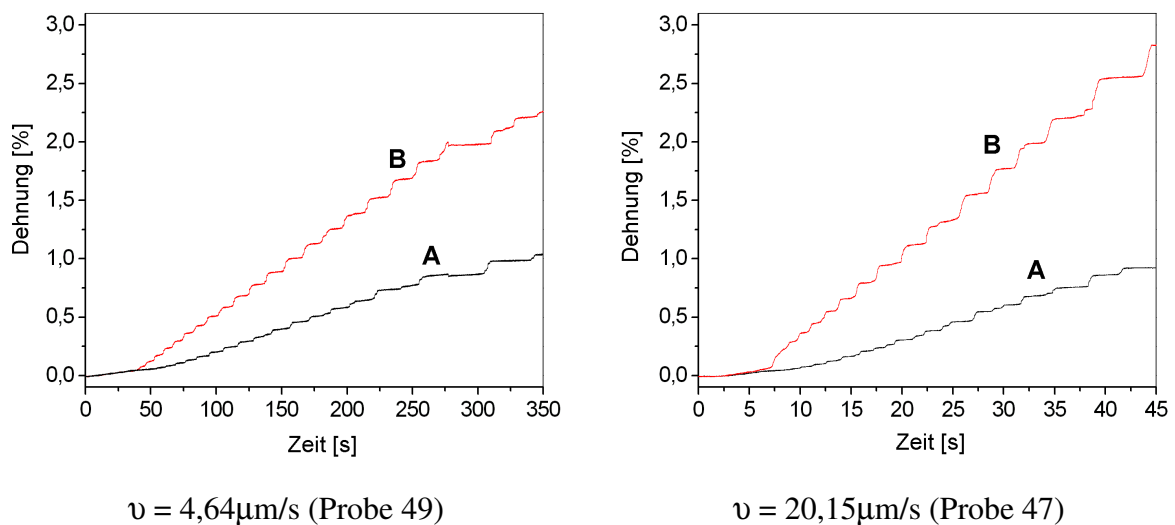


Abb. 4.38: Dehnungs-Zeit-Kurven in den beiden Übergangsbereichen bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten (20,15 $\mu\text{m/s}$, 4,64 $\mu\text{m/s}$)

4.1.5.3 Koexistenz von Bändern durch Versetzungsinteraktion

Im Abb. 4.39 ist die Bandmorphologie in dem Übergangsbereich mit dem kleineren Krümmungsradius anhand ausgewählter Temperaturratebilder dargestellt. Erkennbar sind zwei schmale PLC-Bänder, die zunächst an einer Probenkante entstehen (Abb. 4.39a), sich dann in Richtung der jeweils gegenüberliegenden Probenkante verlängern (Abb. 4.39b, c), in ihrer Intensität und Breite bis zum Zusammenwachsen zunehmen (Abb. 4.39d, e) und schließlich

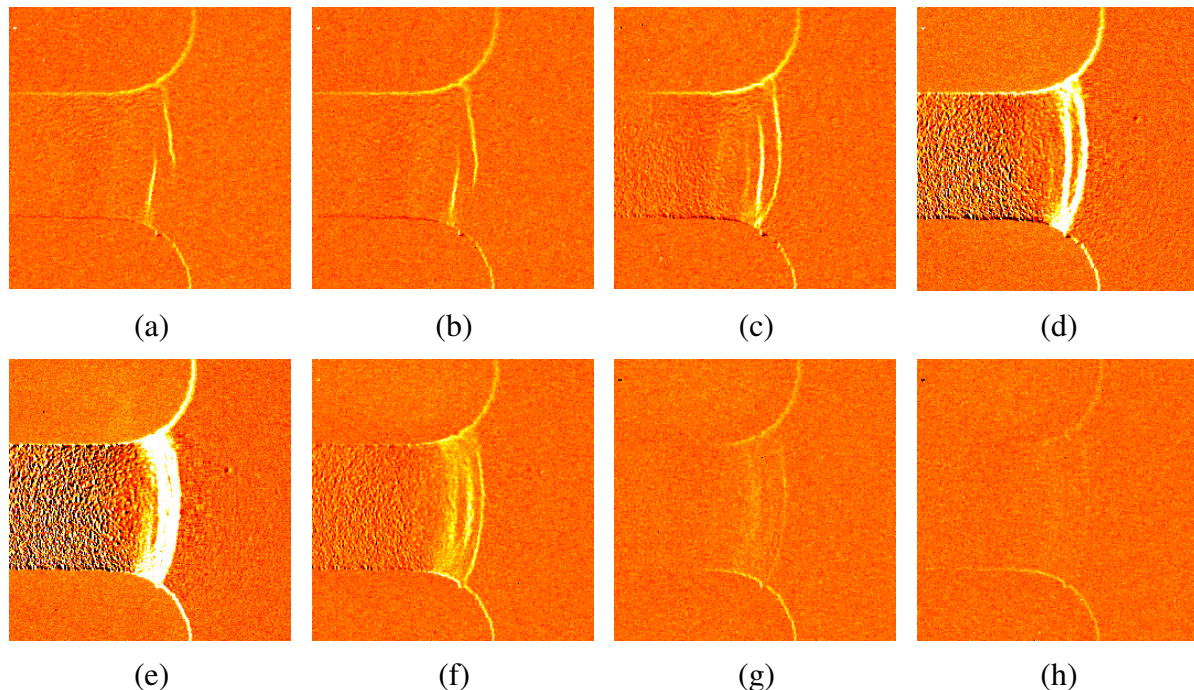


Abb. 4.39: Die Entstehung von Typ-B-Bändern an den Probenkanten, deren Verlängerung in Richtung der jeweils gegenüberliegenden Probekante entlang der Dehnungsgradientlinien (a-d), ihr Zusammenwachsen (d, e) und Verschwinden (f-h), ein Beispiel für die Koexistenz zweier Bänder durch Versetzungsinteraktion (Probe 49)

wieder schwächer werden und verschwinden (Abb. 4.39f, g, h). Auslöser der schmalen Bänder ist der Spannungskonzentrationsbereich an den Kanten. Die Verlängerung der Bänder in Richtung der jeweils gegenüberliegenden Kante erfolgt entlang einer Linie konstanter Spannung, die in diesem Bereich gekrümmt ist. Erstaunlicherweise kommt es nicht zur Unterdrückung des einen Bands durch das andere Band. Die Koexistenz und das Zusammenwachsen der beiden Bänder werden auf weitreichende Versetzungswechselwirkungen zurückgeführt. D.h. es entstehen Versetzungslawinen (Abb. 4.39e), wenn der Abstand der beiden Bänder innerhalb der Korrelationslänge liegt.

4.1.6 Der Einfluss einer lokalen Erwärmung auf das Bandverhalten

Der Einfluss der Temperatur auf den PLC-Effekt wurde bereits in einer Vielzahl von Arbeiten untersucht [60][66]. Entsprechende Veröffentlichungen zur Temperaturabhängigkeit des PLC-Effekts bei der Legierung AlMg3 gibt es dagegen kaum. In dieser Arbeit wurden die Proben mittels Laserstrahlung beleuchtet und dadurch erwärmt. Der dazu verwendete Versuchsaufbau wird in Abb. 4.40 erläutert.

4.1.6.1 Messaufbau

Um den Einfluss der Temperatur auf den PLC Effekt zu untersuchen, werden die Probe normalerweise als ganze Körper erwärmt z.B. Klose [66]. Die Untersuchungen beschränken sich auf eine gleichmäßige Temperaturerhöhung. Der Einfluss von Temperaturgradienten auf die Entstehung und Ausbreitung der PLC-Bänder wird in der Literatur bislang nicht betrachtet. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Laser verwendet, um eine inhomogene Temperaturverteilung zu erzeugen. Hierbei handelt es sich um den Laser *Verdi* der Firma *Coherent*. *Verdi* ist ein monofrequenter, kompakter grüner Festkörperlaser einer Wellenlänge von 532 nm. Die Ausgangsleistung dieses rauscharmen diodengepumpten Lasers liegt zwischen 2 und 18 Watt.

Der Messaufbau, in den der Laser integriert ist, wird in Abb. 4.40 veranschaulicht. Der Laserstrahl wird durch ein Linsensystem auf die Mitte des Probenstegs fokussiert.

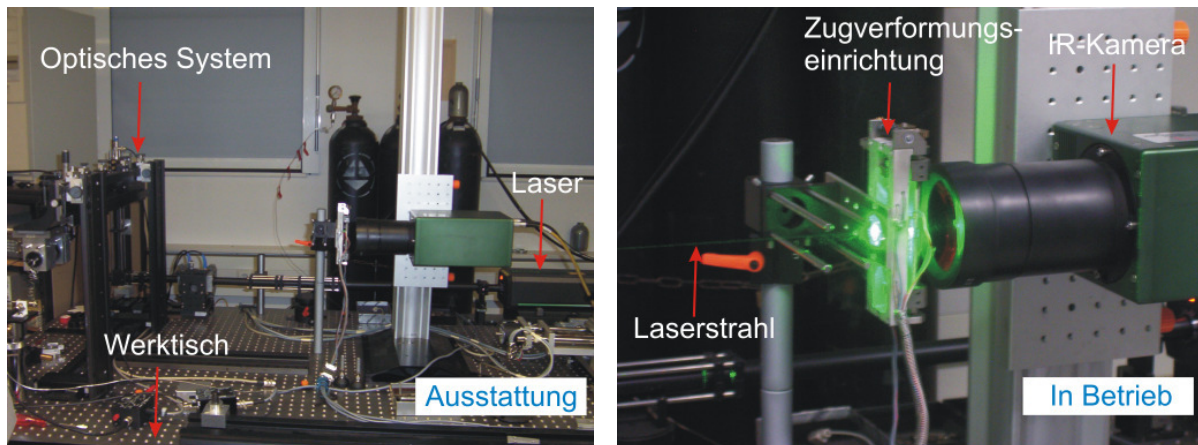


Abb. 4.40: Messaufbau für die thermische Analyse beim PLC-Effekt bei einer Laserstrahlerwärmung der Proben

4.1.6.2 Messergebnisse

In Abb. 4.41 sind die Spannung und die Temperaturdifferenz ΔT als Funktion der Belastungsdauer für eine Probe dargestellt, die nicht mit Laserstrahlung erwärmt wird. Diese Kurven dienen als Referenzkurven. Abb. 4.42 zeigt die entsprechenden Kurven für eine Probe, die vor der Belastung mit einer Laserleistung von 2W erwärmt wurde, um eine erhöhte stabile Temperatur zu erreichen. Ansonsten waren beide Proben identisch hergestellt, wärmebehandelt, geschliffen und poliert worden.

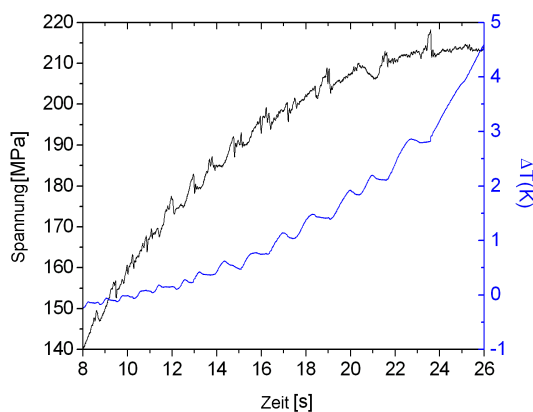


Abb. 4.41: Spannung und Temperaturdifferenz als Funktion der Zeit für die nicht zuvor mit einem Laser erwärmte Referenzprobe (Probe 34).

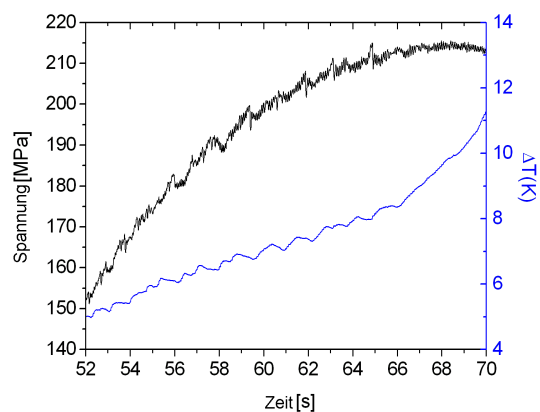


Abb. 4.42: Spannung und Temperaturdifferenz als Funktion der Zeit bei der Probe, die vor der Zugbeanspruchung mit einem 2 W-Laser über 46,1s erwärmt worden ist (Probe 32).

Die in beiden Abbildungen dargestellte Temperaturdifferenz ΔT ist die Differenz zwischen der gemittelten Temperatur im Beobachtungsbereich und der Raumtemperatur. Die Stufen in den Temperaturdifferenzkurven sind auf das Eintreten der PLC-Bänder in den Beobachtungsbereich zurückzuführen. Der Abfall an jeder Stufe ist die Temperaturabnahme in Folge der Wärmeableitung in die Umgebung, zu der auch der Einspannbereich der Zugbelastungseinrichtung gehört. Aus dem Anfangspunkt der Temperaturdifferenzkurve in Abb. 4.42 geht her-

vor, dass der Laser die Probe 32 um fast 5000 mK über Raumtemperatur erwärmt hat. In der Spannungs-Zeit-Kurve der lasererwärmten Probe treten eindeutig mehr und intensivere Oszillationen auf, die darauf hindeuten, dass eine lokale Erwärmung um 5K das Bandverhalten beeinflussen kann. In Abb. 4.43a verändern sich die Anzahl und die Amplitude der Spannungsozillationen schlagartig, nachdem der Laser nach 59.5s ausgeschaltet wird. Während der Kurvenverlauf vor dem Abschalten dem von Abb. 4.42 ähnelt (viele Oszillationen) nimmt er nach dem Abschalten des Lasers eine relativ glatte Form an und ähnelt somit eher dem Spannungsverlauf in Abb. 4.41. Die Ergebnisse des Experiments, die in Abb. 4.43a dargestellt sind, sind damit konsistent mit den Versuchsergebnissen von Abb. 4.41 und Abb. 4.42.

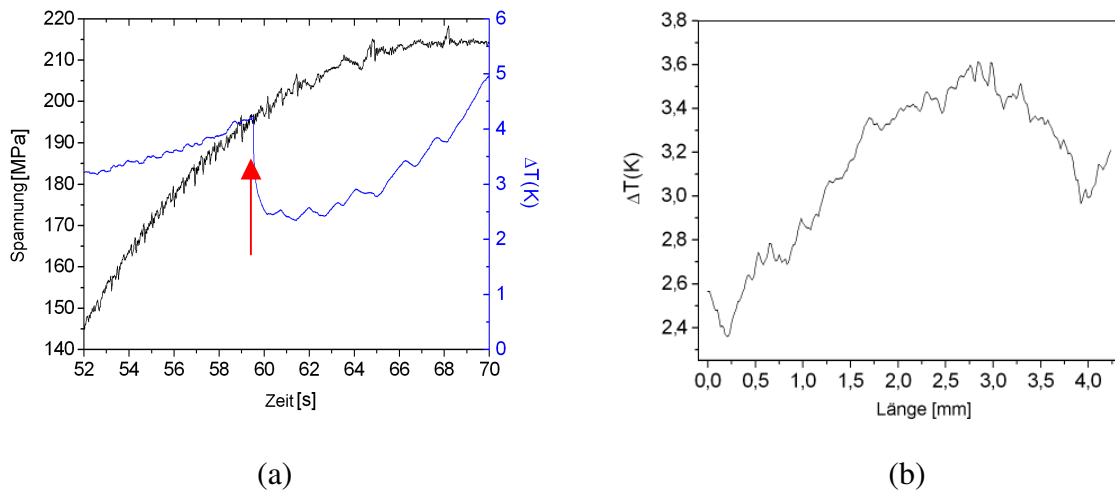


Abb. 4.43: Spannungs-Zeit- und Temperaturdifferenz-Zeit-Kurve bei der Zugbeanspruchung von Probe 33, die Laserstrahlerwärmung der Probe begann 46,1s vor Belastungsbeginn und wurde nach 13,4s Belastungsdauer abgeschaltet (siehe Pfeil) (a), Temperaturprofil in Probenlängsrichtung nach 5 s Belastungsdauer (b)

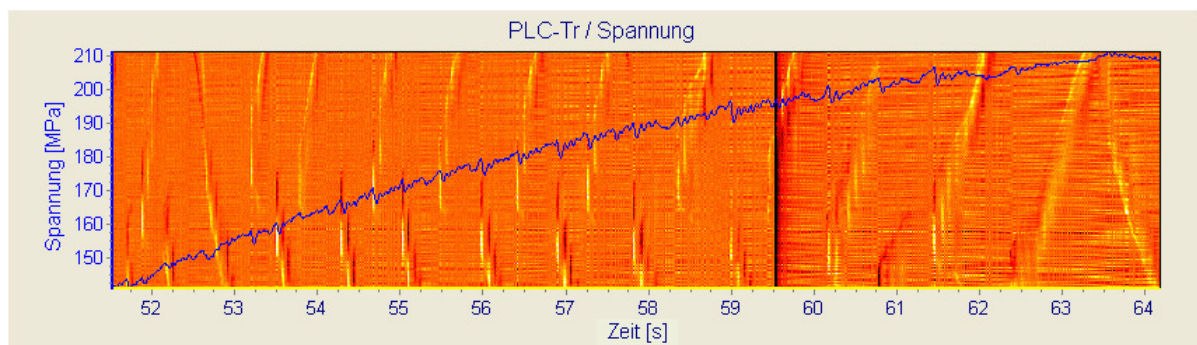


Abb. 4.44: Spannungs-Zeit-Kurve vor dem Hintergrund der PLC-Bandtrajektorien, der laserstrahlerwärmten Probe 33 vor und nach dem Abschalten des Lasers (schwarze vertikale Linie)

Der Einfluss des Temperaturgradienten auf die PLC-Bänder soll jetzt anhand der Abb. 4.43b und Abb. 4.44 grob erläutert werden. Hierzu ist zunächst festzustellen, dass die Versuchszeit, für die das Temperaturprofil in Abb. 4.43b dargestellt ist (51,1s), exakt der Versuchszeit entspricht, bei der die Darstellung der PLC-Bandtrajektorien in Abb. 4.44 einsetzt. Von der Versuchszeit von 53s an entsteht eine Vielzahl von Typ-B-Bändern vorwiegend im unteren Bereich, der dem rechten Bereich des Temperaturprofils in Abb. 4.43b entspricht und somit relativ hohe Temperaturen aufweist. Die Bänder propagieren abwechselnd nach links bzw. rechts

(in Abb. 4.44 zuerst nach oben und dann nach unten). Nachdem der Laser ausgeschaltet ist (rechts der schwarzen Linie in Abb. 4.44), breiten sich die PLC-Bänder wieder von der linken zur rechten Seite aus und oszillieren zunehmend schwächer. Dies ist eine weitere, unabhängige Bestätigung dafür, dass das Bandverhalten durch lokale Temperaturveränderung von wenigen Kelvin beeinflusst wird.

4.1.7 Messung des Taylor-Quinny-Koeffizienten

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, wird bei der plastischen Verformung von Metallen der Hauptteil der mechanischen Energie in Wärme umgesetzt. Dies führt meist zu einem Temperaturstieg. Wie in Abb. 4.45 gezeigt, steigen Temperatur und Dehnung mit der Zeit an. Die Kurven sind bei einer mittleren Dehnrates von $1,0 \times 10^{-2}/s$ aufgenommen worden. Bei dieser Dehnrates führt die mit der Bandausbreitung verknüpfte Wärmefreisetzung zu einem fast stabilen Temperaturprofil über die relevante Zeitskala. Die stufenförmige Zunahme von Dehnung und Temperatur wird dadurch verursacht, dass sich die PLC-Bänder nur zeitweilig im Messbereich des DMS bzw. im Gesichtsfeld der Kamera ausbreiten. Der Dehnungsabfall nach 3,7s wird von der Tatsache verursacht, dass die Messgrenze des DMSs (3%) erreicht worden ist. Eine Kalibrierung der IR-Kamera ergab, dass die Temperaturauflösung bei diesen Proben typ (50mK) einer Änderung der plastischen Dehnung von 0,1% entspricht.

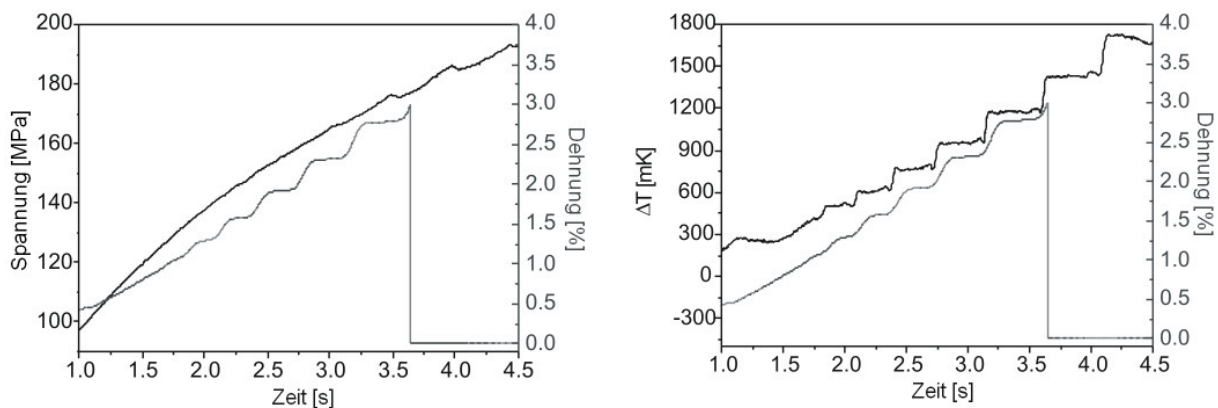


Abb. 4.45: Entwicklung der Spannung, der plastischen Dehnung und des Temperaturinkrements während der Zugbelastung mit einer Dehnrates $d\varepsilon/dt = 1,0 \times 10^{-2}/s$, begleitet von einer Ausbreitung der PLC-Bänder. Links: Spannung (schwarz), Dehnung (grau), rechts: Temperaturinkrement (Differenz zur Raumtemperatur, schwarz), Dehnung (grau), die sich in dem rechteckigen Bereich entwickeln, der in Abb.3.1 (rechts) dargestellt ist.

Unter der Annahme, dass die Belastung der Proben unter adiabatischen Bedingungen erfolgt, kann der folgende Zusammenhang zwischen der Temperaturänderung ΔT und Zunahme der plastischen Vergleichsdehnung $\Delta \varepsilon^p$ angenommen werden:

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho c} \sigma \Delta \varepsilon^p \quad (4.4)$$

Hierbei ist ρ die Dichte, c die spezifische Wärme, σ die äquivalente Spannung, und β der Taylor-Quinney-Koeffizient. Für die AlMg3 Legierung ist ρc $2,6 J/(K cm^3)$. Der Taylor-Quinney-Koeffizient β ist der in Wärme umgewandelte Anteil der mechanischen Energie. Dieser Koeffizient hängt im Allgemeinen von Dehnung, Dehnrates und Temperatur ab.

Aus den in Abb. 4.45 dargestellten stufenförmigen Dehnungs- und Temperaturkurven und der entsprechenden Spannungskurve wurde der Taylor-Quinney-Koeffizient β für 5 verschiedene Dehnungswerte bzw. Dehnungsstufen bestimmt und in Abb. 4.46 dargestellt.

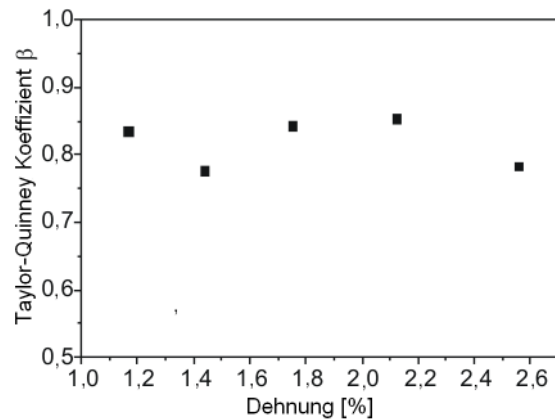


Abb. 4.46: Die auf Basis der in Abb. 4.45 dargestellten, stufenförmigen Kurve ermittelten Taylor-Quinney-Koeffizienten.

Im Rahmen der bestehenden Streuung ist keine Abhängigkeit des Taylor-Quinney-Koeffizienten von der Dehnung zu erkennen. Eine solche Abhängigkeit wird in der Literatur diskutiert, erfordert aber eine Analyse über ein größeres Dehnungsintervall.

4.2 Simulationen und Vergleich mit Experiment

4.2.1 3D-FE-Simulation mit Estrin-McCormick-Modell

4.2.1.1 Modellparameter

Für die 3D-FE-Simulation mit dem Estrin-McCormick-Modell wurden die in Tab. 4.1 aufgeführten Modellparameter ausgewählt. Diese Auswahl erfolgte in Anlehnung an die Arbeiten [60][89].

Parameter	Wert	Parameter	Wert
P_1	$18,0^{0,2}, 22,5^1$	s_1	0,41
P_2	$3,91^0 (\exp(9.1418 - 2280.2/T))^2, 4,89^1$	s_2	2,91
α	0,44	n	1/3
β	0,68	E (GPa)	70
ω_1	$3,60 \times 10^{-5}$	ν	0,3
ω_2	$2,16 \times 10^{-3}$	d_1 (MPa)	$38,03^{0,2}, 105^1$
$\dot{\epsilon}_0$	$2,30 \times 10^{-7}$	d_2 (MPa)	$29,94^{0,2}, 65^1$
C_m	1,0	d_3	$4,8 \times 10^{-2}$

Tab. 4.1 Modellparameter

Einige der in Tab. 4.1 angegebenen Parameterwerte sind mit hochgestellten Zahlen versehen. Diese bedeuten:

0: Parameter aus der Literatur [60][89].

- 1: Da die Simulation mit dem aus der Literatur entnommenen Parametersatz 0 teilweise zu großen Diskrepanzen zwischen den simulierten und den experimentellen Ergebnissen geführt hatte, wurden einige der Parameter aus der Literatur verändert.
- 2: Die Parameterwerte fanden Anwendung in der in Abschnitt 4.2.1.5 beschriebenen Simulation.

Im Rahmen der Parameterfestlegung wurde die Testsimulation an Proben mit realer Geometrie durchgeführt, um festzustellen, welchen Einfluss die Werte ausgewählter Modellparameter auf das PLC-Bandverhalten (kritische Dehnung ε_c für das Einsetzen des PLC-Effekts, Dehnungssprung $\Delta\varepsilon_b$ im Bereich des PLC-Bands) ausüben. Dabei zeigte sich:

1. P_1 : Bei Erhöhung von P_1 nimmt ε_c ab.

P_1	6,5	13.5	22.5
ε_c [%]	>5,66	5,66	1,84

2. P_2 : Bei Erhöhung von P_2 nimmt ε_c ab.

P_2	1,955	2.933	4.89
ε_c [%]	>5,66	5,66	2,55

3. $\dot{\varepsilon}_0$: $\dot{\varepsilon}_0$ hat keinen Einfluss auf die kritische Dehnung. Der Dehnungssprung $\Delta\varepsilon_b$ nimmt mit $\dot{\varepsilon}_0$ zu.
4. α : Bei $\alpha = 0.88$ treten keine PLC Bänder auf, weil die kritische Dehnung nicht erreicht wird, bei $\alpha = 0.22$ kommt es zum Abbruch der Rechnung wegen fehlender Konvergenz.
5. β : $\beta = 0.88$: kritische Dehnung: $\varepsilon_c = 2,55\%$, $\beta = 0.48$: $\varepsilon_c = 3,72\%$, die kritische Dehnung und der Dehnungssprung $\Delta\varepsilon_b$ steigen mit der Abnahme von β .

4.2.1.2 3D-Simulation eines dünnen flachen Streifens

Eine dreidimensionale Finite-Elemente-Analyse wurde zunächst für einen flachen Streifen ausgeführt. Die Geometrie des Streifens, die gewählte Netzstruktur und die Belastungsrichtung sind in Abb. 4.47 schematisch dargestellt. Um die erwartete Konzentration der Verformung in den Verformungsbändern zu simulieren, wurden 3D-Elemente mit acht Knoten verwendet (ABAQUS-Element C3D8I). Wegen des Fehlens von Spannungs- und Dehnungsgradienten in einem solchen flachen Streifen ist es nötig, eine Anfangsstörung in die Probe einzuführen. Dazu wurde angenommen, dass ein einzelnes Element einen um 30% geringeren Anfangswert der inneren Spannung als alle anderen Elemente besitzt ($\sigma_i(0) = d_1$ in Gleichung (2.21)). Da dieses Element früher als die anderen Elemente plastisch verformt, kommt es zu einer Verformungsinhomogenität. Der flache Streifen wurde belastet, indem an den Probenenden eine externe Verschiebung in Probenlängsrichtung mit einer Dehnrates von $2 \times 10^{-3}/s$ aufgebracht wurde.

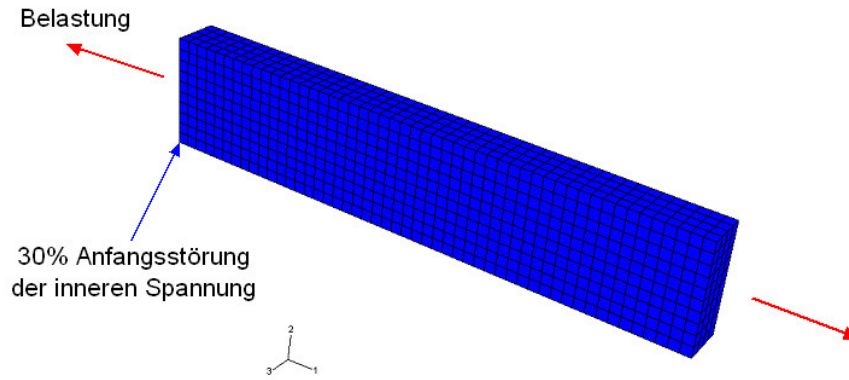


Abb. 4.47: Geometrie, Netzstruktur, Belastungsrichtung und künstliche Störung bei der FE-Simulation der Verformung eines dünnen flachen Streifens. Abmessung: $2,5 \times 1,0 \times 12,5 \text{ mm}$.

Die Abhängigkeit der Ergebnisse derartiger Simulationen von der Element- und Probengröße wurde bereits von Zhang [89] analysiert. Zhang stellt fest, dass die Bandbreite der Probenbreite proportional und der Winkel des Bands zur Ausbreitungsrichtung schwach von der Probendicke abhängig sind. In der vorliegenden Arbeit wurde die Simulation auf die Evolution von ausgewählten Modellvariablen konzentriert. Dies waren die von-Mises-Spannung, die Rate der plastischen Vergleichsdehnung, die plastische Vergleichsdehnung und die Fremdatomkonzentration.

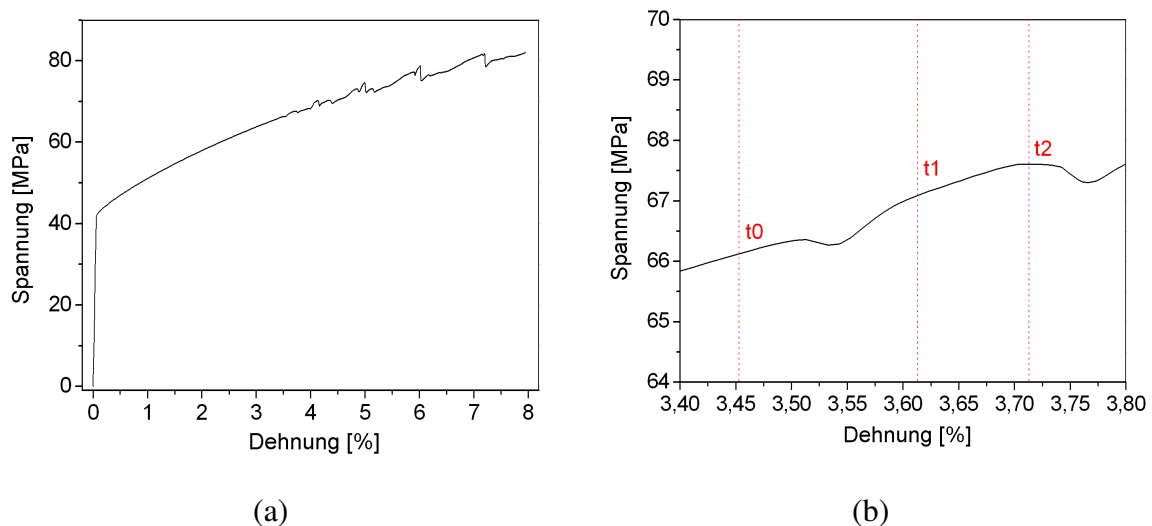


Abb. 4.48: Bis zu einer Gesamtdehnung von 8 % simulierte Spannungs-Dehnungs-Kurve des Streifens (a) und vergrößerter Ausschnitt daraus mit den nachfolgend näher betrachteten Zeitpunkten $t_0 = 17,27 \text{ s}$, $t_1 = 18,07 \text{ s}$ und $t_2 = 18,57 \text{ s}$ (b)

Experimentell zeichnet sich der PLC-Effekt dadurch aus, dass in Phasen der Bandbildung, -ausbreitung und -beendigung Spannungssprünge in der Spannungs-Dehnungs-Kurve auftreten. Derartige Spannungssprünge sind auch in der berechneten Spannungs-Dehnungs-Kurve des Streifens festzustellen (Abb. 4.48). Sie sind charakteristisch für Typ-A-Bänder.

Die in Abb. 4.48 angegebenen Zeitpunkte t_0 , t_1 und t_2 markieren die Phase vor der ersten Entstehung eines Bands, die Phase der Ausbreitung bzw. die Phase der Orientierungsänderung

dieses Bands. Zum Zeitpunkt t_0 tritt aufgrund der Störung der effektiven Fließspannung auf der linken Seite des Streifens eine lokale Spannungskonzentration in Form eines Bands auf (Abb. 4.49a). Die Rate der plastischen Vergleichsdehnung ist zu diesem Zeitpunkt vergleichsweise gleichmäßig in der Probe verteilt (Abb. 4.49b). Ein geringes Ratenmaximum befindet sich in Probenmitte, nicht jedoch im Bereich der Spannungskonzentration auf der linken Probenseite. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass zur Beschreibung der dynamischen Reckalterung die Alterungszeit in das Modell eingeführt worden ist, die die Evolution aller Zustandvariablen beeinflusst (2.23). Auf Grund dessen können sich die Spannung und die Rate der plastischen Vergleichsdehnung nicht simultan ändern. Die Wechselwirkung dieser beiden Größen wird auch von der Fremdatomkonzentration an den Versetzungen beeinflusst. Die plastische Verformung vor dem ersten Lastabfall kann als Vorbereitungsphase für das Auftreten des Phänomens der plastischen Instabilität betrachtet werden, weil die Konzentration der Fremdatome an den Versetzungen sowohl von der plastischen Dehnung als auch der Alterungszeit abhängt (Gleichung (2.29)). Die kritische Dehnung für das Einsetzen des PLC-Effekts liegt bei etwa 3,5% (vgl. Abb. 4.48b).

Die Verteilungen der von-Mises-Spannung, der Rate der plastischen Vergleichsdehnung, der Fremdatomkonzentration und der plastischen Vergleichsdehnung zum Zeitpunkt $t_1=18,07$ werden in Abb. 4.50 dargestellt. Dieser Zeitpunkt entspricht der Ausbreitungsphase eines im erwähnten Spannungskonzentrationsbereich entstandenen PLC-Bands, welches sich in Richtung der rechten Seite der Probe bewegt.

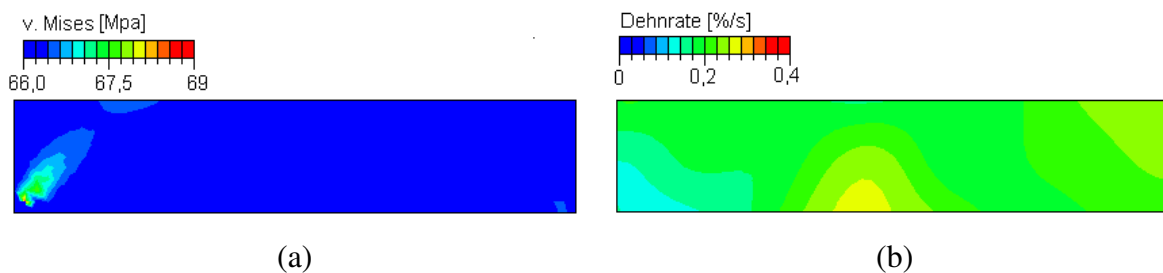


Abb. 4.49: Von-Mises-Spannung (a) und Rate der plastischen Vergleichsdehnung (b) vor der Entstehung des ersten PLC-Bands zum Zeitpunkt $t_0 = 17.27s$

In Abb. 4.50a ist sichtbar, dass es zu diesem Zeitpunkt zwei Spannungskonzentrationsbereiche gibt. Eine Spannungskonzentration befindet sich an der Ursprungsstelle (vgl. Abb. 4.49a), die andere vor dem im Dehnratebild (Abb. 4.50b) erkennbaren PLC-Band. Die zweite Spannungskonzentration ist für die Ausbreitung des PLC-Bands notwendig. Der rote Pfeil stellt die Ausbreitungsrichtung dar. Der Kern des PLC-Bands befindet sich innerhalb der Probe. Abb. 4.50c ist zu entnehmen, dass sich vor dem propagierenden Band ein Bereich hoher Fremdatomkonzentration befindet. Die Fremdatome behindern die Ausbreitung des PLC-Bands, weil sie die Spannung erhöhen, die effektiv zur Überwindung der Hindernisse erforderlich ist, an denen die mobilen Versetzungen während der Wartezeit verankert sind.

Anhand von Abb. 4.50d ist sichtbar, dass sich der Bereich erhöhter plastischer Vergleichsdehnung während der Ausbreitung des PLC-Bands erweitert. Dort liegt aufgrund der Dehnungsalterung auch eine erhöhte interne Spannung vor. Bei einem Vergleich der vier Teilbilder von Abb. 4.50 wird deutlich, dass an der Vorderseite des PLC-Bands, d. h. dort, wohin das PLC-Band demnächst propagieren wird, neben der erhöhten Spannung und erhöhten Fremdatomkonzentration eine - im Vergleich zur ersten Spannungskonzentration - geringe plastische Vergleichsdehnung vorliegt. Beides fördert die Absenkung der erhöhten Fremdatomkonzentration in diesem Gebiet. Dadurch verringert sich dort die Dehnratenempfindlichkeit. Sobald die Dehnratenempfindlichkeit negativ ist, propagiert das PLC-Band in diesen Bereich und schiebt dabei die Spannungskonzentration vor sich her. In dem entsprechenden

Probenbereich hinter der Konzentration nimmt die Spannung schlagartig um einen Werte von ca. 1 MPa ab (Abb. 4.50a, deutlicher in Abb. 4.51a).

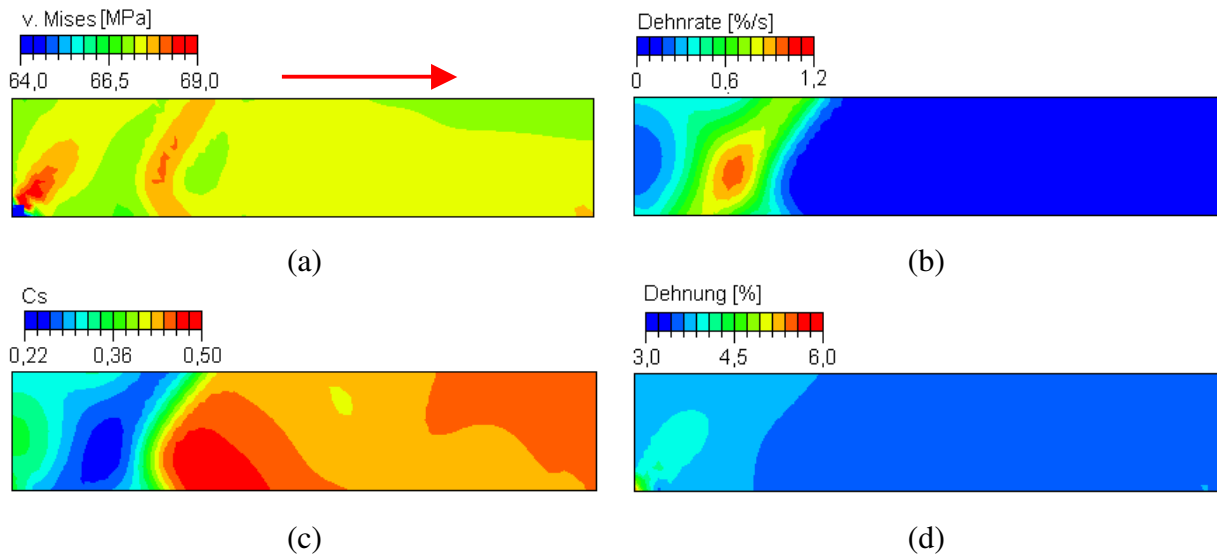


Abb. 4.50: Von-Mises-Spannung (a), Rate der plastischen Vergleichsdehnung (b), Fremdatomkonzentration an den Versetzungen (c) und plastische Vergleichsdehnung (d) in der Phase der Ausbreitung des ersten PLC-Bands zum Zeitpunkt $t_1 = 18,07$ s

In Abb. 4.51 sind die von-Mises-Spannung, die Rate der plastischen Vergleichsdehnung, die Fremdatomkonzentration und die plastische Vergleichsdehnung in der Endphase der Ausbreitung des ersten PLC-Bands dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt ($t_2 = 18,57$ s) erscheint auf der rechten Probenseite bereits ein neues PLC-Band, das spiegelbildlich ausgerichtet ist. Gleichzeitig setzt ein erneuter Abfall der Spannung in der Spannungs-Dehnungs-Kurve ein (Abb. 4.48b).

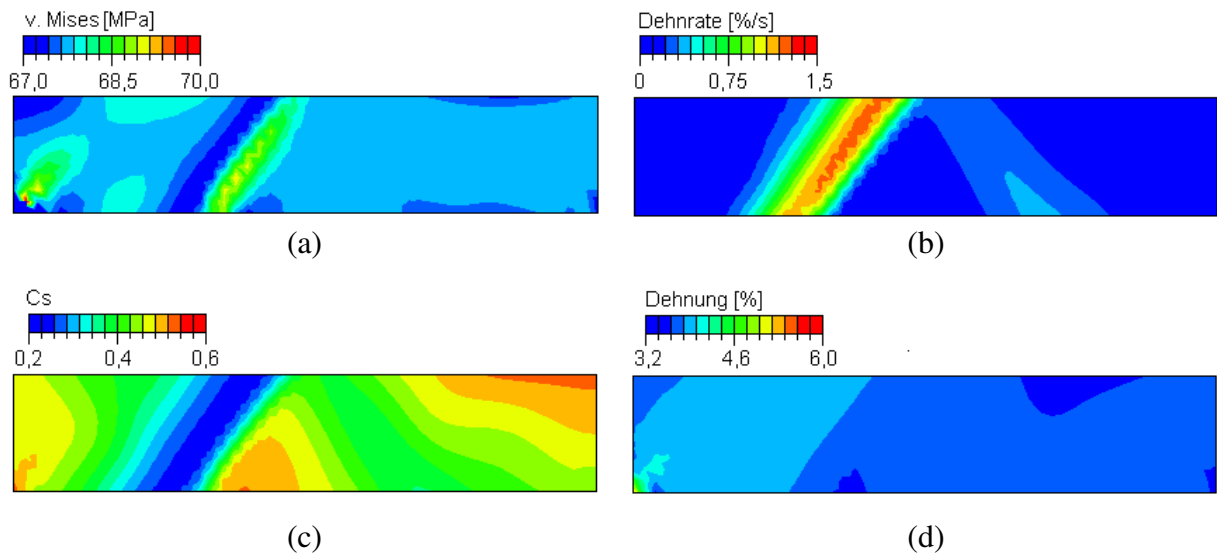


Abb. 4.51: Von-Mises-Spannung (a), Rate der plastischen Vergleichsdehnung (b), Fremdatomkonzentration (c) und plastische Vergleichsdehnung (d) in der Endphase der Ausbreitung des ersten PLC-Bands zum Zeitpunkt $t_2 = 18,57$ s

In Abb. 4.51a gibt es eine deutliche Spannungskonzentration in der Richtung der Ausbreitung des neuen Bands (von links nach rechts). Im Bild der Rate der plastischen Vergleichsdehnung (Abb. 4.51b) ist das neue Band (auf rechten Seite) noch schwach erkennbar. Es wird jedoch

weiter wachsen, während das Band auf der linken Seite abnimmt. Aus Abb. 4.51c ist ersichtlich, dass die Fremdatomkonzentration insgesamt stark gegenüber Abb. 4.50c abgenommen hat. Der Grund des Auftretens des neuen Bands ist eine besonders geringe Fremdatomkonzentration an dieser Stelle. D. h. die Hinderniswirkung der Fremdatome ist für das neue Band kleiner als auf der Vorderseite des propagierenden PLC-Bands.

4.2.1.3 3D-Simulation mit realer Probegeometrie

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von FE-Simulationsrechnungen vorgestellt, die auf Basis des Estrin-McCormick-Modells an Proben mit Realgeometrie durchgeführt worden sind. In diesem Fall war keine künstliche Störung des Anfangswerts der inneren Spannung an einem Element erforderlich, da der Dehnungsgradient im Übergangsbereich zwischen Probenkopf und Probensteg die Entstehung der PLC-Bänder initiiert.

Die Spannungs-Zeit Kurve (Abb. 4.52) wurde unter der Annahme einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 8.0 \mu\text{m/s}$ simuliert. Das betrachtete Zeitintervall entspricht einem Bereich, in dem im Experiment Typ-A-Bänder gefunden wurden. In dieser Spannungs-Zeit Kurve wurden zwei Zeitpunkte t_0 und t_1 gekennzeichnet, die in der Entstehungs- bzw. Ausbreitungsphase eines PLC-Bands liegen und in den Abb. 4.53 sowie Abb. 4.54 näher betrachtet werden.

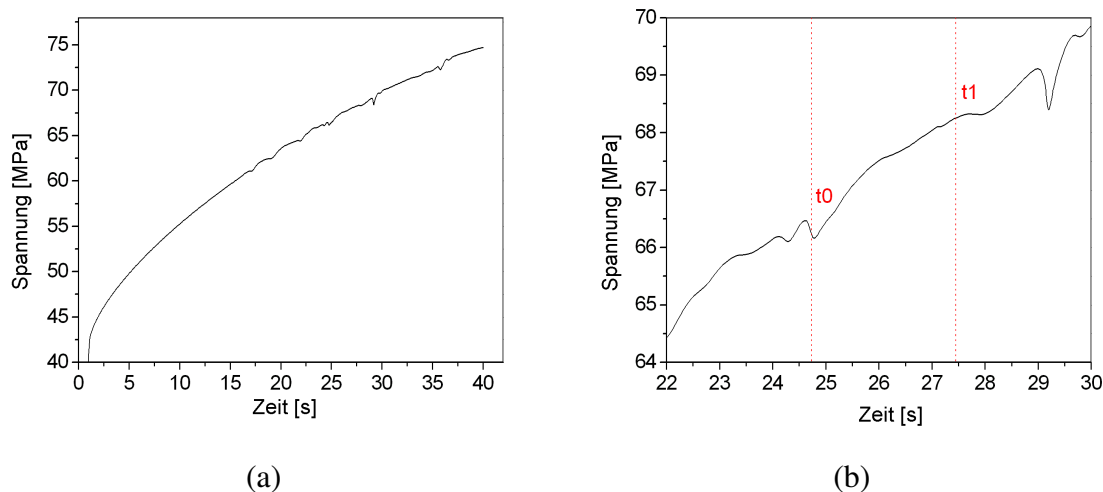


Abb. 4.52: Bis zu einer Gesamtzeit von 40 s simulierte Spannungs-Zeit-Kurve der Realprobe (a) und vergrößerter Ausschnitt daraus mit den nachfolgend näher betrachteten Zeitpunkten $t_0 = 24,73$ s und $t_1 = 27,45$ s (b)

In Abb. 4.53a erscheint das beispielhaft betrachtete PLC-Band am Übergang zwischen dem linken Probenkopf und dem Probensteg. Das Band erstreckt sich stetig von der einen zur anderen Probenkante. Der Winkel zwischen der longitudinalen Achse der Probe und dem PLC-Band beträgt etwa 52° .

Wegen der Probenachsensymmetrie sollten die PLC-Bänder in der Simulation auf beiden Seiten der Probe entstehen und sich dann zur jeweils anderen Seite bewegen. Das ist jedoch nicht der Fall. Der Grund dafür ist, dass zwei gleichzeitig auf beiden Seiten entstehende PLC-Bänder konkurrierende Prozesse sind. Wenn im Bereich des einen der beiden potentiellen PLC-Bänder geringfügig früher die Spannung erreicht wird, die für die Überwindung der Versetzungshindernisse erforderlich ist, beginnt ein elastischer Relaxationsprozess. Der resultierende Spannungsabfall unterdrückt die vollständige Herausbildung des zweiten PLC-Bands. Der Bereich relativ hoher Dehnrate auf der rechten Probenseite ist ein solches, noch nicht vollständig entwickeltes PLC-Band. Die Tatsache, dass der Prozess der Bandbildung auf bei-

den Seiten nicht gleichphasig, d.h. asymmetrisch verläuft, hat numerische Gründe: Das FE-Modell der Probe ist nicht völlig symmetrisch vernetzt. Das Phänomene des asymmetrischen Bandbildungsverhaltens ist auch in den Experimenten festzustellen, hat hier jedoch eine andere Ursache: Die Proben können nicht völlig symmetrisch hergestellt und in der Verformungseinrichtung belastet werden. Folglich werden in den meisten Fällen PLC-Bänder beobachtet, die vorwiegend von einer zur anderen Probenseite propagieren.

Zum Zeitpunkt t_1 hat das nach rechts propagierende PLC-Band etwa die Mitte der Probe erreicht (Abb. 4.53b). Der Winkel zur Probenlängsachse hat sich in der Zwischenzeit kaum verändert (jetzt etwa 53°). Die Herausbildung eines weiteren PLC-Bands auf der rechten Seite, wird nach kurzer Zeit aufgrund einer zu geringen internen Spannung und der Unterdrückung durch das PLC-Band in der Probenmitte abgebrochen.

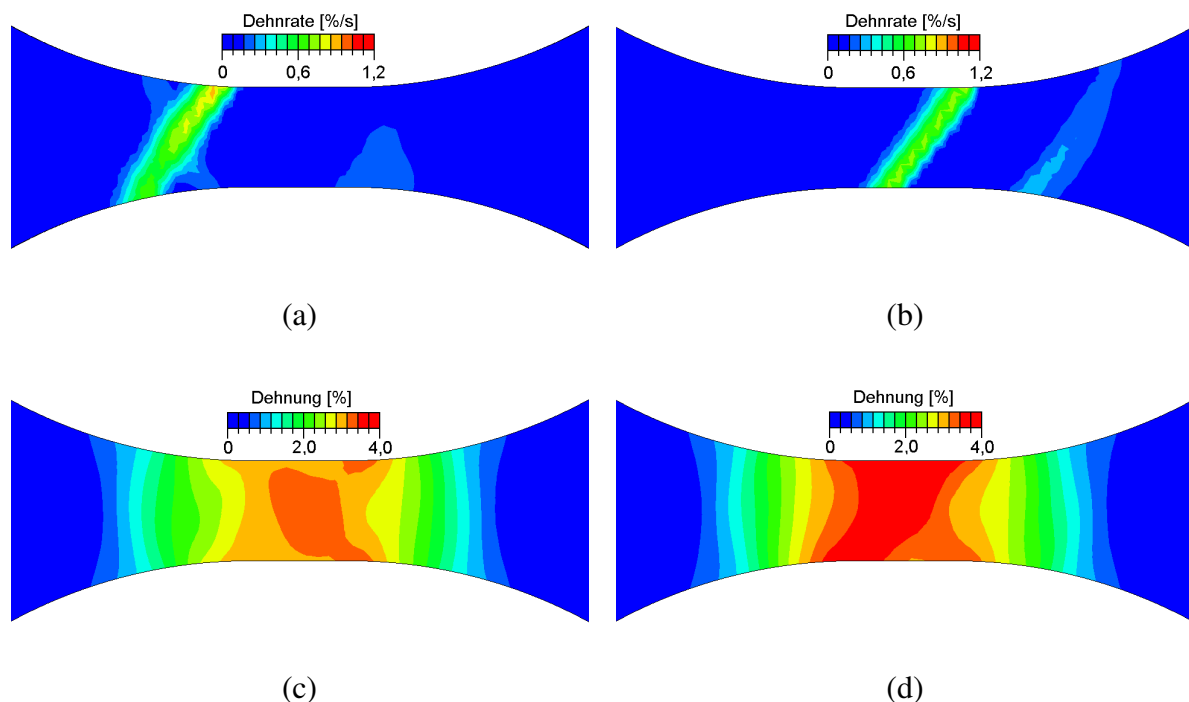


Abb. 4.53: Rate der plastischen Vergleichsdehnung (oben) und plastische Vergleichsdehnung (unten) in der Realprobe zu den beiden Zeitpunkten $t_0 = 24,73$ s (links) und $t_1 = 27,45$ s (rechts)

Die beiden Verteilungen der plastischen Vergleichsdehnung zu den Zeitpunkten t_0 and t_1 zeigen, dass die plastische Verformung in der Mitte der Probe konzentriert ist (Abb. 4.53c+d). Die sich wiederholende Bandausbreitung, manchmal rückwärts und vorwärts, macht die plastische Verformung in Probenmitte immer intensiver und makroskopisch 'homogener'.

In den Verteilungen der Alterungszeit zu den Zeitpunkten t_0 und t_1 (Abb. 4.54a+b) sind in der Nähe der beiden Probenenden zwei schmale Streifen erhöhter Alterung erkennbar. Sie markieren die Grenzen der plastischen Verformung in der Probe und sind gleichzeitig Bereiche, in denen PLC-Bänder entstehen und mit der Ausbreitung beginnen können. Ansonsten ist die Alterungszeit auf die Probenmitte (Abb. 4.54a) oder auf zwei Streifen rechts und links der Probenmitte konzentriert (Abb. 4.54b), wohingegen sie im Übergangsbereich zu den Probenköpfen und in Abb. 4.54b auch in Probenmitte relativ gering ist. Ursache hierfür ist die Verteilung der Rate der plastischen Vergleichsdehnung, die fast umgekehrt proportional zur Alterungszeit verteilt ist (vgl. Abb. 4.53a+b). Die Rate der plastischen Vergleichsdehnung und die

Alterungszeit bestimmen die Fremdatomkonzentration, deren Verteilungen in Abb. 4.54c+d dargestellt sind.

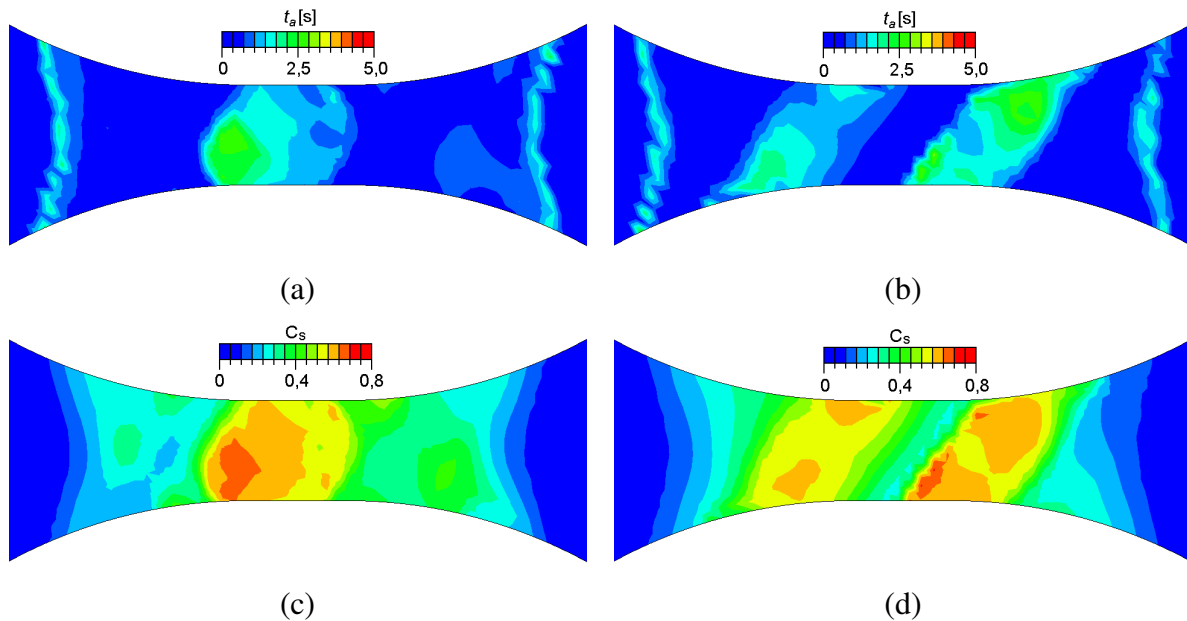


Abb. 4.54: Alterungszeit t_a (oben) und Konzentration der Fremdatome C_s (unten) in der Realprobe zu den beiden Zeitpunkten $t_0 = 24,73$ s (links) und $t_1 = 27,45$ s (rechts)

Aus der Verteilung der von-Mises-Spannung zum Zeitpunkt t_0 (Abb. 4.55a) ist zu entnehmen, dass im Bereich des PLC-Bands keine Spannungskonzentration und somit auch kein Spannungsgradient existiert. Daraus ist zu folgern, dass nicht der Spannungsgradient sondern der Dehnungsgradient der Schlüsselfaktor für die Entstehung dieses Typs von PLC-Bändern ist, d. h. die von der plastischen Dehnung abhängige Fremdatomkonzentration. In der Spannungsverteilung zum Zeitpunkt t_1 tritt an der Front des sich ausbreitenden PLC-Bands eine Konzentration der Spannung und der Fremdatomkonzentration auf (Abb. 4.55b).

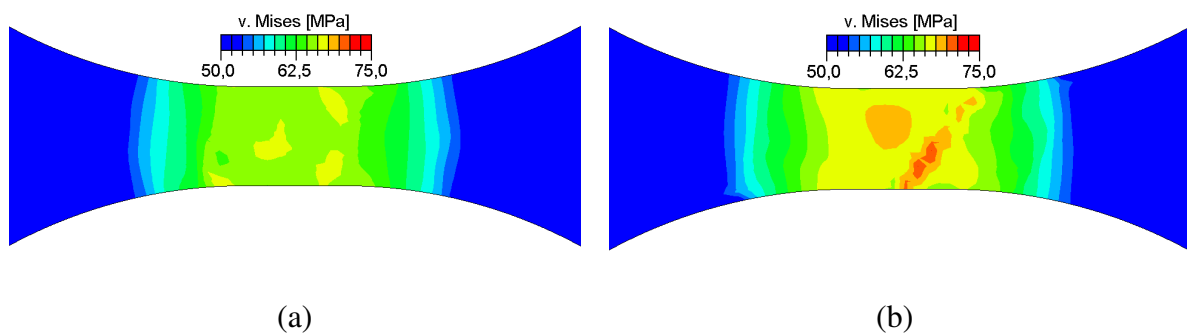


Abb. 4.55: Von-Mises-Spannung in der Realprobe zu den beiden Zeitpunkten $t_0 = 24,73$ s (a, links) und $t_1 = 27,45$ s (b, rechts)

4.2.1.4 Die Temperaturverteilung - Wärmeableitung

Die plastische Verformung ist immer von einer Wärmefreisetzung begleitet. Daher können die sich bewegenden PLC-Bänder als mobile Wärmequellen betrachtet werden. Die für die Wärmefreisetzung maßgebliche Beziehung zwischen dem plastischen Dehnungsincrement $\Delta \epsilon^p$ und dem Temperaturinkrement ΔT wird theoretisch durch Gleichung (4.5)

$$\Delta T = \frac{\beta \sigma}{\rho c_p} \Delta \epsilon^p \quad (4.5)$$

beschrieben.

Diese Gleichung gilt allerdings nur im 1-dimensionalen Fall unter adiabatischen Bedingungen. Für die in dieser Arbeit untersuchten, gut Wärme leitenden Aluminiumlegierungen lassen sich adiabatische Bedingungen kaum erfüllen. Deshalb war es unumgänglich, die Wärmeleitung zu berücksichtigen.

Im Experiment wurde mit der Thermokamera die Temperaturrate flächenhaft gemessen und die PLC-Bänder entlang der Probe verfolgt. In der mittels UMAT durchgeführten Simulation erfolgte in jedem Zeitschritt die Berechnung der Rate der plastischen Vergleichsdehnung und der von-Mises-Spannung. Beide Größen wurden dann als Wärmequellen in das nutzerdefinierte ABAQUS-Unterprogramm „HETVAL“, das für die Lösung des Wärmeleitungsproblems zum Einsatz kam, eingegeben. Als Randbedingung für die Wärmeleitung wurde eine konstante Umgebungstemperatur an beiden Probenenden angenommen.

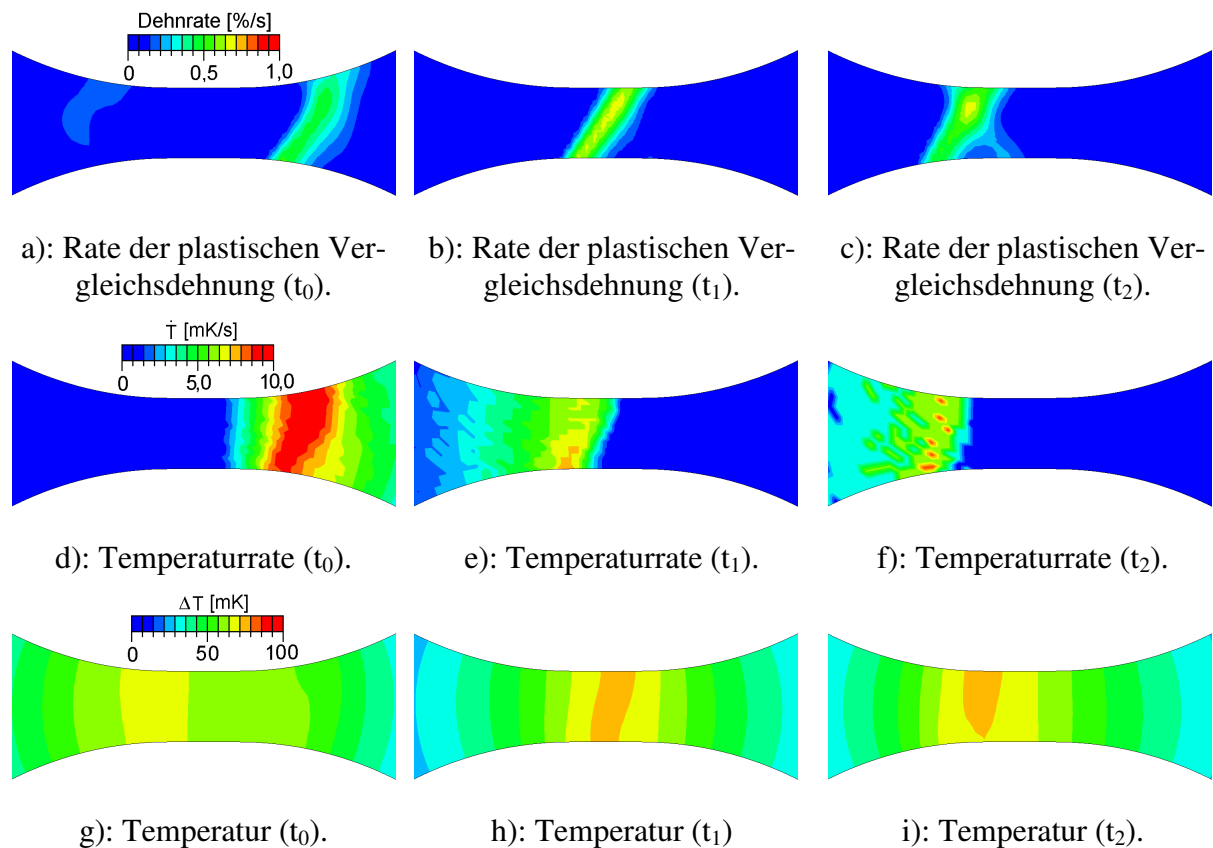


Abb. 4.56: Simulation der Wärmefreisetzung (Temperaturrate, Teilbilder d-f) und der Temperaturverteilung (Teilbilder g-i, Differenz zu Raumtemperatur) in Folge der Bildung eines PLC-Bands am Übergang zwischen dem rechten Probenkopf und dem Probensteg zum Zeitpunkt t_0 (a), der Ausbreitung dieses Band zur Probenmitte (Zeitpunkt t_1 , b) und zur linken Proben Seite (Zeitpunkt t_2 , c)

Die Ergebnisse dieser Simulation sind in Abb. 4.56 dargestellt. Die Teilbilder a, d und g von Abb. 4.56 geben die Verteilung von Dehnrate, Temperaturrate und Temperatur zu einem Zeitpunkt t_0 wieder, in dem gerade ein PLC-Band an der linken Seite verschwindet und ein neues Band an der rechten Seite entsteht. Letzteres propagiert anschließend zur linken Seite.

Der rote Bereich des Temperaturratebands (Abb. 4.56d) ist in der Form dem PLC-Band sehr ähnlich, dessen Position und Ausdehnung am besten im Dehnratebild (Abb. 4.56a) erkennbar ist. Das Temperaturrateband ist aufgrund der Wärmeleitung deutlich breiter als das PLC-Band. Die Asymmetrie des Temperaturratebands zeigt an, dass die entstehende Wärme - dem negativen Gradienten der Temperatur folgend - nach rechts fließt. Das Maximum der Temperaturverteilung (Abb. 4.56g) befindet sich nicht an der gleichen Stelle wie das in Abb. 4.56a sichtbare PLC-Band und auch nicht in der Probenmitte. Ursache hierfür ist das an der linken Seite verschwindende PLC-Band. Die von diesem Band freigesetzte Wärme wirkt noch nach, indem der Temperaturabfall in diesem Bereich verzögert wird. Deshalb ist die alleinige Auswertung des Temperaturfelds keine geeignete Methode, um PLC-Bänder nachzuweisen.

Zum Zeitpunkt t_1 , in dem das PLC-Band die Probenmitte durchläuft (Abb. 4.56b), ist die Temperatur der Probe nahezu symmetrisch verteilt (Abb. 4.56h). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der verzögerte Temperaturabfall auf der linken Seite und der durch das aktuelle PLC-Band verursachte Temperaturanstieg auf der rechten Seite sich wechselseitig ausgleichen. Generell gilt, dass beim Auftreten von Temperaturdifferenzen zwischen beiden Seiten eines PLC-Bands, die vom PLC-Band generierte Wärme die Tendenz hat, diesen Unterschied zu kompensieren. Ist dies der Fall, fließt mehr Wärme zu der Seite, an der die Temperatur niedriger ist und sorgt dort für einen stärkeren Temperaturanstieg. Folglich wird der Bereich maximaler Temperaturrate nicht exakt mit der Position des PLC-Bands übereinstimmen. Wird im Experiment die Temperaturrate zum Nachweisen der PLC-Bänder verwendet, muss berücksichtigt werden, dass in diesem Fall eine kleine Phasendifferenz zwischen der gemessenen Position des Temperaturratemaximums und der tatsächlichen Position des PLC-Bands existiert. Der Vergleich der Teilbilder e und h von Abb. 4.56 mit dem Teilbild b zeigt, dass die Verwendung des Temperaturmaximums in diesem Fall besser als die Temperaturrate zur Ermittlung der Bandposition geeignet ist. Dies ist aber ein Ausnahmefall.

Zum Zeitpunkt t_2 hat das PLC-Band die linke Seite der Probe erreicht (Abb. 4.56c). Der Maximum der Temperaturverteilung liegt wieder links der Probenmitte. Die Phasendifferenz zwischen dem PLC-Band (Dehnrate, Abb. 4.56c) und dem Temperaturratemaximum (Abb. 4.56e) ist jetzt offensichtlich.

Es gibt mehrere Faktoren, welche die Phasendifferenz zwischen der Position des Temperaturratemaximums und der Position des PLC-Bands beeinflussen. Aus Sicht der Simulation der Wärmeleitung gehören dazu die Wärmeleitfähigkeit (k), die spezifische Wärmekapazität (ρc), die Bandgeschwindigkeit (c_b), der Bandtyp, das Diskretisierungszeitintervall (Δt) und die Randbedingungen. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die PLC-Bänder in der Legierung AlMg3 bei hoher Bandgeschwindigkeit mittels des Temperaturinkrements bzw. der Temperaturrate nachweisbar sind und ihre Position und Form ermittelt werden kann. In der Arbeit [3] wurde auf diese Weise festgestellt, dass sich der Zusammenhang zwischen der Bandgeschwindigkeit und der globalen Dehnrate durch ein Potenzgesetz mit dem Exponenten 0,72 beschrieben werden kann. Deswegen kann die Phasendifferenz oberhalb bestimmter globaler Dehnraten (Zuggeschwindigkeit) vernachlässigt werden. Bei Typ-B Bändern, die im Experiment bei sehr geringer globaler Dehnrate auftreten, erfolgt die Wärmedissipation sehr schnell und die Bandausbreitung dauert nur sehr kurze Zeit an.

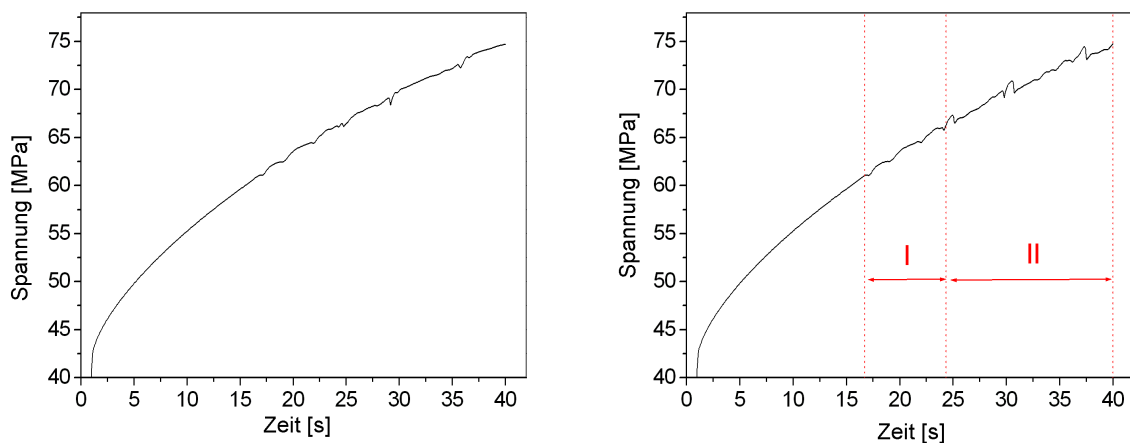
In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass das Zeitintervall bei der Simulation (0,05 s, was einer Abtastfrequenz von 20 Hz entspricht) den Beitrag der ermittelten Phasendifferenz beeinflusst. Je höher die Abtastfrequenz in der Simulation gewählt wird, desto besser nähert man sich der tatsächlichen Phasendifferenz an. Entsprechendes gilt für die Bildrate der Kamera. Um den Fehler, der aus der Bildrate resultiert, zu minimieren, muss eine Hochgeschwindigkeitskamera in den Experimenten eingesetzt werden. Dann sollte die Oberfläche der Probe behandelt (z.B. geschwärzt) werden, um die Emissivität und damit die Nachweisbarkeit der PLC-Bänder zu erhöhen.

4.2.1.5 Die Kopplung der Temperatur unter adiabatischen Bedingungen

Im Modell von Estrin und McCormick wird der Einfluss der Temperatur auf den PLC Effekt auf zweierlei Weise berücksichtigt: Über den Vorfaktor $1/kT$ in der Gleichung für den Parameter P_1 (Gleichung (2.25), den thermisch aktivierten Prozess des Losreißen der Versetzungen von den Hindernissen) und über die Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten D (Gleichung (2.27), Prozess der Diffusion der Fremdatome) und damit über den temperaturabhängigen Parameter P_2 in den konstitutiven Gleichungen. In dieser Simulation kann der Einfluss der Temperatur auf den Parameter P_1 im Vergleich zum Einfluss auf P_2 vernachlässigt werden.

Die in der Überschrift dieses Kapitels angesprochene Temperaturkopplung kommt dadurch zustande, dass auf der einen Seite ein positives Temperaturinkrement die Diffusionsfähigkeit der Fremdatome verbessert, wodurch ihre Hinderniswirkung erhöht wird, und auf der anderen Seite ein positives Inkrement der plastischen Dehnung zu einem positiven Temperaturinkrement in der Probe führt. Der Einfluss dieses Kopplungsprozesses auf die PLC-Bänder wurde in dieser Arbeit simuliert, indem Gleichung (4.5) dem konstitutiven Modell beigelegt wurde.

In Abb. 4.57b ist eine mit diesem erweiterten Modell simulierte Spannungs-Zeit-Kurve der Spannungs-Zeit-Kurve gegenübergestellt, die sich ohne Temperaturkopplung ergibt (Abb. 4.57).



a): Ohne Temperaturkopplung (als Referenz). b): Mit Temperaturkopplung im adiabatischen Fall.

Abb. 4.57: Einfluss der Temperaturkopplung auf die Spannungs-Zeit-Kurve im adiabatischen Fall (b) im Vergleich mit der ohne Kopplung simulierten Kurve (a)

Während im Kurvenbereich I (in Abb. 4.57b gekennzeichnet) kein ausgeprägter Unterschied zwischen beiden Fällen besteht, ist im Bereich II die Amplitude der Spannungsschwankungen bei Temperaturkopplung höher als im normalen Fall. Ein spezifisches Merkmal einiger Spannungsschwankungen im Bereich II von Abb. 4.57b ist eine erhöhte Maximalspannung. Dies kann folgendermaßen erklärt werden: Nachdem die Verformung der Probe den Bereich II und dadurch die Temperatur einen gewissen Wert erreicht haben, kommt es temperaturbedingt zur Erhöhung des Diffusionskoeffizienten D . Gemäß Gleichung (2.26) nimmt dadurch die Konzentration der Fremdatome an den Versetzungen bei gleichbleibender Alterungszeit zu. Deswegen wird eine höhere effektive Spannung benötigt, um die Hindernisse zu überwinden und ein Band zu bilden.

Der Einfluss der Temperaturkopplung auf die PLC-Bandbildung und -ausbreitung wird in Abb. 4.58 und Abb. 4.59 veranschaulicht. In Abb. 4.58 sind zwei Ausschnitte der in

Abb. 4.57 dargestellten Spannungs-Zeit-Kurve dargestellt. Sie enthalten die 12 Zeitpunkte, für die in Abb. 4.59 die Verteilung der Dehnrates in der Probe präsentiert wird. Anhand der Dehnratesbilder ist die gerade zutreffende Morphologie der PLC-Bänder ablesbar.

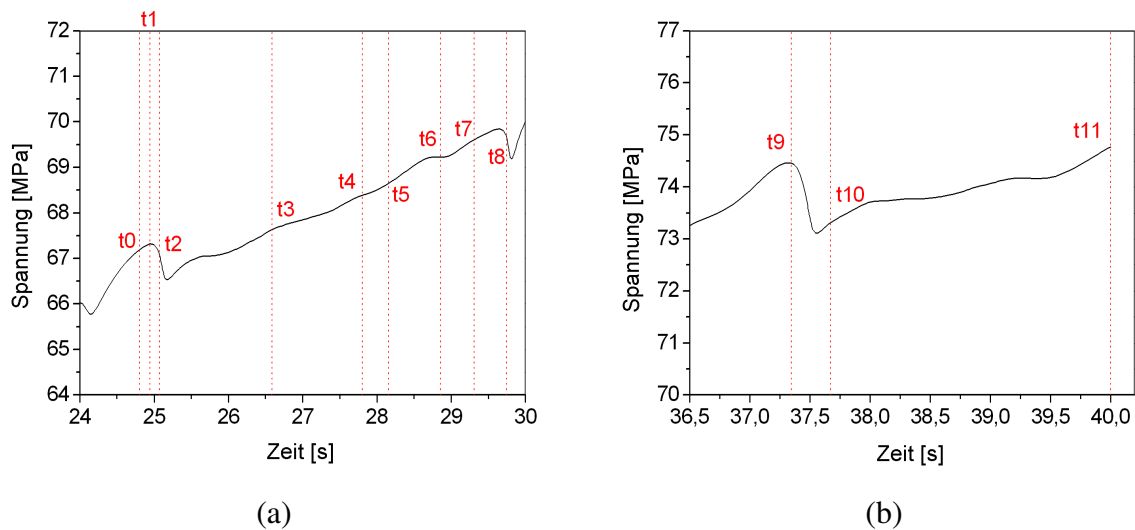


Abb. 4.58: Zwei zeitlich höher aufgelöste Ausschnitte der in Abb. 4.57 dargestellten Spannungs-Zeit-Kurve, Zeitintervall $t_0 \sim t_8$ (a) und Zeitintervall $t_9 \sim t_{11}$ (b)

Im Zeitintervall $t_0 - t_1$ sind mehrere Bänder im Entstehen begriffen und dem entsprechend treten in Abb. 4.59a+b drei Zonen mit erhöhten plastischen Dehnrates auf (links, mittig, rechts). Im Gegensatz zum Normalfall (keine Temperaturkopplung), bei dem ein PLC-Band an einer der beiden Seiten entsteht und sich dann zur anderen ausbreitet, erhält das in der Mitte entstehende Band die meiste Energie. Die plastische Dehnrates konzentriert sich auf diesen Bereich, während die Dehnrates im linken und rechten Bandbildungsbereich absinkt (Abb. 4.59c). Vermutlich liegt das daran, dass dort die Temperatur und damit die Fremdatomkonzentration an den Versetzungen am höchsten sind. Das mittlere PLC-Band breitet sich dann nach rechts aus (Abb. 4.59d). Während der Ausbreitung dieses ersten Bands entsteht ein neues Band am Übergang zwischen dem Probensteg und dem linken Probenkopf. Die beide Bänder breiten sich anschließend gemeinsam nach rechts aus (Abb. 4.59e). Bei der Bildung des zweiten Bands ist ein unerwartetes Phänomen aufgetreten: Der üblicherweise mit der Bandbildung verbundene, ausgeprägte Spannungsabfall ist ausgeblieben (vgl. Spannungs-Zeit-Kurve von Abb. 4.58a im Zeitintervall $t_3 \sim t_4$). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die lokale elastische Relaxation im Bereich des neu entstehenden PLC-Bands die globale (externe) Spannungskurve nicht stark beeinflusst, solange sich ein anderes PLC-Band ausbreitet. In den Experimenten wird in den meisten Fällen ein anderes Verhalten gefunden: Vor dem Verschwinden des sich gerade ausbreitenden Bands steigt die Spannung entweder nicht oder nur langsam an. Anschließend kommt es zu einem deutlichen Spannungsanstieg, der anhält, bis sich ein neues Band gebildet hat. Dann erfolgt wieder ein Spannungsabfall und das neue Band breitet sich aus. Die Spannungsvariation, zu denen es bei der gleichzeitigen Ausbreitung mehrerer Bänder kommt, die an unterschiedlichen Stellen entstehen, muss weiter experimentell untersucht werden.

Die Ausbreitung der beiden Bänder im Zeitintervall t_4 bis t_7 ist von einem alternierenden Wechsel der Dehnrates im Bandbereich begleitet (Abb. 4.59e-h): Wenn das rechte Band schwächer wird, wird das linke Band intensiver (Abb. 4.59f). In Abb. 4.59g ist es umgekehrt. In Abb. 4.59h verschwindet das linke Band und das rechte erreicht mittlerweile den Übergangsbereich. In Abb. 4.59i verbindet sich das rechte Band mit einem neu, am Übergangsbereich entstehenden Band. Zum Zeitpunkt t_9 entsteht - begleitet von einem Spannungsabfall

(vgl. Abb. 4.58a, Zeitpunkt t_8) - ein weiteres intensives PLC-Band in Probenmitte (Abb. 4.59j). Im Zeitintervall t_9 bis t_{11} breitet es sich nach der rechten Seite der Probe aus (Abb. 4.59j-l).

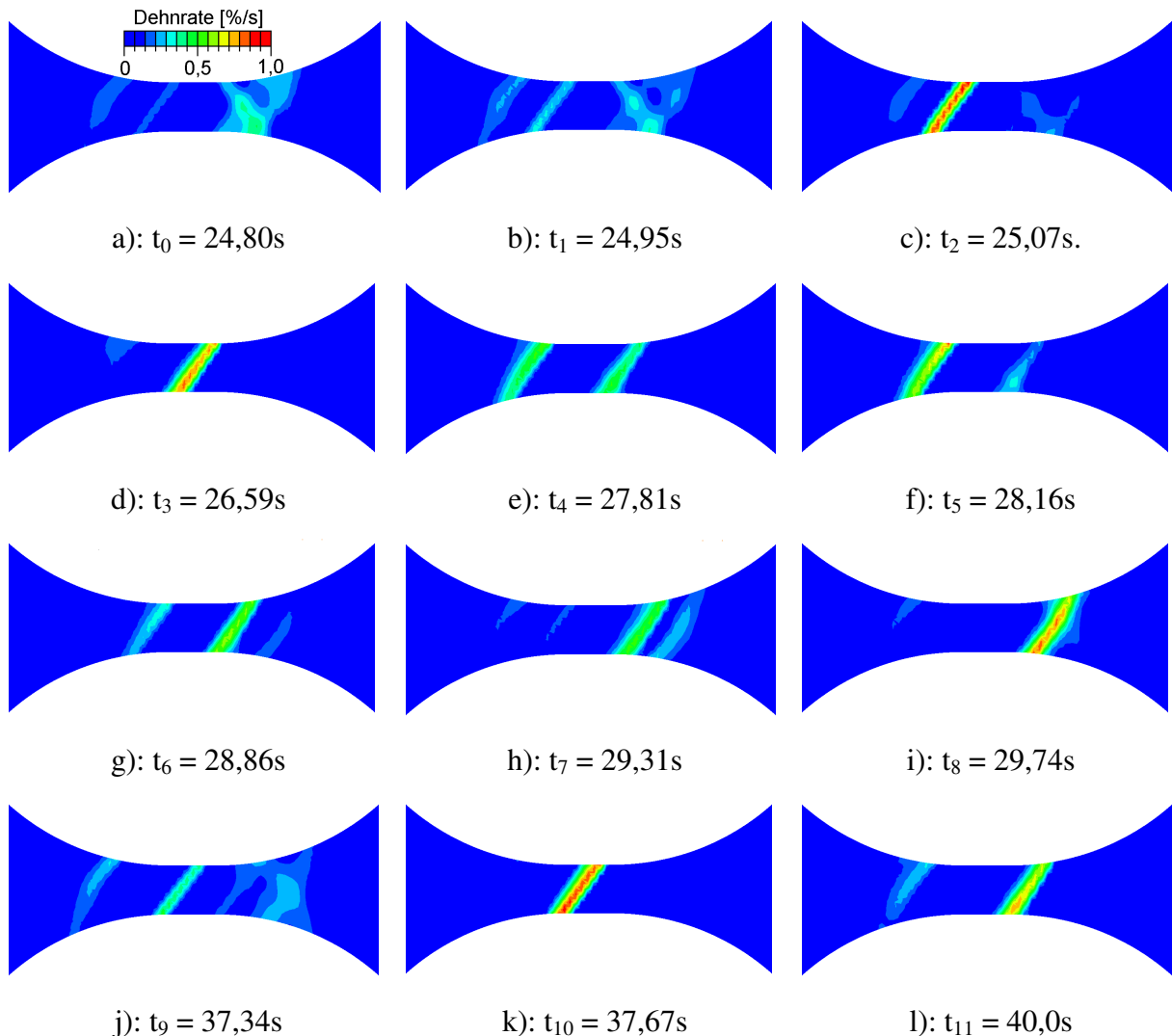


Abb. 4.59: Unter Berücksichtigung der Temperaturkopplung adiabatisch simulierte Dehnrate zu 12 ausgewählten Zeitpunkten

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei Berücksichtigung der Temperaturkopplung folgenden Phänomene zu beobachten sind:

1. Die Spannungsschwankungen sind ausgeprägter als im normalen Fall.
2. Die Ausbreitungen der PLC-Bänder wird häufiger unterbrochen und es breiten sich mehrere Bänder gleichzeitig aus.
3. Bei hohen globalen Dehnungen entstehen die PLC-Bänder nur noch im mittleren Bereich der Probe.

4.2.2 Vergleich von Experiment und Simulation mit dem Estrinmodell

4.2.2.1 Kinematik der Bandausbreitung

4.2.2.1.1 Stufen auf der Dehnungskurve

Breitet sich ein PLC-Band durch den Bereich eines DMS aus, wird ein Dehnungsanstieg registriert, der deutlich steiler ist als der Dehnungsanstieg, der sonst zu beobachten ist. Dadurch besitzt die Dehnungskurve einen stufenförmigen Verlauf. Die Höhe einer Stufe entspricht dem Dehnungssprung $\Delta\varepsilon_b$ des jeweiligen PLC-Bands.

In Abb. 4.60 werden für einen identischen Zeitraum eine gemessene und eine simulierte Dehnungs-Zeit-Kurve gegenübergestellt, die aufgrund des Durchlaufs mehrerer PLC-Bänder durch den DMS-Bereich ebenfalls einen solchen Verlauf zeigen. Experiment und Simulation stimmen darin überein, dass sich der größte Teil der plastischen Verformung auf die PLC-Bänder konzentriert und dass sich die PLC-Bänder vorrangig in eine Richtung ausbreiten. Die Neigung der einzelnen Stufen, das Dehnungssprung $\Delta\varepsilon_b$ und der mittlere Anstieg unterscheiden sich in Simulation und Experiment aber deutlich. Dieser Unterschied ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Modellparameter noch nicht realitätsnah gewählt worden sind. Aus den gleichen Gründen gibt es auch bei Bandgeschwindigkeit und Bandbreite Abweichungen zwischen Experiment und Simulation.

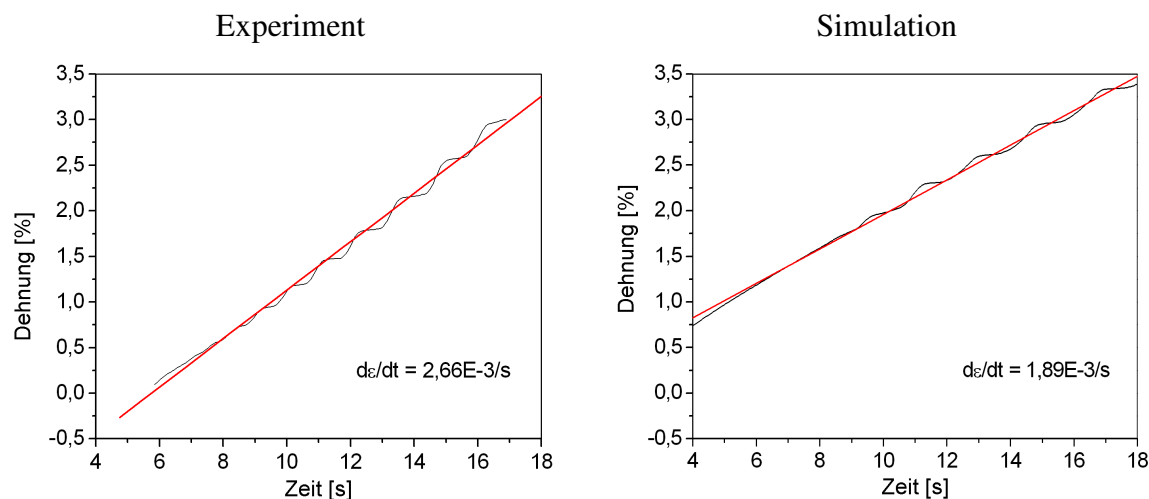


Abb. 4.60: Mittels DMS gemessene und auf Basis des Estrin-McCormick-Modells berechnete Dehnungs-Zeit-Kurven (schwarz), die infolge der Ausbreitung der PLC-Bänder durch den DMS-Bereich einen stufenförmigen Verlauf aufweisen. Den Dehnungs-Zeit-Kurven ist eine Ausgleichsgerade überlagert (rot). Aufgrund eines Schlupfes der Verformungseinrichtung steigt die gemessene Dehnung nicht zeitlinear sondern verzögert an, deshalb liegt zwischen Experiment und Simulation eine Zeitverschiebung vor

4.2.2.1.2 Spannungsserration

Das Auftreten von sägezahnförmigen Spannungsänderungen (Spannungsserration) ist ein typisches, mit der Entstehung und Ausbreitung von PLC-Bändern verknüpftes Merkmal. Im Experiment wird beobachtet, dass die Amplitude der Serrationen mit der Dehnung zunimmt (Abb. 4.61 links), wohingegen die Zunahme der Serrationsamplitude in Simulation nicht so deutlich ist (Abb. 4.61 rechts). Wie im Abschnitt 4.2.1.5 erörtert, passt sich die Amplitude der simulierten Serrationen stärker der im Experiment beobachteten Amplitude an, wenn die Temperaturkoppelung berücksichtigt wird.

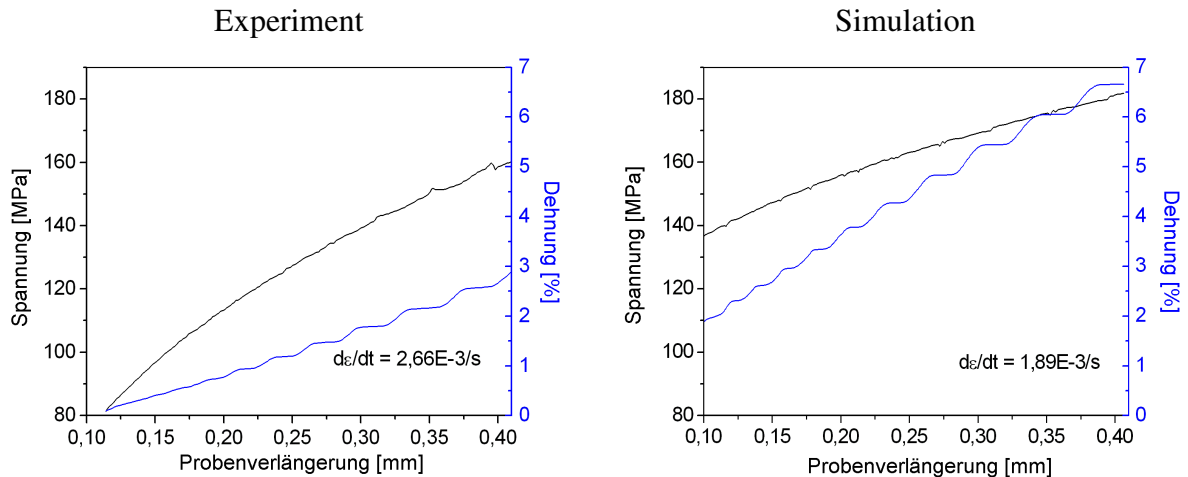


Abb. 4.61: Höhe der Amplitude der Spannungsserrationen, Vergleich zwischen der gemessenen (links) und der auf Basis des Estrin-McCormick-Modells simulierten Spannungs-Dehnungs-Verschiebungskurve (rechts)

Der Unterschied zwischen der experimentellen und der simulierten Spannungs-Probenverlängerungs-Kurve (Abb. 4.61) lässt sich vermuten, dass für die Simulation eine unzutreffende Fließkurve angenommen worden ist.

4.2.2.1.3 Zusammenhang zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und der Dehnrate

Aus Abb. 4.62 geht hervor, dass sowohl im Experiment als auch bei der Simulation ein linearer Zusammenhang zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und der Dehnrate festzustellen ist. Der Anstieg der in beiden Fällen berechneten Ausgleichsgeraden ($0,0869$ bzw. $0,177 \text{ mm}^{-1}$) entspricht dem Kehrwert der effektiven Verformungslänge der Probe, d.h. $11,5$ und $5,65 \text{ mm}$ in Experiment bzw. Simulation. In Anbetracht der tatsächlichen Länge des Probenstegs (4 mm) kommt der Wert der Simulation der Realität sehr nahe. Die Tatsache, dass die effektive Verformungslänge im Experiment etwa doppelt so hoch ist, ist darauf zurückzuführen, dass bei der Probenverlängerungsmessung auch Anteile berücksichtigt werden, die auf eine Längung der Bohrungen im Kopf der Proben zurückzuführen ist.

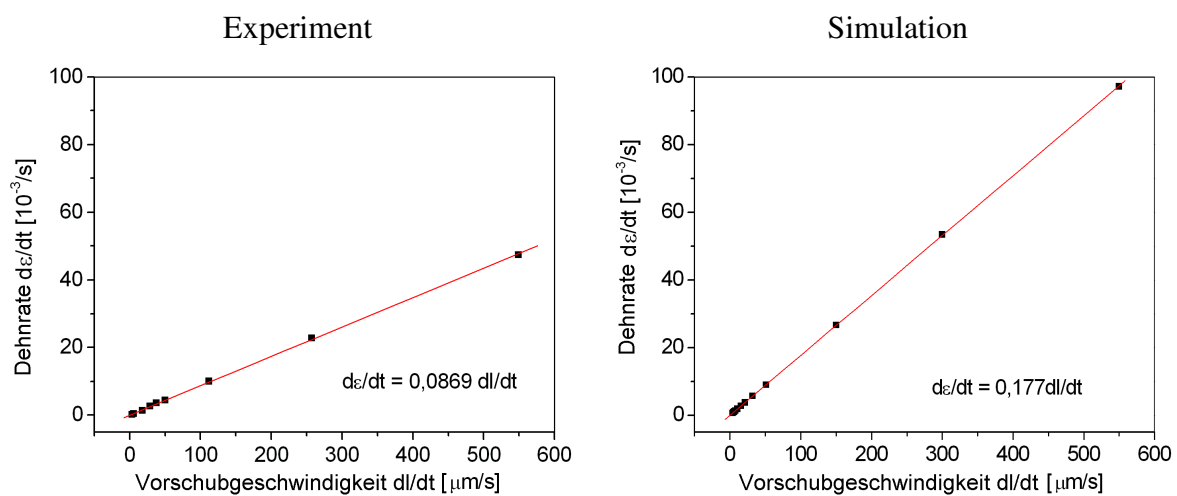


Abb. 4.62: Zusammenhang zwischen der mittleren Dehnrate im Dehnungsbereich von $0,1 - 3 \%$ und der Vorschubgeschwindigkeit des Experiments, Vergleich zwischen Experiment (links) und Simulation auf Basis des Estrin-McCormick-Modells (rechts)

Auch dieser Unterschied zeigt, dass einige der Modellparameter nicht zutreffend festgelegt worden sind. Neben der bereits in Abschnitt 4.2.2.1.2 erwähnten Fließkurve kommen die Parameter in Frage, die die dynamische Reckalterung beschreiben. Leider liegt für den hier untersuchten Werkstoff Al5457 keine sichere Datenbasis vor.

4.2.2.1.4 Einfluss der Dehnung auf die Bandgeschwindigkeit

In Abb. 4.63 ist sichtbar, dass die Geschwindigkeit der einzelnen Bänder eines Experiments exponentiell mit der mittleren Dehnung im Bereich des DMS abnimmt und sich dann asymptotisch einem Endwert annähert. Hierin stimmen Simulation und Experiment qualitativ überein. Allerdings ist diese Abnahme in der Simulation viel steiler als im Experiment. Außerdem sind die Koeffizienten der exponentiellen Ausgleichfunktion sehr unterschiedlich (10,8-128,4, 0,047-0,0053), während der Unterschied im Geschwindigkeitsendwert gering ist (0,88-1,35).

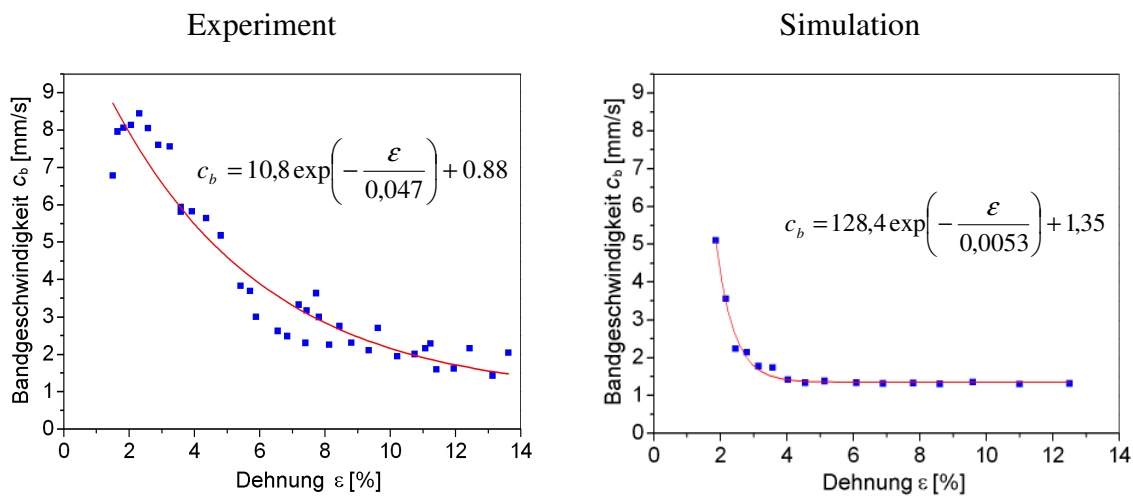


Abb. 4.63: Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit einzelner Bänder und der mittleren Dehnung im DMS-Bereich für ein mit einer Dehnrate von $2,7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ durchgeführtes Experiment, Vergleich zwischen dem Experiment (links) und einer Simulation auf Basis des Estrin-McCormick-Modells (rechts). Die in den beiden Abbildungen angegebenen Konstanten sind in der Einheit mm/s angegeben.

4.2.2.1.5 Einfluss der Dehnrate auf die Bandgeschwindigkeit

In Abb. 4.64 ist der Zusammenhang zwischen der Bandgeschwindigkeit und der Dehnrate für mehrere Experimente dargestellt, die mit unterschiedlicher Dehnrate durchgeführt worden sind. Es zeigt sich, dass die Bandgeschwindigkeits-Dehnungs-Kurve sowohl im Experiment (links) als auch in der Simulation (rechts) mit zunehmender Dehnrate nach oben verschoben wird.

Um den Einfluss der Dehnrate auf die Bandgeschwindigkeit zu analysieren, wurde die mittlere Geschwindigkeit (\bar{c}_b) der ersten fünf Bändern eines Experiments in Abhängigkeit von der Dehnrate ($\dot{\epsilon}$) des betreffenden Experiments dargestellt (Abb. 4.65). Diese Abhängigkeit folgt einem Potenzgesetz, wobei die beiden Exponenten in Experiment und Simulation (0,72 bzw. 0,73) sehr gut übereinstimmen. Beim Vorfaktor (19,2-8.1) besteht dagegen ein großer Unterschied.

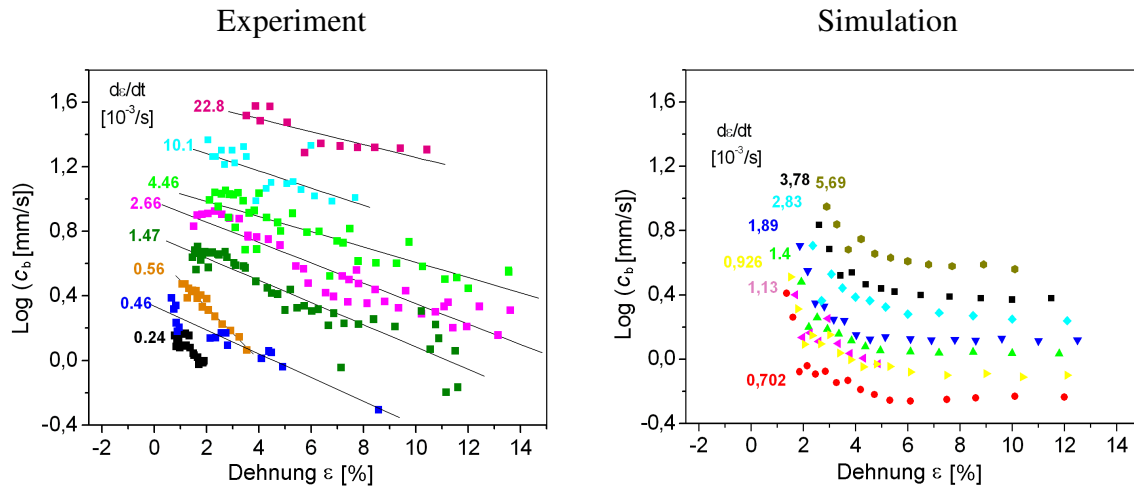


Abb. 4.64: Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit einzelner Bänder und der mittleren Dehnung im DMS-Bereich für verschiedene Dehnraten, Vergleich zwischen Experiment (links) und Simulation auf Basis des Estrinmodells

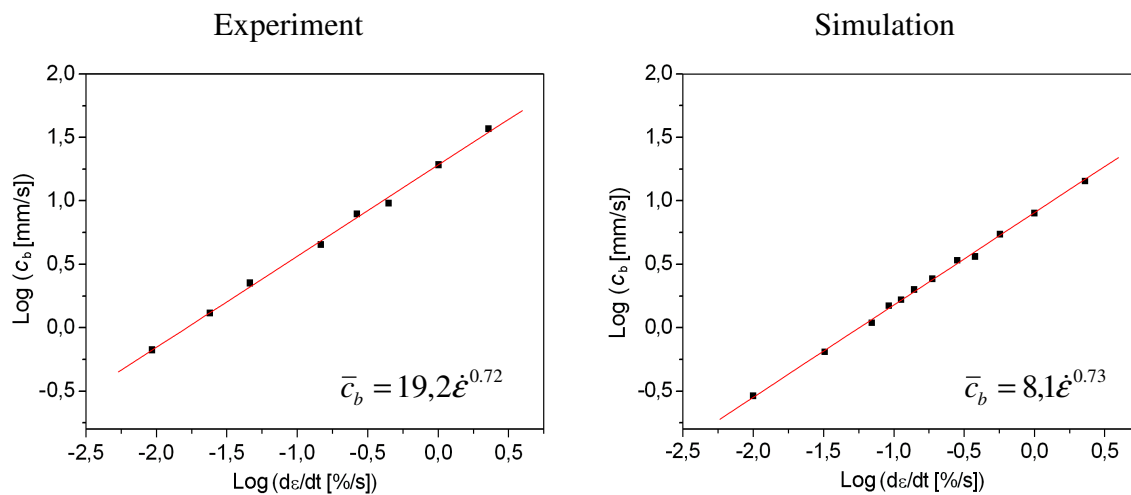


Abb. 4.65: Zusammenhang zwischen der mittleren Geschwindigkeit der ersten fünf Bänder und der mittleren Dehnrates des jeweiligen Experiments im Dehnungsbereich von 0,1 - 3 %, Vergleich zwischen Experiment (links) und Simulation auf Basis des Estrin-McCormick-Modells (rechts). Die in den beiden Abbildungen angegebenen Konstanten sind in der Einheit mm/s angegeben

4.2.2.1.6 Einfluss der Dehnung auf den Dehnungssprung $\Delta\epsilon$

In Abb. 4.66 wird der Zusammenhang zwischen der Höhe des Dehnungssprungs $\Delta\epsilon_b$ und der Dehnung ϵ dargestellt. Experiment (links) und Simulation (rechts) stimmen darin überein, dass der Dehnungssprung mit der Dehnung zunimmt und nicht stark von der Dehnraten abhängig ist. Allerdings ist der Anstieg des nahezu linearen Zusammenhangs in der Simulation geringer als im Experiment.

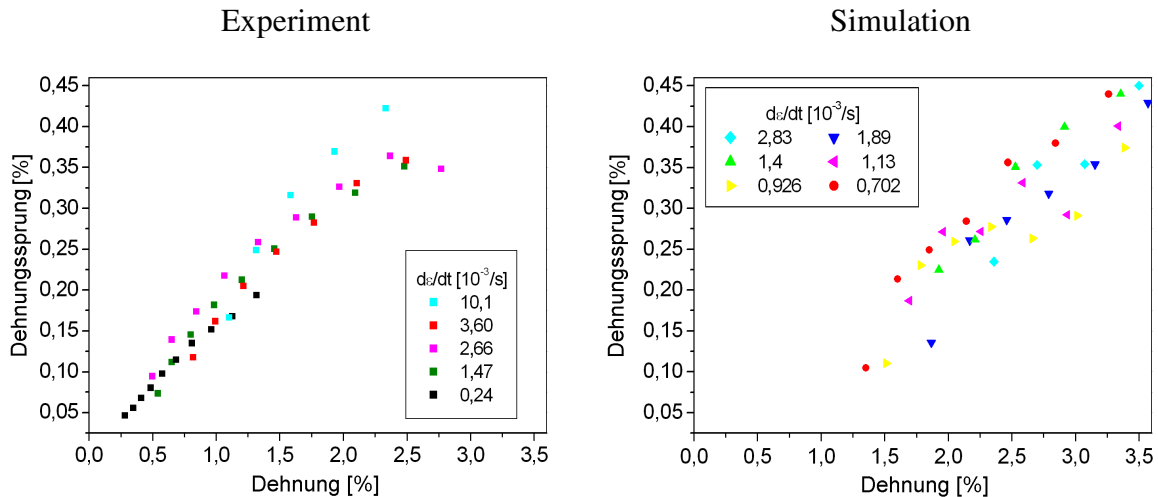


Abb. 4.66: Zusammenhang zwischen dem Dehnungssprung und der mittleren Dehnung im DMS-Bereich für verschiedene Dehnraten, Vergleich zwischen Experiment (links) und Simulation auf Basis des Estrinmodells (rechts)

4.2.2.1.7 Einfluss der Dehnrates auf die kritische Dehnung

Aus Abb. 4.67 geht hervor, dass die kritische Dehnung bei den in dieser Arbeit durchgeführten Experimenten das „normale Verhalten“ zeigt. Wie bereits in Abschnitt 4.1.1.2 erläutert,

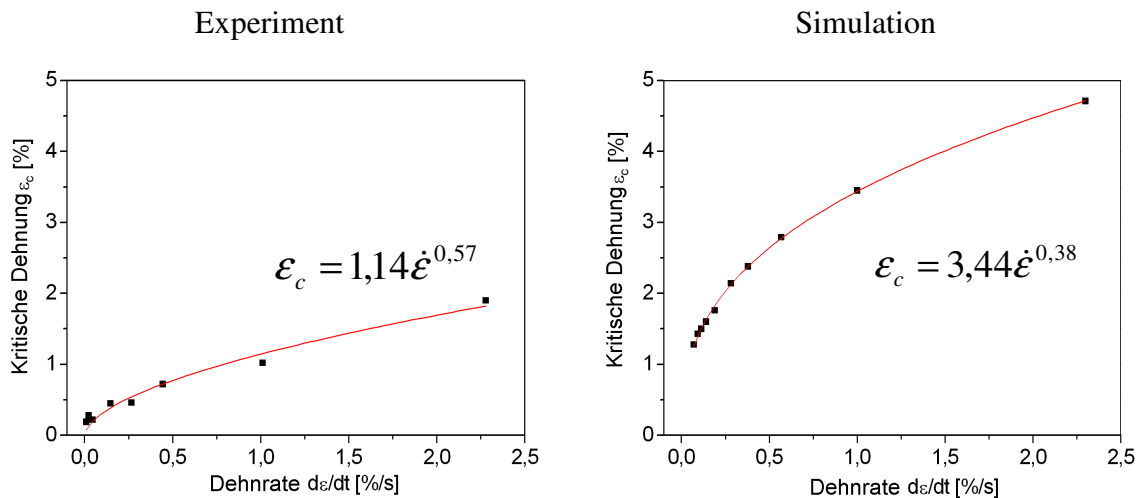


Abb. 4.67: Einfluss der Dehnrates auf die kritische Dehnung für das Einsetzen des PLC-Effekts im Experiment (links) und in der Simulation auf Basis des Estrin-McCormick-Modells ohne räumliche Kopplung (rechts)

bedeutet dies eine Zunahme der kritischen Dehnung mit anwachsender Dehnrates. Um das anormale Verhalten beobachten zu können, hätte der Dehnratesbereich nach unten erweitert werden müssen.

Der Zusammenhang zwischen der kritischen Dehnung und der Dehnrates folgt in Experiment und Simulation einem Potenzgesetz. Allerdings verändert sich die kritische Dehnung in der Simulation stärker mit der Dehnrates als im Experiment.

4.2.2.2 PLC-Bandmorphologie

Für den in diesem Abschnitt vorgenommenen Vergleich zwischen der im Experiment beobachteten Bandmorphologie und der Morphologie der simulierten Bänder werden für die experimentelle Seite Abb. 4.10 und Abb. 4.11 herangezogen. Dem werden Simulationen gegenübergestellt, die an Proben realer Geometrie durchgeführt worden sind und somit keine künstliche Störung der inneren Spannung an einem Element erforderten (Abb. 4.68). Der Dehnungsgradient im Übergangsbereich zwischen Probekopf und Probensteg initiiert die Entstehung der PLC-Bändern. Der Bandwinkel in der Simulation liegt bei etwa 55° und stimmt befriedigend mit dem experimentellen Wert (etwa 60°) überein. Die in Abb. 4.68b und c erkennbare Bandorientierungsänderung passt gut zu der Orientierungsänderung, die in Abb. 4.10c und d sichtbar ist. Die zu dieser Simulation gehörende Spannungs-Zeit-Kurve als ist in Abb. 4.57a dargestellt.

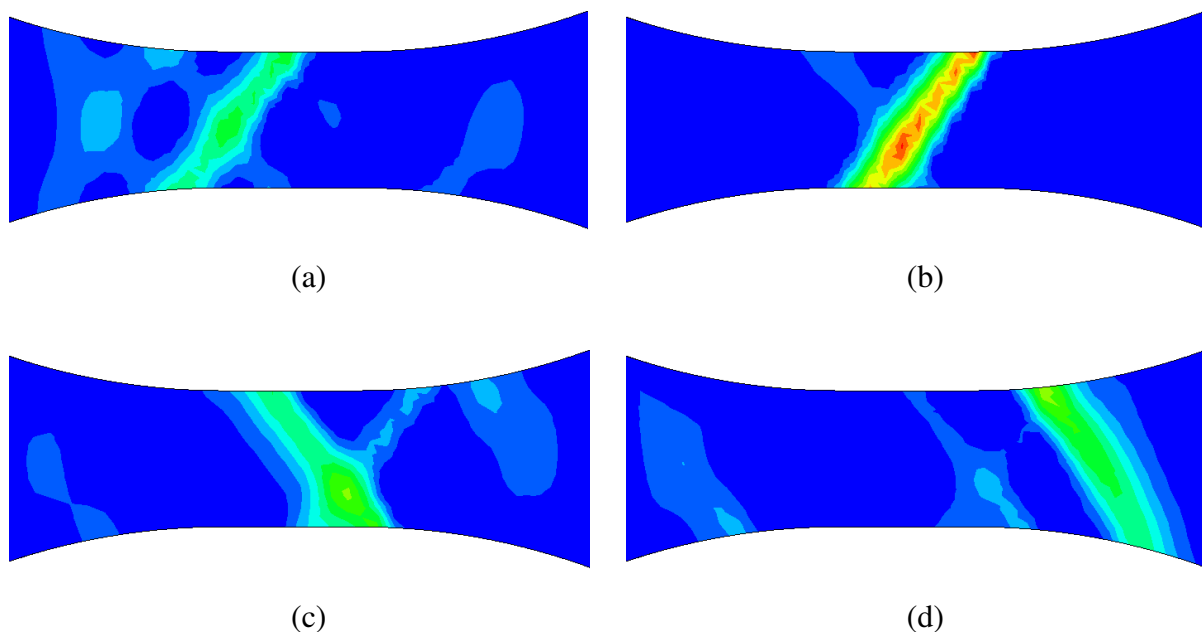
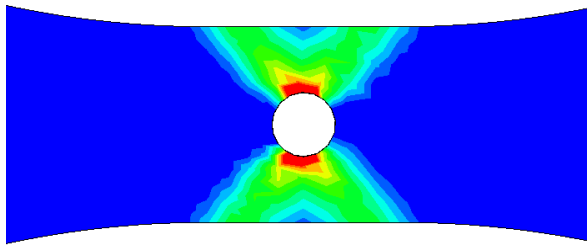


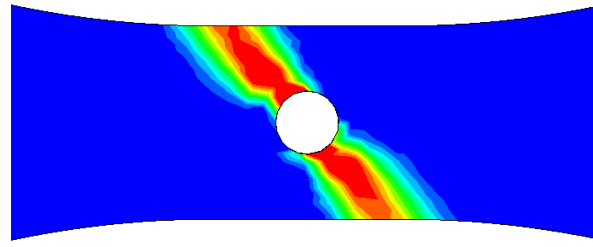
Abb. 4.68: Form, Winkel und Winkeländerung eines Bands (Bandmorphologie), simuliert mit dem Estrin-McCormick-Modell ohne künstlichen Störung der inneren Spannung.

4.2.2.3 Wechselwirkung zwischen den Scherbändern und den PLC-Bändern

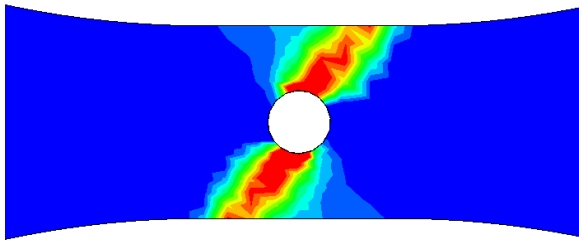
Um die Scherband-PLC-Band-Wechselwirkung zu untersuchen, wurden Zugproben mit einem Loch in der Mitte herangezogen. Bei ihrer Belastung entstehen intensive Scherbänder. Die Ergebnisse einer hierzu durchgeführten Simulation sind in Abb. 4.69 für vier Verformungsphasen dargestellt. Bevor die Dehnung den Grenzwert für das Einsetzen der PLC-Bandbildung erreicht hat, erscheinen zunächst vier Scherbänder um das Loch (Abb. 4.69a). Danach entstehen im Scherbänderbereich um das Loch zwei PLC-Bänder (Abb. 4.69b). Die zwei PLC-Bänder drehen sich dann um das Loch, so dass sie in Abb. 4.69b spiegelbildlich zu Abb. 4.69c ausgerichtet sind. Anschließend setzen sie ihre zueinander entgegengesetzte Ausbreitung ohne Änderung der jeweiligen Ausbreitungsrichtung fort. Dafür müssen sie den Bereich des Loches verlassen und ihre Länge so erweitern, dass sie sich von einer zur anderen Probenkante erstrecken (Abb. 4.69d). In diesem Fall propagieren die zwei Bänder simultan nach zwei Seiten. Der Grund für die Entstehung und Ausbreitung der PLC-Bänder ist der von den Scherbändern verursachte Gradient der Spannung und der Alterungszeit der Versetzungen.



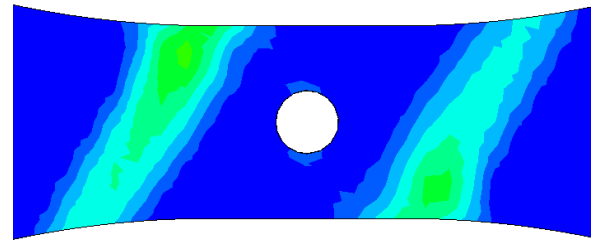
a): Vier Scherbänder entstehen am Loch



b): Zwei PLC-Bänder entstehen am Loch

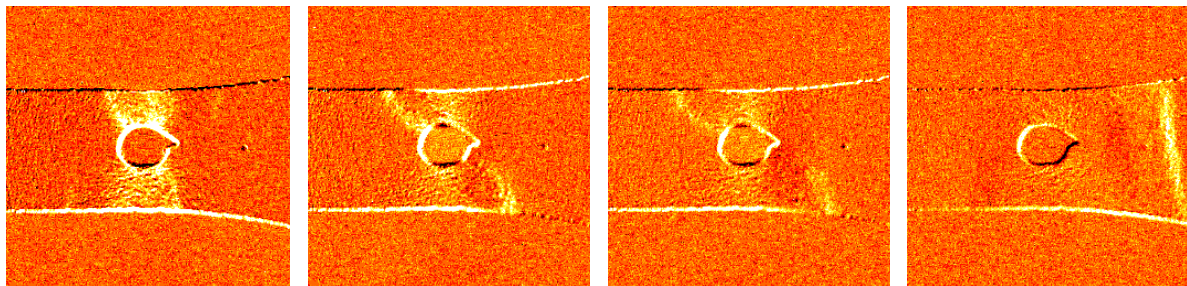


c): Die zwei PLC-Bänder rotieren um das Loch



d): Die zwei PLC-Bänder propagieren vom Loch weg

Abb. 4.69: Simulation der Scherband-PLC-Band-Wechselwirkung an einer Zugprobe mit einem Loch in der Mitte, die Teilbilder a~d beschreiben das Verhalten in vier aufeinander folgenden Verformungsphasen



(a)

(b)

(c)

(d)

Abb. 4.70: Experimentelle Temperaturratebilder einer Probe mit zentralem Loch, entsprechend den Simulationsergebnissen von Abb. 4.69. Es sind erkennbar: Die Entstehung von Scherbändern um das Loch (a), die Entstehung und Rotation von PLC-Bändern (b, c), die Ausbreitung eines PLC-Bands zur rechten Seite der Probe.

Um die Gültigkeit dieser Simulationsergebnisse zu zeigen, sind in Abb. 4.70 entsprechende experimentelle Ergebnisse dargestellt. Wie im simulierten Teilbild Abb. 4.69a sichtbar, erscheinen auch im Experiment zunächst Scherbänder um das Loch (Abb. 4.70a). In Abb. 4.70b, c ist sichtbar, dass sich aus dem Scherbänderbereich zwei PLC-Bänder abspalten, die in Probenlängsrichtung propagieren, wobei sie sich zunächst nicht durch den gesamten Probenquerschnitt erstrecken. Dies erfolgt erst zu einem späteren Zeitpunkt (Abb. 4.70d). Gleichzeitig geht die Dehnrage im Scherbandbereich zurück. In Abb. 4.70d ist rechts ein intensives PLC-Band erkennbar, während das linke PLC-Band und die Scherbänder ver-

schwunden sind. Aus diesem Vergleich zwischen Experiment und Simulation kann geschlossen werden, dass die Bandrotation, die Abspaltung der PLC-Bänder von Scherbändern und die anschließende PLC-Bandausbreitung ziemlich gut durch das Modell von Estrin und McCormick simuliert werden können.

Experimentell wurden an Zugproben mit Loch auch solche PLC-Bänder gefunden, die im Übergangsbereich zwischen Probenkopf und Probensteg entstehen und dann in Richtung der anderen Probenseite propagieren [3]. Wenn sie am Loch vorbeikommen, drehen sie sich um das Loch und propagieren manchmal weiter bis zur anderen Probenseite.

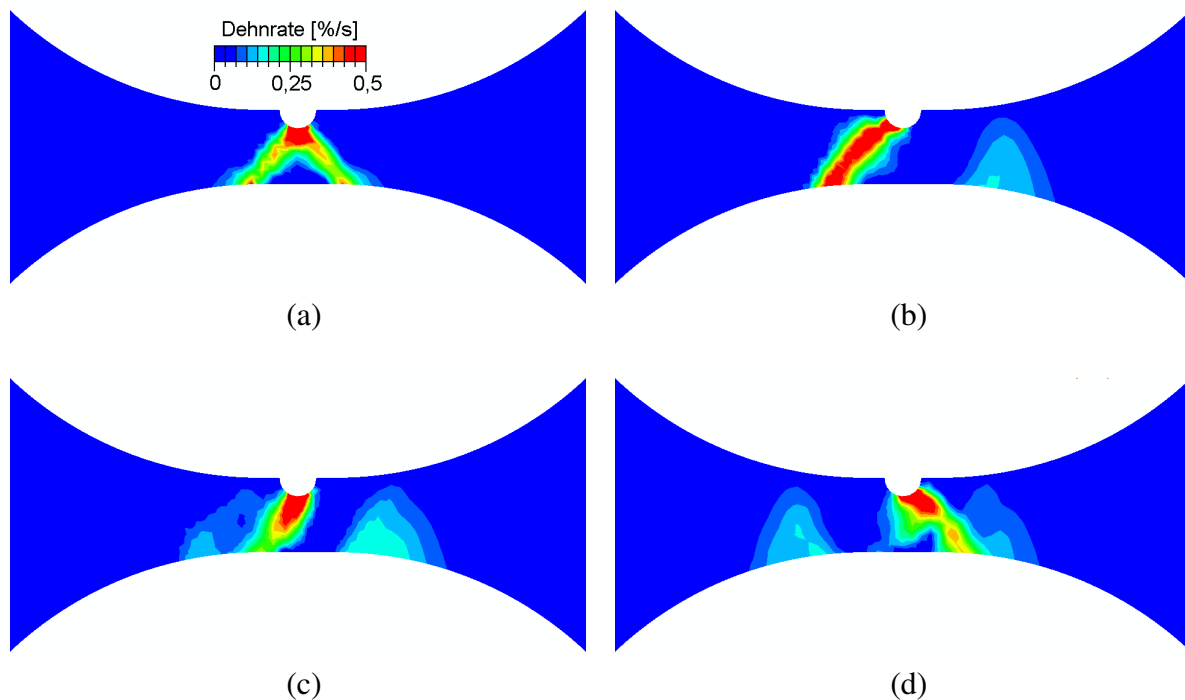


Abb. 4.71: Simulation der Scherband-PLC-Band-Wechselwirkung an einer Zugprobe mit einer Kerbe auf einer Seite, die Teilbilder a~d beschreiben das Verhalten in vier aufeinander folgenden Verformungsphasen

Zum Vergleich werden den in den Abschnitten 4.1.4.1 und 4.1.4.2 dargestellten experimentellen Ergebnissen entsprechende Simulationsergebnisse an einer Probe mit einem Kerb (Abb. 4.71) und an einer Probe mit zwei Kerben (Abb. 4.72) gegenübergestellt. In Abb. 4.71a erscheinen zunächst zwei Scherbänder am Kerb, bevor die Dehnung die kritische Dehnung erreicht hat (Abb. 4.71a). Danach entsteht im Scherbänderbereich um das Loch ein PLC-Band (Abb. 4.71b). Das PLC-Band dreht sich dann um die Kerbe (Abb. 4.71b, c, d). Es ist bemerkenswert, dass die PLC-Bänder auf den Kerbbereich der Probe konzentriert bleiben und eine Entstehung von Bändern außerhalb dieses Bereichs durch die PLC-Bänder am Kerb unterdrückt wird. In Abb. 4.72 ist das Phänomen der Konzentration der PLC-Bänder auf den Kerbbereich noch deutlicher. In Abb. 4.72a ist ein die beiden Kerben verbindendes Scherband entstanden. Nur um die Kerben entstehen Bänder, die nur kurze Strecken zurücklegen. Zwischen der Bandbildung (Abb. 4.72a) und dem Bandende (Abb. 4.72d) bleibt das obere Bandende am Kerbgrund fixiert, während das Band um diesen Punkt rotiert. Diese spezifische Form der Bandausbreitung geht aus einer ganzen Serie von Bildern hervor, die für die Phase berechnet worden sind.

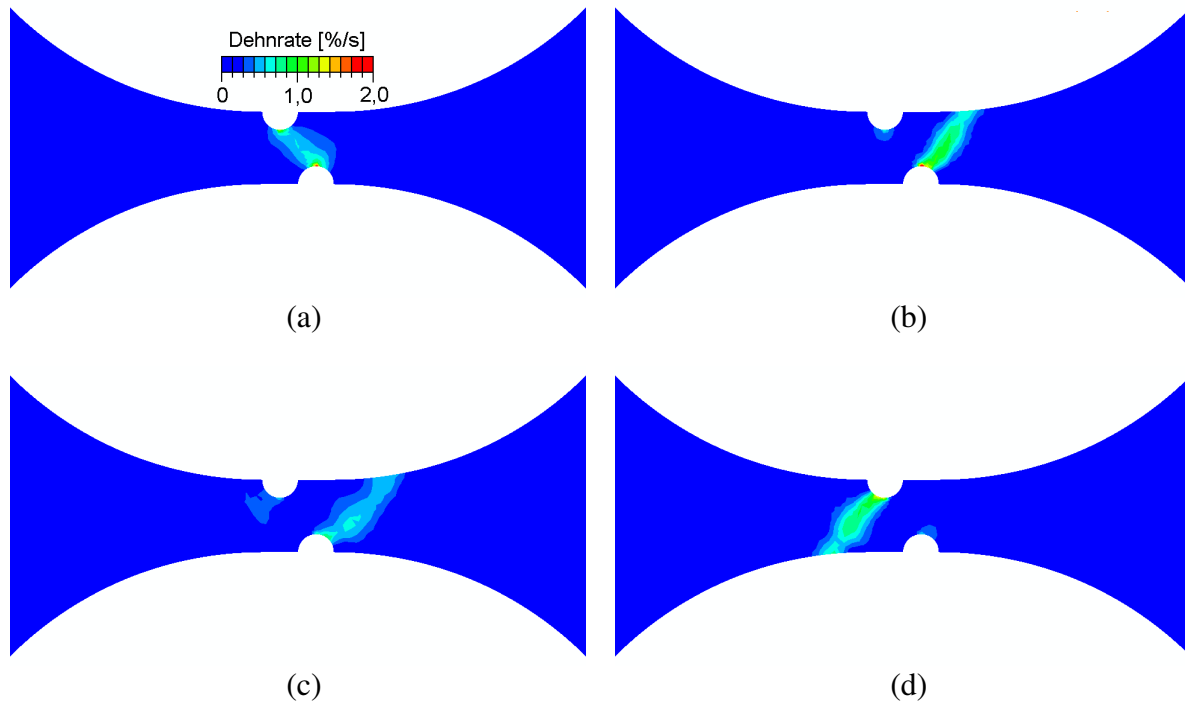


Abb. 4.72 Simulation der Scherband-PLC-Band-Wechselwirkung an einer Zugprobe mit zwei Kerben auf beiden Seiten, die Teilbilder a~d beschreiben das Verhalten in vier aufeinander folgenden Verformungsphasen

4.2.3 1D-FD-Simulation mit Hähner-Modell und räumlicher Kopplung

4.2.3.1 Ermittlung der Modellparameter

Um den PLC-Effekt quantitativ zu untersuchen, müssen die Modellparameter bestimmt werden. Nach dem Modell von Hähner ist zwischen den internen (Alterungsrate η , Elementardehnung Ω , Dehnungsverfestigungskoeffizient h , Pseudodiffusionskoeffizient D_g) und den externen Modellparametern (Vorschubgeschwindigkeit v , Steifigkeit der Probe E_S , Steifigkeit der Prüfmaschine E_m) zu unterscheiden. Wenn ein umfassender Satz von Materialparametern vorliegt, sollte eine Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation möglich sein [90]. Z. B. könnte man versuchen, die obere und untere Grenze der Dehnrates für den Existenzbereich des PLC-Effekts von Simulation und Experiment einander anzupassen. Es ist allerdings schwierig, die obere Grenze zu messen, weil die Leistung der vorhandenen, zum Antrieb der Zugverformungseinrichtung eingesetzten Elektromotoren zu gering ist. Auch Balik [87] kommt zur Aussage, dass es unter den gegenwärtigen experimentellen Bedingungen schwer ist, die obere Grenze der Dehnrates zu messen.

Zukünftig muss das Problem der Bestimmung der oberen Dehnratesgrenze des PLC-Bereichs gelöst werden. Wenn der Existenzbereich der PLC-Bänder ermittelt ist, kann der Sättigungswert der Reckalterungsenthalpie auf entsprechende Weise bestimmt werden. Auch die physikalischen Parameter Alterungsrate η und Elementardehnung Ω können experimentell bestimmt werden [91]. Die Alterungsrate erhält man beispielsweise aus der verzögerten Spannungsreaktion auf plötzliche Dehnratesänderungen, wobei deren Wert sich um mehrere Größenordnungen bei Änderung der Prüftemperatur verschieben kann.

Zur Zeit wird keine Möglichkeit der Messung des Pseudodiffusionskoeffizienten D_g gesehen. Von Hähner wird üblicherweise eine D_g -Größenordnung von $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ angenommen [90].

Die Elementardehnung steigt bei zunehmender Dehnung an [60]. In der jetzigen Situation ist eine quantitative Anpassung der Ergebnisse des Hähner-Modells an die für AlMg3 ermittelten experimentellen Ergebnissen nur schwer realisierbar, weil keine zuverlässige Datenbasis vorliegt. In dieser Situation erscheint es am aussichtsreichsten, den Einfluss der zunächst frei festgelegten Modellparameter auf das simulierte PLC-Bandverhalten zu untersuchen und durch den Vergleich mit entsprechenden experimentellen Befunden die tatsächlich zutreffenden Parameterwerte zu identifizieren.

4.2.3.2 Für die Simulation verwendet Parameter

Die für die Simulation verwendeten Parameter lassen sich zwei Gruppen zuordnen - den fixierten und den variierten Parametern.

Fixierte Parameter:

Für die Verfestigung werden zwei Varianten angenommen, eine lineare Verfestigung und eine über das Voce-Modell beschriebene, nichtlineare Verfestigung.

Die Fließkurve im Voce-Modell folgt der Beziehung:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + (\sigma_{y\infty} - \sigma_{y0}) \left(1 - e^{-\epsilon^p / \epsilon_c^p}\right)$$

Daraus erhält man für den Dehnungsverfestigungskoeffizienten h :

$$h = \frac{d\sigma_y}{d\epsilon^p} = \frac{(\sigma_{y\infty} - \sigma_{y0})}{\epsilon_c^p} \cdot e^{-\epsilon^p / \epsilon_c^p}$$

Im Voce-Modell wird von einer nicht-linearen isotropen Verfestigung ausgegangen. Der Parameter $\sigma_{y0} = \sigma_y (\epsilon^p = 0)$ ist die Anfangsfliespannung. $\sigma_{y\infty} = \sigma_y (\epsilon^p = \infty)$ ist die Fließspannung, die bei einer unendlichen großen plastischen Dehnung erreicht wird. ϵ_c^p ist die charakteristische Dehnung. In der vorliegenden Arbeit wurden für die Al-Legierung AA6061 die folgenden Werte verwendet: $\sigma_{y0} = 105$ MPa, $\sigma_{y\infty} = 170$ MPa, $\epsilon_c^p = 0,048$.

Die Proben (Länge 11mm) sind in Längsrichtung in 100 Segmente (Elemente) unterteilt worden. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde einmal als mit der Zeit linear anwachsend und einmal als konstant angenommen.

Varierte Parameter:

Die variierten Parameter wurden zu zwei Parametersatzgruppen zusammengefasst (Anhang II).

Parametersatzgruppe 1:

Innerhalb dieser Parametersatzgruppe wurden folgende Variationen unter Verwendung des Voce-Ansatzes für die Verfestigung vorgenommen:

Vorschubgeschwindigkeit:	2 - 30 $\mu\text{m/s}$
Steifigkeit der Prüfmaschine E_m :	60 - 220 GPa
Pseudodiffusionskoeffizient D_g :	0,5 - 3 mm^2/s
Elementardehnung Ω :	0,4 - $1,6 \times 10^{-4}$
Alterungsrate η :	2 - 20 s^{-1}

Hier bestand das Ziel, den Einfluss dieser Parameter auf die Bandgeschwindigkeit, den Bandtyp und den Ausbreitungsmodus im Übergangsbereich vom Typ A zum Typ B zu untersuchen.

Parametersatzgruppe 2:

Innerhalb dieser Parametersatzgruppe war die Vorschubgeschwindigkeit einmal konstant und stieg in einem anderen Fall linear mit der Zeit an. Hier wurde eine lineare Verfestigung mit Dehnungsverfestigungskoeffizienten $h = 400\text{MPa}$ angenommen. Die anderen Simulationen erfolgten wiederum unter Verwendung des Voce-Ansatzes für die Verfestigung. Die Elementardehnung wurde variiert.:

Konstante Vorschubgeschwindigkeit:	30 $\mu\text{m/s}$
Elementardehnung Ω :	0,5 - $2,5 \times 10^{-4}$

4.2.3.3 Numerische Lösung des Modells

Wie in Abschnitt 3.2.6 erläutert, werden die konstitutiven Gleichungen sowohl zeitlich als auch räumlich diskretisiert und durch ein vollkommen implizites Finite-Differenz-Integrationschema an den Raumkoordinaten zu jedem diskreten Zeitpunkt gelöst. Dabei wird das Rückwärts-Euler-Verfahren für die Diskretisierung der Gleichungen verwendet. Die diskretisierten nicht-linearen Gleichungen werden dann mittels Newton-Raphson-Methode gelöst. Es ist sehr wichtig, die Zeitschrittweite in der richtigen Relation zur Raumschrittweite festzulegen, weil dies einen großen Einfluss auf die numerische Stabilität des Verfahrens und die Genauigkeit der Ergebnisse hat.

4.2.3.4 Vorbemerkungen zur Darstellung der Simulationsergebnisse

Üblicherweise sind Typ-A-Bänder durch eine gleichmäßige Ausbreitung gekennzeichnet. In einigen Arbeiten [62][92][79][89] differenziert man zusätzlich zwischen A1- und A2-Bändern. Die A1-Bänder entstehen oft an dem gleichen Probenende und breiten sich nur einmal in nur eine Richtung aus. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve ist sägezahnförmig. Die A2-Bänder werden mehrfach an dem Probenende reflektiert und wechseln dadurch ihre Ausbreitungsrichtung. In der Spannungs-Dehnungs-Kurve äußert sich das Verhalten in einem treppenstufenartigen Profil der Fließspannung. Um besser zwischen dem unterschiedlichen Verhalten der Bänder differenzieren zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich zu den bereits eingeführten Begriffen A1-Band und A2-Band die Bezeichnungen A'-Band und A(O)-Band eingeführt. A'-Bänder sind gleichzeitig auftretende A-Bänder, die miteinander kollidieren (sich kreuzen). A(O)-Bänder treten im Übergangsbereich von Typ-A- zu Typ-B-Bänder auf und sind - im Unterschied zu reinen Typ-A-Bändern (nahezu konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit) - durch eine oszillierende Bandgeschwindigkeit gekennzeichnet. Diese neu eingeführten Begriffe werden in den nachfolgenden Abschnitten verwendet. Die Simulationsergebnisse werden zunächst ohne Bezug zum Experiment vorgestellt. Der Vergleich mit experimentellen Ergebnissen erfolgt in einer separaten Kapitel (4.2.4).

4.2.3.5 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit

Anhang IIa zeigt den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit sowie der Parameter η , Ω , D_g und E_m auf die Geschwindigkeit und den Typ der PLC-Bänder. Wenn die Vorschubgeschwindigkeit von 30 nach 2 $\mu\text{m/s}$ abnimmt, verändert sich der Typ von A' über A'+A1, A1 und A1(O) nach B. Für einen bestimmten Bandtyp nimmt die Bandgeschwindigkeit ab (Abb. 4.73). Hierzu ist zu bemerken, dass der eingezeichnete Geschwindigkeitswert der mittleren Geschwindigkeit des ersten Bands entspricht.

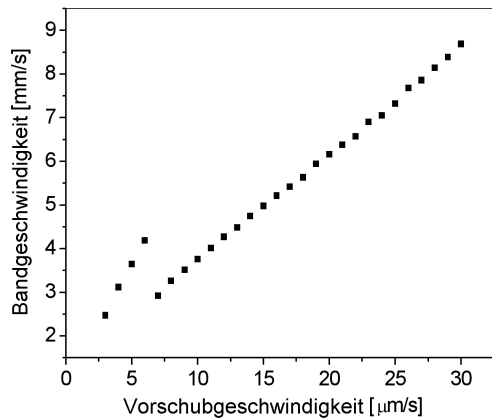


Abb. 4.73: Die Bandgeschwindigkeit nimmt bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit zu, die ersten vier Werte gehören jeweils zum ersten Typ-A1-Band, die anderen zum ersten Typ-A-Band

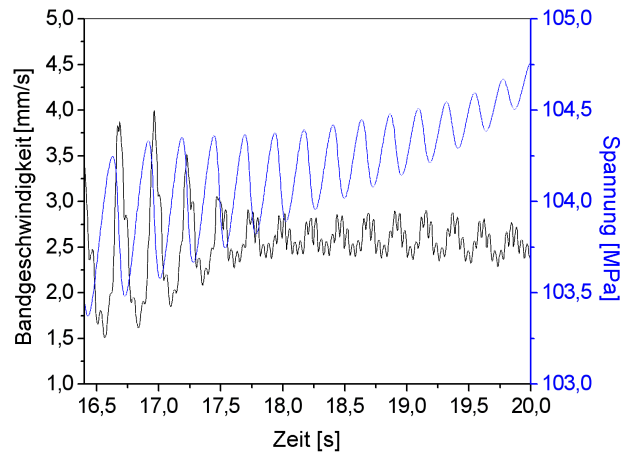


Abb. 4.74: Im Übergangsbereich vom Typ A zum Typ B oszilliert die Bandgeschwindigkeit phasenverschoben zur ebenfalls oszillierenden Spannung, Simulation für die Vorschubgeschwindigkeit $v = 3,2 \mu\text{m/s}$

Bei reinen Typ-A-Bändern bleiben sowohl das Dehnratenmaximum als auch die Bandgeschwindigkeit während der Bandausbreitung nahezu unverändert. Im Übergangsbereich zwischen den Typ-A- und den Typ-B-Bändern oszillieren das Dehnratenmaximum (Typ A(O)) und die Bandgeschwindigkeit (Abb. 4.74 und Abb. 4.77).

Reine Typ-B-Bänder propagieren und verschwinden nach einem kurzen Ausbreitungsweg. Kurz darauf entsteht ein neues Band nahezu an der gleichen Stelle, an der das vorangehende Band verschwunden ist, und propagiert in die gleiche Richtung (Abb. 4.78).

Eine andere Methode, den Zusammenhang zwischen Bandgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit zu untersuchen, besteht in der Verwendung einer linear zunehmenden Vorschubgeschwindigkeit. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abb. 4.75 und Abb. 4.76 dargestellt (Parameter aus Anhang IIb). Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit nimmt die Bandgeschwindigkeit zu. Dieses Phänomen lässt auf den mikroskopischen Prozess der dynamischen Reckalterung zurückführen. Die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit verursacht eine Verringerung der mittleren Wartezeit der Versetzungen vor Hindernissen, wenn vorausgesetzt werden kann, dass sich die Elementardehnung und die Alterungsrate nicht verändern. Wie im Hähner Model erläutert, ergibt sich das sägezahnförmige Verhalten der Fließspannung aus den schnell diffundierenden Fremdatomen, welche die mobile Versetzung verankern, bis die Spannung hoch genug ist für das Losreißen der mobilen Versetzungen von den Verankerungspunkten an den Schnittstellen zwischen mobilen- und Waldversetzungen [93]. Beim Typ A propagieren die mobilen Versetzungen nach der Bildung eines PLC-Bands so schnell, dass die Fremdatome die mobilen Versetzungen nicht mehr behindern können. Bei hoher mittlerer Versetzungsgeschwindigkeit ist die Wartezeit an Hindernissen so kurz, dass die Fremdatome nicht ausreichend Zeit haben, in die Kerne der wartenden Versetzungen diffundieren. Dadurch wird der Alterungsprozess gewissermaßen verhindert. Wenn die Vorschubgeschwindigkeit vermindert, d.h. die Wartezeit erhöht wird, bekommen die Fremdatome mehr Zeit, um die mobilen Versetzungen wieder zu erreichen. Dies führt letztlich zum Auftreten von Typ-B-Bändern.

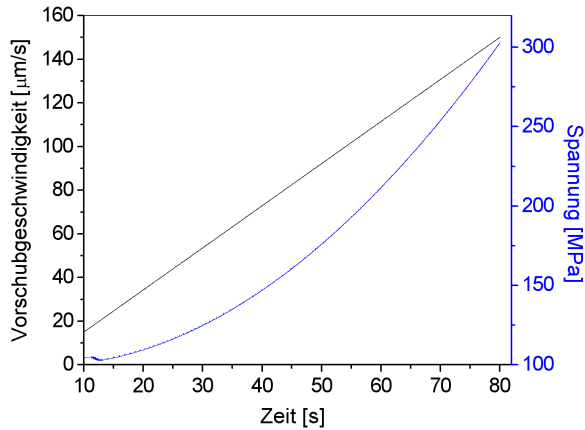


Abb. 4.75: Linear mit der Zeit zunehmende Vorschubgeschwindigkeit betrachtet für den Fall linearer Verfestigung. Die Spannung nimmt nichtlinear zu

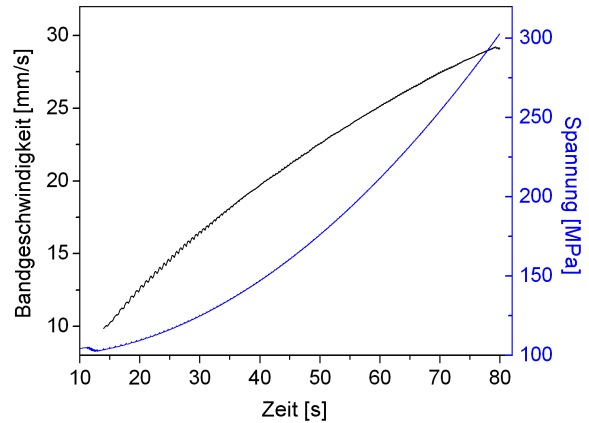


Abb. 4.76: Verlauf der Bandgeschwindigkeit bei einer linear mit der Zeit zunehmenden Vorschubgeschwindigkeit

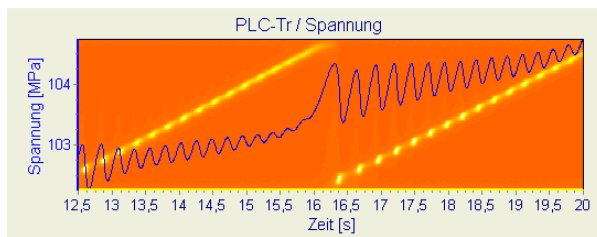


Abb. 4.77: Zeitlicher Verlauf der Spannung (blau) im Übergangsbereich zwischen den Typ-A- und den Typ-B-Bändern, entspricht Abb. 4.74, simuliert für die Vorschubgeschwindigkeit $v = 3,2 \mu\text{m/s}$, im Hintergrund Bilder der Bandtrajektorien

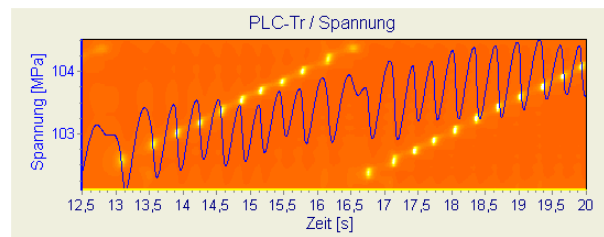


Abb. 4.78: Zeitlicher Verlauf der Spannung (blau) simuliert für die Vorschubgeschwindigkeit $v = 3,0 \mu\text{m/s}$, im Hintergrund Bilder der Bandtrajektorien

4.2.3.6 Der Einfluss der Steifigkeit der Zugverformungseinrichtung E_m und des Pseudodiffusionskoeffizienten D_g

Um den Einfluss der Steifigkeit der Zugverformungseinrichtung und des Pseudodiffusionskoeffizienten auf das Bandverhalten zu untersuchen, wurde ein Parametersatz ausgewählt (Anhang IIa), der zu PLC-Bändern führt, die hinsichtlich ihres Typs dem Übergangsbereich zwischen den Typen A und B zuzuordnen sind.

Der Einfluss der Steifigkeit auf das PLC-Bandverhalten ist in den Abb. 4.79a-Abb. 4.81a dargestellt. Der oszillierende Verformungsmodus wird durch eine weiche Zugverformungseinrichtung begünstigt. Hierzu ist anzumerken, dass eine Zugverformungseinrichtung mit niedriger Steifigkeit noch keine spannungsrategesteuerte Zugverformungseinrichtung ist [90]. Aus einer Störungsanalyse, die für das Hähner-Modell durchgeführt worden ist [20], ist bekannt, dass eine niedrigere effektive Steifigkeit die Bildung der Typ-B-Bänder fördert. Ein Einfluss der Steifigkeit auf die Bandgeschwindigkeit ist dagegen kaum zu beobachten.

Aus Abb. 4.80b geht hervor, dass eine Erhöhung des Pseudodiffusionskoeffizienten D_g den Übergang zu Typ-B-Bändern fördert. Diese Feststellung stimmt mit dem Ergebnis einer von

Häher durchgeführten theoretischen Analyse des Existenzbereichs verschiedener Bandtypen überein [90]. Im Unterschied zur Maschinensteifigkeit verursacht ein Anstieg des Diffusionskoeffizienten D eine Zunahme der Bandgeschwindigkeit (Abb. 4.81b).

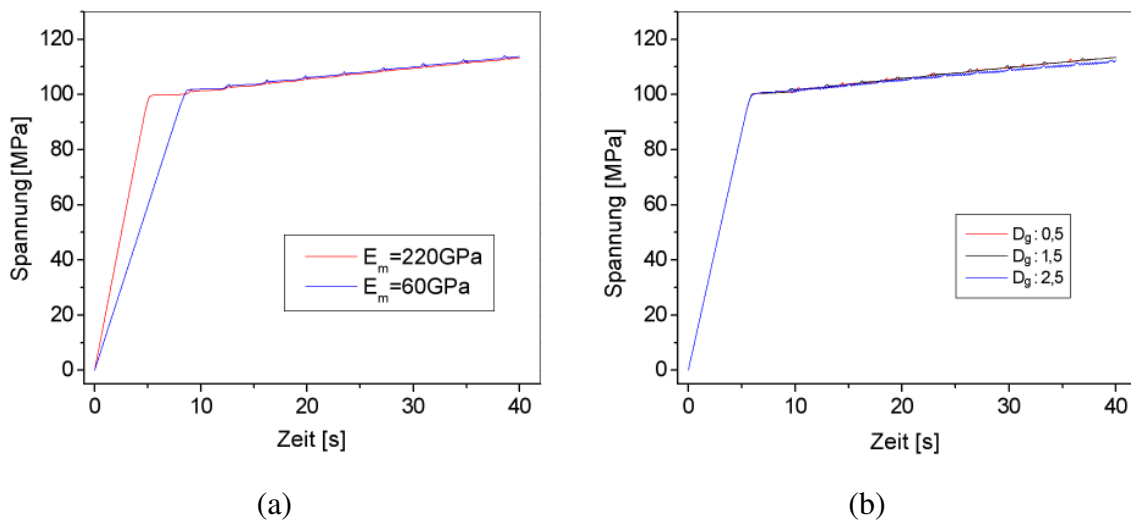


Abb. 4.79: Einfluss der Steifigkeit der Zugverformungseinrichtung (a) und des Diffusionskoeffizienten (b) auf die Spannungs-Dehnungs-Kurve, Simulation im Übergangsbereich zwischen den Bandtypen A und B

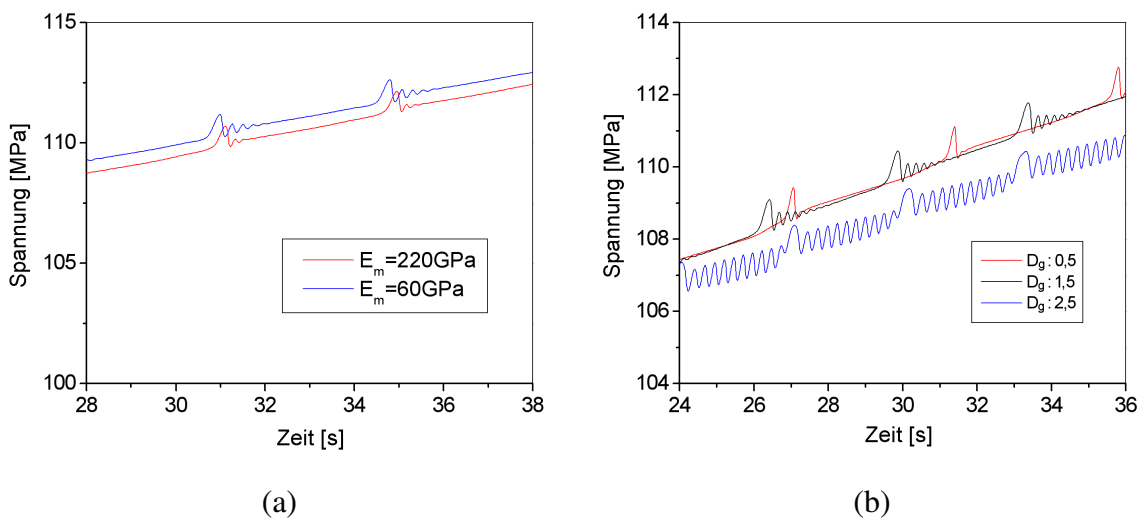


Abb. 4.80: Vergrößerte Ausschnitte von Abb. 4.79a+b: Eine Verringerung der Maschinensteifigkeit (a) und eine Erhöhung des Diffusionskoeffizienten (b) begünstigen die Spannungsozillation und die Bildung von Typ-B-Bändern

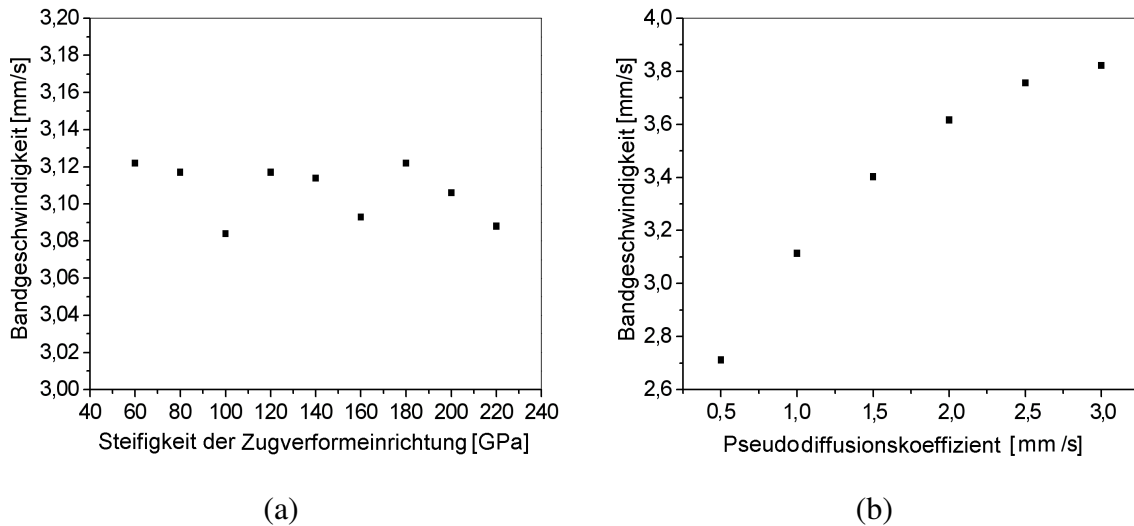


Abb. 4.81: Einfluss der Steifigkeit der Zugverformungseinrichtung (a) und des Diffusionskoeffizienten (b) auf die Bandgeschwindigkeit

4.2.3.7 Einfluss der Elementardehnung Ω und der Alterungsrate η

Die Elementardehnung Ω und die Alterungsrate η sind die charakteristischen Parameter zweier konkurrierender Prozesse, die bereits in Gleichung (2.35) beschrieben worden sind. In den Abb. 4.82-Abb. 4.84 sind der Einfluss der Elementardehnung und der Alterungsrate auf die Oszillation der Fließspannung und die Bandgeschwindigkeit für eine Vorschubgeschwindigkeit dargestellt, für die Bänder im Übergangsbereich zwischen den Typen A und B initiiert werden. Wie Abb. 4.82b zeigt, beeinflusst die Alterungsrate η die Spannungs-Dehnungs-Kurven nachhaltig. Wenn die Alterungsrate zunimmt, ändert sich der Typ von A nach B bis schließlich der PLC-Existenzbereich überschritten ist (bei $\eta = 18 \text{ s}^{-1}$).

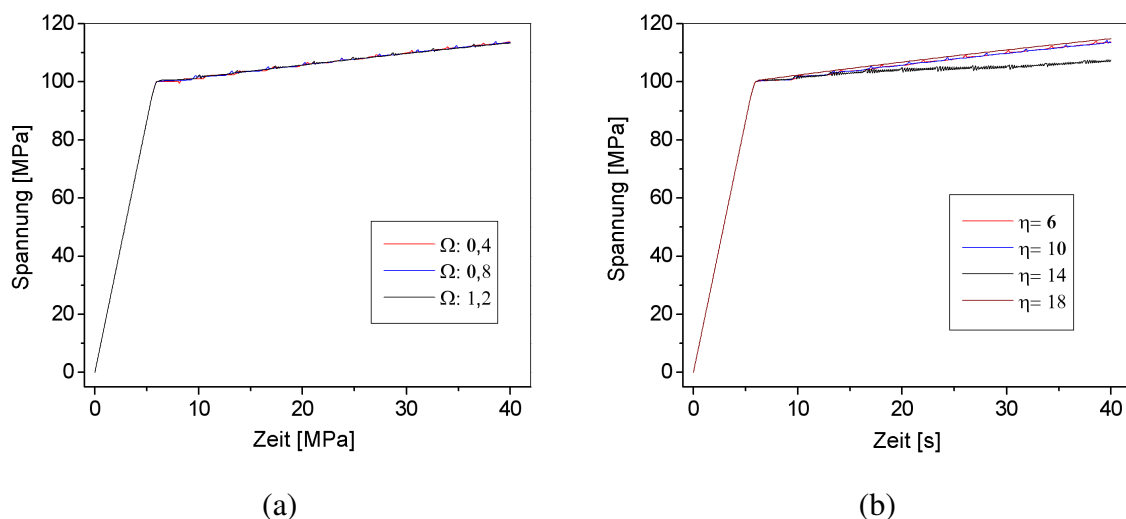


Abb. 4.82: Einfluss der Elementardehnung $\Omega [10^{-4}]$ (a) und der Alterungsrate $\eta [s^{-1}]$ (b) auf die Spannungs-Dehnungs-Kurve, Simulation im Übergangsbereich zwischen den Bandtypen A und B

Die höher aufgelösten Kurvenausschnitte in Abb. 4.83 lassen deutlich erkennen, dass nicht nur eine Erhöhung der Alterungsrate η sondern auch ein Anstieg der Elementardehnung Ω den Übergang vom Typ A zum Typ B und eine zunehmende Spannungsoszillation bewirken.

Im Hinblick auf den Prozess der dynamischen Reckalterung bedeutet eine Erhöhung der Alterungsrate eine Verbesserung der Diffusionsfähigkeit der mobilen Fremdatome, während die Vergrößerung der Elementardehnung bei gleich bleibender globaler Zuggeschwindigkeit wegen $t_w = \Omega / \dot{\epsilon}_t^p$ zu einer Verlängerung der Wartezeit führt. Die Erhöhung beider Parameter macht die dynamische Reckalterung wirkungsvoller. Dadurch wird der Übergang vom Typ A zum Typ B (Oszillierungsmode) herbeigeführt.

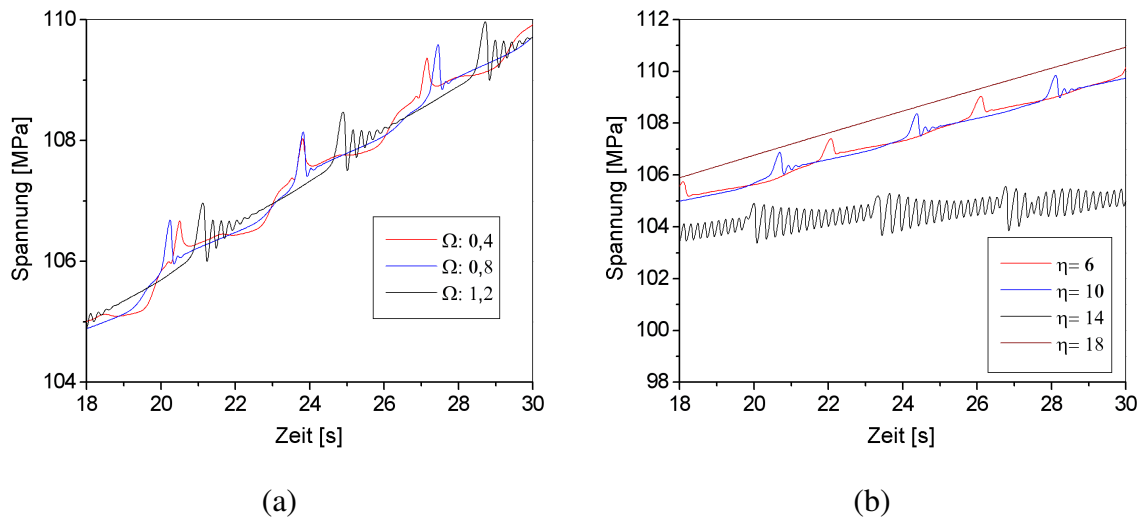


Abb. 4.83: Vergrößerte Ausschnitte der Abb. 4.82a+b zum Einfluss der Elementardehnung $\Omega [10^{-4}]$ (a) und der Alterungsrate $\eta [s^{-1}]$ (b) auf das Bandverhalten

Wie Abb. 4.84a zeigt, kann die Erhöhung der Wartezeit (verursacht durch eine Erhöhung der Elementardehnung) zur Verminderung der Bandgeschwindigkeit führen. Für die bei Zunahme der Alterungsrate festgestellte Bandgeschwindigkeitsvergrößerung (Abb. 4.84b) gibt es zurzeit noch keine schlüssige Erklärung.

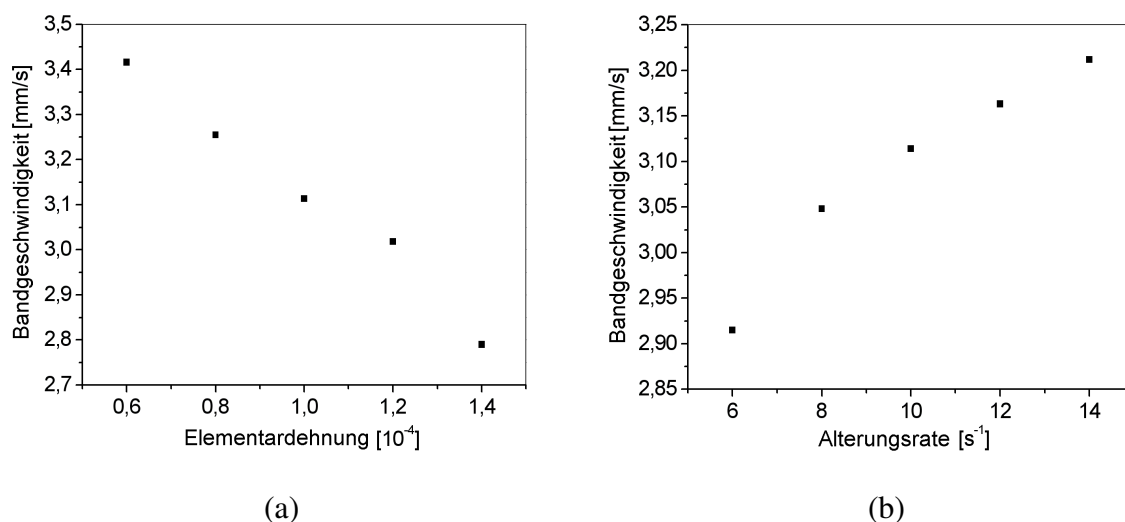


Abb. 4.84: Einfluss der Elementardehnung $\Omega [10^{-4}]$ (a) und der Alterungsrate $\eta [s^{-1}]$ (b) auf die Bandgeschwindigkeit, Simulation im Übergangsbereich zwischen den Bandtypen A und B

4.2.3.8 Einfluss des Dehnungsverfestigungskoeffizienten h

Zur Untersuchung des Einflusses, den der Dehnungsverfestigungskoeffizient h auf das Bandverhalten ausübt, wurde der in Anhang IIb aufgeführte Parametersatz verwendet. Aus den verfügbaren Verfestigungsmodellen (z.B. Voce-Modell und parabolisches Modell) wurde das Voce-Modell ausgewählt. In Folge dessen nimmt der Verfestigungskoeffizient mit der Zeit exponentiell ab (Abb. 4.85). Die mittlere Bandgeschwindigkeit vermindert sich ebenfalls exponentiell mit der Zeit (Abb. 4.86) und korreliert somit mit dem Dehnungsverfestigungskoeffizienten im Voce-Modell.

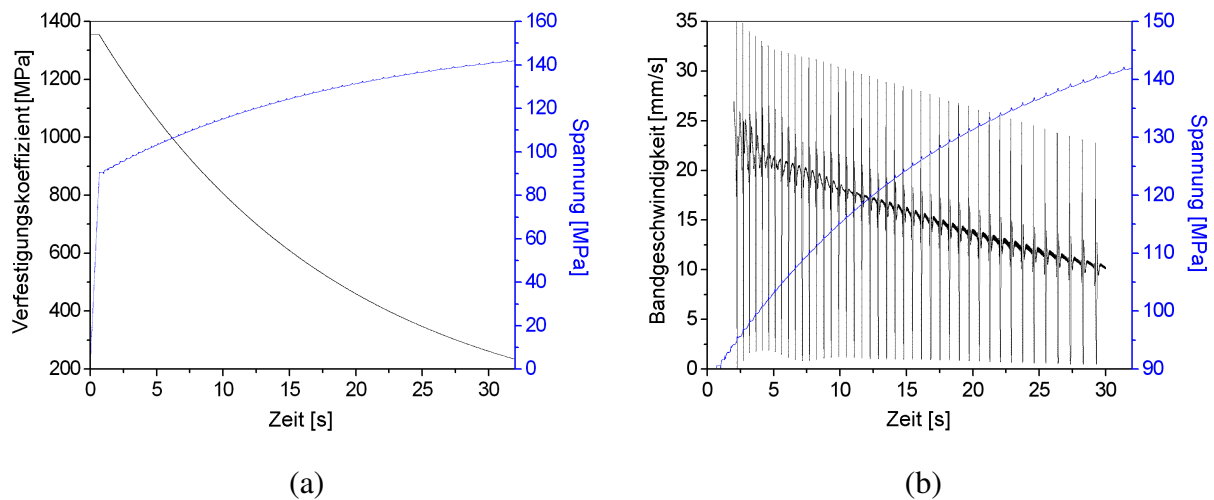


Abb. 4.85: Fließspannung (blau) und Dehnungsverfestigungskoeffizient (schwarz) bei Anwendung des Voce-Modells und Abb. 4.86: Fließspannung (blau) und im Mittel abnehmende Bandgeschwindigkeit (schwarz) als Funktion der Zeit, abrupte Geschwindigkeitsänderungen vor und nach dem Moment der Bandneubildung

Unter mikroskopischem Gesichtspunkt betrachtet, kann die Dehnungsverfestigung die Erhöhung der Waldversetzungsdichte hervorrufen [93]. Deswegen werden mehr und mehr Diffusionspfade erstellt, so dass sich der Wirkungsgrad der DSA erhöht. Dementsprechend treten viel stärkere Verankerungen und höhere Dehnungssprünge $\Delta\epsilon_b$ im Bereich des PLC Bands auf. Aus der Formel $v = c_b \Delta\epsilon_b$ geht hervor, dass eine Zunahme des Dehnungssprungs einer Abnahme der Bandgeschwindigkeit entspricht.

Der in Abb. 4.87 stärker vergrößert dargestellte Ausschnitt von Abb. 4.86 zeigt, dass die Geschwindigkeit eines neu gebildeten Bands (nach dem Geschwindigkeitsminimum) nahezu konstant ist. Kurz vor dem Verschwinden eines Bands findet man dagegen ein kurzzeitiges Geschwindigkeitsmaximum.

Eine Untersuchung zum Einfluss der Elementardehnung Ω (Parameter in Anhang IIb) ergab, dass sich das Maximum vor dem Bandverschwinden und das Minimum vor der Bandneubildung verringern, wenn die Elementardehnung ansteigt. Gleichzeitig erhöht sich die Tendenz zur Geschwindigkeitsoszillation bei der Bandneubildung (Abb. 4.88).

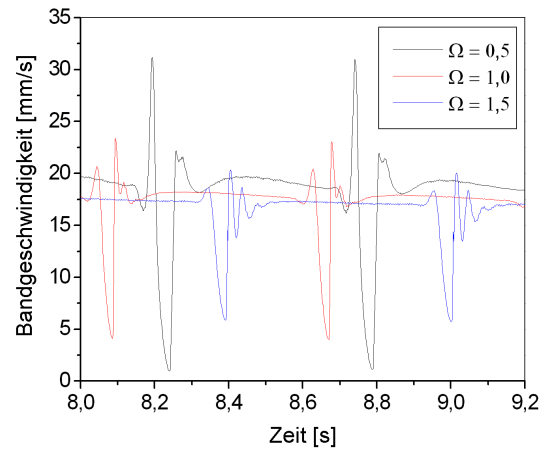
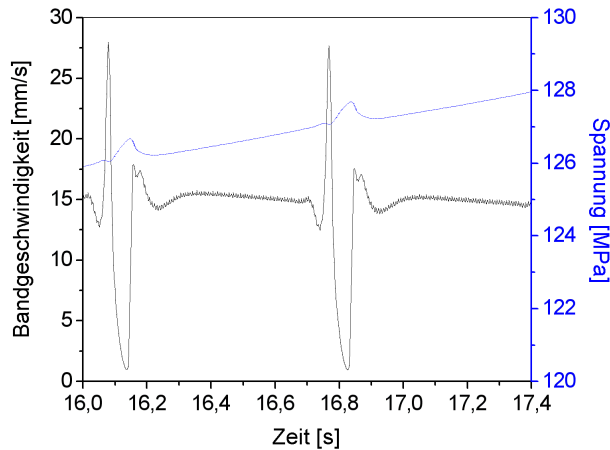


Abb. 4.87: Vergrößerter Ausschnitt von Abb. 4.85b, nahezu konstante Bandgeschwindigkeit nach dem Geschwindigkeitsminimum (Moment der Bandneubildung) und ein kurzzeitiges Geschwindigkeitsmaximum kurz vor dem Verschwinden eines Bands

Abb. 4.88: Einfluss der Elementardehnung $\Omega [10^{-4}]$ auf die Geschwindigkeitsextrema vor dem Verschwinden und bei der Neubildung von Bändern.

4.2.3.9 Einfluss der Anfangs- und Randbedingungen

Für die Untersuchung zum Einfluss der Anfangs- und Randbedingungen auf das Bandverhalten wurde der in Anhang IIa angegebene Parametersatz verwendet. Zusätzlich kamen zwei Randbedingungen A und B zur Anwendung (Abb.3.9). Bei Randbedingungstyp A wurde eine feste Spannungsrate vorgegeben und die Verfestigung am Rand als konstant angenommen (nachfolgend als feste Randbedingung bezeichnet). Diese Randwerte sind gleichzeitig Anfangswerte für alle Elemente des Modells. Beim Randbedingungstyp B gibt es keinen Unterschied zwischen den Randwerten und den Werten an den äußersten Blöcken (links und rechts). (freie Randbedingung genannt). Die Randbedingung spielt eine sehr wichtige Rolle bei der Bildung der PLC-Bänder und verursacht ein unterschiedliches Bandausbreitungsverhalten. Die feste Randbedingung bewirkt die Entstehung von Typ-A1-PLC-Bändern auf der Seite, auf der ein großer künstliche Dehnungsgradient vorliegt (Abb. 4.89a). Solche PLC-Bänder breiten sich nur in eine Richtung aus. Unter der freien Randbedingung (Abb. 4.89b) entsteht ein neues PLC-Band (Typ A2) im ersten Block aufgrund der dort vorgegebenen plastischen Anfangsdehnung. Bedingt durch den schwachen Einfluss der freien Randbedingung wird dieses Band auf der Gegenseite reflektiert. Dieser Prozess wiederholt sich im Verlauf der Zeit mehrfach. In Abb. 4.89c ist sichtbar, dass mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit die Ausbreitung unterbrochen wird und mehrere neue PLC-Bänder - entsprechend dem Zustand der plastischen Dehnung, Spannung und Reckalterungsenthalpie - in der Mitte der Probe entstehen. Hinsichtlich der Entstehung von Typ-A1- und Typ-A2-Bändern ist festzustellen, dass bei niedriger Zuggeschwindigkeit ($v = 6\mu\text{m/s}$) Typ-A1-Bänder häufiger unter der festen Randbedingung und Typ-A2-Bänder häufiger unter freier Randbedingung auftreten. Aus numerischen Gründen sind die Anforderungen an die Zeitschrittweite (Δt) für beide Randbedingungstypen unterschiedlich. Um stabile und genaue Simulation zu gewährleisten, sind bei der freien Randbedingung mehr Zeitschritte, d.h. kleinere Zeitschrittweiten (Δt) erforderlich als bei der festen Randbedingung.

In Abb. 4.89d, unter freier Randbedingung, entsteht ein PLC-Band bedingt durch eine Störung der Anfangsfließspannung im zentralen Element. Dieses Band spaltet sich in zwei Bänder, die zur linken und rechten Seite propagieren. Dies bedeutet, dass zwischen der Entste-

hug der PLC-Bänder und dem Anfangsgradienten entlang der Probe ein enger Zusammenhang besteht. Auf der anderen Seite entsteht - bedingt durch die Symmetrie der freien Randbedingungen, bei der der Dehnungsgradienten im Vergleich zum Dehnungsgradienten bei fester Randbedingung vernachlässigbar ist - ein gemischter Bandtyp. Dieser Bandtyp besitzt sowohl die Eigenschaften des Typ-A2-Bands (Reflektionsform) als auch des Typ-A'-Bands (Kreuzbänder).

Die Form der Ausbreitung der Typ-A-Bänder steht in einem engen Zusammenhang mit den

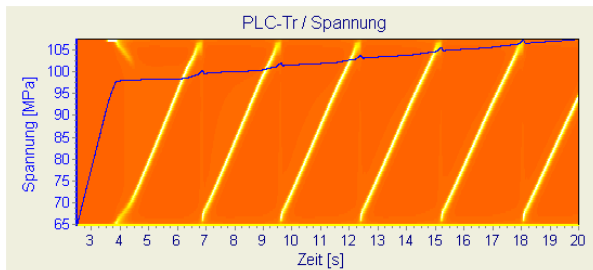


Abb. 4.89a. Zeitlicher Verlauf der Spannung (blau), im Hintergrund Bilder der Bandtrajektorien. Simulation mit der festen Randbedingung, $v = 6\mu\text{m/s}$, Typ-A1-Bänder.

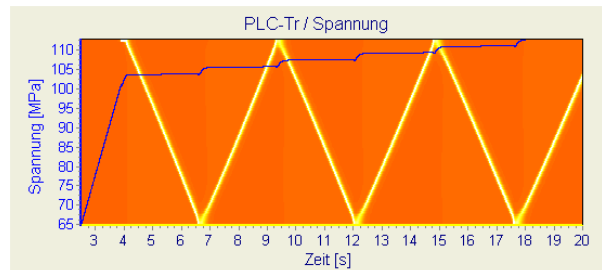


Abb. 4.89b. Zeitlicher Verlauf der Spannung (blau), im Hintergrund Bilder der Bandtrajektorien. Simulation mit der freien Randbedingung, $v = 6\mu\text{m/s}$, Typ-A2-Bänder.

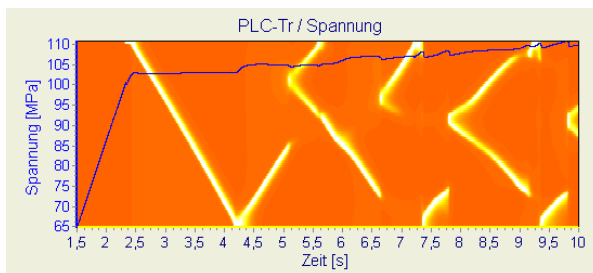


Abb. 4.89c. Zeitlicher Verlauf der Spannung (blau), im Hintergrund Bilder der Bandtrajektorien. Simulation mit der freien Randbedingung, $v = 10\mu\text{m/s}$. Typ-A2-Bänder unterbrocht

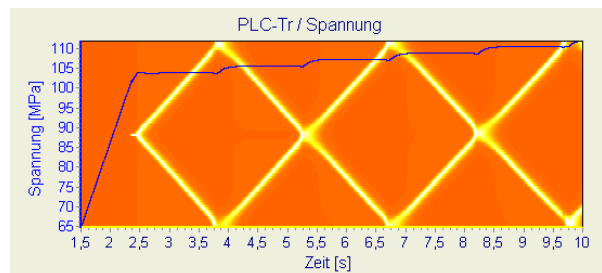


Abb. 4.89d. Zeitlicher Verlauf der Spannung (blau), im Hintergrund Bilder der Bandtrajektorien. Simulation mit der freien Randbedingung, $v = 10\mu\text{m/s}$. Initialisierung des Bands im Probenmitte durch Störung der Anfangsfließspannung.

Anfangs- und Randbedingungen. Die Ausbreitung ist nicht nur von der Zuggeschwindigkeit abhängig, sondern auch von der lokalen plastischen Dehnung und vom lokalen Verfestigungszustand (der Verteilung der inneren Spannung).

4.2.4 Vergleich von Experiment und Simulation mit dem 1D-Hähnermodell

4.2.4.1 Übereinstimmende Phänomene bei Experiment and Simulation

1. Im Übergangsbereich vom Typ A zum Typ B oszilliert die experimentell gemessene Bandgeschwindigkeit (vgl. Abb. 4.3 bzw. [3]). Die in Abb. 4.74 und Abb. 4.77 dargestellte, simulierte Bandgeschwindigkeit zeigt ebenfalls Oszillationen, die von Oszillationen der Spannung begleitet sind.
2. Reine Typ-B-Bänder entstehen, breiten sich aus und verschwinden wieder, nachdem sie einen kurzen Weg zurückgelegt haben. In Abb. 4.4 ist das typische Typ-B-Verhalten dar-

gestellt, das im Experiment beobachtet wird. Ähnliches findet man bei der Simulation (Abb. 4.78).

3. Die Bandgeschwindigkeit wächst bei ansteigender Vorschubgeschwindigkeit an. In Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen von Ziegenbein [67], Klose [66] und Ognjenovic [3] wurde in der vorliegenden Arbeit festgestellt, dass sich der experimentell gefundene Zusammenhang dieser beiden Größen durch ein Potenzgesetz beschreiben lässt. Die ebenfalls hierzu durchgeführten Simulationsrechnungen liefern ähnliche Resultate (Abb. 4.73 und Abb. 4.76).
4. Die Bandgeschwindigkeit nimmt exponentiell ab, wenn der Verfestigungskoeffizient abnimmt. Experimentell wurde dies eindeutig von Ognjenovic [3] sowie in der vorliegenden Arbeit (vgl. Abb. 4.1) nachgewiesen. Übereinstimmende Simulationsergebnisse werden in Abb. 4.85 dargestellt.
5. Lokale Dehnungsgradienten können die PLC-Bandsbildung auslösen. Ognjenovic, der kleine Löcher in die Mitte der Zugprobe gebohrt hat, stellte fest, dass in dem, mit hohen Dehnungsgradienten behafteten Bohrungsbereich viele PLC-Bänder initiiert werden, die sich dann in beide Richtungen ausbreiten [3]. Die erhöhte Dehnung im Scherbandbereich ist verantwortlich dafür, dass der PLC-Effekt dort zuerst ausgelöst wird. Zwar liegt der in Abb. 4.89d dargestellten Simulation keine Probe mit Bohrung zugrunde, aber die in Probenmitte vorgegebene Störung der Anfangsfließspannung hat den gleichen Effekt wie eine Bohrung, da sie ebenfalls zu einer lokal erhöhten Dehnung führt.
6. Am Anfang des Experiments mit ungekerbten Proben entstehen die PLC-Bänder zunächst an den Probenenden und breiten sich kontinuierlich aus. Später, bei höherer Verformung, werden sie zunehmend in Probenmitte initiiert und unterbrechen ihre Ausbreitung vor Erreichen eines Probenendes. Diese z. B. in Abb. 4.1 dargestellte experimentelle Beobachtung wurde auch bei den Simulationen gefunden (Abb. 4.89c).

4.2.4.2 Differenzen zwischen Experiment und Simulation

1. Am Anfang der Experimente gibt es eine kurze Phase, in der die Bandgeschwindigkeit mit zunehmender Dehnung ansteigt. Dies wurde von Ognjenovic [3] experimentell festgestellt. Bei den Simulationen, die in der vorliegenden Arbeit durchgeführt worden sind, ließ sich das Phänomen nicht bestätigen. Möglicherweise ist das auf die im Modell von Hähner getroffene Annahme zurückzuführen, dass die Elementardehnung Ω eine Konstante, d. h. nicht von der Dehnung abhängig ist. Gegen eine solche Annahme spricht auch die von Ling & McCormick gemachte Beobachtung; derzufolge wird die Elementardehnung der Legierung Al-Mg-Si 0,00005 auf 0,0006 erhöht, wenn die Dehnung anwächst [60].
2. Im Experiment wurde festgestellt, dass das mittels DMS gemessene Dehnratenmaximum von Band zu Band bzw. bei anwachsender Dehnung zunimmt (Abb. 4.90, rechts). Demgegenüber bleibt das Dehnratenmaximum in der Simulation nahezu konstant (Abb. 4.90, links). Es muss zukünftigen Untersuchungen vorbehalten bleiben, den Grund für diese Diskrepanz zu ermitteln.
3. Die im Experiment festgestellten Werte der kritischen Dehnung lassen sich nicht im Rahmen der mit dem Hähner-Modell durchgeführten Simulationsrechnungen vorhersagen.

Die Schlussfolgerungen, die aus der Übereinstimmung zwischen der 1D-FD-Simulation mit dem Experiment sowie den Diskrepanzen zwischen Simulation und Experiment zu ziehen sind, werden in Kapitel 5 diskutiert.

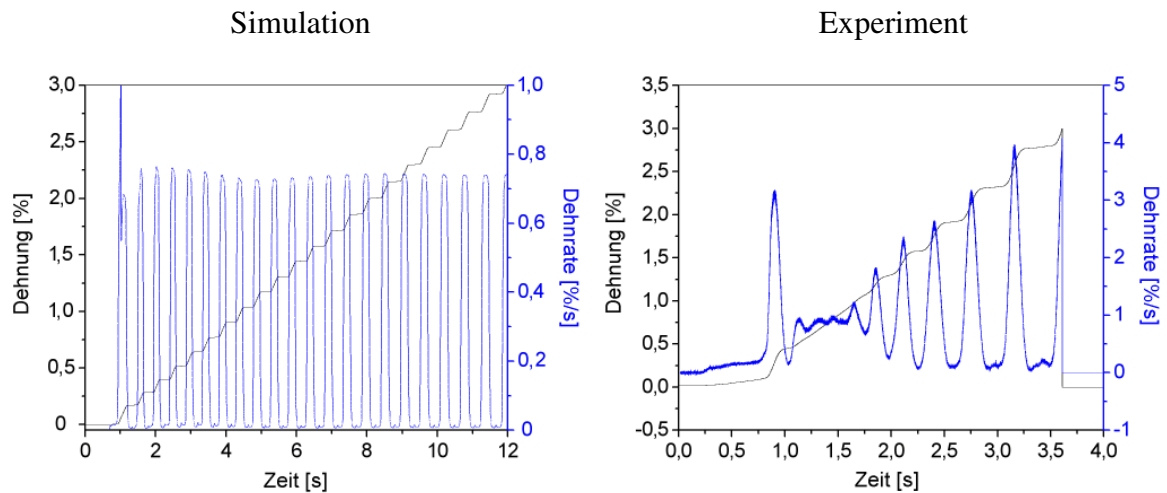


Abb. 4.90 Simulation: Das Dehnratenmaximum der einzelnen Bänder bleibt bei zunehmender Verformung (Zeit) nahezu gleich (Parametersatz von Anhang IIb, $\Omega = 0,5 \times 10^4$). Experiment: Das Dehnratenmaximum steigt mit der Verformung an. Davon weicht nur das erste Maximum ab. Das ist aber einem Lüdersband zuzuordnen (Experiment an Probe 13 in der Arbeit [3]).

4.2.5 3D-FE-Simulation mit Hähner-Modell ohne Kopplung

Die im vorangehenden Abschnitt vorgestellten 1D-Simulationen auf Basis des Hähner-Modells bilden die Realität nur eingeschränkt ab, da sich in realen Proben sowohl die Spannung als auch die Dehnung im 3D-Raum verändern. Allerdings ist der 3-dimensionale Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei visko-elastisch-plastischen Materialmodellen sehr kompliziert. Insbesondere die durch die Diffusion von Fremdatomen bedingte, weitreichende Versetzungswechselwirkung (nachfolgend kurz als räumliche Kopplung bezeichnet) bereitet große Schwierigkeiten, das vollständige Hähner-Modell in ABAQUS zu implementieren. Deshalb wurde die auf dem Hähner-Modell basierende 3D-Simulation ohne Berücksichtigung der räumlichen Kopplung durchgeführt. In Abschnitt 2.4.2 wird der instabile Bereich (negative SRS) ohne Berücksichtigung der Kopplung in Gleichung (2.41) erläutert. Auch von Lasko [94] wurden bereits Simulationsrechnungen auf Basis des Hähnermodells ohne Berücksichtigung der Kopplung durchgeführt. Während dort von einer parabolischen Dehnungsverfestigung ausgegangen wurde, beruhen die in diesem Abschnitt vorgestellten Simulationsergebnisse auf einem Voce-Dehnungsverfestigungsmodell.

Bei der Simulation wurde die gleiche Netzstruktur wie in Abb. 4.47 eingesetzt. Auch ist für das gleiche Element des Netzes eine 5%-Störung des Anfangswerts der inneren Spannung (Initial back stress) angenommen worden. Die vollständige Modellparameterliste ist in Tab. 4.2 angegeben.

Parameter	Symbol	Wert
E-Modul	E	70 GPa
Poissonzahl	ν	0,3
Anfangswert der internen Spannung	$\sigma_i(0)$	1,0 MPa (ausgenommen das erste Element, dort 0,95 MPa)
Interne Spannung	$\sigma_i = \sigma_i(0) + d_2 \left[1 - \exp\left(-\frac{\epsilon_{pl}}{d_3}\right) \right]$	$d_2 = 29,94$ MPa
		$d_3 = 5,6 \times 10^{-2}$
Anlauffrequenz der Versetzungen an Hindernissen	ν	10^{+13} s^{-1}
Statische Aktivierungsenthalpie für die Überwindung von Hindernissen	G_0/kT	60
Elementardehnung	Ω	$1,0 \times 10^{-4}$
Alterungsrate	η	10 s^{-1}
Instantane Dehnratenempfindlichkeit	S_0	1 MPa
normierte Sättigungsenthalpie	g_∞	10

Tab. 4.2 Modellparameter für die 3D-Simulation auf Basis des Hähner-Modells

Als ein Beispielergebnis dieser Simulation wird in Abb. 4.91 die Spannungs-Zeit-Kurve dargestellt. Der erste Spannungsabfall in dieser Kurve ähnelt dem eines Lüdersbands. In Abb. 4.92a ist sichtbar, dass sich vor diesem Spannungsabfall ein vom künstlich gestörten Element ausgehender Bereich starker Spannungskonzentration unter einem Winkel von etwa 50° zur Wirkrichtung der Zugspannung erstreckt. Im Moment des Spannungsabfalls hat sich der Bereich erhöhter Spannungskonzentration in zwei Zonen aufgespalten (Abb. 4.92b) Zwischen diesen beiden Zonen liegt eine dritte Zone, in der die Spannung gering und dementsprechend die Dehnratenempfindlichkeit groß und die Reckalterungsenthalpie klein sind.

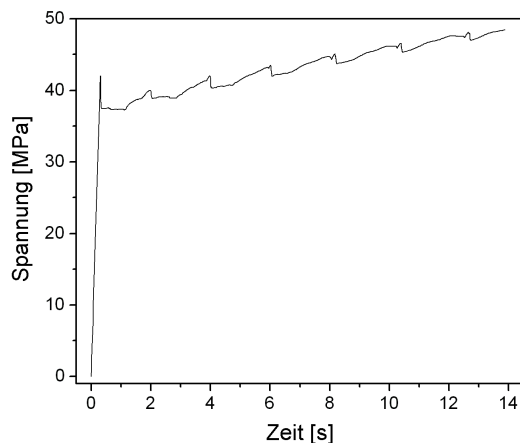


Abb. 4.91: Spannungs-Zeit-Kurve, 3-dimensional mit dem Hähner-Modell ohne räumliche Kopplung simuliert

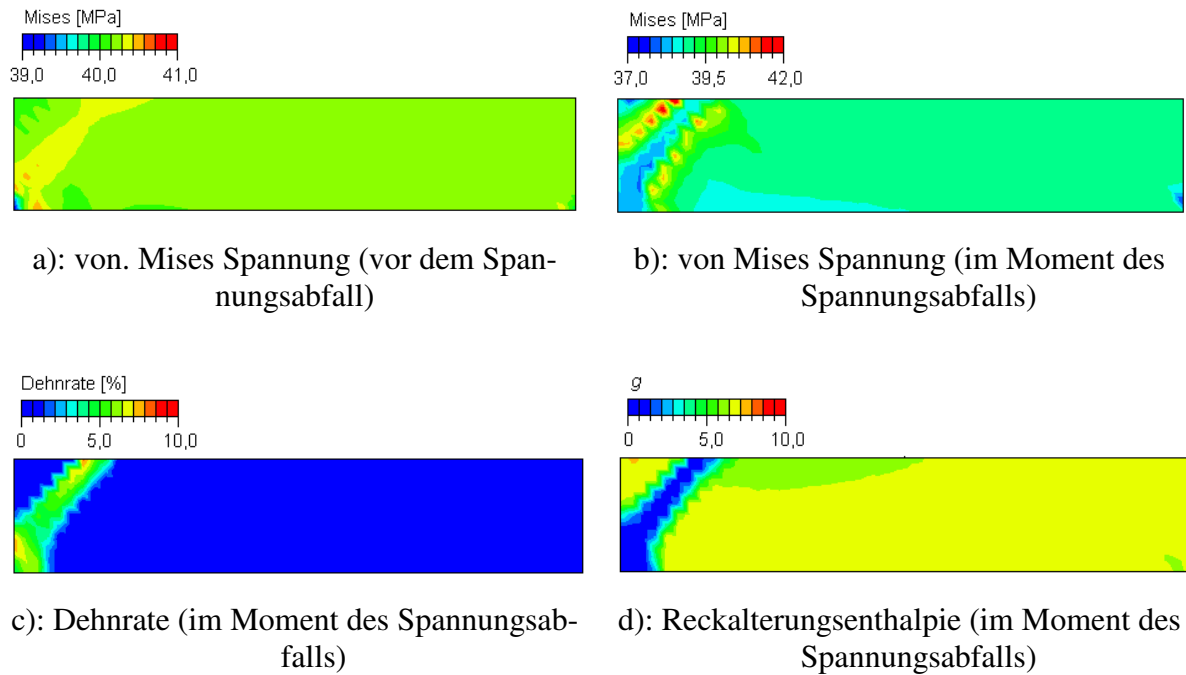


Abb. 4.92: Die Verteilungen der v.-Mises-Spannung, der Dehnrate und der Rekalterungsenthalpie in der Phase kurz nach der Bandbildung, Simulation auf Basis des Hähnermodells ohne räumliche Kopplung

In Abb. 4.93a ist die Morphologie eines von rechts nach links propagierenden Bands dargestellt. Es ist gut sichtbar, dass sich das Dehnratenmaximum nicht in Bandmitte befindet, sondern von der Mitte weg in Ausbreitungsrichtung verschoben ist. Vor dem PLC-Band befindet sich ein Bereich erhöhter Spannung (Abb. 4.93b). Dieses Phänomen tritt auch bei der Simulation des Estrin-McCormick-Modells auf. Die Rekalterungsenthalpie erreicht im Bereich des Bands (in der Zone maximaler Dehnrate) erwartungsgemäß ihr Minimum.

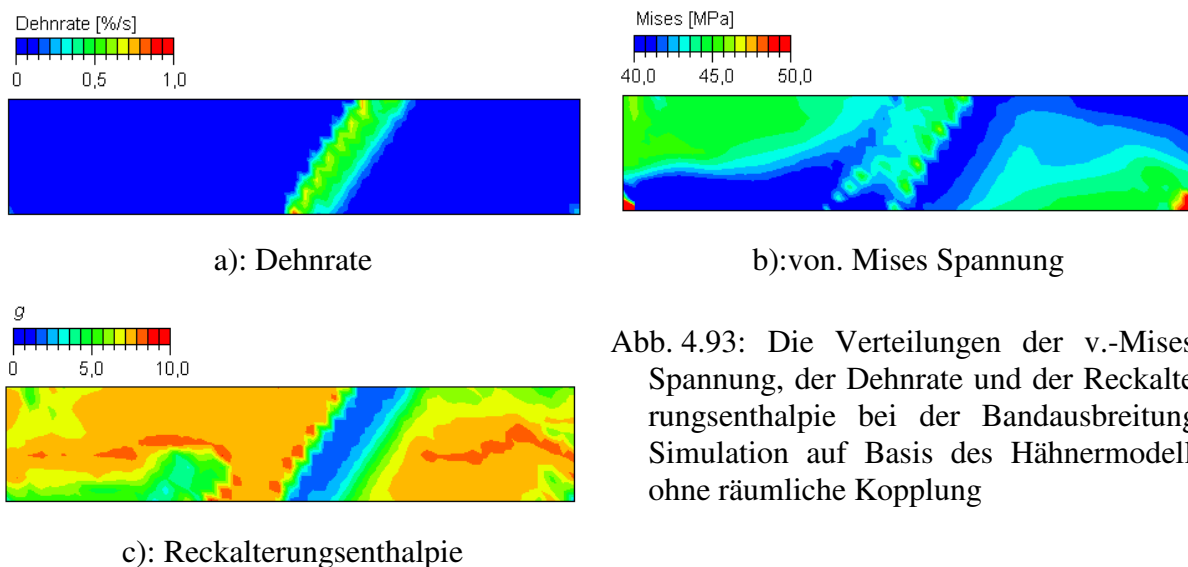


Abb. 4.93: Die Verteilungen der v.-Mises-Spannung, der Dehnrate und der Rekalterungsenthalpie bei der Bandausbreitung, Simulation auf Basis des Hähnermodells ohne räumliche Kopplung

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bildung und Ausbreitung von PLC-Bändern auch ohne Berücksichtigung der räumlichen Kopplung (vgl. Term 1 in Gleichung (2.44)) simuliert werden können, obwohl die im Rahmen des Hähnermodells geforderte Einbeziehung der Versetzungswchselwirkung durch Vernachlässigung des Kopplungsterms nicht entsprochen wird.

Die a-priori-Annahme einer δ -förmiger Wartezeitverteilung legt bereits eine starke Versetzungswechselwirkung fest.

5 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit einer sowohl experimentellen als auch theoretischen Untersuchung des PLC-Effekts. Dementsprechend werden nachfolgend zunächst die experimentellen und die Simulationsergebnisse getrennt zusammenfasst. Dann folgt eine vergleichende Zusammenfassung.

5.1.1 Experimentelle Ergebnisse

- 1 Die durchgeführte Kalibrierung der IR-Kamera ermöglichte es, die Temperaturänderungen auf der Probenoberfläche quantitativ zu bestimmen. Auf dieser Basis konnte der durch den Taylor-Quinney-Koeffizienten beschriebene und für die thermomechanische Simulation wichtige Zusammenhang zwischen der plastischen Verformung und der Temperatur ermittelt werden.
- 2 Die ebenfalls realisierte, simultane Messung von Dehn- und Temperaturratefelder auf Basis der IR-Bildserien eröffnet die Möglichkeit, den Taylor-Quinney-Koeffizienten lokal zu bestimmen.
- 3 Zur gleichzeitigen Visualisierung des Bandausbreitungsverhaltens auf der einen und des Verlaufs von Spannung, Dehnung und Temperatur auf der anderen Seite wurde eine Methode zur Erstellung von Raum-Zeit-Darstellungen entwickelt. Anhand dieser Darstellungen können die bei der Bildung und Ausbreitung der PLC-Bänder ablaufenden Prozesse umfassender charakterisiert und erklärt werden.
- 4 Mit diesen Darstellungen ließ sich beispielsweise zeigen, dass die Bandgeschwindigkeit in weggeregelten Experimenten bei zunehmender Dehnung abnimmt und dass dies mit einer entsprechenden Veränderung des Dehnungsverfestigungskoeffizienten korreliert. Festgestellt wurde des Weiteren, dass die Bandgeschwindigkeit im Übergangsbereich von Typ-A- zu Typ-B-Bändern oszilliert und dass dies mit der Frequenz der ebenfalls stattfindenden Spannungsozillationen erfolgt. Bandgeschwindigkeit und Spannung oszillieren mit einer gewissen Phasenverschiebung zueinander.
- 5 Das Verhalten von Lüdersbändern und der Lüdersband-PLC-Band-Wechselwirkung wurde im Übergangsbereich zwischen dem Probensteg und dem Probenkopf analysiert. Dabei konnte anhand der Temperaturratebilder nachgewiesen werden, dass sich PLC-Bänder von den Lüdersbändern abspalten. Neben den lokalen Lüdersbändern erwiesen sich die Probenkanten und die Probenbereiche mit erhöhtem Dehnungsgradienten als bevorzugte Orte der Bandentstehung. Die im Übergangsbereich durchgeführten Untersuchungen haben auch gezeigt, dass das Verschwinden eines PLC-Bands als ein zur Bandbildung inverser Prozess verstanden werden kann. Im Übergangsbereich wurde darüber hinaus die Reflexion von Bändern beobachtet.
- 6 Bei Experimenten, bei denen die Zugproben lokal mit einem Laserstrahl erwärmt worden sind, wurde festgestellt, dass die Bandbildung und -ausbreitung nicht nur von der Höhe der Temperaturveränderung sondern auch von der Temperaturverteilung beeinflusst wird.
- 7 Die an gekerbten Proben durchgeführten Zugverformungsexperimente haben gezeigt, dass die Probengeometrie das PLC-Bandverhalten beeinflusst.

- 8 An gekerbten Proben wurde auch die Scherband-PLC-Band-Wechselwirkung analysiert. Hierbei zeigte sich einerseits, dass die Höhe und Verteilung der plastischen Dehnung in den Scherbändern und die Scherbandorientierung stark auf die Bildung und Ausbreitung der PLC-Bänder einwirken. Andererseits scheinen die PLC-Bänder aber auch auf die Scherbandentwicklung zurückzuwirken.
- 9 An speziell präparierten Proben wurde der Einfluss von Spannungskonzentrationen und den damit verbundenen Spannungsgradienten auf den Ort der Bandbildung statistisch untersucht. Hier zeigt sich im Verlauf der Verformung eine starke Veränderung.

5.1.2 Simulationsergebnisse

1. Sowohl dünne prismatische Proben als auch Proben, deren Geometrie der realen Proben entsprach, wurden verwendet, um die Entwicklung von Modell- (Spannung, plastische Vergleichsdehnung, Rate der plastischen Vergleichsdehnung) und verschiedener Statusvariablen (Alterungszeit, Konzentration der Fremdatome im Bereich der Versetzungen) auf Basis des Estrin-McCormick-Modells zu simulieren. Darüber hinaus wurde das Verhalten gekerbter Proben simuliert, um die Wechselwirkung von Scher- und PLC-Bändern zu analysieren. Schließlich wurden die Wärmeleitung und die Temperaturkopplung (im adiabatischen Fall) berücksichtigt, um die Wechselwirkung zwischen den PLC-Bändern und der Temperaturverteilung zu untersuchen.
2. Das Hähner-Modell wurde verwendet, um dehnungsgeregelte Zugtests mit der Finite-Differenzen-Methode zu simulieren. Dabei wurde der Einfluss verschiedener Modellparameter auf die Geschwindigkeit und den Typ der Bänder betrachtet. Hierbei waren folgende Modellparameter einbezogen: Die Alterungsrate η , die Elementardehnung Ω , der Diffusionskoeffizient D , der Dehnungsverfestigungskoeffizienten h , die Steifigkeit E_m und die Vorschubgeschwindigkeit v der Prüfmaschine. Dabei zeigte sich, dass im Übergangsbereich vom Typ A zum Typ B die Bildung von Typ-B-Bändern begünstigt wird, wenn der Diffusionskoeffizient, die Elementardehnung und die Alterungsrate hoch und die Steifigkeit der Prüfmaschine gering ist, sofern die Vorschubgeschwindigkeit konstant gehalten wird. Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Bandgeschwindigkeit wurde sowohl bei konstanter als auch linear anwachsender Vorschubgeschwindigkeit simuliert. Die Voce-Gleichung wurde verwendet, um den Einfluss des Dehnungsverfestigungskoeffizienten auf die Bandgeschwindigkeit zu simulieren. Hierbei zeigt sich, dass die Bandgeschwindigkeit exponentiell mit der Dehnung abnimmt. Festgestellt wurde auch, dass die Art der gewählten Anfangs- und Randbedingungen die Bildung und Ausbreitung der Bänder beeinflusst und dass die Geschwindigkeit der Typ-A-Bänder am Anfang und am Ende der Ausbreitung einer Schwankung unterworfen ist. Zum Beispiel tritt vor dem Ende des Bands, bevor die Geschwindigkeit auf Null zurückgeht, noch einmal ein kurzer Geschwindigkeitsanstieg auf (vgl. Abb. 4.87).
3. Die ohne Berücksichtigung der räumlichen Kopplung und mit der Voce-Verfestigungsgleichung durchgeführten 3D-FE-Simulationen auf Basis des Hähner-Modells erzielten Ergebnisse zur Bandbildung und -ausbreitung sind den Ergebnissen sehr ähnlich, die bei den Simulationsrechnungen auf Basis des Estrin-McCormick-Modells festgestellt worden sind.

5.1.3 Vergleich Experiment - Simulation

1. Der bei den Simulationen vorhergesagte Bandwinkel von ca. 55° entspricht recht gut dem experimentell ermittelten Wert von ca. 60° .

2. Die Änderung des Bandwinkels, die im Experiment beobachtet wird, tritt auch bei der Simulation auf.
3. Die bevorzugte Bandbildung in Probenmitte, die im Experiment bei hoher Dehnung beobachtet wird, wird durch die Simulation dann besser vorhergesagt, wenn die Rückwirkung der durch die plastische Verformung verursachten Temperaturerhöhung auf den PLC-Effekt (Temperaturkopplung) berücksichtigt wird. Das heißt, die Berücksichtigung dieser Kopplung im Modell ist erforderlich, um die Morphologie and Kinetik der PLC-Bänder realitätsnaher beschreiben zu können.
4. Der Vergleich von Experiment und Simulation zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung bei der Kinematik der PLC-Bänder und bei der Scherband-PLC-Band-Wechselwirkung. Der quantitative Vergleich offenbarte aber Diskrepanzen in den Bandparametern. Auch gibt es experimentell beobachtete Phänomene, die bisher mit keinem der beiden Modelle simuliert werden konnten.

5.2 Schlussfolgerungen und Ausblick

Um vertiefte Einsichten in den PLC-Effekt als Verformungsinstabilität und in den thermomechanischen Prozess zu gewinnen, ist es erforderlich, den in dieser Arbeit begonnenen Weg der engen Kopplung von Modellbildung, Simulation und Experiment fortzusetzen. Dies bedeutet zunächst, dass die Modellansätze, Simulationstools und experimentellen Methoden kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert werden müssen. In diesem Zusammenhang sollten die Belange von Modellbildung und Simulation noch stärker im Experiment berücksichtigt werden. Daraus leiten sich Forderungen ab wie die Erhöhung der Orts- und Zeitauflösung (durch den Einsatz von CMOS-Kameras realisierbar), die Messung bei erhöhter Dehnrates und die weitere Automatisierung der Bandparameterbestimmung durch verbesserte Auswertalgorithmen.

Auf Basis der verbesserten Methoden ist dann eine Fortführung der begonnenen Arbeiten in folgende Richtungen möglich und sinnvoll:

1. Bereitstellung aller für die Simulation erforderlichen Eingangsdaten (Materialparameter z.B der Taylor-Quinney-Koeffizient und die instantane Dehnratesempfindlichkeit) durch das Experiment.
2. Bereitstellung der charakteristischen Bandparameter (Geschwindigkeit, Dehnungssprung, Breite, Winkel der Bänder als Funktion der globalen Dehnung) und Feldgrößen (Dehn- und Temperaturratefelder als Funktion der globalen Dehnung und der Nennspannung) für die Validierung der Modellansätze und Simulationsergebnisse
3. Formulierung und Entwicklung von drei-dimensionalen thermomechanischen Ansätzen für das Materialverhalten beim PLC-Effekt unter Berücksichtigung der lokalen Spannungsrelaxation, der Versetzungswechselwirkung, der dynamischen Reckalterung und der Temperaturkopplung.
4. Um den Effekt der Fehler bei der Messung der Modellparameter auf das Simulationsergebnisse abschätzen zu können, wären Sensitivitätsanalysen und Modellidentifikationen sinnvoll.

Auf diese Weise wird es im Rahmen der Modellierung und Simulation möglich sein, Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung der Legierungen, dem Typ des technologischen Prozesses und dem Auftreten des PLC-Effekts zu erforschen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden Wege dafür aufzeigen, wie durch eine gezielte Wahl der Legierungsart bzw. der Belastungsparameter der PLC-Effekts reduziert werden kann.

6 *Literaturverzeichnis*

- [1] Estrin, Y., Kubin, L.P. Plastic instabilities: classification and physical mechanisms. *Res. Mechanica* 23, 197-221: 1988
- [2] Estrin, Y., Kubin, L.P. Plastic instabilities: phenomenology and theory. *Materials Science and Engineering A* 137, 125-134: 1991
- [3] Ognjenovic, Experimentelle Untersuchung des inhomogenen Verformungsverhaltens bei Scher- und PLC-Bandbildung, 2005
- [4] Tong, W. Tao, H. Zhang, N. Hector Jr, L. G. Time-resolved strain mapping measurements of individual Portevin–Le Chatelier deformation bands. *Scripta Materialia* 53, 87-92: 2005
- [5] Akeret, R. Beobachtungen über die Lokalisierung der Verformung in Aluminiumwerkstoffen. *Aluminium*, 54(6), 385-391: 1978
- [6] Brechet, Y. et al. Plastic Instabilities in AlLi Alloys. *Solid State Phenomena*, 23-24: 335-346: 1992
- [7] Schatt, W. und Worch, H. *Werkstoffwissenschaft*, Technische Universität Dresden, 2002
- [8] Bross, S. Versetzungsdynamik und Reckalterung als Ursache instabilen Materialverhaltens beim PLC-Effekt. Dissertation TU Braunschweig 2002
- [9] Gottstein, G. *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*. Springer: 1998
- [10] NADGORNÝ, E. *Dislocation dynamics and mechanical properties of crystals*. Pergamon Press, Oxford, 1988.
- [11] Vollertsen, F. und Vogler, S. *Werkstoffeigenschaften und Mikrostruktur*. Hanser:1989
- [12] Picu, R.C. Zhang, D. Atomistic study of pipe diffusion in Al–Mg alloys, *Acta Materialia* 52, 161-171: 2004
- [13] Springer, F. und Schwink, CH. Quantitative Investigations on Dynamic Strain Ageing in Polycrystalline CuMn Alloys. *Scripta Met. Mat.* 25, 2739-2744: 1991
- [14] Schöck, G. Thermodynamics and Thermal Activation of Dislocations. Bd. 6 von *Dislocation in Solids*, North-Holland, 63-163: 1980
- [15] Springer, F. et al. A Study of Basic Processes Characterizing Dynamic Strain Ageing. *Phys. Stat. Sol. A* 170, 63-81: 1998
- [16] Schlipf, J. On the Kinetics of Static and Dynamic Strain Ageing. *Scripta Met.* 31, 909-914: 1994
- [17] Louat, N. On the theory of the Portevin-Le Chatelier effect. *Scripta Metallurgica* 15, 1167-1170: 1981

- [18] Hähner, P. On the critical conditions of the Portevin-Le Chatelier effect. *Acta Mater.*, 45(9): 3695-3707: 1997
- [19] Zaiser, M. und Hähner, P. Oscillatory Modes of Plastic Deformation: Theoretical Concepts. *Phys. Stat. Sol. B*, 199, 267-330: 1997
- [20] Hähner, P. Ziegenbein, A. Rizzi, E. Neuhäuser, H. Spatiotemporal analysis of Portevin-Le Châtelier deformation bands: theory, simulation and experiment. *Physical Review B* 2002; 65(13): 134109
- [21] Korbel, A. The Structural Aspect of the Portevin LeChatelier effect in Alpha Brass. *Scripta Met.* 8, 609-612: 1974
- [22] Korbel, A. Zasadizinski, J. and Sieklucka, Z. A New Approach to Portevin LeChatelier Effect. *Acta Met.* 24, 919-923: 1976
- [23] Korbel, A and H. Dybiec. The Problem of the Negative Strain Rate Sensitivity of Metals under the Portevin LeChâtelier Deformation Conditions. *Acta Met.* 29, 89-93: 1981
- [24] Hähner, P. On the physics of the Portevin-Le Châtelier effect, part 1: the statistics of dynamic strain ageing, *Materials Science and Engineering A* 207, 208-215: 1996
- [25] Hähner, P. On the physics of the Portevin-Le Châtelier effect, part 2: from microscopic to macroscopic behaviour. *Materials Science and Engineering A* 207, 216-223: 1996
- [26] Zorn, C. Plastisch unstable Verformung aufgrund dynamischer Reckalterung und korrelierten Versetzungsgleitens. PhD thesis, TU Braunschweig, 2002.
- [27] Ait-Amokhtar, H. Boudrahem, S. and Fressengeas, C. Spatiotemporal aspects of jerky flow in Al-Mg alloys, in relation with the Mg content, *Scr. Metall.* 54, 2113-2118: 2006
- [28] Ait-Amokhtar, H. Vacher, P. and Boudrahem, S. Kinematics fields and spatial activity of Portevin-Le Chatelier bands using the digital image correlation method, *Scr. Metall.* 54, 4365-4371: 2006
- [29] Casarotto, L. Tutsch, R. Ritter, Dierke, R. H. Klose, F. Neuhäuser, H. Investigation of PLC bands with optical techniques, *Computational Materials Science* 32, 316-322: 2005
- [30] Chinh, N. Q. Horvath, G. Kovacs, Z. Juhasz, A. Berces, G. Lendvai, J. Kinematic and dynamic characterization of plastic instabilities occurring in nano- and microindentation tests, *Materials Science and Engineering A* 409, 100-107: 2005
- [31] Chmelik, F. Klose, FB. Dierke, H. Sachl, J. Neuhäuser, H. Lukac, P. Investigating the Portevin-Le Chatelier effect in strain rate and stress rate controlled tests by the acoustic emission and laser extensometry techniques. *Mat. Sci. Eng. A* 462, 53-60: 2007
- [32] Dierke, H. Krawehl, F. Graff, S. Forest, S. Sachl, J. Neuhäuser, H. Portevin-LeChatelier effect in Al-Mg alloys: Influence of obstacles – experiments and modelling. *Computational Materials Science* 39, 106-112: 2007

- [33] Halim, H. Wilkinson, D. S. Niewczas, M. The Portevin–Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy, *Acta Materialia* 55, 4151-4160: 2007
- [34] Horvath, G. Chinh, N. Q. Gubicza, J. Lendvai, J. Plastic instabilities and dislocation densities during plastic deformation in Al–Mg alloys, *Materials Science and Engineering A* 445, 186-192: 2007
- [35] Kang, J. Wilkinson, D. S. Embury, J. D. Jain, M. Beaudoin, A. J. Effect of type-B Portevin–Le Chatelier bands on the onset of necking in uniaxial tension of strip cast AA5754 sheets, *Scripta Materialia* 53, 499-503: 2005
- [36] Kang, J. Wilkinson, D.S. Jain, M. Embury, J.D. Beaudoin, A.J. Kim, S. Mishra, R. Sachdev, A.K. On the sequence of inhomogeneous deformation processes occurring during tensile deformation of strip cast AA5754, *Acta Materialia* 54, 209-218: 2006
- [37] Lebyodkin, M.A. Estrin, Y. Multifractal analysis of the Portevin–Le Chatelier effect: General approach and application to AlMg and AlMg/Al₂O₃ alloys, *Acta Materialia* 53, 3403-3413: 2005
- [38] Louche, H. Vacher, P. and Arrieux, R. Thermal observations associated with the Portevin–Le Chatelier effect in an Al–Mg alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 404, 188-196: 2005
- [39] Picu, R.C. Vincze, G. Ozturk, F. Gracio, J.J. Barlat, F. Maniatty, A.M. Strain rate sensitivity of the commercial aluminum alloy AA5182-O, *Materials Science and Engineering A* 390, 334-343: 2005
- [40] Picu, R.C. Vincze, G. Gracio, J.J., Barlat, F. Effect of solute distribution on the strain rate sensitivity of solid solutions, *Scripta Materialia* 54, 71-75: 2006
- [41] Sarkar, A. and Barat, P. The Portevin–Le Chatelier effect in the continuous time random walk framework, *Physics Letters A* 367, 291-294: 2007
- [42] Shabadi, R. Kumar, S. Roven, H.J. Dwarakadasa, E.S. Characterisation of PLC band parameters using laser speckle technique, *Mater. Sci. Eng. A* 364, 140-150: 2004
- [43] Shabadi, R. Kumar, S. Roven, H.J. Dwarakadasa, E.S. Effect of specimen condition, orientation and alloy composition on PLC band parameters, *Materials Science and Engineering A* 382, 203-208: 2004
- [44] Zdunek, J. Szychalski, W.L. Mizera, J. Kurzydłowski, K.J. The influence of specimens geometry on the PLC effect in Al–Mg–Mn (5182) alloy, *Materials Characterization* 58, 46-50: 2007
- [45] Cuniberti, A. Serrated yielding in long-range ordered 18R Cu–Zn–Al single crystals, *Intermetallics* 14, 776–779: 2006
- [46] Graff, S. Forest, S. Strudel, J.-L. Prioul, C. Pilvin, P. and Bechade, J.-L. Finite element simulations of dynamic strain ageing effects at V-notches and crack tips, *Scripta Materialia* 52, 1181-1186: 2005
- [47] Jiang, Z. Zhang, Q. Jiang, H. Chen, Z. Wu, X. Spatial characteristics of the Portevin-Le Chatelier deformation bands in Al-4at%Cu polycrystals, *Materials Science and Engineering A* 403, 154–164: 2005

- [48] Jiang, H. Zhang, Q. Wu, X. Fan, J. Spatiotemporal aspects of the Portevin–Le Chatelier effect in annealed and solution-treated aluminum alloys, *Scripta Materialia* 54, 2041-2045: 2006
- [49] Jiang, H. Zhang, Q. Jiang, Z. Wu, X. Experimental investigations on kinetics of Portevin–Le Chatelier effect in Al–4 wt.%Cu alloys, *Journal of Alloys and Compounds* 428, 151–156: 2007
- [50] Jiang, H. Zhang, Q. Chen, X. Chen, Z. Jiang, Z. Wu, X. Fan, J. Three types of Portevin–Le Chatelier effects: Experiment and modelling, *Acta Materialia* 55, 2219-2228: 2007
- [51] Ranc, N. Wagner, D. Some aspects of Portevin–Le Chatelier plastic instabilities investigated by infrared pyrometry, *Mat. Sci. Eng. A* 394, 87-95: 2005
- [52] Ranc, N. Wagner, D. Experimental study by pyrometry of Portevin–Le Chatelier plastic instabilities - Type A to type B transition, *Materials Science and Engineering A* 474, 188–196: 2008
- [53] Schmitter, E. D. Electric signals from plastic deformation in metals. Monitoring intermittent plastic flow in metals with an electric field sensor, *Physics Letters A* 368, 320-323: 2007
- [54] Xiang, G.F. Zhang, Q.C. Liu, H.W. Wu, X.P. and Jub, X.Y. *Scripta Materialia* 56, 721-724: 2007
- [55] Zhang, Q. Jiang, Z. Jiang, H. Chen, Z. and Wu, X. On the propagation and pulsation of Portevin-Le Chatelier deformation bands: An experimental study with digital speckle pattern metrology, *Int. J. Plasticity* 21, 2150-2173: 2005
- [56] Delafosse, D. Lapasset, G. Kubin, L.P. Dynamic strain aging and crack propagation in the Al-Li alloy, *Scr Metall Mater* 29, 1379-1384: 1993
- [57] Mizera, J. and Kuzydlowski, K. J. On the anisotropy of the Portevin- Le Chatelier plastic instabilities in Al-Li-Cu-Zr alloy, *Scripta Materialia* 45, 801-806: 2001
- [58] Pink, E. Kumar, S. Tian, B. Serrated flow of aluminium alloys influenced by precipitates, *Materials Science and Engineering A* 280, 17–24: 2000
- [59] Shen, Y.Z. Oh, K.H. Lee, D.N. The effect of texture on the Portevin–Le Chatelier effect in 2090 Al–Li alloy, *Scripta Materialia* 51, 285-289: 2004
- [60] Ling, C.P., McCormick, P.G., The effect of temperature on strain rate sensitivity in an Al-Mg-Si alloy. *Acta Metal. Mater* 41, 3127-3131: 1993
- [61] Springer, F. Nortmann, A. und Schwink, Ch. A study of Basic Processes Characterizing Dynamic Strain Ageing. *Phys. Stat. Sol. A* 170, 63-81: 1998
- [62] Kalk, A. Nortmann, A. und Schwink, CH. On the Dynamic Strain Ageing and the Boundaries of Stable Plastic Deformation Studied on Cu-Mn single Crystals. *Phil. Mag. A*, 1239-1259: 1995

- [63] Chmelik, F. Trojanova, Z. et al., The Portevin-LeChatelier Effect in Al-2.92%Mg-0.38%Mn Alloy and Linear Location of Acoustic Emission, *Mat. Sci. Eng. A* 164, 260-265: 1993
- [64] Chmelik, F. Ziegenbein, A. Neuhäuser, H. Lukac, P. Investigating the Portevin–LeChatelier effect by the acoustic emission and laser extensometry techniques. *Mat. Sci. Eng. A* 324, 200-207: 2002
- [65] Dobron, P. Bohlen, J. Chmelik, F. Lukac, P. Letzig, D. Kainer, K. U. Acoustic emission during stress relaxation of pure magnesium and AZ magnesium alloys. *Mat. Sci. Eng. A*, 462 (2007) 307–310: 2007
- [66] Klose, F. Experimental and numerical studies on the Portevin-LeChatelier effect in Cu-Al and Al-Mg in strain and stress controlled tensile tests, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2003
- [67] Ziegenbein, A. Laserextensometrische Untersuchung des PLC-Effekts an einer CuAl-Legierung, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2000
- [68] Beukel, v. d. A. Theory of the Effect of Dynamic Strain Ageing on Mechanical Properties. *Phys. Stat. Sol. A* 30, 197-206: 1975
- [69] Beukel, v. d. und Kocks, U.F. The strain Dependence of Static and Dynamic Strain Ageing. *Acta Met.* 30, 1027-1034: 1982
- [70] Kubin, L.P. und Estrin, Y. Evolution of Dislocation Densities and the Critical Conditions for the Portevin-LeChatelier Effekt. *Acta Met. Mat.*, 38, 697-708: 1990
- [71] McCormick, P.G. Theory of Flow Localization due to Dynamic Strain Ageing. *Acta Met.*, 36, 3061-3067: 1988
- [72] Zbib, H.M. und Aifantis, E.C. A Gradient Model for the Portevin-LeChatelier Effect. *Scripta Met.* 22, 1331-1336: 1988
- [73] Zbib, H.M. und Aifantis, E.C. On the localization and Postlocalization Behaviour of Plastic Deformation. III. On the Structure and Velocity of the Portevin-LeChatelier Bands. *Res Mech.* 23, 293-305: 1998
- [74] Hähner, P. Modelling of Propagative Plastic Instabilities. *Scripta Met. Mat.* 29, 1171-1176: 1993
- [75] Hähner, P. Modelling the Spatio-Temporal Aspects of the Portevin-LeChatelier effect. *Mat. Sci. Eng. A* 164, 23-34: 1993
- [76] Estrin, Y. und Kubin, L.P. Collective Dislocation Behaviour in Dilute Alloys and the Portevin-LeChatelier Effect. *J. Mech. Beh. Mat.* 2, 255, 1990
- [77] Zaiser, M. und Hähner, P. A Unified Description of Strain-rate Softening Instabilities. *Mat. Sci. eng. A* 238, 399-406: 1997
- [78] Estrin, Y. und Kubin, L.P: Spatial Coupling and Propagative Plastic Instabilities. In *Continuum Models for Materials with Microstructures* (herausgegeben von Mühlhaus, H.B.) Wiley: 1995

- [79] Rizzi, E. Hähner, P. On the Portevin-Le Châtelier effect: theoretical modelling and numerical results. *International Journal of Plasticity* 20, 121-165: 2004
- [80] Crostack, H.-A. Fischer, G. Dehnungsanalyse im Mikrobereich mittels REMbasiertem Objektgitterverfahren, *DVM Werkstoffprüfung*, 159-165: 1997
- [81] Crostack, H.-A. Fischer, G. Steffens, H.-D. und Reisch, L. Messung der Dehnungsverteilung im Mikrobereich von Metallmatrix-Verbundwerkstoffen, *Beitr. Elektronenmikroskop. Direktabb. u. Analyse v. Oberfläche* 29, 75-86: 1996
- [82] Liu, Y.-L. Fischer, G. In situ measurement of local strain in a metal matrix composite by the object grating technique. *Scripta Materialia* 36, 1187-1194: 1997
- [83] ABAQUS Version 6.4 Dokumentation – ABAQUS Theory Manual
- [84] Balik, J. Lukac, P. Kubin, L.P. Inverse critical strains for jerky flow in Al-Mg Alloys, *Scripta mater.* 42, 465–471: 2000
- [85] Miyazaki, S. Fujita, H. Effects of Grain Size and Specimen Thickness on Mechanical Properties of Polycrystalline Copper and Copper-Aluminium Alloy. *Trans. Japan Inst. Metals*, 19, 438-444: 1978
- [86] Miyazaki, S. Shibata, K. and Fujita, H. Effect of Specimen Thickness on Mechanical Properties of Polycrystalline Aggregates with Various Grain Sizes. *Acta Met.* 27, 885-862: 1979
- [87] Balik, J. Lukac P, Portevin-Le Châtelier instabilities in Al-3Mg conditioned by strain rate and strain. *Acta metal. Mater.* Vol.41, No.5, 1447-1454: 1993
- [88] Estrin, Y. McCormick, Modelling the transient flow behaviour of dynamic strain ageing materials. *Acta Metall. Mater.* 39, 2977-2983: 1991
- [89] Zhang, S. McCormick, Estrin, Y. the morphology of Portevin-Le Châtelier bands: finite element simulation for Al-Mg-Si. *Acta Materialia* 49, 1087-1094: 2001
- [90] Hähner, P. Rizzi, E. On the kinematics of Portevin-Le Châtelier bands: theoretical and numerical modelling. *Acta Materialia* 51, 3385-3397: 2003
- [91] Springer, F. Schwink, CH. On a method to determine directly the waiting time of arrested dislocations and the elementary strain in dynamic strain ageing. *Scripta Metall. Mater.* 32, 1771-1776: 1995
- [92] McCormick, P.G. Venkadesan, S. Ling, C.P. Propagative instabilities: an experimental view. *Scripta Metallurgica et Materialia (Viewpoint Set 21)* 29, 1159-1164: 1993
- [93] Klose, F.B., Ziegenbein A, Weidenmüller, Neuhäuser H, Hähner P, Portevin-Le Châtelier effect in strain and stress controlled tensile tests. *Computational Materials Science* 26, 80-86: 2003
- [94] Lasko, G. Haehner, P and Schmauder, S. Finite element simulation of the Portevin-LeChatelier effect. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 13, 645-656: 2005

7 Liste der verwendeten Zeichen und Symbole

b	Burgersvektor
c	dimensionslose Bandgeschwindigkeit
D_g	Pseudodiffusionskoeffizient
DSA	dynamische Reckalterung
c_b	Bandgeschwindigkeit
c_p	spezifische Wärme
C_0	Konzentration der Fremdatome in der Legierung
C_m	Sättigungswert von C_s
C_s	Konzentration der an den Versetzungen arretierten Fremdatome
D	Diffusionskoeffizient
E^*	Lagrangesche Verzerrungstensor
F	Deformationsgradienten
g_∞	normierte Sättigungsenthalpie
G	Gesamtaktivierungsenthalpie
G_0	statische Aktivierungsenthalpie
h	Dehnungsverfestigungskoeffizient
k	Boltzmann-Konstante
L	freie Weglänge der Versetzungen bis zur Immobilisierung
M	TAILOR-Faktor
N	Anzahl der Diffusionspfade
n	Diffusionsexponent
P	Aktivierungswahrscheinlichkeit
P_1, P_2	Modellparameter in Estrin-Modell
Q	Aktivierungsenergie
S_i	instantane Dehnratenempfindlichkeit (mesoskopisch)
S'_i	instantane Dehnratenempfindlichkeit (makroskopisch)
S_∞	Asymptotische Dehnratenempfindlichkeit (mesoskopisch)
S'_∞	Asymptotische Dehnratenempfindlichkeit (makroskopisch)
SRS	Dehnratenempfindlichkeit
r_0	Radius eines Zylinders
T	absolute Temperatur
t_a	Alterungszeit
t_{cond}	Kondensationszeit

t_{corr}	Korrelationszeit
t_w	Wartezeit
V	mesoskopische Aktivierungsvolumen
V'	makroskopische Aktivierungsvolumen
w_b	Bänderbreite
Δc_{vol} :	Zuwachs der Linienkonzentration wegen Volumendiffusion
Δc_{pipe} :	Zuwachs der Linienkonzentration wegen Pipe-Diffusion
$\Delta G, \Delta G_{DRA}$	Reckalterungsenthalpie
ΔG_∞	Sättigungswert der Reckalterungsenthalpie
ΔT	Temperaturänderung
$\Delta \varepsilon_b$	Dehnungssprung in einem PLC Band
$\Delta \varepsilon_{Lüders}$	Lüdersbanddehnungssprung
$\Delta \varepsilon^p$	Inkrement der plastischen Dehnung
Ω	Elementardehnung
α	Geometriefaktor
$\alpha, \omega_1, \omega_2, s_1, s_2$	Materialkonstanten in Estrin-Modell
β	Taylor-Quinney-Koeffizient
ε	Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	Dehnrage
$\dot{\varepsilon}_0$	präexponentielle Faktor
$\varepsilon_{b,t}$	lokale plastische Dehnrage in einem PLC Band
$\dot{\varepsilon}^p$	plastische Dehnrage
η	die Diffusionsrate der Fremdatome
μ	Schubmodul
ν_0	Anlauffrequenz
θ	normierte Dehnungsverfestigungskoeffizient
ρ	Dichte
ρ_f	Dichte der Waldversetzungen
ρ_p	Dichte der parallelen Stufenversetzungen
ρ_m	Dichte der mobilen Versetzungen
σ_{eff}	effektive Spannung
σ_i	innere Spannung
σ_{int}	Wechselwirkungsspannung
σ_y	Fließspannung

$\sigma_{,\tau}$	dimensionslose Spannungsrateterm
τ	Schubspannung
τ_0	kritische Schubspannung
τ_s	Schneidspannung
τ_{eff}	effektive Schubspannung
τ_{MK}	Mischkristallspannung
τ_i	interne Schubspannungen
τ_p	Peierls-Spannung
v	Vorschubgeschwindigkeit

Anhang I: Jacoby-Matrix $\nabla L(\mathbf{X}_i)$ bei der 1D-FD Simulation

$$\begin{pmatrix}
 1 - \Delta\tau\{\dot{\sigma} - 2\theta & -\Delta\tau\{\theta \exp[-g(\tilde{x}_0, \tau_1)] & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\
 \exp[-g(\tilde{x}_0, \tau_1)] & f^2(\tilde{x}_0, \tau_1)\} & & & & & & & & \\
 f(\tilde{x}_0, \tau_1)\} & & & & & & & & & \\
 \Delta\tau \exp[-g(\tilde{x}_0, \tau_1)] & 1 - \Delta\tau\{-1^*/\Delta\tilde{x}^2 - 1 & & & & & & & & \\
 g(\tilde{x}_0, \tau_1) & -[\exp(-g(\tilde{x}_0, \tau_1)) & & & & & & & & \\
 & -g(\tilde{x}_0, \tau_1) & 0 & -\frac{\Delta\tau}{\Delta\tilde{x}^2} & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\
 & \exp(-g(\tilde{x}_0, \tau_1))] & & & & & & & & \\
 & f(\tilde{x}_0, \tau_1)\} & & & & & & & & \\
 0 & 0 & 1 - \Delta\tau\{\dot{\sigma} - 2\theta & -\Delta\tau\{\theta \exp[-g(\tilde{x}_1, \tau_1)] & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\
 & & \exp[-g(\tilde{x}_1, \tau_1)] & f^2(\tilde{x}_1, \tau_1)\} & & & & & & \\
 & & f(\tilde{x}_1, \tau_1)\} & & & & & & & \\
 0 & -\frac{\Delta\tau}{\Delta\tilde{x}^2} & \Delta\tau \exp[-g(\tilde{x}_1, \tau_1)] & 1 - \Delta\tau\{-2/\Delta\tilde{x}^2 - 1 & 0 & -\frac{\Delta\tau}{\Delta\tilde{x}^2} & \dots & \dots & 0 & 0 \\
 & & g(\tilde{x}_1, \tau_1) & -[\exp(-g(\tilde{x}_1, \tau_1)) & & & & & & \\
 & & & -g(\tilde{x}_1, \tau_1) & & & & & & \\
 & & & \exp(-g(\tilde{x}_1, \tau_1))] & & & & & & \\
 & & & f(\tilde{x}_1, \tau_1)\} & & & & & & \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 1 - \Delta\tau\{\dot{\sigma} - 2\theta & -\Delta\tau\{\theta \exp[-g(\tilde{x}_{99}, \tau_1)] \\
 & & & & & & & & \exp[-g(\tilde{x}_{99}, \tau_1)] & f^2(\tilde{x}_{99}, \tau_1)\} \\
 & & & & & & & & f(\tilde{x}_{99}, \tau_1)\} & \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & -\frac{\Delta\tau}{\Delta\tilde{x}^2} & \Delta\tau \exp[-g(\tilde{x}_{99}, \tau_1)] & 1 - \Delta\tau\{-1^*/\Delta\tilde{x}^2 - 1 \\
 & & & & & & & & g(\tilde{x}_{99}, \tau_1) & -[\exp(-g(\tilde{x}_{99}, \tau_1)) \\
 & & & & & & & & & -g(\tilde{x}_{99}, \tau_1) \\
 & & & & & & & & & \exp(-g(\tilde{x}_{99}, \tau_1))] \\
 & & & & & & & & & f(\tilde{x}_{99}, \tau_1)\}
 \end{pmatrix}$$

Anhang II: Parameter zur Simulation der PLC-Bänder

Anhang IIa: Parametersatzgruppe 1, Einfluss der Parameter η , Ω , D_g , E_m auf die Bandgeschwindigkeit und Bandtyp

$v(\mu\text{m/s})$	$\eta(\text{s}^{-1})$	$\Omega(\times 10^{-4})$	$D_g(\text{mm}^2/\text{s})$	$E_s(\text{GPa})$	$E_m(\text{GPa})$	$v_b(\text{mm/s})$	Typ
30	10	1	1	72	140	8,686	A'
29	10	1	1	72	140	8,386	A'
28	10	1	1	72	140	8,138	A'
27	10	1	1	72	140	7,855	A'
26	10	1	1	72	140	7,680	A'
25	10	1	1	72	140	7,322	A'
24	10	1	1	72	140	7,053	A'
23	10	1	1	72	140	6,903	A'
22	10	1	1	72	140	6,570	A'
21	10	1	1	72	140	6,382	A'
20	10	1	1	72	140	6,160	A'
19	10	1	1	72	140	5,940	A'
18	10	1	1	72	140	5,634	A'
17	10	1	1	72	140	5,415	A'+A1
16	10	1	1	72	140	5,211	A'+A1
15	10	1	1	72	140	4,980	A'+A1
14	10	1	1	72	140	4,742	A'+A1
13	10	1	1	72	140	4,483	A'+A1
12	10	1	1	72	140	4,270	A'+A1
11	10	1	1	72	140	4,008	A'+A1
10	10	1	1	72	140	3,763	A'+A1
9	10	1	1	72	140	3,515	A'+A1
8	10	1	1	72	140	3,257	A'+A1
7	10	1	1	72	140	2,921	A'+A1
6	10	1	1	72	140	4,184	A1
5	10	1	1	72	140	3,647	A1
4	10	1	1	72	220	3,088	A1
4	10	1	1	72	200	3,106	A1
4	10	1	1	72	180	3,122	A1
4	10	1	1	72	160	3,093	A1

4	10	1	1	72	140	3,114	A1
4	10	1	1	72	120	3,117	A1
4	10	1	1	72	100	3,084	A1
4	10	1	1	72	80	3,117	A1
4	10	1	1	72	60	3,122	A1(O)
4	10	1	0,5	72	140	2,712	A1
4	10	1	1	72	140	3,114	A1
4	10	1	1,5	72	140	3,402	A1
4	10	1	2	72	140	3,616	A1(O)
4	10	1	2,5	72	140	3,756	A1(O)
4	10	1	3	72	140	3,822	A1(O)
4	10	0.4	1	72	140	2,386	A'+A1
4	10	0.6	1	72	140	3,416	A1
4	10	0.8	1	72	140	3,255	A1
4	10	1.0	1	72	140	3,114	A1
4	10	1.2	1	72	140	3,018	A1(O)
4	10	1.4	1	72	140	2,790	A1(O)
4	10	1.6	1	72	140	0	stable
4	2	1	1	72	140	1,482	A'+A1
4	4	1	1	72	140	1,879	A'+A1
4	6	1	1	72	140	2,915	A1
4	8	1	1	72	140	3,048	A1
4	10	1	1	72	140	3,114	A1
4	12	1	1	72	140	3,163	A1
4	14	1	1	72	140	3,212	A1(O)
4	16	1	1	72	140	0	stable
4	18	1	1	72	140	0	stable
4	20	1	1	72	140	0	stable
3,8	10	1	1	72	140	3,039	A1
3,6	10	1	1	72	140	2,923	A1
3,4	10	1	1	72	140	2,815	A1(O)
3,2	10	1	1	72	140	2,695	A1(O)
3	10	1	1	72	140	2,468	B
2	10	1	1	72	140	0	stable

Anhang IIb: Parametersatzgruppe 2, Einfluss der Parameter (h , Ω) auf Bandgeschwindigkeit und Bandtyp

$v(\mu\text{m/s})$	$\eta(\text{s}^{-1})$	$\Omega(\times 10^{-4})$	$D(\text{mm}^2/\text{s})$	$E_s(\text{GPa})$	$E_m(\text{GPa})$	$v_b(\text{mm/s})$	Typ
30	50	0,5	10	72	140	16,224	A'+A1
30	50	1	10	72	140	23,358	A1
30	50	1,5	10	72	140	21,691	A1
5-150	50	1	10	72	140		

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Xiaoqun Feng
Geburtsdatum: 11.Sep. 1975
Geboren am: Hunan, V.R. China
Familienstand: verheiratet

Ausbildung

09/1982 – 07/1985 Grundschule, Hunan, V.R. China
09/1987 – 07/1993 Gymnasium, Hunan, V.R. China
09/1993 – 07/1997 Studium an der Fakultät für Maschinenbau, Nordchinesische
Universität für Elektrizitätswesen, V.R. China
Abschluss: Bachelor of Science
09/1997 – 03/2000 Studium an der Fakultät für Maschinenbau, Nordchinesische
Universität für Elektrizitätswesen, V.R. China
Abschluss: Master of Science

Beruflicher Werdegang

04/2000 – 11/2002 Angestellter bei der Elektronik-Firma Dongfang in Yantai, Pro-
vinz Shangdong, V.R. China
12/2002 – 04/2003 Angestellter bei der Hengguang Hi-tech Co. Ltd, Beijing, V.R.
China
05/2003 – 08/2004 Deutschkurs in Dortmund (am Auslands-Institute und ASTA)
09/2004 – 06/2008 Promotionsstudium am Lehrstuhl für Qualitätswesen der Uni-
versität Dortmund und Stipendiat der Graduate School of Pro-
duction Engineering and Logistics von NRW

Dortmund, in Juni. 2008