

**Abschlußbericht**  
**Deutsche Bundesstiftung Umwelt**

**Entwicklung einer meßtechnischen Apparatur zur zerstörungsfreien  
Messung des Stabilitätszustandes von Gewebe an Kulturgütern**

**Aktenzeichen DBU: 35466/01 -45**

**Verfasser: Dr.-Ing. Hartmann Hieber**

**Firma: ICR**

**Projektbeginn: 2019-12-09**

**Laufzeit: 33 Monate**

**Ludorf, am 2022-12-17**



## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	3
Bilder und Tabellen .....	4
<b>Anlaß und Zielsetzung des Projekts</b>	
1 Bedarf in der restauratorischen Bewertungsmethodik .....	7
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden .....</b>	
2 Charakterisierung der Gewebestrukturen .....	11
3 Mechanische Relaxation textiler Bildträger .....	18
4 Streulicht- und Specklepattern-Meßtechnik .....	30
5 Mechanisierung und Automatisierung der Specklepattern-Meßtechnik .....	38
<b>Ergebnisse</b>	
6 Meßprozedur und Ergebnisse .....	42
7 Bewertung von Schädigungen in textilen Bildträgern .....	50
8 Die neue Meßtechnik als Hilfsmittel für die restauratorische Anwendung .....	51
<b>Diskussion</b>	
9 Beitrag zum Verständnis des Materialverhaltens in der Restaurierungstechnik .....	53
10 Einfluß der Ergebnisse auf die Konservierung und Restaurierung .....	56
<b>Öffentlichkeitsarbeit und weiteres Vorgehen</b>	
11 Laufende Arbeiten und weitere Disseminierung .....	58
<b>Fazit</b>	
12 Methodik mit Anwendungen .....	60
13 Gerätetechnik, Software und Geräteeinsatz .....	61
14 Komplexitätsprobleme, Weiteres .....	62
Literaturangaben .....	63
Anerkennung .....	70
Epilog .....	70

## Zusammenfassung

Entwickelt wird eine neue zerstörungsfreie Meßtechnik, mit der die mechanische Stabilität von Textilien in Kulturgütern festgestellt werden kann. Hintergrund ist die in der Restaurierungs- und Konservierungstechnik erforderliche Beurteilung textiler Bildträger in Gemälden, ob diese unter der Einwirkung der zur Stabilisierung der Malschicht eingebrachten Vorspannung ohne Gefahr weiterer Reißbildungen stabil sind. Dazu wird zunächst die Mikrostruktur der Gewebe aus Flachs, Hanf und Baumwolle untersucht. Die semikristallinen Polysaccharide setzen sich aus amorphen und teilweise kristallinen Zonen zusammen. Im Verlauf der Gewebeatlerung wachsen die kristallinen Zonen auf Kosten der amorphen Zonen. Aus Messungen der mechanischen Nachgiebigkeit ergibt sich, daß die zeitabhängige Dehnung der Gewebe aus einem reversiblen und aus einem irreversiblen Anteil zusammengesetzt werden kann. Offensichtlich stehen diese beiden Verformungsbeiträge in den gemessenen neuen und vorgealterten Gewebeproben in demselben Verhältnis zueinander. Neue Gemälde sind jedoch dehnbarer, alte Gewebe brechend bereits bei geringerer Dehnung. Die Streulichtmessung im Labor und die Specklepattern-Methode im mobilen Gerät liefern nun eine einfache Möglichkeit, aus den unterschiedlichen Mikrostrukturen auf die mechanische Belastbarkeit bzw. die Fähigkeit zur Dehnung ohne weitere Schädigungen durch lokale Brüche zu schließen. Automatisch ausgewertet werden die mit verhältnismäßig einfachen Mitteln aufgenommenen Videoaufnahmen der Specklepattern. Die Korrelation aufeinander folgender Videobilder liefert Funktionen zur Charakterisierung der kristallinen Zonen in den Gewebefasern. Infolge der lokalisierten Messung lassen sich mechanisch instabile Schwachstellen in Leinwänden ermitteln. Die Versuche zur Materialermüdung ermöglichen die Vorusberechnung von Auswirkungen langsamer Temperatur- und Feuchtewechsel. Dazu liefert die stationäre Kriechgeschwindigkeit die Grundlage für das Langzeitverhalten der Leinwände im Spannrahmen. Diese wird mit den mikroskopischen Strukturveränderungen in Zusammenhang gebracht, die sich mit den optischen Methoden beobachten lassen. Mit Blick auf die komplizierte Mechanik des Gesamtsystems bestehend aus Bildträger und Malschicht mit Craquelés wird die neue zerstörungsfreie Meßmethode einen quantitativen Beitrag zur Einordnung der Kulturgüter hinsichtlich der Transport- und Ausstellungsfähigkeit liefern. Weiterhin wird eine Unterstützung allgemeiner Maßnahmen zur Restaurierung und Konservierung von Textilien in Kulturgütern erwartet. Dazu kann ein Katalog mit Spezifikationen der Verständigung bei künftigen Anwendungen dienen. 1 Gerät wird in der Restaurierungswerkstatt aufgestellt. Weitere Laborgeräte werden bei Bedarf zum praktischen Einsatz in den Restaurierungswerkstätten bereitgestellt.

## Bilder und Tabellen

Bild 1 : Standardgewebe

Bild 2 : Gereckte Gewebe (horizontale Zugrichtung)

Bild 3: Faserbrüche in modernen Geweben; a), b) mit gereckten Faserzonen

Bild 4: Beispiele aus historischen Geweben

Bild 5: Strukturen und Brüche in Altleinwand; Stapelbilder im LM

Bild 6: Strukturen und Brüche in Altleinwand aus dem 17. / 18.. Jahrhundert; REM ohne Leitfähigkeitsbeschichtung

Bild 7: Altes Leinen aus dem 18. Jhdt.

Bild 8: Weitere gealterte Gewebeproben

Bild 9: Sprödebrüche in den  $\approx 2$  Jahrhunderte alten Flachsfasern mit Zellwänden des Polysaccharids

Bild 10: Zugprobe mit Einspannung

Bild 11: Querszugversuch, schematisch

Bild 12: Zugkraftverlauf im Wechselkriechversuch

Bild 13: Wechselkriechkurven

a) „Neues Leinen“, gewaschenes Gewebe

b) „Altes Leinen“

Bild 14: Übergangskriechkinetik einer „alten Leinwand“ nach positivem bzw. negativem Lastwechsel

Bild 14: Übergangskriechkinetik einer „alten Leinwand“ nach positivem bzw. negativem Lastwechsel

a) Rückwärtsfließen nach positiven Lastsprüngen entspr. Bild 12 auf S. 17

b) Vorwärtsfließen nach negativen Lastsprüngen

Bild 16: Übergangsfunktionen infolge Spannungsrelaxation an Hanfleinen mit Vorleimung bei Raumtemperatur

a) Rückwärtsfließen nach positiven Lastsprüngen

b) Vorwärtsfließen nach negativen Lastsprüngen

Bild 17: Übergangsfunktionen infolge Spannungsrelaxation an Baumwolle bei erhöhter Temperatur ( $45\pm 2$ )°C und ( $80\pm 5$ )% relativer Feuchte

a) Rückwärtsfließen nach positiven Lastsprüngen entspr. Bild 12 auf S. 17

b) Vorwärtsfließen nach negativen Lastsprüngen

Bild 18: Übergangsfunktionen infolge Spannungsrelaxation an Baumwolle bei Raumtemperatur

a) Rückwärtsfließen nach positiven Lastsprüngen entspr. Bild 12 auf S. 17

b) Vorwärtsfließen nach negativen Lastsprüngen

Bild 19: Übergangsfunktionen infolge Spannungsrelaxation an neuem feinem Leinen bei Raumtemperatur, niedrige Amplituden

a) Rückwärtsfließen nach positiven Lastsprüngen entspr. Bild 12 auf S. 17

b) Vorwärtsfließen nach negativen Lastsprüngen

- Bild 20: Zur rechnerischen Auswertung der Übergangsfunktionen  
a) Übergangsfunktion mit zugehöriger Asymptoten  
b) Logarithmierte Differenz zur Asymptoten
- Bild 21: Verläufe des Rückwärts- bzw. Vorwärtsfließens im Verlauf aufeinanderfolgender Lastwechsel nach Bild 3; Zeitabstand von Punkt zu Punkt  $\approx 4.3$  Stunden, Gesamtzeit des Ermüdungsversuches also  $\approx 3.2$  Tage mit 180 Wechseln
- Bild 22: Geschwindigkeiten des Übergangskriechens (rot) und des stationären Kriechens (blau) in verschiedenen Proben; die Streuung über alle Proben liegt bei  $\approx 4.7\%$  bis  $7.8\%$  (relativer Fehler)
- Bild 23: Probenführung zur automatisierten Streulichtmessung an Garnen und Fasern mit Mikrofokus
- Bild 24: Streulichtmessungen an Polymergarnen unterschiedlicher Mikrostruktur — links „Neues Leinen, gewaschen“, mittlerer Peakabstand  $\Delta L = (15.1 \pm 2.8) \mu\text{m}$ ; rechts „Altes Leinen“, mittlerer Peakabstand  $\Delta L = (38.6 \pm 4.5) \mu\text{m}$
- Bild 25: Laborversuchsanordnung zur kontinuierlichen Specklepattern-Messung
- Bild 26: Strahlengang zur nichtinterferometrischen Specklepattern-Meßtechnik
- Bild 27: Verschiedene Specklepattern  
a) auf einem Streifen Neue Leinwand vor Pappe  
b) auf einer Lackoberfläche, Rauhtiefe  $\approx 6 \dots 10 \mu\text{m}$
- Bild 28: Optische Distanz und Überdeckungsgrad als Funktionen des geometrischen Speckleabstandes an einem einfachen, 1-dimensionalen Beispiel
- Bild 29: Konstruktion in 3D-gestapelten Achsen
- Bild 30: Eine Ausführungsform des Meßgeräts mit Specklepattern auf der Gemälderückseite
- Bild 31: Rasterschema zur Flächenabtastung mit 1 = Zeile, 2 = Spalte, 3 = Specklefläche, 4 = ausgewertete Bereiche
- Bild 32: Aktuelle Gerätekonstruktion
- Bild 33: Schaltungsschema zur elektronischen Ansteuerung
- Bild 34: Programmschema zur Geräteansteuerung mit Aufruf des Auswertungsprogramms
- Bild 35: Programmoberflächen zum Gerätebetrieb  
a) Für die Restaurierungswerkstatt  
b) Für den Laborbetrieb
- Bild 36: Korrelationsfunktion entlang eines Streifens, Längenabschnitts  $400 \mu\text{m}$  mit gespreiztem Ordinatenmaßstab; eingeblendeter Ausschnitt mit markierter Steigungsgeraden
- Bild 37: Programmoberflächen mit verschiedenen Ausschnitten der Specklepattern (links) und herausgezogenen Verteilungen des modifizierten Rotsignals (rechts)
- Bild 38: Optische Distanz- und Korrelationsfunktionen der Wegstrecken, logarithmierte Differenzen zu den Asymptoten  
a) an „neuem Leinen“  
b) an „altem Leinen“
- Bild 38: Optische Distanz- und Korrelationsfunktionen der Wegstrecken, logarithmierte Differenzen zu den Asymptoten  
a) an „neuem Leinen“  
b) an „altem Leinen“
- Bild 39: Programmschema zur Geräteansteuerung mit Aufruf des Auswertungsprogramms

Bild 40: Balkendiagramm zur Schnellanzeige der Auswertung

Bild 41: Höhenprofile zu Mikrostruktureigenschaften aus den Speckleserien:

Verteilung des Korrelationsgradienten über der Bildfläche

a) Alte Leinwand

b) Neue Leinwand

c) Kleinflächige, punktuelle Strukturunterschiede im historischen Gewebe

d) Mikroskopisch inhomogenes historisches Gewebe

e) Historisches Gewebe mit lokalen Brüchen

Bild 42: Strukturmodell zur Mosaikbildung in semikristallinen Faserzellwänden aus kristallinen und amorphen Makromolekülen

Bild 43: Statistische Modellrechnung zum gleichzeitigen Kriechen und Diffundieren:

D = Diffusionskinetik; K = Kriechkinetik; V = lokales Versagen

Bild 44: Gemälde aus dem 19. Jahrhundert (67 cm \* 57 cm)

Bild 45: Bruchstücke historischer Gewebe

Bild 46 : Die Bildträgerleinwand des Gemäldes in Bild 44

Bild 47: Signatur auf der Leinwand einer Gemäldeskizze von Friedrich Nerly in den Restaurierungswerkstätten der Erfurter Museen mit einem Laserspecklepattern

Tabelle. 1: Verwendete Proben

Tabelle 2 : Übergangskriechen und stationäres Kriechen in aufeinander folgenden Versuchen n einer Probe „neues Leinen“ mit Meß- bzw. Interpolationsfehlern

Tabelle 3 : Distanz- und Korrelationswerte

## Anlaß und Zielsetzung des Projekts

### 1 Bedarf in der restauratorischen Bewertungsmethodik

#### *Textile Substrate in Gemälden*

Gemälde bestehen aus einer Malschicht, die auf einen Bildträger aufgebracht wird. Somit trägt die mechanische Stabilität des Bildträgers wesentlich zum Erhaltungszustand der Gemälde bei. Im Falle der textilen Bildträger werden diese vor dem Grundieren und Bemalen auf Spannrahmen aufgespannt <sup>[1]</sup>. Die kontinuierliche Erhaltung einer möglichst gleichmäßigen Spannung hat große Bedeutung für die langfristige Erhaltung der Malschicht <sup>[2]</sup>. Zum Aufspannen werden verschiedene Spannrahmenarten genutzt: Zu Beginn gab es einfache Spannrahmen mit fest verbundenen Eckkonstruktionen, aus denen sich später keilbare Varianten entwickelten, die ein manuelles Nachspannen des Bildträgers erlauben. In der Gegenwart gibt es auch Spannrahmen, die durch den Einsatz von Federn in den Eckbereich ermöglichen, daß die Gewebe sich elastisch auf die sich verändernden Spannungen (beispielsweise bei Klimaveränderungen) einstellen können, und so die Gemälde auf textilen Bildträgern weitgehend unter gleichbleibender Spannung halten. Ein optimaler Spannungszustand vermeidet Schäden in der Malschicht und soll über möglichst lange Zeiträume eingestellt und erhalten bleiben. Erhöhte Spannung kann zur Reißbildung in der Malschicht (Craquelés) führen, nachlassende bzw. zu geringe Spannung zur Wölbung, die ebenfalls zur Reißbildung in der Malschicht und zu deren Abplatzen führen kann. Auch die Größenabmessungen spielen eine Rolle <sup>[3]</sup>. Zusätzlich zur Vorspannung entstehen mechanische Belastungen durch wechselndes Raumklima mit Veränderungen der Temperatur und der Luftfeuchte, die anteilig zur Dehnung der Bildträger beitragen. Hinzu kommen Stoßbelastungen und Vibrationen vor allem beim Transport der Gemälde. Die kürzlich vom Verband Deutscher Restauratoren veranstaltete Tagung steht unter der Überschrift *Tragfähig?! Konservierung und Technologie textiler Bildträger* <sup>[4]</sup>.

Bei der Beurteilung des Bildträgers ist oft unsicher, ob dieser unter der Einwirkung der erforderlichen Flächenspannung die Malschicht ohne die Gefahr einer weiteren Reißbildung trägt, vgl. <sup>[5]</sup>, und ein für die sichere Erhaltung der Malschicht ausreichender stabiler Spannungszustand erreicht wird. Untersuchte Objekte sind Gemälde ganz unterschiedlichen Erhaltungszustandes, die aus den letzten Jahrhunderten stammen, beispielsweise Bilder der italienischen Renaissance <sup>[6, 7]</sup>. Während der letzten Jahrzehnte werden die mechanischen Eigenschaften der als Bildträger verwendeten Gewebe vor allem hinsichtlich ihrer Bruchfestigkeit als dem wesentlichen mechanischen Parameter betrachtet. Die Untersuchungen hierzu werden an Einzelstücken von Leinwänden durchgeführt und beziehen sich vor allem auf den festigkeitsmindernden Einfluß von Imprägnierungen und langzeitiger Beleuchtung mit Tageslicht <sup>[8-10]</sup>. Bereits frühzeitig wird der Versuch unternommen, mittels statistischer Methoden die beobachteten Schadensfälle zu quantifizieren <sup>[11]</sup>. Dabei wird der Einfluß einer modellhaften künstlichen Alterung mittels einer chemischen Behandlung bzw. durch eine Belichtung auf die mikroskopischen Veränderungen innerhalb der Makromoleküle der Zellulose beschrieben <sup>[12]</sup>. Zur Bestimmung chemischer Spezifikationen werden häufig zerstörungsfreie Meßmethoden wie die Molekülspektroskopie im optischen bis in den langwelligen Spektralbereich eingesetzt <sup>[13]</sup>. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, daß insbesondere Temperatur- und Feuchteschwankungen die mechanischen Eigenschaften der Naturfasern aus Flachs, Hanf oder Baumwolle über längere Zeit bzw. Zykelzahlen bei schwankender Belastung empfindlich beeinflussen. Die Ursache von Veränderungen der

Hygroskopizität textiler Bildträger ist in der Veränderung des Kristallisationsgrades in den Makromolekülen zu suchen, weswegen eine Wasseraufnahme zu irreversiblen Alterungseffekten führen kann [14].

Während zahlreiche Befunde zur chemischen und mechanischen Degradation der Polymere vorliegen, gibt es nur verhältnismäßig wenige Untersuchungen zur Strukturentwicklung der Leinwände in Gemälden, vgl. z.B. die klassischen Anleitungen für Restauratoren [15, 16] und die wichtige erste systematische Beschreibung zur Feuchtekorrosion der Bildleinwände [14]. Dem entspricht auch der Einfluß des Wassers auf die Eigenschaften der naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffe [17]. Noch stärker wirken sich chemische Substanzen wie Säureanhydride und Nanopartikel aus [18].

Viele Kulturgüter der Menschheit werden seit Jahrtausenden mithilfe textiltechnischer Methoden gestaltet und sind deshalb Gegenstand aller Anstrengung zu ihrer dauerhaften Erhaltung [19]. Dabei spielen seit jeher die praktisch-handwerklichen Erfahrungen eine besondere Rolle [20], einschließlich der dort so genannten Mikrotechniken [21, 22]. Hauptsächliches Augenmerk gilt der Erkennung von Beschädigungen speziell in der Malschicht [23-25]. Beispiele der ältesten Artefakte in besonders gutem Alterungszustand sind die Hüllen der ägyptischen Mumien [26]. Die wertvollsten textilen Substrate werden häufig aus Flachsfasern hergestellt [27, 28]. Verwendet werden auch Hanf [29] oder Baumwolle [30], in selteneren Fällen auch Jute [31]. Analysiert werden Brüche in Bastfasern [32, 33] oder tierische Produkte wie Seide [34]. In ihrer chemischen Zusammensetzung bestehen die pflanzlichen Fasern aus teilkristallinen Polysacchariden [35] und zeigen ein ähnliches physikalisches und chemisches Verhalten wie die Hemizellulose im Papier, einem intensiv beforschten Gegenstand [36, 37]. Seit kurzem entstehen in kurzer Folge neue Erkenntnisse zu den mikroskopischen Eigenschaften insbesondere der Flachsfasern [38]. Daraus können Rückschlüsse auf die spezifischen Eigenschaften und auf das Langzeitverhalten der textilen Kulturgüter gezogen werden [39].

### ***Gewebemechanik, Mikrostruktur und zeitabhängige Nachgiebigkeit***

Die aus Pflanzenfasern gewonnenen, natürlichen Polymere unterscheiden sich in ihren mechanischen Eigenschaften erheblich von einander, vgl. z.B. [29, 40]. Sie sind empfindlich gegen Bestrahlung und erleiden in energiereicher kurzweiliger  $\gamma$ - und Röntgenstrahlung, aber auch im mit dem menschlichen Auge sichtbaren Licht über längere Zeiträume bleibende Schädigungen. Der Mechanismus besteht in Molekülbrüchen der Polysaccharide [41, 42]. Die Mikrostruktur der Flachsfaserzellen mit Fehlern in den Zellwänden und im Lumen wird üblicherweise im Labor mittels zerstörender Methoden untersucht [43-45]. Die Degradationsmechanismen und ihre individuellen Kinetiken sind in den letzten Jahren intensiv erforscht [46]. So führt die plastische Instabilität der Polymere unter konstanter Zugbelastung zu einer bestimmbaren Kriechgeschwindigkeit [47]. Daraus kann auf eine Relaxation der Leinwand als dem Träger der Malschicht im Spannrahmen eines Gemäldes geschlossen werden. In den Polymeren aus Pflanzenfasern und in den synthetischen Materialien besteht eine enge Verknüpfung zwischen der Molekularchemie, den mechanischen Eigenschaften und der Mikrostruktur [31, 48]. Speziell in der Zellulose läuft bei fortschreitender Oxidation ein molekularer Degradationsmechanismus ab [49, 50]. Für die Alterungseffekte der Textilien in Kulturgütern spielt neben den mechanisch induzierten Schädigungen [51, 52] auch die lichtinduzierte Degradation [53] eine besondere Rolle, vgl. dazu die Fachgruppenkonferenz des VDR in Weimar [54]. Generell wird der Einfluß Museumsklima untersucht [55, 56].

## ***Gerätekonzept und Ziel der Untersuchung***

Den gängigen Restaurierungsmethoden für Gemälde wird eine automatisierte und einfach zu bedienende Meßtechnik zur Seite gestellt, mit deren Hilfe Flächenabschnitte in den Bildträgern hinsichtlich ihres Alterungszustandes beurteilt werden können. Die Zielobjekte sind Bildträger und Kulturgüter aus textilen Materialien. Die Bewertungsmethode soll die Wirksamkeit von Maßnahmen zur präventiven Konservierung von Kulturgütern gegen Umwelteinflüsse unterstützen, in denen bereits Schädigungen durch Lichteinwirkung, Temperaturwechsel, Feuchte und mikrobiologische Korrosion eingetreten sind. Dazu soll eine erste Klassifizierung nach dem Grad der Schädigung vorgenommen werden, die sich an der in den Versuchen mit Modellgeweben ermittelten Kriechrelaxation und Bruchfestigkeit orientiert.

Die rechnergesteuerte Meßmethode mit angeschlossener Auswertung soll zerstörungsfrei, schnell und quantitativ arbeiten. Im Labor und in neuen Anwendungen ermöglicht ein manuell angesteuerter Betriebsmodus eine optimale Verfolgung des Meß- und Rechenablaufs. In der Restaurierungswerkstatt ermöglicht der automatisierte Programmablauf die arbeitszeitsparende Messung und Berechnung größerer Objekte. In einem praktisch zu erprobenden Prognosemodell wird schließlich die Berechnung des über möglichst lange Zeiträume zu erwartenden Relaxations- und Bruchverhaltens vorgesehen. Die neue Meß- und Rechenmethode arbeitet ohne Probenbelastung mit klar definiertem Ablaufschema zur Messung, Auswertung und Darstellung der Ergebnisse. Zu erwarten ist im Verlauf der praktischen Anwendung die Bildung einer Grundlage für eine Zustandsbeschreibung der Meßobjekte bis hin zur objektspezifischen Langzeitprognose.

In der ursprünglichen Antragsformulierung zu diesem Projekt wird noch von einer in der Geweebene geführten Streulichtmessung ausgegangen. Abweichend davon ist frühzeitig entschieden worden, die ebenfalls zerstörungsfreie Specklepattern-Meßtechnik einzusetzen, die wesentliche meß- und auswertetechnische Vorteile bietet. Die Optik und der mechanische Aufbau lassen sich robust und verhältnismäßig einfach gestalten. Erreicht werden kann vor allem jedoch ein wesentlich höherer Informationsfluß bis hin zur anschaulichen Ergebnisdarstellung direkt vor Ort. Die zu entwickelnden, in den Restaurierungswerkstätten der Museen einsetzbaren Geräte sollen von Anfang an so bereitgestellt werden, daß mit ihrer Hilfe restauratorische Entscheidungen zur mechanischen und klimatischen Belastbarkeit der Museumsobjekte abgesichert werden können. Dazu erhalten die Geräte eine möglichst einfach zu bedienende Rechenoberfläche. Das Automatisierungsprogramm nimmt dann die Funktionen der selbständigen optischen Justage mit anschließender Serienmessung und Auswertung vor. Mittels der zerstörungsfreien Meßmethode können Aufschlüsse über die mit fortschreitender Alterung sich verändernde Mikrostruktur der Gewebefasern gewonnen werden.

Bis zum Projektabschluß wird eine manuelle Ansteuerung des Meß- und Auswerteprogramms mit durchgehenden Kontrollen zur Betriebssicherheit realisiert. Sobald eine ausreichende Datenbasis aus den Versuchen an Museumsobjekten im Labor und aus Versuchen in der Restaurierungswerkstatt vorliegt, wird das Automatisierungsprojekt freigeschaltet, mit dessen Hilfe ein Beispielkatalog gefüttert wird, in dem restauratorische und physikalische Bewertungen zu den Objekten aufgelistet sind. Sowohl die zeitabhängigen mechanischen Eigenschaften wie auch die Ergebnisse aus der zerstörungsfreien Meßtechnik werden der Alterung der Bildträger zugeordnet und bilden die physikalische Grundlage zur Festigkeitsprognose über längere Belastungszeiten. Aus den erwarteten experimentellen und theoretischen

Ergebnissen kann ein Modell zur Stabilität der Bildträger entwickelt werden, das dann einer Beurteilung bestimmter restauratorischer Maßnahmen zugrunde gelegt werden soll.

In der Konservierungswissenschaft besteht eine grundsätzliche Forderung nach verbesserten Beurteilungsmethoden zur Prognose der Langzeitstabilität gealterter textiler Bildträger. Die zerstörungsfreien Messungen sollen auf einem verbesserten Verständnis der zeitabhängigen viskoelastischen Verformung der textilen Bildträger und der Veränderung in deren Mikrostrukturen im Verlaufe einer langzeitigen Alterung beruhen. Das Ziel dieser Untersuchung besteht darin, einen Beitrag zur restauratorischen Entscheidungsfindung zu leisten, welche Maßnahmen zum Schutz der Gemälde und zur Stabilisierung und lokalen Verstärkung der Materialien zu treffen sind. Ein Aspekt besteht auch in der Feststellung der Eignung von Objekten für Ausstellungen mit Schwankungen des Raumklimas und für den Transport mit den damit einhergehenden mechanischen und klimatischen Belastungen. Mit Blick auf die Langzeitstabilität der Textilien in den Kulturgütern und speziell der Leinwände in den historischen Gemälden besteht ein Bedarf an grundlegender Information zur Planung und Durchführung restauratorischer Maßnahmen. Diese Information kann durch die Anwendung einer zerstörungsfreien Meßtechnik zur quantitativen Beurteilung des Alterungszustandes der Gemäldeleinwände gewonnen werden. Die Meßtechnik soll apparativ handhabbar in den Restaurierungswerkstätten zu Verfügung gestellt werden. Eine quantifizierende Einteilung der Gemäldeleinwände entsprechend dem jeweils vorliegenden Alterungszustand mittels einer zerstörungsfreien physikalischen Analyse wird somit an dieser Stelle erstmalig entwickelt.

### *Anwendung in der Restaurierungs- und Konservierungspraxis*

Die restauratorische Bewertung zum Zustand der textilen Bildträger orientiert sich u. a. an den Kriterien zur Restverformbarkeit und zum Bruchrisiko in den als mechanisch geschwächt angesehenen Flächenbereichen. Dabei liefert die Restaurierungstechnik hauptsächlich qualitative Aussagen auf der Grundlage langjähriger Beobachtung der Museumsobjekte. Hier spielt die persönliche Erfahrung des Beobachters zur Objektbeurteilung eine wesentliche Rolle. Beispielsweise können Vergleiche mit empirisch festgestellten Schädigungen herangezogen werden. Demgegenüber liefern die physikalischen Messungen quantitative Aussagen zu den speziellen mikrostrukturellen und mechanischen Eigenschaften der Untersuchungsobjekte. Im einzelnen sind dies die Kenngrößen der Kriechverformung entsprechend der mechanischen Belastung der Bildträger in der vorliegenden Bildrahmenkonstruktion sowie die optischen Parameter aus den Mikrostrukturen der Gewebefasern. Somit gilt es, die spezifischen physikalischen Aussagen mit den eher ganzheitlichen restauratorischen Aussagen zusammenzubringen. Dies kann mittels unscharfer Wahrscheinlichkeitsrechnung geschehen. Dem kommt die Tatsache einer verhältnismäßig großen Streubreite plastizitäts- und bruchmechanischer Eigenschaften der Naturfasergewebe entgegen, aus denen sich Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Eigenschaften gewinnen lassen.

Hinsichtlich der Gerätetechnik wird festgestellt, daß die Gültigkeit der Aussagen auf die physikalischen Messungen und deren Interpretation beschränkt bleibt. Jede weitergehende Interpretation ist Sache der Anwendung. Bei Fehlbedienung wird keine Haftung übernommen. Beschädigungen des Geräts oder der Software werden entsprechend der jeweiligen Nutzungsvereinbarung im Labor behoben.

## Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Prüfmaterialien in dieser Untersuchung sind Gewebeproben unterschiedlicher Herkunft und Alterungszustände sowie Malleinwände, Bruchstücke aus historischen Gemälden und ein exemplarisches Original datiert auf Ende des 19. Jahrhunderts, Tabelle 1. Dazu stellen die Zentralen Restaurierungswerkstätten der Museen der Stadt Erfurt (ZRW) Proben aus dem eigenen Fundus zur Verfügung. Dies sind teils historische und teils moderne Malleinwände. Ein Originalbild vom Ende des 19. Jahrhunderts wird zur Entwicklung der Laser- und Kamertechnik verwendet. Des weiteren werden die Mikrostrukturen älterer Bildträgerproben mit teilweise gebrochener Malschicht untersucht, die von der Klassik Stiftung Weimar zur Verfügung gestellt werden.

**Tabelle 1: Verwendete Proben**

Gewebeproben mit Kett- und Schußrichtung	Behandeltes und unbehandeltes neues Leinengewebe
Neues Leinen	Leinenreste aus dem 18. und 19. Jahrhundert
Neue Baumwolle	Altes Leinen aus dem frühen 20. Jahrhundert mit feiner und mit gröberer Struktur
Behandeltes und unbehandeltes Hanfgewebe	
Bild, 19. Jhdt.	Historische Malleinwände

Nach einer Bestandsaufnahme zu den bisherigen empirischen Entscheidungskriterien für restauratorische und konservatorische Maßnahmen erfolgen die mikroskopische und die mechanische Charakterisierung der Gewebe sowie eine erste Anpassung der Streulichtmeßtechnik. Nach der grundsätzlichen Entscheidung zur Anwendung der Specklepattern-Meßtechnik als der am besten geeigneten zerstörungsfreien Meßtechnik werden die erforderliche Laborerprobung und die gerätetechnische Mechanisierung gestartet. Die notwendigen Versuchsaufbauten mit (i) Aktuatorik, Antriebstechnik, elektronische Beschaltung, Mikrooptik, Justage; (ii) Stabilitätsmessungen; Mikroprozessorprogrammierung, Entwicklung der Steuerungsprogramme; (iii) rechentechnische Auswertung mit Datenkompression und Datenablage und Darstellung sowie (v) Konzeption und Aufbau der Geräte für den Einsatz in den Restaurierungswerkstätten beanspruchen den Großteil des Projektaufwandes. Bei Projektende stehen 3 Geräte mit neu entwickelter Software im Status des *Technology Readiness Levels 5* <sup>[57]</sup> bereit, das sind voll funktionsfähige und entsprechend den Standards in industrieller Umgebung (hier sind das die Restaurierungswerkstätten) einsetzbare Geräte. Deshalb wird den Punkten *Restauratorische Bewertung, Anpassung der Meßtechnik und Auswertung für den Restaurator, Einfluß der Ergebnisse auf die Konservierung und Restaurierung* sowie der *Disseminierung* zur Weitergabe, Überwachung des praktischen Einsatzes und zur Auswertung der Ergebnisse auch nach Abschluß des Projekts ein erheblicher Aufwand beige-steuert.

## 2 Charakterisierung der Gewebestrukturen

Die Makrostruktur der Garne in den Geweben und die Zellstruktur der Fasern werden mittels Lichtmikroskopie (Rekonstruktion aus Schichtenbildern) und mittels Rasterelektronenmikroskopie (niedriger Probenstrom, keine leitfähige Probenbeschichtung) charakterisiert. Höhere Vergrößerungen reichen bis in die Zellstruktur der Fasern. Zur Zeit stehen mit Blick auf den Beispielkatalog >300 Licht- und rasterelektronenmikroskopische Bilder für 15 unterschiedliche Gewebearten zur Verfügung. Hinsichtlich der Lichtmikroskopie mit automatischer Schichtenbildverarbeitung soll insbesondere die Benutzung des modernen Digitalmikroskops des Herstellers *Keyence* beim Kooperationspartner ZRW hervorgehoben werden.

Die Bilder 1 bis 9 auf den nachfolgenden S. 13 bis 17 zeigen einige Beispiele für die makroskopischen Gewebestrukturen ohne bzw. mit repräsentativen Fehlern, beispielsweise in Gestalt von Brüchen in den Faserbündeln. Die Leinengewebe treten in verschiedenen Varianten in Erscheinung. Die Garnstärke, die S- bzw. Z-Drehung in Kett- oder Schußrichtung, die Fachgröße quadratisch oder rechteckig mit unterschiedlichen Hoch- und Tiefgängen, die Vorbehandlung und evtl. vorhandene Beschichtung ergeben makroskopische Klassifikationsmerkmale. Hinzu kommt der Faserzustand mit lokaler Krümmung, Reckung und mit Brüchen. Diese Eigenschaften hängen von den Lagerungs- und Belastungsbedingungen ab, so daß ähnlich wie in der klassischen Materialkunde der Halbzeuge ein durchgehendes Konzept zur Beschreibung der wesentlichen Spezifikationen entwickelt werden kann.

Aus mechanischer Sicht ist der Faseraufbau kompliziert, dies betrifft insbesondere die ungleichmäßige Dicke der Zellwände, die Orientierungsunterschiede und die Größenverteilung der kristallisierten Zonen in den Faserzellen <sup>[28]</sup>. Hinzu kommt die Orientierungsabhängigkeit der elastischen Koeffizienten tragender Zellwände <sup>[35]</sup> und die breite Streuung des Schermoduls  $G = (42...63)$  GPa, der Bruchfestigkeit  $\sigma_f = (855...1089)$  MPa sowie der Bruchdehnung  $\varepsilon_f = (1.81...2.53)\%$  <sup>[58]</sup>. Ganz allgemein ist das Verformungsverhalten der Naturfasern kompliziert und hängt nicht nur von der Pflanzengattung ab, aus der die Fasern gewonnen werden, sondern auch von deren geografischer Herkunft, Beispiel Hanffasern aus verschiedenen Provenienzen <sup>[59]</sup>. Entsprechend den Erfahrungen aus Jahrhunderten liefern Flachspflanzen eines der langzeitstabilsten natürlichen Konstruktionsmaterialien. Mehrere Gruppen beschäftigen sich deshalb mit den mechanischen Eigenschaften von Naturfasern, die mit Polymeren zu Verbundmaterialien verklebt werden, u.a. <sup>[60, 61]</sup>. Aus Sicht der mechanischen Spezifikation der Bildträger sind auch die an den Pflanzenfasern in Kulturgütern eingesetzten und erprobten Meß- und Prüfmethode sehr wertvoll, die an anderer Stelle entwickelt werden <sup>[62]</sup>.

***Makrostrukturen der Gewebe***



**a) Hanfleinen mit Vorleimung**



**b) Seide**



**c) Altes Leinen)**



**d) Unbehandeltes Leinen, feines Gewebe**

**Bild 1: Standardgewebe**



**a) Neue Baumwolle**



**b) Neue Baumwolle, gereckt ↔**

**Bild 2 : Gereckte Gewebe (horizontale Zugrichtung)**

***Makrostrukturen der Gewebe mit Faserbrüchen***



**a) Altes Leinen, feines Gewebe**



**c) Hanfleinen mit Vorleimung**



**b) Neues grobes Leinen, gewaschen**



**d) Neue Leinwand**

**Bild 3: Faserbrüche in modernen Geweben; a), b) mit gereckten Faserzonen**

Demgegenüber zeigt Bild 3 die Strukturunterschiede ohne bzw. mit plastischer Reckung und bereits in der frühen Verformungsphase einsetzenden duktilen Faserbrücken. Die mit „neues Leinen“ bezeichneten gröberen Gewebe und die mit „altes Leinen“ bezeichneten feineren Gewebe unterscheiden sich nicht wesentlich in ihren Faserzellstrukturen. Die erkennbaren Sprödbrüche liegen quer zu den Zellwänden bei ähnlichen Längenabschnitten in den Garnen, Bild 3b).

### *Brüche in Faserbündeln historischer Gewebe*



**a) Probe mit Farbresten der Klassik Stiftung Weimar**



**b) dito, kristallisierte Zonen**



**c) Probe aus ZRW**



**d) dito mit Garnbruch**

**Bild 4: Beispiele aus historischen Geweben**

Historische Gewebe zeigen ein gänzlich andere Verformungs- und Bruchmorphologie, Bild 4. Hier treten klar erkennbare kristalline Faserzonen mit Sprödbrüchen auf. In den weitgehend gealterten Fasern gehen die Garnbrüche quer durch mehrere Fasern, Bild 4b), c). Die beobachteten Mikrostrukturen und Bruchmorphologien passen gut zu entsprechenden Untersuchungen an natürlichen bzw. synthetischen semikristallinen Fasern [17, 40, 63]. Durchgehend sind an jüngeren Fasern Duktilbrüche festzustellen, wogegen gealterte und weniger gekrümmte bzw. tordierte Fasern mit fortgeschrittenem Kristallisationsgrad eine typische Sprödbbruchmorphologie aufweisen.

Dem entsprechend zeigen die REM-Aufnahmen in den Bildern 6 bis 9 auf den Seiten 16 und 17 ein klares Bild vor allem der spröden Faserbrüche. Hintergrund ist die dem Lambert-Beer-Gesetz für die lichteoptische Intensitätsverteilung entsprechende Intensitätsabhängigkeit der Sekundärelektronenemission.

### *Mikroskopische Faserstrukturen*

Die Bilder 5 bis 9 zeigen exemplarische Gewebestrukturen ohne bzw. mit Faser- und Garnbrüchen als typische Strukturfehler, aufgrund derer eine verringerte mechanische Belastbarkeit der Gewebe resultiert.



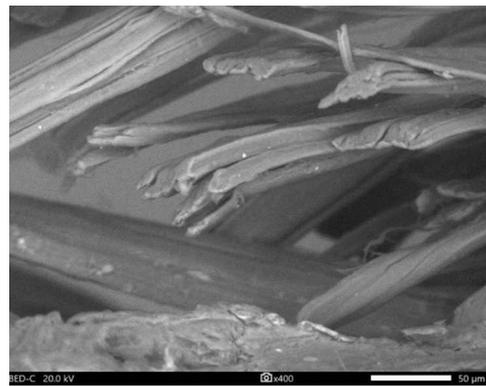
a) Gewebe



a) Gewebe



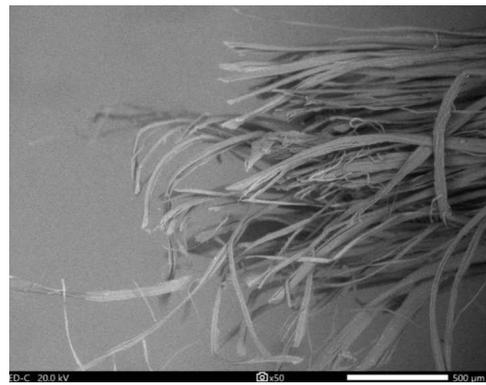
b) Einzelne Faserbrüche im Garn



b) Einzelne Faserbrüche im Garn



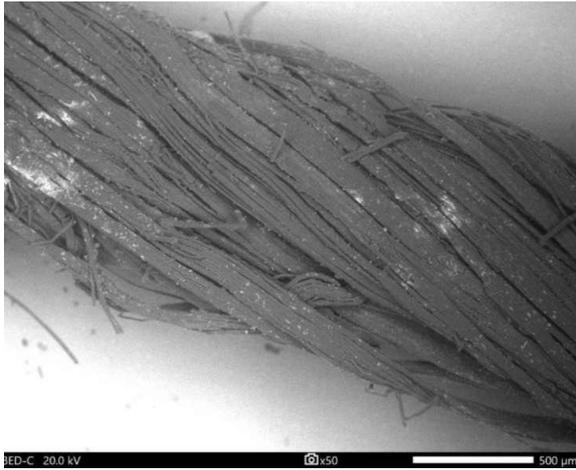
c) Kompletter Garnbruch



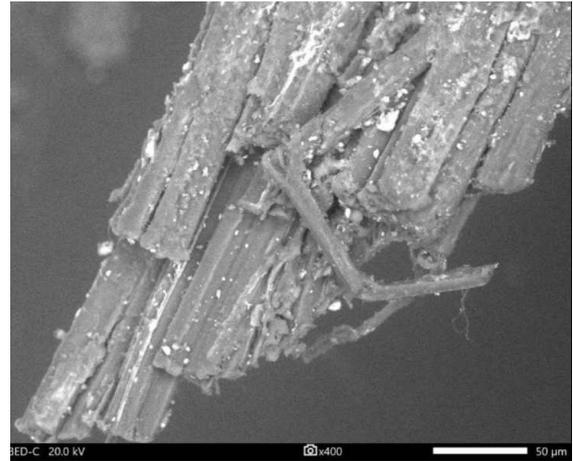
c) Kompletter Garnbruch

**Bild 5: Strukturen und Brüche in Altleinwand; Stapelbilder im LM**

**Bild 6: Strukturen und Brüche in Altleinwand aus dem 17. / 18. Jahrhundert; REM ohne Leitfähigkeitsbeschichtung**



a) Garndrehung

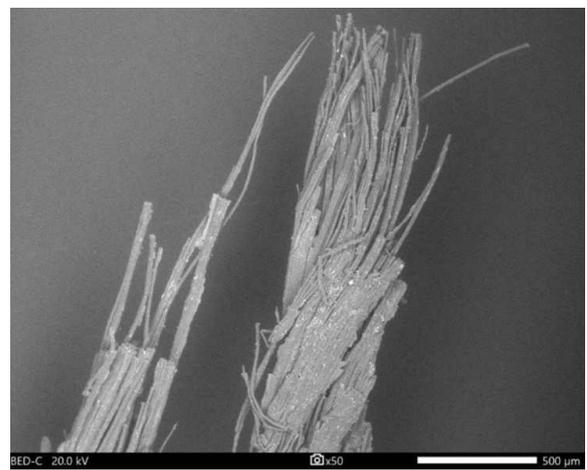


b) Garnbruch

Bild 7: Altes Leinen aus dem 18. Jhdt.

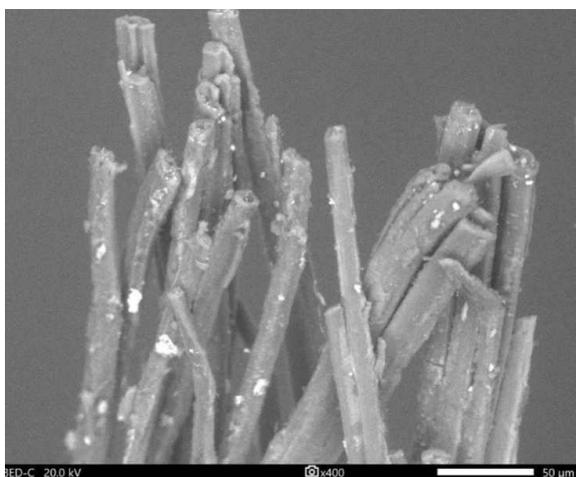


a) Sprödbrüche zum Garnbruch

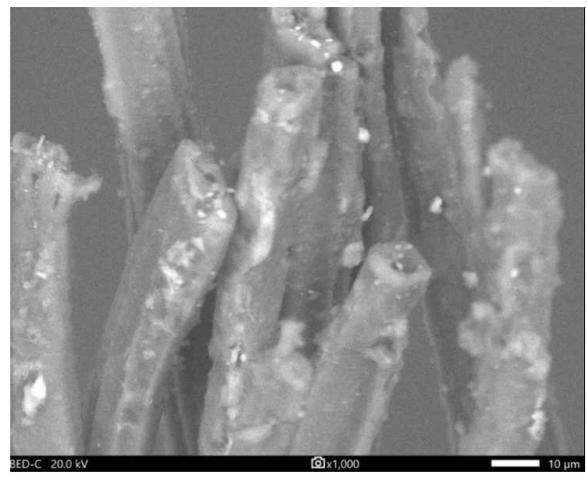


b) Faserbündelbrüche

Bild 8: Weitere gealterte Gewebeproben



a) Bruchmorphologie der Flachsfasern



b) Herausvergrößerung aus Bild a)

Bild 9: Sprödbrüche in den  $\approx 2$  Jahrhunderte alten Flachsfasern mit Zellwänden des Polysaccharids

### 3 Mechanische Relaxation textiler Bildträger

#### *Leinwand unter Zugspannung mit zeitabhängigem Fließen*

Die Bildträger im Spannrahmen werden zwecks Stabilisierung der Malschicht federelastisch vorgespannt. Die Linienspannung muß optimiert werden, zu geringe Spannungen gefährden die Malschicht, zu hohe Spannungen das Gewebe<sup>[9]</sup>. Die Einstellung erfordert die ausreichend genaue Kenntnis des Kriechverhaltens sowohl unter stationären Bedingungen wie auch unter dem Einfluß langsamer Temperatur- und Luftfeuchteänderungen. Dabei ist die mechanische Beanspruchung der Gewebe im Textiltrapport durch örtliche Biegung, Torsion und Reckung der Fasern zu beachten. Im mechanischen System der auf Rahmen aufgespannten textilen Bildträger ist zunächst die lokale Spannungsverteilung in der Ebene zu betrachten. Die Webstruktur erzeugt Spannungskomponenten, die auch außerhalb der Webebene liegen. Ursache ist die Anisotropie, d. h. die orientierungsabhängige Verformung der einzelnen im Geweberapport gebogen und verdrillt aufgespannten Garne. Dies führt zu zusätzlichen Spannungskomponenten über die laterale Makrospannung in der Ebene hinaus<sup>[64]</sup>. Sobald die Abmessungen in der Gewebeebene bestimmte Grenzwerte überschreiten, nimmt die Materialbelastung vor allem im Bereich der Ecken von Spannvorrichtungen weiterhin zu<sup>[3]</sup>. Die Ursache liegt in der Integration der Spannungsfelder in den großen Flächen bezogen auf die Linienspannung an den Rändern. Messungen der ebenen Linienspannungen elastisch auf Rahmen aufgespannter Leinwände über mehrere Jahre hinweg ergeben den logarithmischen Spannungsabfall in der Größenordnung von  $\approx 5\%$  bis  $\approx 10\%$  pro Dekade<sup>[59]</sup>. Dieser Effekt kann mittels stationären Kriechens erklärt werden. An Pflanzenfasern (und an technischen Fasern vergleichbarer chemischer Zusammensetzung und semikristalliner Struktur) gemessene Bruchspannungen weisen eine große Streuung zwischen  $\approx 20\%$  und  $>60\%$  auf<sup>[65]</sup>. Die verschiedenen Herstellungs- und Verarbeitungstechniken der Faserbündel beispielsweise von Hanf führen zu einer entsprechenden Streuung der mechanischen Eigenschaften. Entsprechendes gilt für das Garnspinnen und für die Webtechnik<sup>[66]</sup>.

Beim Aufspannen der textilen Bildträger in starren Spannvorrichtungen werden diese als hart im Vergleich zur Leinwand beschrieben, pauschal ist mit einem zweidimensionalen viskoelastischen System zu rechnen. Aus Sicht der Materialmechanik sind die Leinwandgewebe nachgiebig, d. h. sie verformen sich bei Zugbelastung zusätzlich zur elastischen Dehnung durch einen zeitabhängigen Verformungsbeitrag<sup>[67]</sup>. Während die elastische Dehnung bei Entlastung ohne Zeitverzug auf Null zurückgeht, bleibt die viskoelastische Dehnung bestehen. Dabei ist nach einer eingebrachten Belastungsänderung die Dehnungsgeschwindigkeit zunächst hoch und nimmt anschließend zeitverzögert ab. Der harte Spannrahmen gibt beim Aufspannen eine Zwangsdehnung vor, somit nimmt mit der Zeit die Anfangsspannung durch das viskoelastische Nachgeben ab.

Dagegen erhalten federelastische Spannrahmen die Spannung aufrecht. Das Gewebe dehnt sich weiter, es tritt viskoelastisches Kriechen mit zeitabhängiger Dehnungsgeschwindigkeit auf. Zur Beschreibung der kombinierten elastischen und viskoelastischen Verformung werden verschiedene Modelle verwendet, von denen eines beispielhaft in diesem Abschnitt zur Auswertung unserer Versuche dargestellt wird. Damit können mit ausreichender Genauigkeit die wesentlichen Materialeigenschaften als ein Elastizitätskoeffizient, eine Amplitude des zeitabhängigen reversiblen Kriechens und schließlich die Geschwindigkeit des irreversiblen Kriechens herausgerechnet werden. Ein Vorteil der Berechnung besteht in der Möglichkeit, aus einer Messung sowohl den Fall des harten Rahmens wie auch der elasti-

schen Federspannung einschließlich der in der Praxis auftretenden Zwischenstufen quantitativ zu beschreiben. So entsprechen unsere Zugversuche an Flachs- oder Hanfleinwänden auch den an anderer Stelle berichteten Experimenten zu den viskoelastischen Verformungseigenschaften einzelner Hanffasern mit wechselnder Feuchteeinwirkung [68]. Messungen des viskoelastischen Verformungsverhaltens an flächigen Geweben aus Flachs, Hanf oder Baumwolle mit einer für die Extrapolation über längere Zeiträume ausreichenden Genauigkeit sind dem Autor gegenwärtig nicht bekannt.

Die Messung der Kriechnachwirkung im Labor bildet die Belastung der Bildträger in der Museums Umgebung über lange Zeiträume ab. Andauernde Zugspannungen in der Fläche werden überlagert von Fluktuationen der Temperatur und der Luftfeuchte. Somit liefern die Versuche zur Spannungsnachwirkung eine quantitative Aussage zum teils reversiblen und teils irreversiblen plastischen Fließen. Festzuhalten ist, daß hier ausschließlich der frei eingespannte textile Bildträger betrachtet wird. Die Verformungsmechanik des Bildträgers zusammen mit der Malschicht erfordert einen Modellansatz zur Mechanik für mehrfach zusammenhängende Körper, wie er beispielsweise für faserverstärkte Verbundmaterialien entwickelt wurde [69].

### Versuche zum zeitabhängigen Makrokriechen

Um die verschiedenen Materialzustände unter Belastungsbedingungen zu vergleichen, erfolgt die Messung der viskoelastischen Nachwirkung in einem aus stationärem Kriechen und federelastischer Vorspannung kombinierten Versuch. Dieser entspricht der Vorspannung der Bildträger in einem elastischen Rahmen, der dem Bildträger eine bestimmte Vordrehnung aufzwingt. Für die Versuche werden beispielhafte Gewebeprobe unterschiedlichen Alters aus Flachsleinen, Hanf und Baumwolle verwendet. Die Probenabmessungen betragen 10 mm in der Breite und  $\approx 300$  mm in der Länge, Bild 10. Bild 11 zeigt schematisch die geometrische Anordnung der Querszugversuche.



Bild 10: Zugprobe mit Einspannung

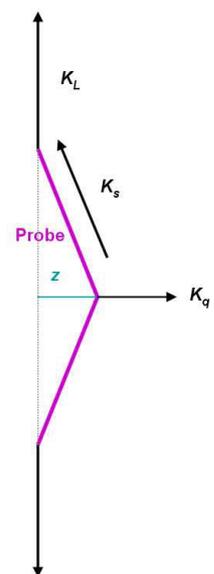
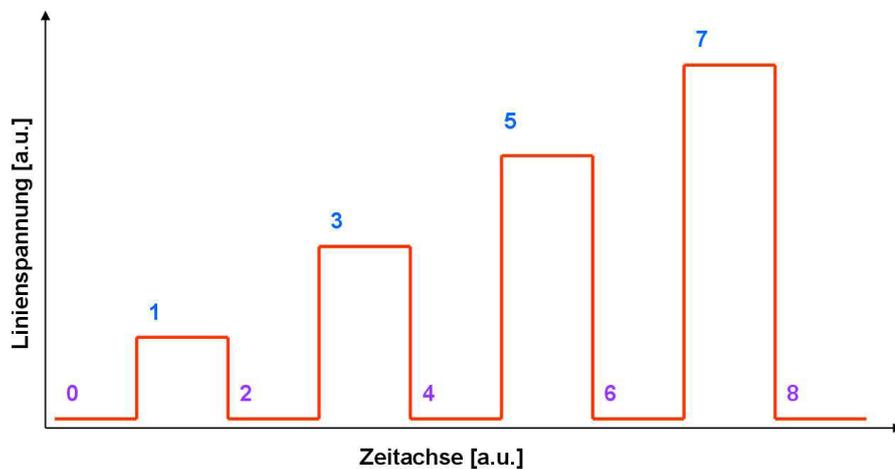


Bild 11: Querszugversuch, schematisch

Die Gewebestreifen mit jeweils  $\approx 10 \dots 16$  Schußfäden werden als Zugproben aus den von den ZRW zur Verfügung gestellten Geweben herausgeschnitten und in die Querkzugvorrichtung eingespannt. Damit werden Messungen der Querkraft  $K_q$  mit hoher Genauigkeit durchgeführt, Relativfehler  $< 10^{-5}$ . Die zeitabhängige Probenzugkraft beträgt

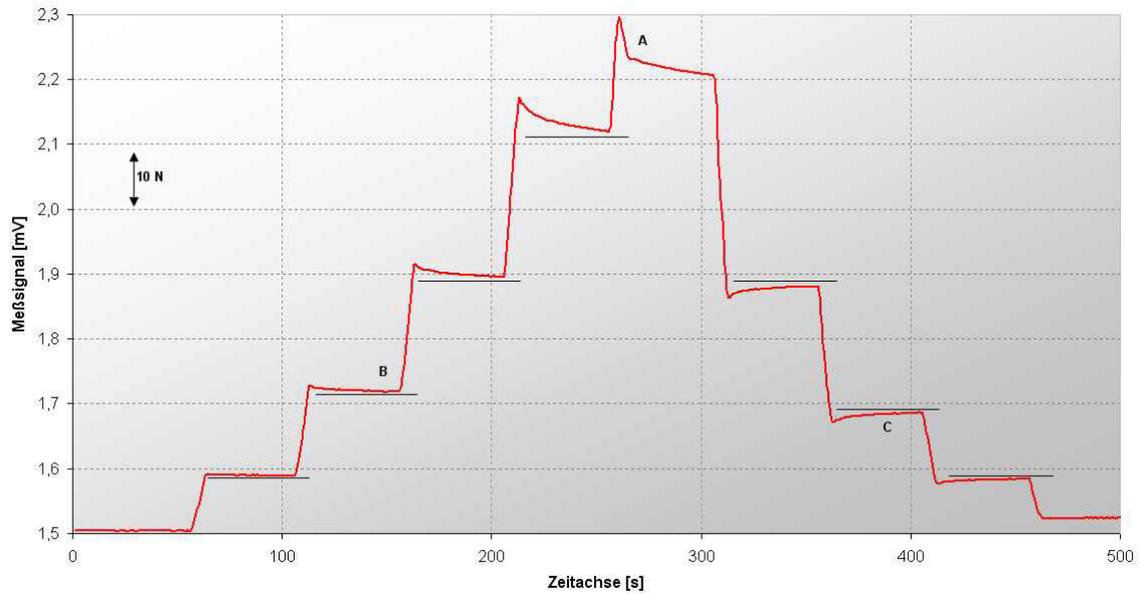
$$K_L = \frac{L}{2z} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{L}\right)^2} K_q$$

mit der Probenlänge  $L$  und der seitlichen Auslenkung  $z$ . Ein Luftstrom hält die Proben bei konstanter Temperatur und Luftfeuchte. In den Versuchen werden jeweils  $(23.5 \pm 0.15)^\circ\text{C}$  bzw.  $(45 \pm 2)^\circ\text{C}$  mit  $(52 \pm 8)\%$  bzw.  $(80 \pm 5)\%$  relative Feuchte eingestellt. Die Linienspannung wird stufenweise auf 3 bis  $8 \text{ Ncm}^{-1}$  erhöht, Bild 12. Die Ausläufer der gemessenen Übergangsfunktionen werden zeitlich so lang gehalten, daß jeweils eine Asymptote mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden kann.

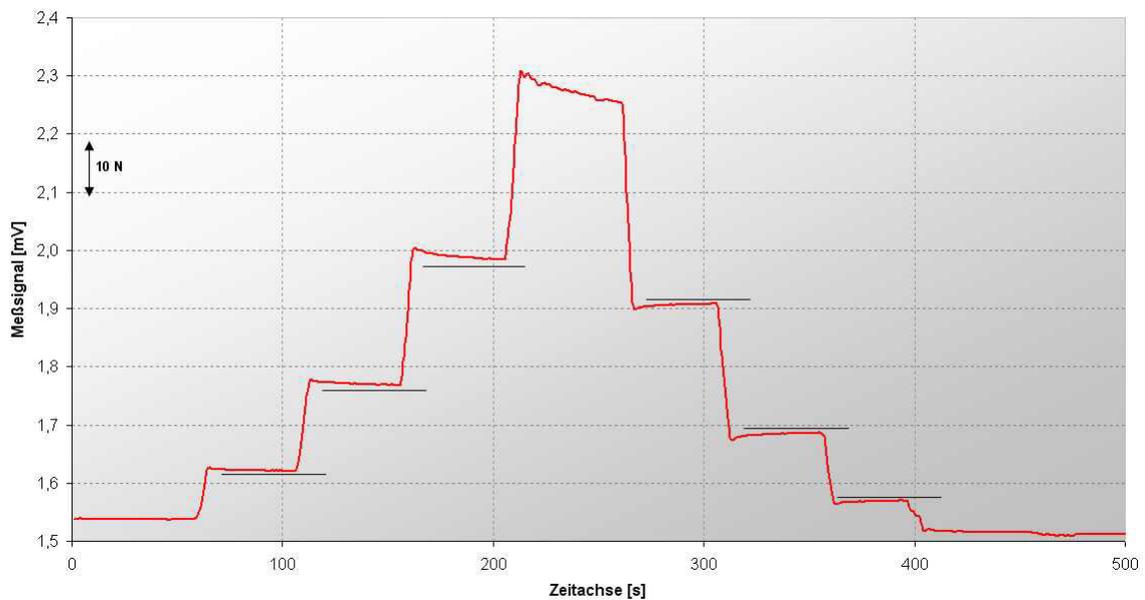


**Bild 12: Zugkraftverlauf im Wechselkriechversuch**

Bild 13 auf der nächsten Seite 21 zeigt die Funktionen der Zugkraft im gestuften Be- und Entlastungsversuch. Direkt im Anschluß an einen positiven Lastwechsel tritt Übergangskriechen mit negativer Amplitude auf, umgekehrt bewirkt eine schnelle Entlastung einen Wiederanstieg der Zugkraft. „Neues Leinen“ zeigt höhere Amplituden des anelastischen Kriechens im Vergleich zu „altem Leinen“. Bei letzterem wird stationäres Kriechen früher erreicht. Die Vorwärtsabschnitte der Kriechversuche mit positivem Spannungswechsel bewirken möglicherweise Faserbrüche in den Garnen und ergeben höhere Differenzen der jeweiligen Asymptoten unmittelbar nach dem Lastwechsel. Die Rückwärtsabschnitte bewirken keine Faserbrüche. Die Differenzen der Asymptoten sind somit dem irreversiblen Verformungsanteil der Fasern und den Faserbrüchen zuzuordnen. Aus den bisherigen Versuchen mit gleichbleibender Belastung über Stunden ergeben sich Zeitkonstanten im Bereich  $\approx (1000 \pm 200) \text{ s}$  und Exponenten bei  $\approx (300 \dots 500) \text{ N/m}$ , ausgedrückt als Zugspannung, d. i. die Zugkraft je Meter Leinwandkante, Bild 14 auf Seite 22.



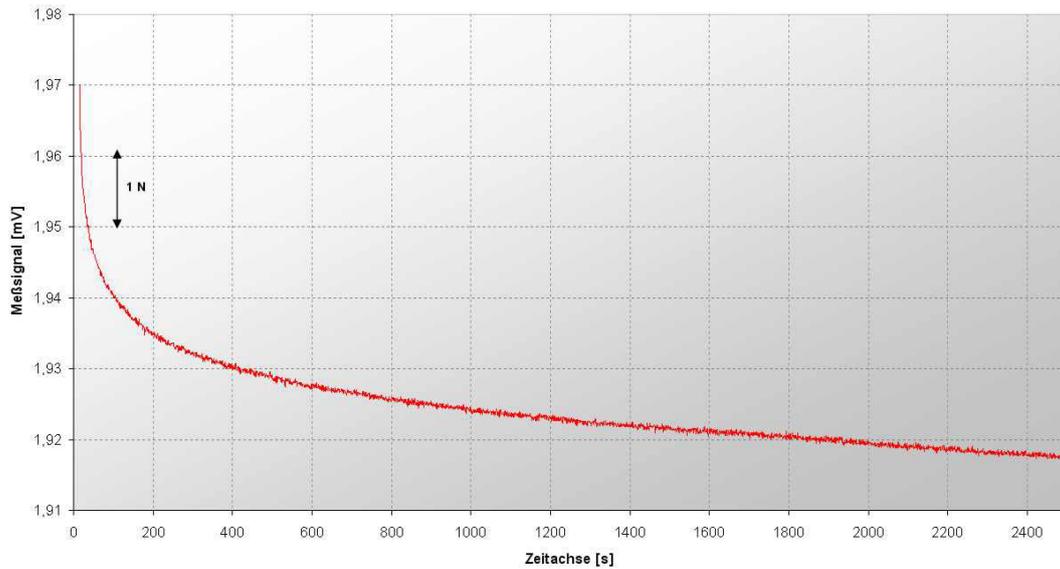
a) „Neues Leinen“, gewaschenes Gewebe



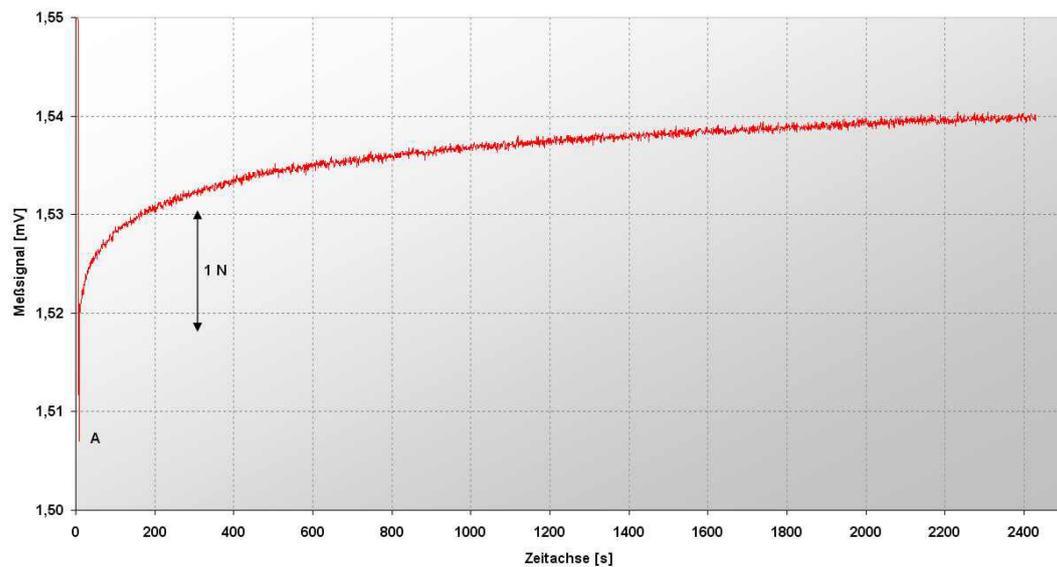
b) „Altes Leinen“

Bild 13: Wechselkriechkurven

Die Versuche erfolgen an neuen und an gealterten Proben. Im Labor werden die Kriechversuche mit gestufter Spannung so ausgeführt, daß sich positive und negative Stufungen abwechseln. Die Abhängigkeit der Relaxationsstärke von der Sprungamplitude liefert mehr Information als die Stufung mit konstanter Amplitude. Um bei der erzielten Genauigkeit die mechanische Nachwirkung der verschiedenen Gewebeproben optimal zu vergleichen, werden die mechanische Belastungsfolge und die Intervallängen für die verschiedenen Proben stets gleich gehalten.



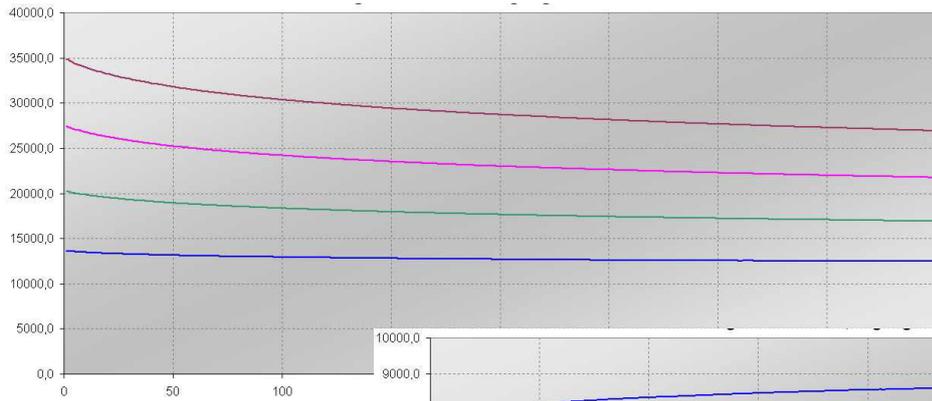
**a) Positiver Lastwechsel**



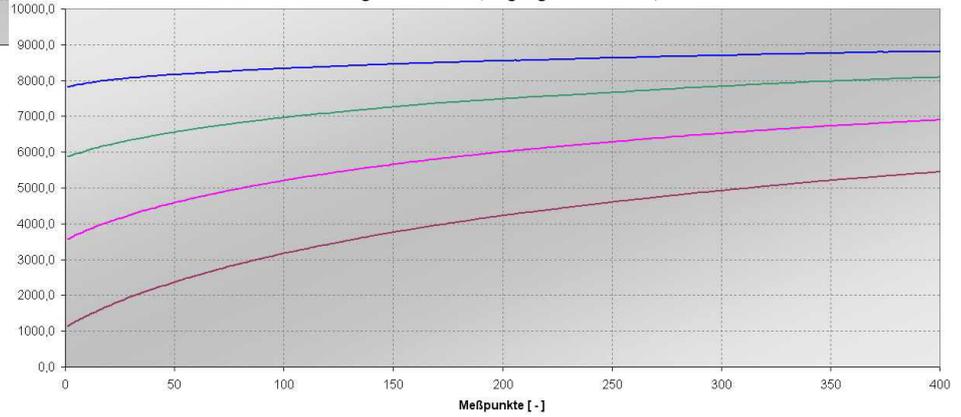
**b) Negativer Lastwechsel**

**Bild 14: Übergangskriechkinetik einer „alten Leinwand“ nach positivem bzw. negativem Lastwechsel**

Aktuell stehen an 9 verschiedenen Gewebearten 3222 Übergangskennlinien mit  $\approx 4.99$  Mio. Meßpunkten zur Verfügung. Die nachfolgenden Diagramme Bild 15 bis Bild 19 auf S. 23 bis 25 zeigen beispielhafte Nachwirkungskennlinien für 5 Proben bzw. verschiedene Versuchsbedingungen. Aufgetragen sind die unmittelbar aufgenommenen elektrischen Meßwerte (in Vielfachen von  $0.1 \mu\text{V}$  entsprechend der Auflösung des  $6 \frac{1}{2}$ -stelligen Präzisions-Multimeters). Zur Bewertung der Materialeigenschaften erfolgt die Umrechnung in die Linienspannung, Einheit  $[\text{N}/\text{cm}]$ . Die Probenmaterialien ergeben deutliche Unterschiede in den Kurvenformen, siehe die nachfolgenden Diagramme.

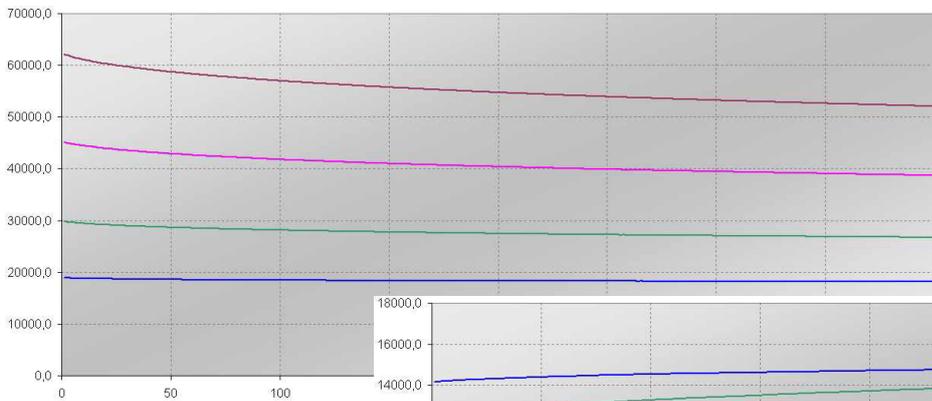


a) Rückwärtsfließen nach positiven Lastsprüngen entspr. Bild 12 auf S. 20

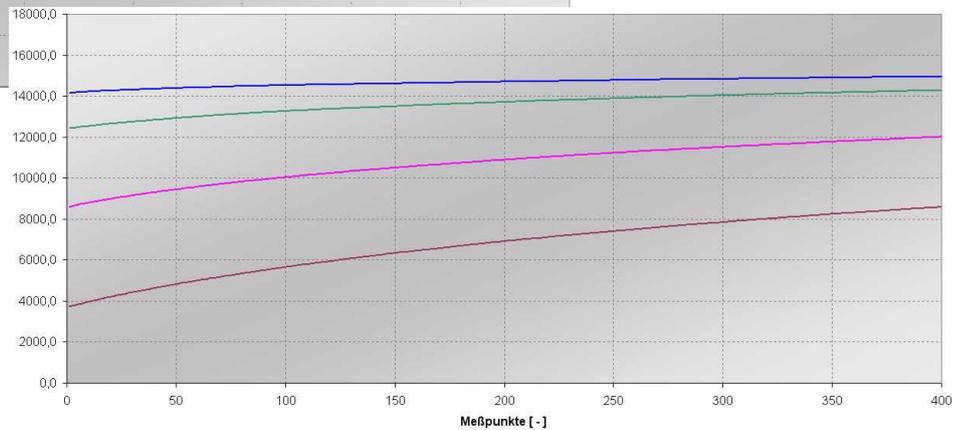


b) Vorwärtsfließen nach negativen Lastsprüngen

Bild 15: Übergangskriechkinetik einer „alten Leinwand“ nach positivem bzw. negativem Lastwechsel

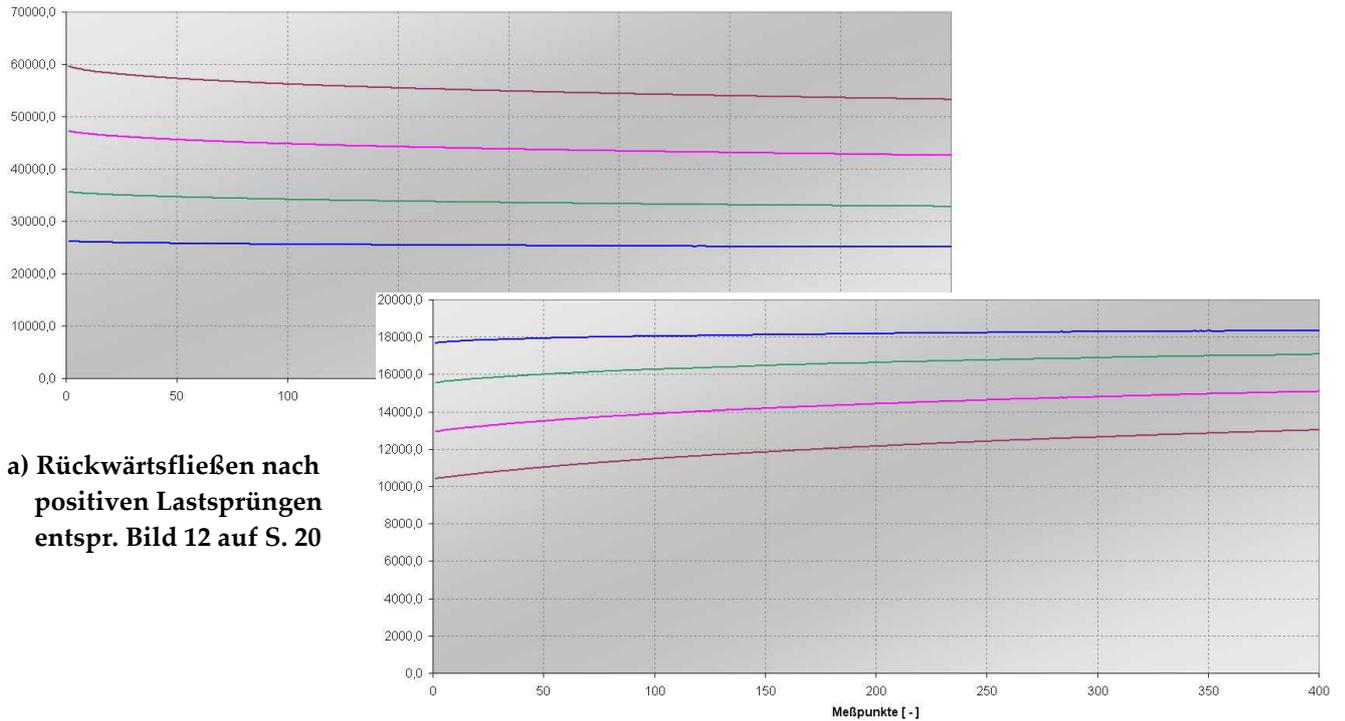


a) Rückwärtsfließen nach positiven Lastsprüngen entspr. Bild 12 auf S. 20



b) Vorwärtsfließen nach negativen Lastsprüngen

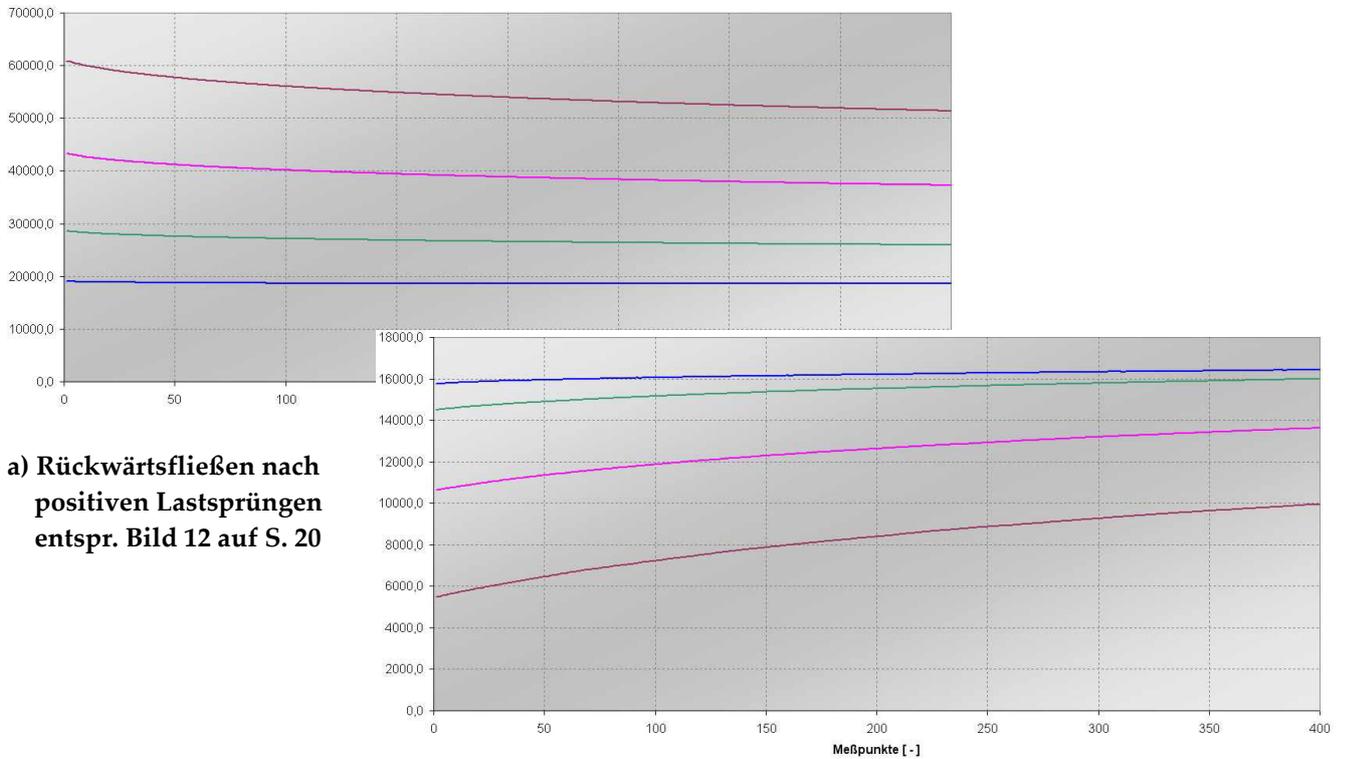
Bild 16: Übergangsfunktionen infolge Spannungsrelaxation an Hanfleinen mit Vorleimung bei Raumtemperatur



a) Rückwärtsfließen nach positiven Lastsprüngen entspr. Bild 12 auf S. 20

b) Vorwärtsfließen nach negativen Lastsprüngen

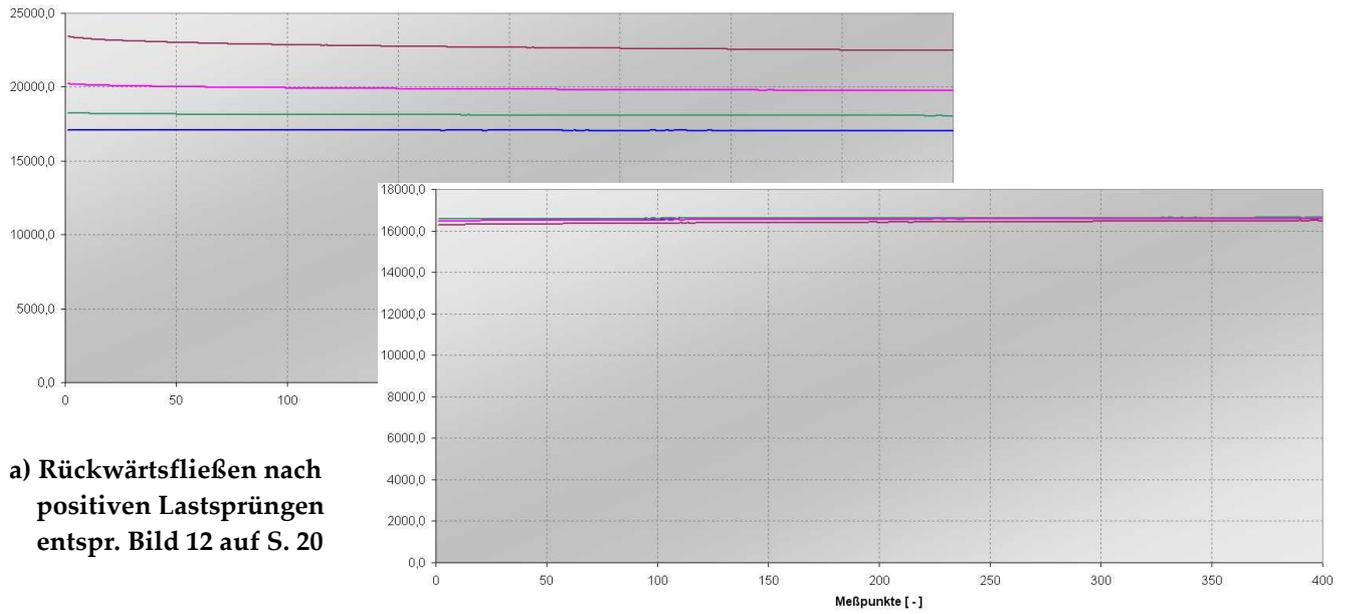
Bild 17: Übergangsfunktionen infolge Spannungsrelaxation an Baumwolle bei erhöhter Temperatur ( $45\pm 2$ )°C und ( $80\pm 5$ )% relativer Feuchte



a) Rückwärtsfließen nach positiven Lastsprüngen entspr. Bild 12 auf S. 20

b) Vorwärtsfließen nach negativen Lastsprüngen

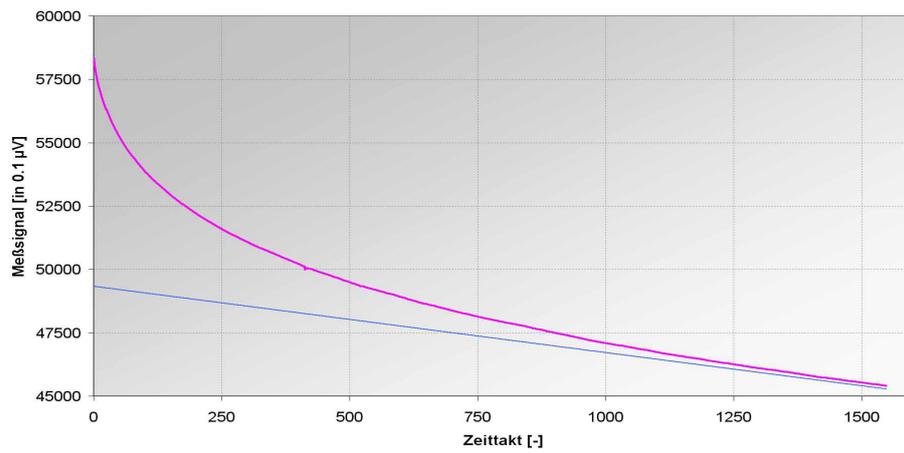
Bild 18: Übergangsfunktionen infolge Spannungsrelaxation an Baumwolle bei Raumtemperatur



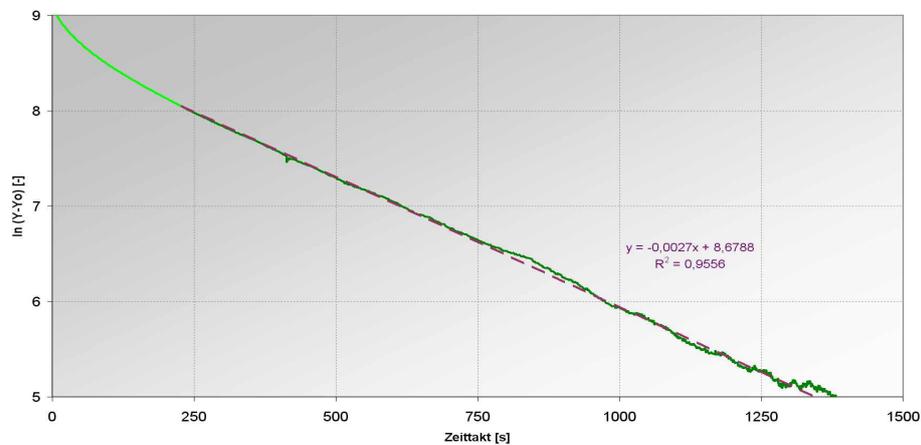
a) Rückwärtsfließen nach positiven Lastsprüngen entspr. Bild 12 auf S. 20

b) Vorwärtsfließen nach negativen Lastsprüngen

Bild 19: Übergangsfunktionen infolge Spannungsrelaxation an neuem feinem Leinen bei Raumtemperatur, niedrige Amplituden

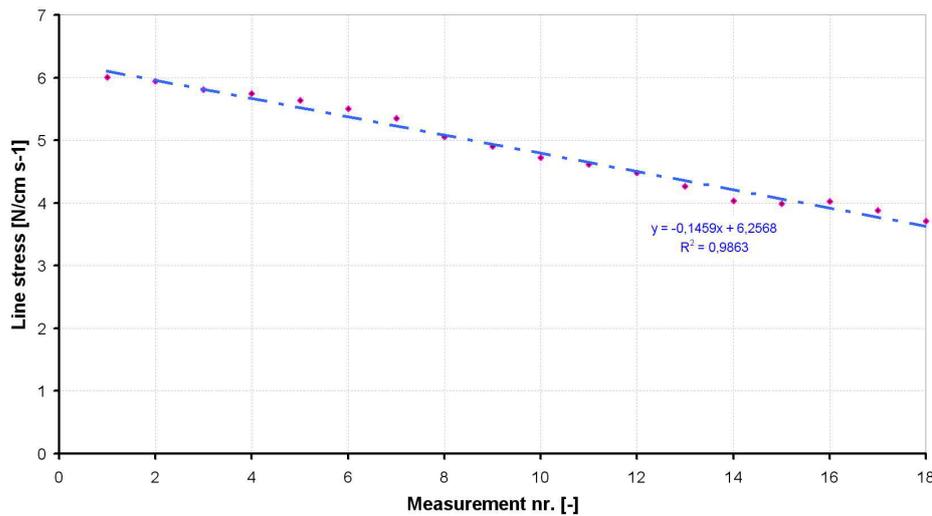


a) Übergangsfunktion mit zugehöriger Asymptoten

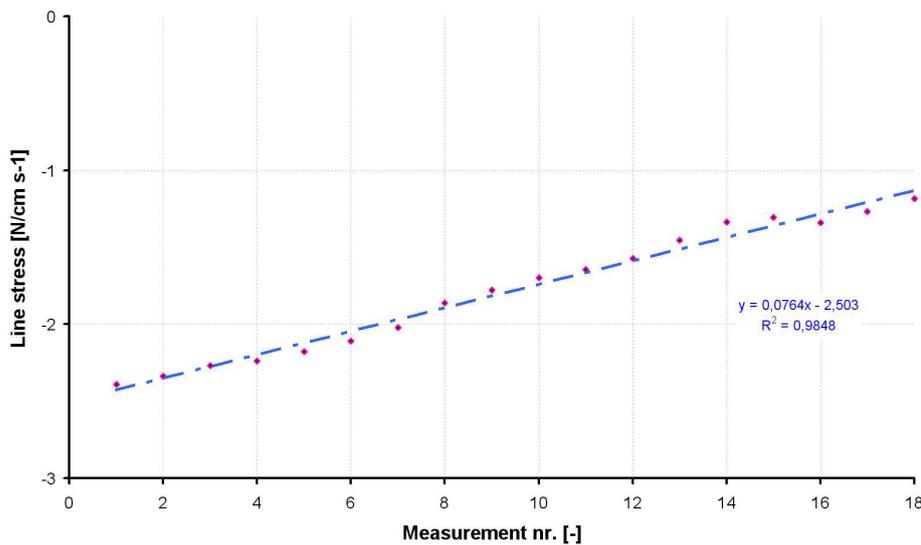


b) Logarithmierte Differenz zur Asymptoten

Bild 20: Zur rechnerischen Auswertung der Übergangsfunktionen



a) Drift der (positiven) Übergangsamplitude beim Rückwärtsfließen



b) Drift der (negativen) Übergangsamplitude beim Vorwärtsfließen

**Bild 21: Verläufe des Rückwärts- bzw. Vorwärtsfließens im Verlauf aufeinanderfolgender Lastwechsel nach Bild 3; Zeitabstand von Punkt zu Punkt  $\approx 4.3$  Stunden, Gesamtzeit des Ermüdungsversuches also  $\approx 3.2$  Tage mit 180 Wechseln**

Bild 20 auf Seite 25 zeigt an einem Beispiel die Übergangsfunktion in einem Meßintervall zwecks Überprüfung der Meßgenauigkeit und optimaler Funktionsanalyse. Die Probe ist in diesem Fall Hanflein mit Vorleimung. Werden mehrere Wechsel in Folge vorgenommen, so addiert sich die verformungsbedingte Probenschädigung, die Absolutwerte der Übergangsamplituden nehmen ab, Bild 21, Materialermüdung mit Verfestigung.

Interessant ist die Richtung der Dehnung während des Übergangskriechens bzw. des stationären Kriechens (Wie reagieren Bildleinwände in Gemälden auf Temperatur- und Feuchtewechsel?!). Während das Vorzeichen der Übergangsfunktionen gegenläufig zu den Lastwechseln ist, bleibt das Vorzeichen der Asymptoten stets positiv. Die Textilproben kriechen auch nach Entlastung stationär durch Verlängerung, eine Verkürzung tritt im stationären

Tabelle 2: Übergangskriechen und stationäres Kriechen in aufeinander folgenden Versuchen an einer Probe „neues Leinen“ mit Meß- bzw. Interpolationsfehlern

Übergang			Stat. Geschwindigkeit	
Amplitude	Steigung	rel. Fehler	Asymptote	rel. Fehler
[N/cm]	[N/cm s <sup>-1</sup> ]	[ - ]	[N/cm s <sup>-1</sup> ]	[ - ]
8,660	0,008777	1,10E-06	2,3978E-04	1,09E-07
7,700	0,007872	8,95E-07	2,4018E-04	1,47E-07
7,397	0,008062	1,03E-06	2,3572E-04	1,23E-07
6,364	0,008374	1,08E-06	2,3237E-04	1,42E-07
5,815	0,008659	1,06E-06	2,4234E-04	1,37E-07
5,501	0,008912	1,11E-06	2,2860E-04	8,69E-08
5,421	0,008869	1,11E-06	2,1958E-04	1,52E-07
6,706	0,008197	1,02E-06	2,5245E-04	5,86E-08
...	...	...	...	...
-3,386	0,003334	5,51E-07	2,5429E-04	1,99E-07
-3,048	0,003074	6,27E-07	2,8084E-04	1,70E-07
-2,907	0,003058	7,90E-07	2,5023E-04	1,54E-07
-2,352	0,003612	6,91E-07	2,3281E-04	1,96E-07
-2,068	0,003397	6,80E-07	2,4477E-04	1,66E-07
-1,907	0,003245	9,23E-07	2,5267E-04	2,70E-07
-1,929	0,003183	1,10E-06	2,1766E-04	3,24E-07
-2,659	0,003254	5,35E-07	2,5402E-04	2,01E-07
...	...	...	...	...

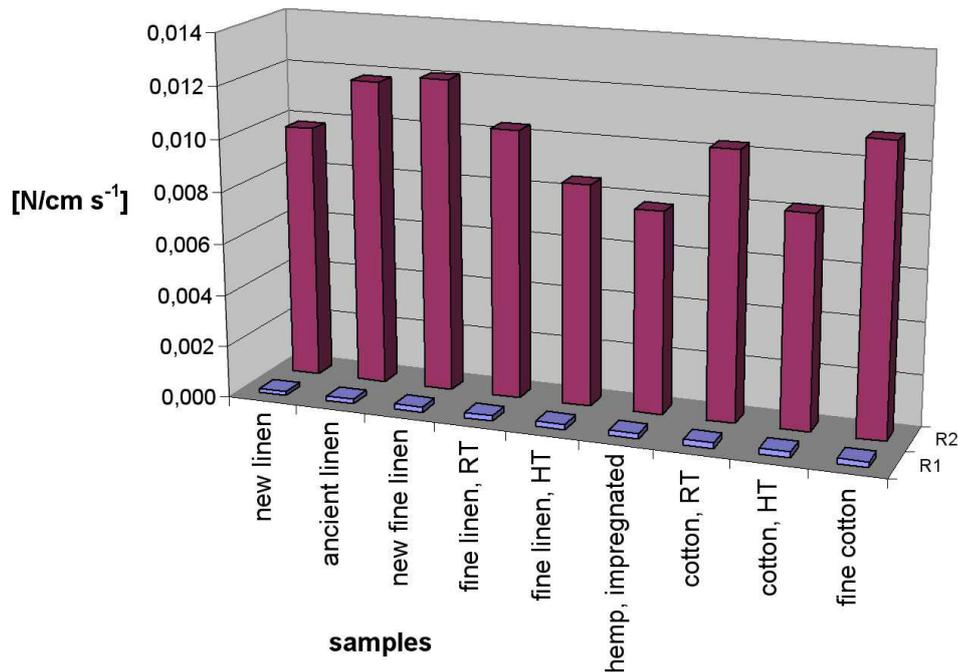


Bild 22: Geschwindigkeiten des Übergangskriechens (rot) und des stationären Kriechens (blau) in verschiedenen Proben; die Streuung über alle Proben liegt bei ≈4.7% bis 7.8% (relativer Fehler)

Kriechzustand nicht ein. Die Übergangsgeschwindigkeiten ändern sich nicht signifikant in aufeinanderfolgenden Wechsln. Die stationären Geschwindigkeiten liegen etwa eine Zehnerpotenz niedriger im Vergleich zu den Übergangsgeschwindigkeiten. Die Beispieltabelle 2 und das Balkendiagramm Bild 22 zeigen die statistische Auswertung für verschiedene Proben jeweils für die in den Versuchen angewandten Höchstlasten im Bereich ≈3...8 N/cm.

Es wird gefolgert, daß sich die Bildträger nach Lastwechseln hinsichtlich ihrer Zugdehnung teilweise erholen können (Übergangskriechen), ein kleinerer Teil der Verformung jedoch irreversibel als Dehnungsbeitrag in Zugrichtung verbleibt. Die Messungen zeigen, daß sich die Textilien durch stationäres Kriechen sogar dann ausdehnen, wenn keine Zugspannung mehr anliegt. Die Meßkampagne zeigt ein bemerkenswert konstantes Verhältnis jeder einzelnen Übergangsamplitude zur stationären Kriechgeschwindigkeit in demselben Meßintervall. Diese Feststellung gilt für die Messungen an den Geweben hinsichtlich der negativen Kriechgeschwindigkeiten nach positiven Dehnungssprüngen ebenso wie für die positiven Kriechgeschwindigkeiten nach negativen Dehnungssprüngen. Über alle gemessenen Gewebeproben hinweg betragen die Standardabweichungen  $\pm 4.7\%$  für das Übergangskriechen und  $\pm 7.8\%$  für das stationäre Kriechen. Dabei scheint es sich um eine von der Faserart unabhängige Gesetzmäßigkeit der semikristallinen Pflanzenfasern zu handeln. Die mechanischen Messungen an den Geweben sind ausreichend genau, so daß der aus statistischem und systematischem Fehler zusammengesetzte Gesamtfehler letztendlich nur noch von der Kalibrierung der Kraftmeßtechnik und vom Temperaturfehler sowie der Genauigkeit der Feuchteinstellung bestimmt wird. Die Mittelwerte über die bisher untersuchten Proben Flachsleinen verschiedener Alterungsstufen, Hanf, Baumwolle usw. betragen:

- a) Für die Übergangs-Kriechgeschwindigkeit beim Rückwärtsfließen nach Belastung  $-(0.0109 \pm 0.0015) \text{ N/cm s}^{-1}$
- b) Für die stationäre Kriechgeschwindigkeit beim Rückwärtsfließen nach Belastung und ebenso nach Entlastung  $+(0.000208 \pm 0.000019) \text{ N/cm s}^{-1}$

Bei der Mittelung über die bislang mechanisch geprüften 9 Gewebearten treten somit Streuwerte von 9.9% bzw. 15.5% auf. Diese Streuwerte sind verhältnismäßig gering im Vergleich zu dynamischen Messungen an Pflanzenfasern an anderer Stelle <sup>[28, 35]</sup>.

### *Physikalische Interpretation der Kriechnachwirkung*

Zur Auswertung stehen neben den empirischen, mittels statistischer Gleichmaßverteilung hergeleitete Ansätze zur Verfügung <sup>[70; 71]</sup>. Die Modelle verwenden konstante Asymptoten. Im Falle der Dauerbelastung der Bildträger tritt jedoch stationäres Kriechen auf mit einer Geschwindigkeit  $m \neq 0$ . Als Übergangsfunktion kann der Ausdruck

$$y = y_o + mt + B e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta}$$

mit der Asymptotensteigung  $m$ , der Zeit  $t$ , der Zeitkonstanten  $\tau$  und dem Exponenten  $\beta$  verwendet werden. Die zeitliche Ableitung liefert

$$\dot{y} = m - \frac{\beta}{\tau} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{\beta-1} B e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta}$$

Mit der Näherung  $\beta \approx 1$  ist

$$\dot{y}(0) \cong m - \frac{B}{\tau}$$

das Maß für die Geschwindigkeit der Übergangsfunktion zum Zeitpunkt 0.

Wu et al. [58] schlagen ein 3-Phasenmodell zur Kriechkinetik semikristalliner Polymere, in diesem Fall für Polypropylen, vor. Demnach nach einem anfänglichen elastischen Bereich eine Schwellspannung überschritten werden, wonach eine plastische Verformung bereits nach niedrigeren Spannungsamplituden einsetzt. Die Makromoleküle nehmen durch Reckung mehr Energie auf, der intramolekulare Energieanteil nimmt zu. Die Moleküle gleiten gegenseitig ab, wodurch der intermolekulare Energieanteil abnimmt. Mit zunehmender Reckung treten neben der Reckung und dem Vorbeigleiten zusätzlich Molekülbrüche ein. berücksichtigt man die in den Pflanzenfasern an den Zellenden vorhandenen Knicke [72] als zusätzliche Kapazität für die Molekülreckung, so ließe sich ein analoges Kriechmodell für die Pflanzenfasergewebe kalibrieren. Diese hätten dann eine erhöhte Dehnungsreserve im Vergleich zu den verhältnismäßig einfach aufgebauten synthetischen Polymeren. Die Zwangsdehnung der viskoelastischen Gewebe bewirkt zunächst ein Überschießen der Spannung, die sich ebenfalls mit einer Zeitfunktion verringert. Unter der Annahme des linearen viskoelastischen Verhaltens folgt aus aufeinanderfolgenden Belastungen mit festen Spannungshüben immer dieselbe resultierende Summe der Dehnungen  $\sigma_1(t) + \sigma_2(t) \rightarrow \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$ . Dieses Superpositionsprinzip gilt sowohl für die Berechnung der zeitabhängigen Dehnung

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_0} \sigma(t) + \int_{-\infty}^t \frac{1}{\dot{E}} (t - \zeta) \sigma(\zeta) d\zeta$$

wie auch umgekehrt für die Berechnung der zeitabhängigen Spannung

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) + \int_{-\infty}^t \dot{E}(t - \zeta) \sigma(\zeta) d\zeta$$

mit dem Elastizitätsmodul  $E$ .  $t$  ist die Zeit. Aus dem stationären Kriechen über längere Zeitabschnitte folgt, daß die Interpretation mit den 3 Parametern nicht ausreicht, sondern noch eine Asymptote hinzuzunehmen ist. Deren Steigung hängt ebenfalls von der Temperatur und von der Feuchte ab. Die gemessenen Kennlinien können mittels einer Iteration nach Gauß-Newton bzw. Levenberg-Marquardt approximiert werden. Die Näherungsrechnung setzt eine durchgängige Funktion vom Anfang bis zum Ende jedes Meßintervalls voraus. Die berechneten Koeffizienten beeinflussen sich gegenseitig und führen zu relativen Fehlern in der Größenordnung  $\approx 10^{-4}$ . Infolge der Genauigkeit der Messungen mit relativen Fehlern im Bereich  $\approx 6 \cdot 10^{-8}$  bis  $6 \cdot 10^{-7}$  wird die Übergangsfunktion am Anfang der Intervalle mittels eines Polynoms und die Asymptote am Ende des Intervalls mittels einer Linearapproximation in jeweils 1 Rechenschritt explizit berechnet. Mit dieser Methode kann die Meßgenauigkeit zur Bestimmung der wesentlichen Materialparameter voll ausgenutzt werden. Bei der Beurteilung der Rechenergebnisse treten nur noch die systematischen Fehler durch Temperatur- und Feuchteeinfluß in Erscheinung, die elektrischen und rechen-technischen Fehler sind um etwa 3 bis 4 Zehnerpotenzen geringer und können vernachlässigt werden. Damit können robuste Aussagen zum Materialverhalten und zu den Unterschieden einzelner Proben nach Alterung und Vorbehandlung getroffen werden. Weiterhin eignen sich die berechneten stationären Kriechgeschwindigkeiten zur Extrapolation über Jahre hinweg ohne Genauigkeitsverlust.

## 4 Streulicht- und Specklepattern-Meßtechnik

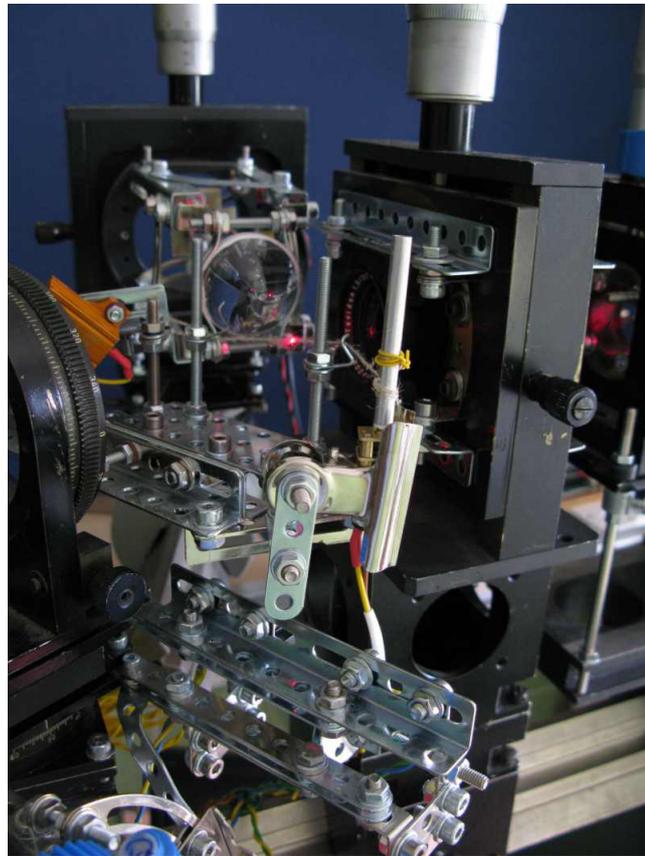
### *Zerstörungsfreie Meßmethode*

Die Aufgabe der zerstörungsfreien Prüfung des Stabilitätszustandes von Geweben in Kulturgütern besteht darin, lokale Mängel an Tragfähigkeit festzustellen. Dazu muß ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Mikrostruktur der Fasern und dem erhaltenen Meßsignal als Orts- und Zeitfunktion hergestellt werden. Will man die lokalisierten Alterungseffekte der Bildleinwände herausholen, so müssen die Volumina bzw. Oberflächenanschnitte der Signalentstehung in der Größenordnung der Faserstärke liegen. Weiterhin soll für die Charakterisierung der Festigkeit und der Kriecheigenschaften der textilen Bildträger der apparative Aufwand so gering wie möglich bleiben. Für den Untersuchungszweck entfallen somit Meßmethoden mit hohem Geräteaufwand wie hochauflösende Röntgendurchstrahlung bzw. Computer-Tomografie <sup>[44]</sup> oder beispielsweise solche zur reinen Farbmessung <sup>[73, 74]</sup>, zur chemischen Analyse mittels physikalischer Methoden wie FTIR-, Raman- oder UV-vis-NIR- Spektroskopie <sup>[75, 76]</sup>. Die akustischen Meßmethoden (Laufzeitmessung, Ultraschallspektroskopie) benötigen zwecks Erreichens der erforderlichen Auflösung Wasser oder Öle als inkompressibles Koppelmedium <sup>[77]</sup>. Integrierende Methoden wie die in der Elektrochemie bekannte Impedanzspektroskopie <sup>[78]</sup>, die Dispersion lokalisiert eingestrahelter Nahfeld-Mikrowellen <sup>[79, 80]</sup>, Laufzeitmessungen <sup>[81]</sup> oder die Messung der Massenverteilung mittels Thermographie <sup>[82]</sup> weisen keine ausreichende Lokalisierung der Signalgenerierung auf. Weit fortgeschritten sind die physikalischen Analysetechniken für Papier-Zellulose und verwandte Materialien. Der Volumenanteil der kristallinen Phase in Zellulose wird mittels Röntgenbeugung (üblicherweise mit der Cu-K $\alpha$ -Strahlung) definiert <sup>[83]</sup>. Hierzu werden die Peakhöhen der Beugungslinien ausgewertet <sup>[84]</sup>. Die magnetische Kernresonanz des <sup>13</sup>C-Isotops eignet sich als Labormethode, erforderlich ist hierzu eine spezielle Präparationstechnik <sup>[85]</sup>. Weitere Methoden bedienen sich der lichtoptischen Spektroskopie im nahen Infrarot- bzw. im langwelligen Ramanbereich <sup>[86]</sup>. Nach subjektiver Einschätzung erfordern diese Meßmethoden einen kostenintensiven Geräteaufwand, speziell geschultes Personal und je nach Methode einen gewissen Präparations- und Meßzeitaufwand. Daher werden Versuche unternommen, mittels thermodynamischer Kennwerte wie der Sorptionsisothermen für Wasser und der Benetzungsenthalpie zu arbeiten, die einen indirekten Schluß auf den Kristallisationsindex erlauben <sup>[87]</sup>.

Nach dem aktuellen Kenntnisstand des Berichterstatters existiert in der verfügbaren Literatur derzeit kein zerstörungsfreies Meßverfahren zur Messung des Kristallisationsgrades der semikristallinen Textilfasern in Kulturgütern. Somit verbleiben vorteilhaft die optischen Meßmethoden, die sowohl auf die mikrostrukturellen Veränderungen der Faserbündel in den Garnen als auch auf deren Kompression durch die anliegenden Zugkräfte ansprechen <sup>[88-91]</sup>. Zur quantitativen Interpretation der optischen Messungen im sichtbaren Wellenlängenbereich existieren grundlegende Modelle, die in diesem Projekt umgesetzt werden können. Ein Beispiel ist die Mikroskopie der biologischen Präparate, u.a. in der medizinischen Anwendung <sup>[92, 93]</sup>. Aus der Untersuchung zur Bildkontrastentstehung in Videoaufnahmen von Haaren <sup>[94]</sup> kann eine quantitative Interpretation der Lichtstreuung mit Reflexion, Beugung und Absorption in Naturfaserbündeln abgeleitet werden. Einen interessanten rechen-technischen Ansatz liefert die Auswertemethode zur raum aufgelösten akustischen Spektroskopie <sup>[95, 96]</sup>. Generell stehen die Methoden der Bildanalyse zur Verfügung <sup>[97-100]</sup>. Dazu trägt insbesondere die rasche Entwicklung der Kameratechnik bei hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Sensoren gekoppelt mit spezifischer Software.

### ***Streulichtmessung***

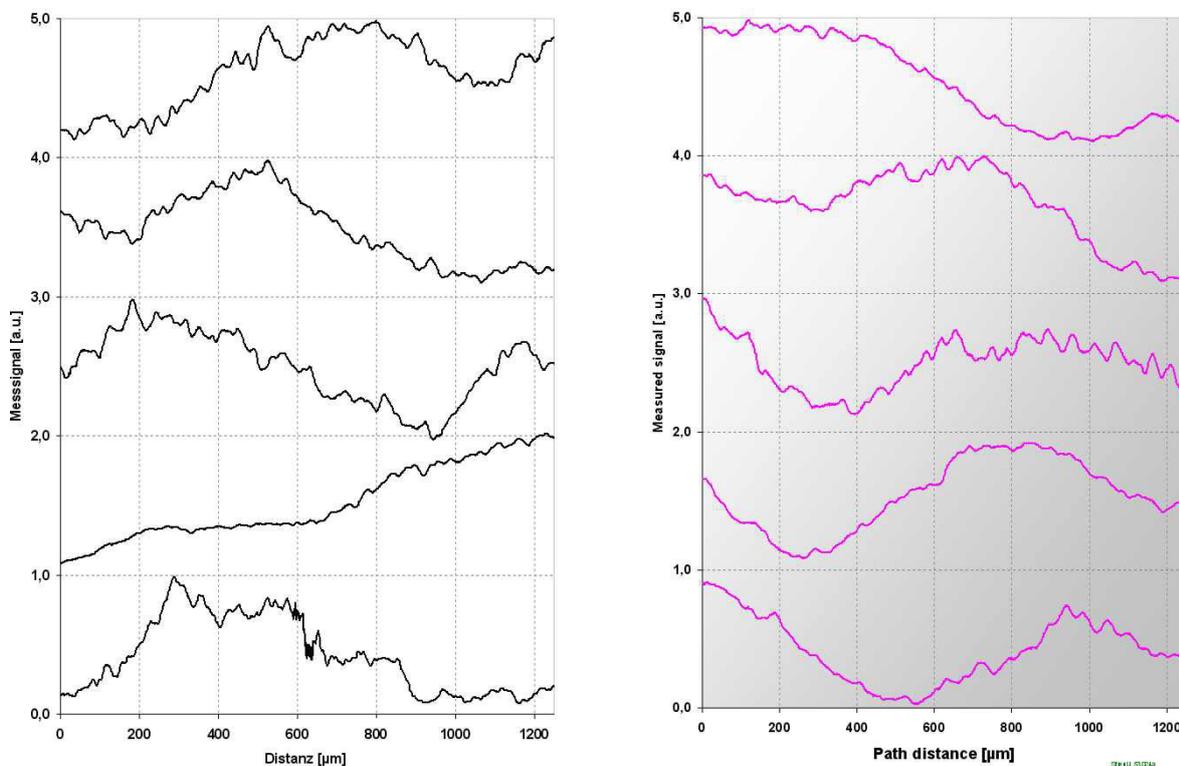
Grundsätzlich wertet die hier in diesem Projekt angestrebte Meßtechnik die in der Streuung kohärenten Laserlichts erzeugten räumlichen Intensitätsmuster aus, wobei die streuenden Mikrovolumina zeilenförmig durch die Gewebe geführt werden. Im Gegensatz zur konventionellen Specklepattern-Meßtechnik sind dazu keine Kohärenzlängen der Laser im Dezimeterbereich erforderlich; das Meßobjekt kann sich während der Messung in  $\mu\text{m}$ -Schritten bewegen. Zur Ansteuerung reichen kostengünstige Diodenlaser im Leistungsbereich einiger 10 mW aus. Die Fokusgeschwindigkeit im Bereich einiger  $\mu\text{m s}^{-1}$  ermöglicht die genaue Messung und Auswertung kurzer Garnstrecken im Bereich weniger Millimeter Länge. Laufende Versuche zeigen, daß sich auch kleinste Proben aus historischen Gewebebruchstücken einkleben und mit genauen Ergebnissen ausmessen lassen. Die Streulichtmeßtechnik im ICR-Labor ist mit einem rechnergesteuerten Vorschub für die Garn- und Fadenproben versehen, mit dem die Proben vorgeheizt, befeuchtet und dann mit einer Auflösung in der Längsachse  $\approx 200 \text{ nm}$  / Meßpunkt abgetastet werden, Bild 23. Damit können Fasermuster ab  $\approx 5 \text{ mm}$  Gesamtlänge präzise charakterisiert werden.



**Bild 23: Probenführung zur automatisierten Streulichtmessung an Garnen und Fasern mit Mikrofokus**

Der Laserfokus wird im Garn, bestehend aus einigen 10...30 Fasern, oder in einer herausgezogenen Faser bewegt. Damit läßt sich die Homogenität entlang der Garn- bzw. Faserachse ermitteln. Ein Vorteil dieser Methode besteht darin, daß man bereits aus kurzen Gewebeproben die gewünschte Information erhält. Beispiel ist ein  $\approx 1 \text{ cm}$  langes Faserende mit  $\approx 500$  Strukturelementen.

Die einzelnen Garne werden aus den Geweben herausgezogen und mit einer konstanten Federkraft ( $0.26 \pm 0.02$ ) N vorgespannt. Gemessen wird die Streulichtintensität, die aus der Umgebung eines Laserfokus mit Gaußradius  $\approx 3 \dots 4 \mu\text{m}$  im Garn emittiert wird. Die intakten Fasern der unbeschädigten Garne leiten das Laserlicht über Strecken bis zu einigen 10 ... 20 mm weit. Wird der Laserfokus mit einer Geschwindigkeit  $\approx 3 \dots 7 \mu\text{m s}^{-1}$  in der Garnachse bewegt, so entstehen durch die unterschiedlichen Dicken der Faserbündel und der dadurch bewirkten örtlichen Kompression der Fasern verhältnismäßig langwellige Schwankungen der Streulichtintensität, Bild 24.. Der Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Meßpunkten erreicht mit  $\approx 700 \text{ nm}$ , weit unterhalb der Makromoleküllängen  $> 10 \mu\text{m}$  bis  $> 100 \mu\text{m}$ , die erforderliche Auflösung. Die Fluktuation der Streulichtintensität verläuft ungleichmäßig über der Garmlänge. Auf homogene Abschnitte folgen solche mit feineren Strukturen. Die Spektralanalyse der Periodogramme (das sind Auftragungen zur Häufigkeit in Frequenzbereichen) liefert ein Maß für die Inhomogenität der Mikrostruktur der Polymerfasern.

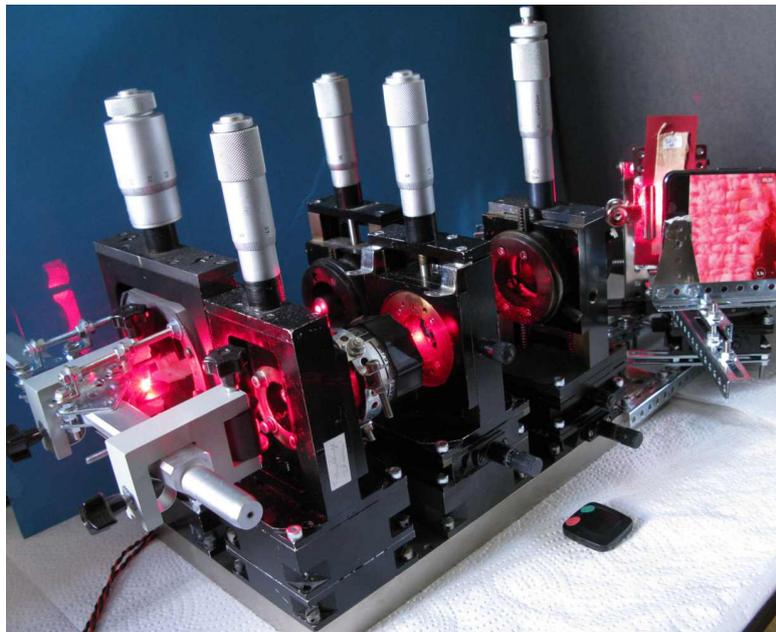


**Bild 24: Streulichtmessungen an Polymergarnen unterschiedlicher Mikrostruktur — links „Neues Leinen, gewaschen“, mittlerer Peakabstand  $\Delta L = (15.1 \pm 2.8) \mu\text{m}$ ; rechts „Altes Leinen“, mittlerer Peakabstand  $\Delta L = (38.6 \pm 4.5) \mu\text{m}$**

Die Streulichtmethode eignet sich zur Charakterisierung einzelner Fasern und von Garnen, die aus nur wenigen, bis etwa 30 Fasern bestehen. Der Meßaufbau ist aufwendig und muß in einer Dunkelkammer betrieben werden. Deshalb wird die Streulichtmessung in einer frühen Projektphase beendet und dient heute zur Charakterisierung von Fasern mit künstlicher Alterung durch Temperatur, Feuchte und Korrosion, wobei dieselben Garnabschnitte *während* der optischen Messung thermisch und chemisch belastet werden.

### ***Specklepattern-Meßtechnik***

Kohärentes Laserlicht wird in der Bildebene fokussiert. Sobald dort in einem Objekt örtliche Gangunterschiede erzeugt werden, überlagern sich zahlreiche Wellenfronten, und die durch deren Interferenz entstehenden Hell-Dunkel-Kontraste erzeugen ein Fleckenmuster in der Sensorebene der Kamera, daher der Name *Speckle Pattern*. Zahlreiche Anwendungen verwenden Specklepattern zur präzisen Messung der räumlichen Bewegung von Körpern. Dazu werden feinste, Licht streuende Partikel auf die Oberfläche der nichttransparenten Körper aufgebracht, vgl. beispielsweise <sup>[101]</sup>. Mehrfachlasersysteme und Modulationstechniken ermöglichen eine wesentliche Steigerung der Genauigkeit und der Empfindlichkeit <sup>[102-104]</sup> In den semikristallinen Fasern der Textilgewebe wird das Laserlicht ebenfalls vielfach gebrochen, totalreflektiert und auch teilweise absorbiert. Dadurch können nicht nur Oberflächenstrukturen, sondern auch mikroskopische Binnenstrukturen der Fasern zur Ausbildung der Specklepattern beitragen. Der Vergleich aufeinander folgender Specklepattern entlang der Kett- oder Schußrichtung der Gewebe kann zur Ausmessung dicht nebeneinander liegender Mikrostrukturelemente in den Fasern herangezogen werden.



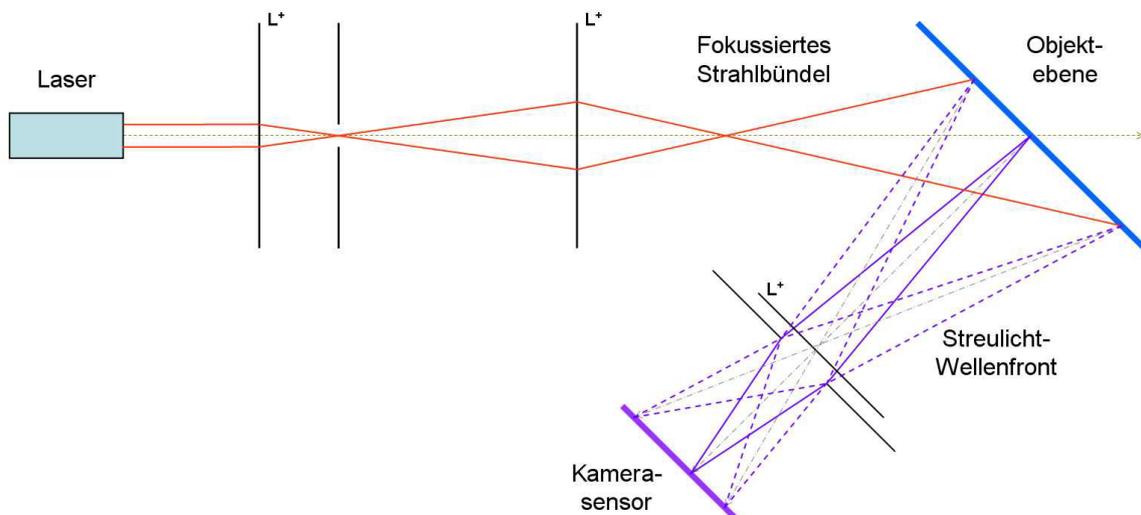
**Bild 25: Laborversuchsanordnung zur kontinuierlichen Specklepattern-Messung**

Eine Versuchsanordnung ermöglicht die kontinuierliche Aufnahme von Videosequenzen bei horizontaler Relativbewegung des Meßsystems gegenüber der Gewebeprobe mit konstanter Geschwindigkeit. Dazu werden der Laser, die Kondensorlinse, die Lochblende, das Projektiv und die Kamera jeweils in den 3 Raumachsen justiert. Der Probenhalter wird auf einer präzisen Linearführung mit einer konstanten Geschwindigkeit ab  $\approx 0.5 \mu\text{m s}^{-1}$  bis zu maximal  $\approx 35 \mu\text{m s}^{-1}$  horizontal an dem Aufbau vorbeibewegt, Bild 25. Mit der Framerate 14.6 Bilder pro Sekunde entspricht ein Bildabstand dem Probenweg von  $\approx 34 \text{ nm}$  bis  $\approx 2.4 \mu\text{m}$ .

Die Speckle-Größe beträgt

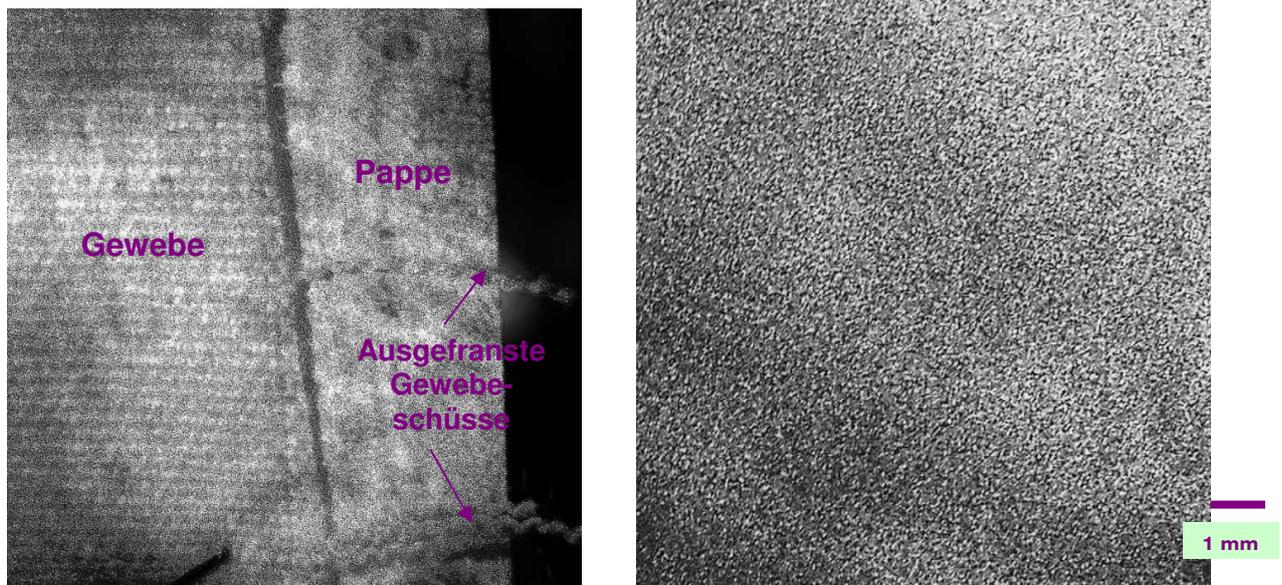
$$\Delta x_{sp} = 2.44 \frac{\lambda b}{D}$$

mit  $\lambda$  der Laserwellenlänge,  $b$  dem Abstand zwischen Kameralinse und -sensor,  $D$  dem Linsendurchmesser und kann somit durch die Wahl und Montage der Optikkomponenten eingestellt werden, vgl. z. B. [105]. Die Intensitätsverteilung der Speckles in der Sensorebene der Kamera folgt einer Rayleigh-Statistik [106]. Zur Rauwertmessung existieren aktuelle theoretische Modelle, insbesondere zur *Digital image correlation* zwecks Verformungsmessung [107, 108]. Dazu existiert eine spezielle Interessentengemeinschaft [109]. Aus den verschiedenen Möglichkeiten des optischen Aufbaues wird in diesem Projekt die einfachste Beleuchtungs- und Abbildungsmethode verwendet, bei der das Specklepattern mit einer Videokamera abgefilmt wird. Die aufeinanderfolgenden Videoframes werden aus dem Film entnommen und miteinander verglichen. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, daß keine Aufspaltung des primären Laserstrahls in einem Strahlteiler zur Erzeugung eines Interferenzbildes erforderlich ist. Die einfache Optikkonstruktion erfordert die Auswertung, zur Erledigung des Bildvergleichs. Neben der so erzielten Robustheit der Optik entsteht ein weiterer Vorteil dadurch, daß die Rechentechnik in weiten Grenzen beliebige Zeitabstände (im Video) bzw. Ortsabstände (in der Probenebene bei bewegter Probe) ermöglicht. Damit lassen sich bei bekannter Relativbewegung Probe / Laser die Strukturunterschiede unterschiedlicher Reichweite quantitativ ermitteln. Während sich die meisten Arbeiten mit der interferometrischen Ausmessung rauher Oberflächen z. B. zur hochgenauen Bewegungsmessung diffus reflektierender Oberflächen beschäftigen, besteht im Rahmen dieses Projekts die Möglichkeit, zusätzlich zur Oberflächentopografie vor allem eine Information aus der Mikrostruktur der Gewebe zu erhalten. Der Grund besteht darin, daß das Laserlicht in die Fasern eindringt, dort teilweise absorbiert und an den Faseroberflächen andernteils gebrochen und totalreflektiert wird. Es tritt also eine kombinierte Informationsübertragung aus der Oberflächentopographie und aus der Mikrostruktur der Gewebefasern auf.



**Bild 26: Strahlengang zur nichtinterferometrischen Specklepattern-Meßtechnik**

Bild 26 zeigt die optische Anordnung zur Aufnahme aufeinanderfolgender Specklepattern.



a) auf einem Streifen Neue Leinwand vor Pappe    b) auf einer Lackoberfläche, Rauhtiefe  $\approx 6 \dots 10 \mu\text{m}$

### Bild 27: Verschiedene Specklepattern

Die Specklepattern bilden sich je nach Materialoberfläche unterschiedlich aus, Bild 27. Die Optik fokussiert mit einem kurzbrennweitigen Objektiv (40\*, wenige mm Fokusabstand) die Speckle in einer stark divergenten Verteilung auf dem Objekt. Im Specklebild sind die Hell-Dunkel-Kontraste statistisch verteilt. Vorteilhaft ist die hohe Gesamtintensität, es entstehen scharfe Speckles. Für die Abbildungsqualität ist die Fokussierung der Kamera wichtig (die bei den benutzten Industrie-Kameras verschiedener Hersteller automatisch erfolgt). Bei geringer numerischer Apertur ist die Fokussierung größer, einfachere Scharfstellung bei den Geweben, die ausreichende Kontraste liefern. Zur Fokussierung des Primärstrahls auf die Blende wird eine Kondensorlinse mit Korrektur des Astigmatismus und der sphärischen Aberration benötigt. Eine Farbkorrektur ist in den Kameraobjektiven ohnehin vorhanden, hier aber nicht erforderlich (monochromatisches Laserlicht, in den Kameras kann auch der SW-Modus mit erhöhter Auflösung verwendet werden).

### Auswertung der Specklepattern

Der kostengünstige Diodenlaser (mit der Wellenlänge 650 nm) ist mit mehreren parallelgeschalteten Kantendioden strukturiert und weist infolgedessen eine ungleichmäßige Intensitätsverteilung im Specklebild auf. Daher können in einem Gesamtbild kleinere Bildausschnitte mit günstigen Hell-Dunkel-Kontrasten ausgewählt werden. Dort sieht man bei langsam vorbeilaufender Probe die Entstehung neuer Speckles, ihre Wanderung und ihr Verschwinden. Die Specklegröße und ihre Dichteverteilung in der Ebene hängen von der Laseroptik und dem Probenabstand in der Laserstrahlachse ab. Vorteilhaft für die Qualität der Videoaufnahmen ist neben der automatischen Scharfstellung noch die Helligkeitssteuerung der Kameras. Ohne Luftzug, Vibrationen und Geräusche lassen sich ruckelfreie Videos im Minutenbereich über Probenstrecken von einigen mm aufnehmen. Die Auswertung orientiert sich zunächst an den üblichen Rechenmethoden zur Bestimmung des differentiellen Bildkontrastes, vgl. z. B. [100, 110, 111]. Vorausgesetzt wird ein Specklepattern mit ausreichendem Kontrast, stochastischer und isotroper Verteilung. Verglichen werden 2 Bilder verschiedener Probenpositionen. In diesen Bildern wird ein quadratischer Ausschnitt

mit  $(2M+1) \times (2M+1)$  Pixeln ausgewählt. Die Koordinaten im Ausschnitt werden auf einen Schnittpunkte der  $x$ - und der  $y$ -Achse bezogen. Die Verschiebung des Bildausschnitts vom ersten Bezugsbild zum zweiten Vergleichsbild ist durch

$$x^* = u + \frac{\delta u}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta u}{\delta y} \Delta y$$

$$y^* = v + \frac{\delta v}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta v}{\delta y} \Delta y$$

gegeben.  $u$  and  $v$  sind die Komponenten der Ausschnittverschiebung,  $\Delta x$  und  $\Delta y$  die anfänglichen Abstände zwischen einem beliebigen Punkt  $Q$  und dem jeweiligen Achsen-schnittpunkt  $P$ . Betrachtet werden die beiden Funktionen mittlere standardisierte Summe der Differenzen-Quadrate (*zero-mean normalized sum-of-square difference*)

$$d_{ssd} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[ \frac{f(x, y) - f_m}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2}} - \frac{g(x^*, y^*) - g_m}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x^*, y^*) - g_m]^2}} \right]^2$$

und die mittlere standardisierte Korrelationsfunktion (*zero-mean normalized cross-correlation*)

$$d_{cc} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[ \frac{[f(x, y) - f_m] \cdot [g(x^*, y^*) - g_m]}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2 \cdot \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x^*, y^*) - g_m]^2}} \right]$$

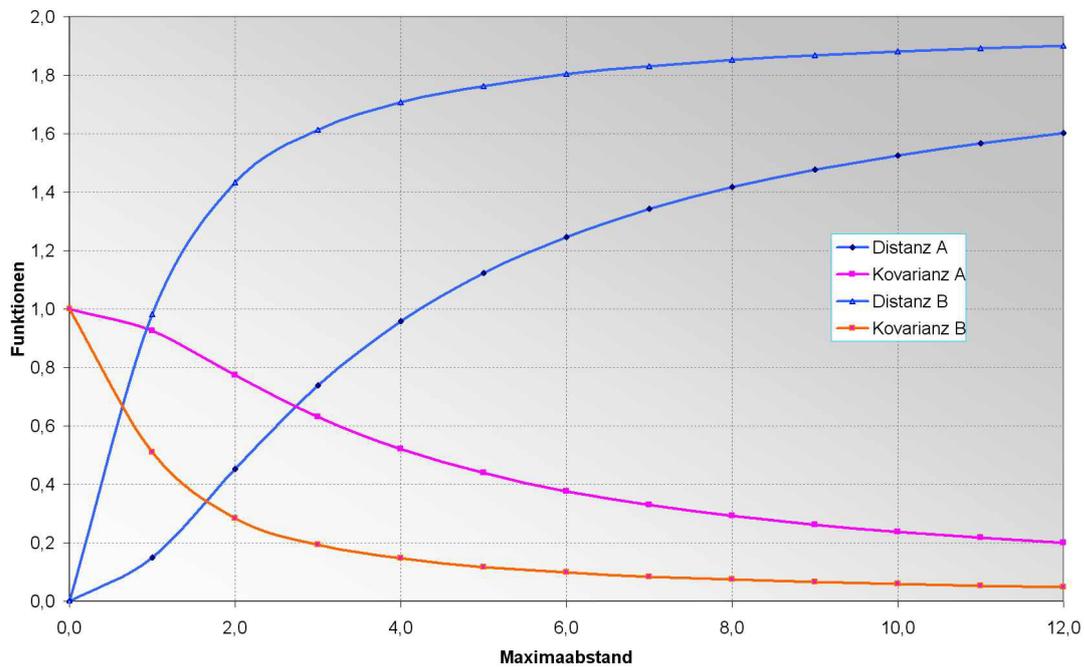
Beide Funktionen enthalten die Grau-Mittelwerte des Ausschnitts im ersten und im zweiten Bild

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x, y)]$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x^*, y^*)]$$

Die einachsigen Peaks mit der quadratischen Helligkeitsfunktion  $f(x) = A - B(x - x_o)^2$  werden entlang der  $x$ -Achse gegeneinander verschoben. Ab Deckungsgleichheit nimmt die Differenz mit steigendem geometrischem Abstand von Null ausgehend zu, die Korrelation nimmt von 1 ausgehend ab. Schmale, schlanke Peaks ergeben eine schnellere Änderung der Distanz / Korrelation. Flache, breite Peaks zeigen eine langsamere Änderung an, jeweils mit  $B$  und  $A$  bezeichnet. Daraus folgt, daß das Rechenergebnis empfindlich von der Fokusqualität der Speckle-Peaks und damit von den optischen Parametern Fokuslängen und Strahldurchmesser abhängt. Vergleichende Messungen müssen demnach mit identischen optischen Parametern durchgeführt werden.

Die Distanz- und Kovarianzfunktionen hängen nach der einfachen Gleichung  $d_{cc} = 1 - 0.5 d_{ssd}$  miteinander zusammen, Bild 28.



**Bild 28: Optische Distanz und Überdeckungsgrad als Funktionen des geometrischen Speckleabstandes an einem einfachen, 1-dimensionalen Beispiel**

## 5 Mechanisierung und Automatisierung der Specklepattern-Meßtechnik

### Gerätekonstruktion zur mobilen Anwendung in der Restaurierungswerkstatt

Der Gerätebau orientiert sich an den optischen und mechanischen Genauigkeitsanforderungen. Eine Robotik mit seriell gestapelten Achsen benötigt wesentlich geringeren Programmieraufwand im Vergleich zu parallelkinematischem Hexapoden, vgl. z. B. [112], und wird deshalb realisiert. Bild 29 zeigt das Funktionsschema. Das mechanische Konzept wird durchgehend beim Aufbau und in der Programmierung der zum Praxiseinsatz in der Restaurierungswerkstatt tauglichen Geräte beibehalten, Bild 30. Industriell verfügbare Geräte der Präzisionsoptik eignen sich wg. des begrenzten Arbeitsraumes und hohen Gewichts nicht für den mobilen Einsatz. Handhabungsautomaten ermöglichen bei entsprechender Baugröße nicht die erforderliche Wiederholgenauigkeit.

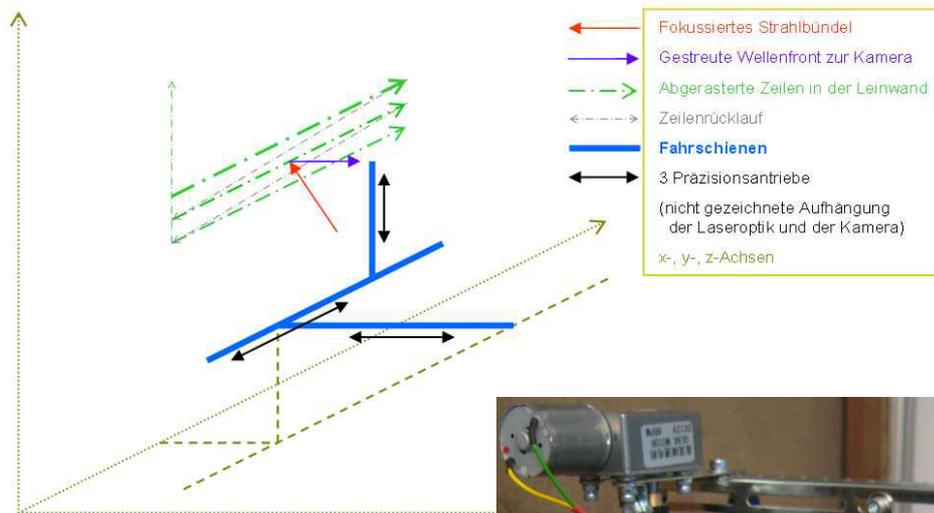
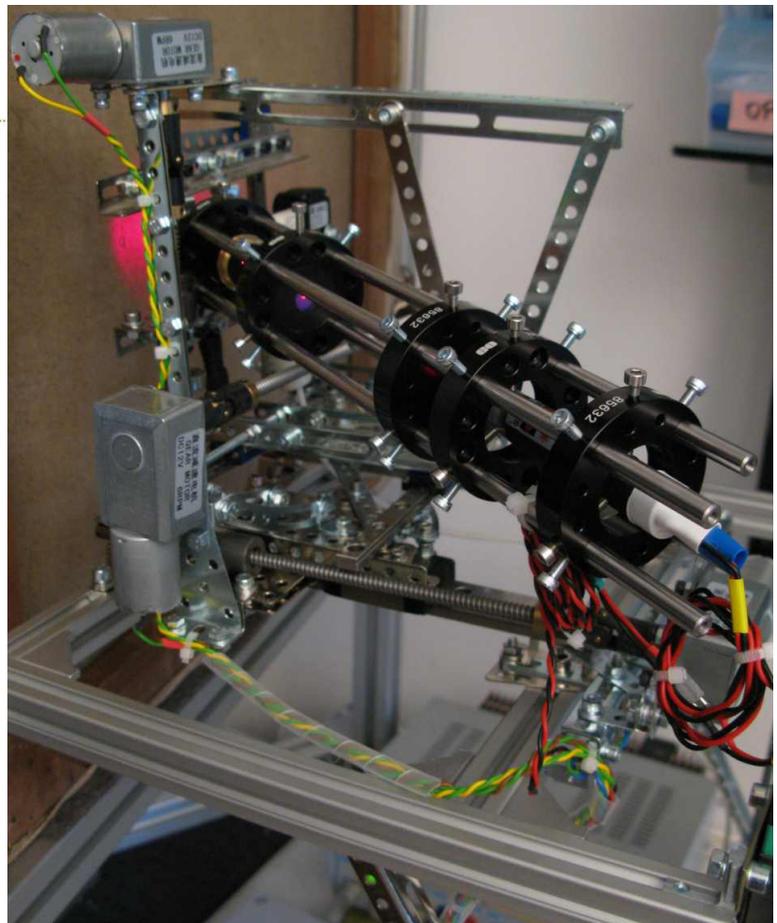


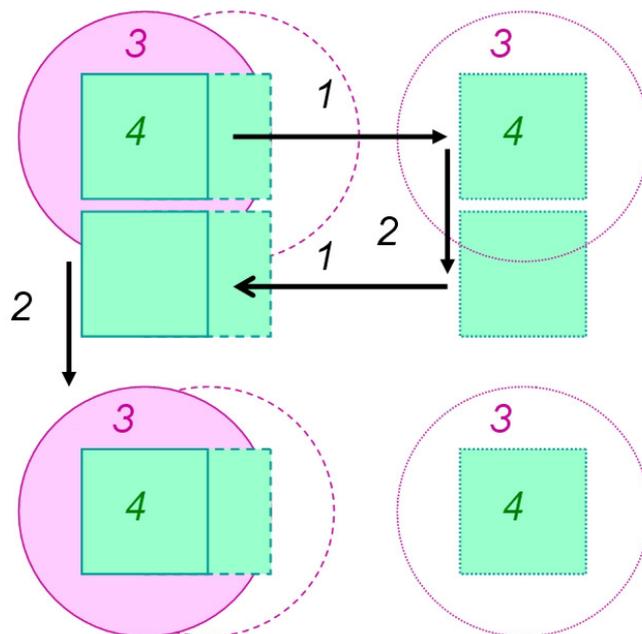
Bild 29: Konstruktion in 3D-gestapelten Achsen

Bild 30: Eine Ausführungsform des Meßgeräts mit Specklepattern auf der Gemälderückseite



Bei der Konstruktion sind zusätzlich zu den Anforderungen an die Positioniergenauigkeit noch die Leistungsdichte beim Messen und Rechnen sowie die Geschwindigkeit des Gesamtablaufs zu berücksichtigen. Ein absolutes Gebot betrifft die Vermeidung der Objektschädigung durch geeignete Verschiebungsmodelle mit aus der Robotik bekannten Sicherheitsbegrenzern. Weiterhin muß entsprechend der Laserschutzklasse IIIb der Arbeitsschutz nach DIN EN 60825-1 gewährleistet werden.

Das für die Praxisanwendung in der Restaurierungswerkstatt vorgesehene Gerät besteht aus elektrisch angetriebenen Präzisionsführungen in jeweils 2 Schienen mit kugelgelagerten Wagen. Eingebaut sind 3 Untersetzermotoren mit spielfreien Getrieben und Spindelvorschub. Die in den 3 Raumrichtungen gestapelten Führungen ermöglichen, daß die Meßoptik mit einer Genauigkeit im µm-Bereich am Meßobjekt vorbeigeführt wird. Mit Präzisionsschienen bis zu ≈0.6 m Fahrweg und entsprechenden Antrieben können Bildträger bis zu mehreren dm<sup>2</sup> abgefahren werden. Bild 31 zeigt ein Schema zum Abrastern von Flächen.



**Bild 31: Rasterschema zur Flächenabtastung mit 1 = Zeile,  
2 = Spalte, 3 =Specklefläche, 4 = ausgewertete Bereiche**

Der leichte Aufbau ermöglicht eine zusätzliche vertikale Voreinstellung. Das Gerät wird in der Achse senkrecht zur Bildebene grob positioniert, die Toleranz beträgt etwa ±5 cm. Die restlichen Einstellungen erledigt der Autofokus der Kamera. Der kompakte Aufbau besteht aus industriell vorgefertigten Konstruktionselementen. Die Kamera blickt ⊥ auf die Objektfläche. Verwendet wird eine robuste Industriekamera, z. Zt. ist dies die *uEye XS* des Herstellers *IDS*, 2592\*1944 Pixel, Pixelfläche 1.4 µm \* 1.4 µm, Pixeltiefe 8 Bit, Autofokus und Weißabgleich, im jpeg-Modus ≈5 MPixel Auflösung. Die Bildfläche der Videoframes orientiert sich an der Brennweite des Projektivs und beträgt zur Zeit ≈7...8 cm<sup>2</sup>, so daß eine

Fläche von beispielsweise  $10 * 20 \text{ cm}^2$  in einer Serie gemessen und ausgewertet werden kann. Alternativ werden Kameras der Hersteller *ImagingSource* und *Kern Optics* untersucht. Die Implementierung der jeweiligen Kamerasoftware in das Meßprogramm ist allerdings aufwendig.

Bild 32 zeigt die aktuelle Gesamtkonstruktion des Geräts. Von Seiten der Restaurierungstechnik kommt der Vorschlag, ein Gerät mit geringer Höhe der Kameraachse  $\approx 10 \text{ cm}$  über dem Fußboden zu bauen. Eine vertikale Blickachse zum Vermessen flach auf dem Tisch liegender Objekte scheint (zumindest heute) nicht erforderlich.



Bild 32: Aktuelle Gerätekonstruktion

### Elektronische Ansteuerung, Betriebssoftware

Die Geräteansteuerung erfolgt über einen Mikroprozessor aus der Familie *MSP430* des Herstellers TI. Dieser ist über Vor- und Leistungsverstärker mit der Geräteelektrik verschaltet. Die Kamera wird direkt aus dem Steuerungsprogramm betrieben. Vorgesehen ist mit Blick auf die stark variierenden Absorptions- und Reflexionseigenschaften der Meßobjekte eine Programmansteuerung der Laserleistung und eines LED-Hilfslichts. Bild 33 zeigt die elektronische Ansteuerung des Geräts.

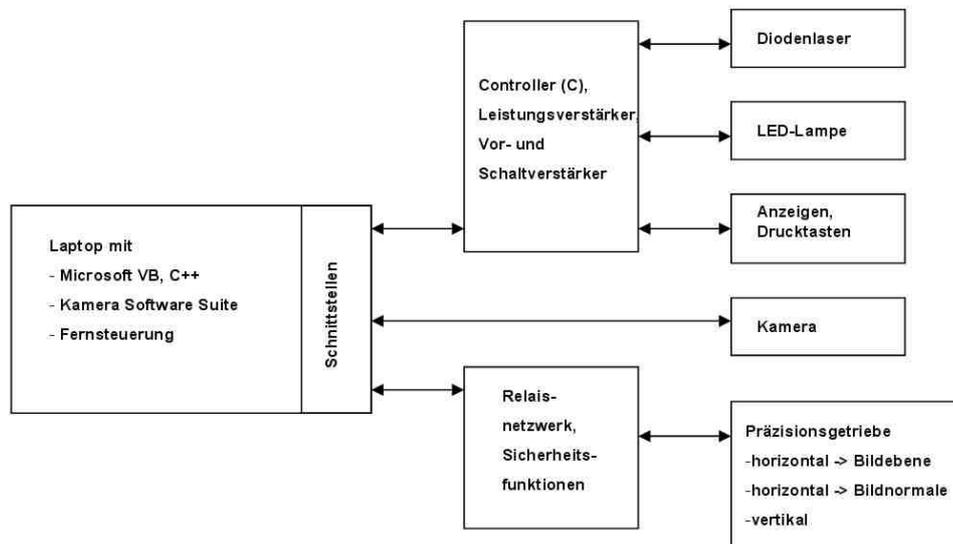


Bild 33: Schaltungsschema zur elektronischen Ansteuerung

Die objektorientierten Steuerprogramme in MS Visual Basic, C, C++ arbeiten mit eigens programmierten Mikroprozessorschaltungen, mit Relaisverstärkern und elektromechanischen Schaltelementen zur galvanischen Trennung der Schaltungen von den Rechnern. Dem entsprechend ist die Software modular aufgebaut. Bild 34 zeigt ein entsprechendes Ablaufschema, wobei das Programm zur Speckleauswertung aus dem Meßprogramm heraus aufgerufen wird.

<b>Positionierung des Gerätes</b>		<b>Einschalten</b>		<small>Die Funktionen per Knopfdruck</small>	
<b>Manuelle Funktionssteuerung</b> ↓					
⇒ Beleuchtung				⇒ Helligkeitsmittelwerte	
⇒ Kamera				⇒ Auswertungsschritt	
⇒ Laser					
<b>Automatikbetrieb</b> ↓					
Hilflicht zur automatischen Abstandsjustage zwecks Scharfstellung					
Laserfokusjustage und –intensität zur Kontrastoptimierung → Specklequalität					
<b>Makrozeilendurchlauf in vertikalen Schritten</b> ↓					
Kamera, Laser ein					
Makrospaltendurchlauf kontinuierlich horizontal, mit jeweils 1 Videosequenz					
Tastenabfrage					
Nein?		Ja?			
Kamera aus, Laser aus; Rückfahrt zum Ausgangspunkt					
Bildvergleich					
Läuft?		Steht?			
Pausentakt					
Kamera aus, Laser aus					
Lesen des aktuellen Zeilenvideos; Auswertung der Makrozeile					
Gemeinsame Darstellung der Korrelations- und Distanzfunktionen in den Makrozeilen					
3D-Darstellung der Korrelationsfunktionen über der Gesamtfläche					

**Bild 34: Programmschema zur Geräteansteuerung mit Aufruf des Auswertungsprogramms**

### Gerätesicherheit

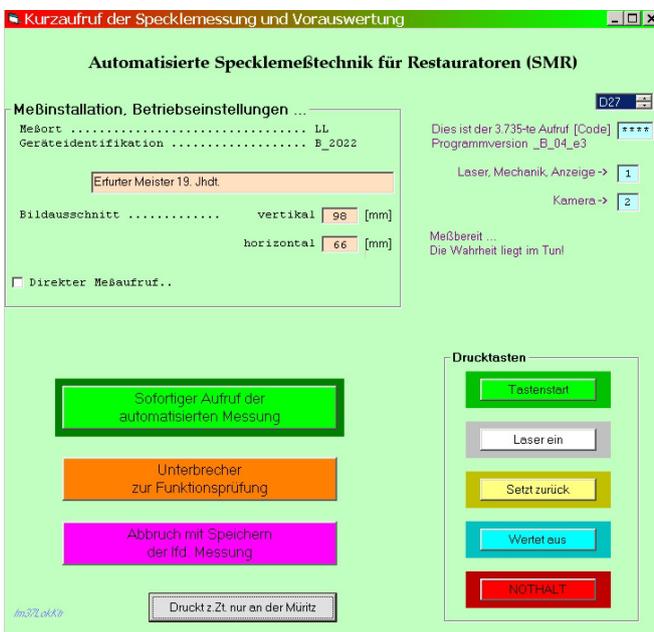
Die Qualitätsspezifikationen für das Gerät zur zerstörungsfreien Strukturmessung an textilen Bildträgern orientieren sich hinsichtlich des Vermeidens von Beschädigungen am Meßobjekt und Gefährdung des Bedienpersonals an der Medizingerätetechnik, vgl. z. B. [113]. Die Bedingungen für eine langfristige Funktionssicherheit vor allem der Software können den für die Bahn geltenden Vorschriften entnommen werden, vgl. z. B. [114]. In der aktuell anstehenden praktischen Erprobungsphase wird eine durchgehende Fehlerdokumentation vorgenommen. Die in der Entwicklung festgehaltenen Skizzen sind digitalisiert und werden ebenso wie die Programmprüfläufe datentechnisch gesichert. Die mechanischen und elektromechanischen Komponenten sind in Dauerbelastungsversuchen >1000 h geprüft. Die Elektronikkomponenten (Mikroprozessoren, Verstärker, Sensoren) arbeiten aus Erfahrung in anderen Projekten über Jahre störungsfrei. Die verwendeten 200 mW-Diodenlaser zeigen über Betriebsdauern über einige 100 h eine Leistungsminderung, die aber in der Auswertung keine Rolle spielt.

## Ergebnisse

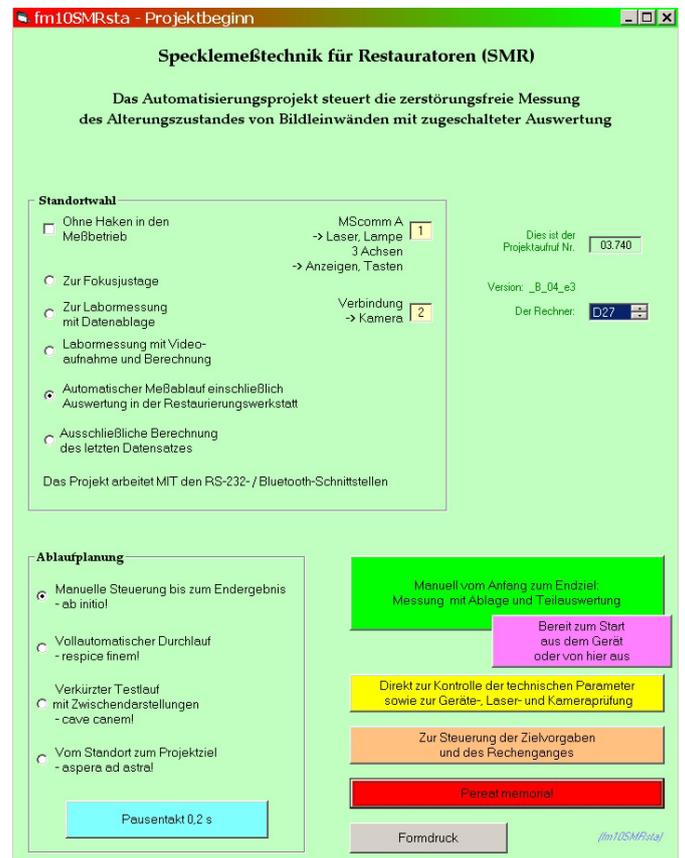
### 6 Meßprozedur und Ergebnisse

#### Programmaufrufe

Das Projekt zur Gerätesteuerung *prSpeRes* mit Datenaufnahme und Datenvorverarbeitung ruft die Projektpakete *prZerMat* zur Auswertung und *prZerPrä* zur Darstellung der Ergebnisse auf, Programmformen in Bild 35. Die abgespeicherten Steuerungsdaten und ursprünglichen Meßvideos ermöglichen eine spätere Videobildverarbeitung mit weiterentwickelten Programmen einschließlich der Optionen einer Mustererkennung <sup>[115]</sup> und Objektraumanalyse mittels neuer statistischer Methoden <sup>[116]</sup>. Damit kann beispielsweise aus



a) Für die Restaurierungswerkstatt

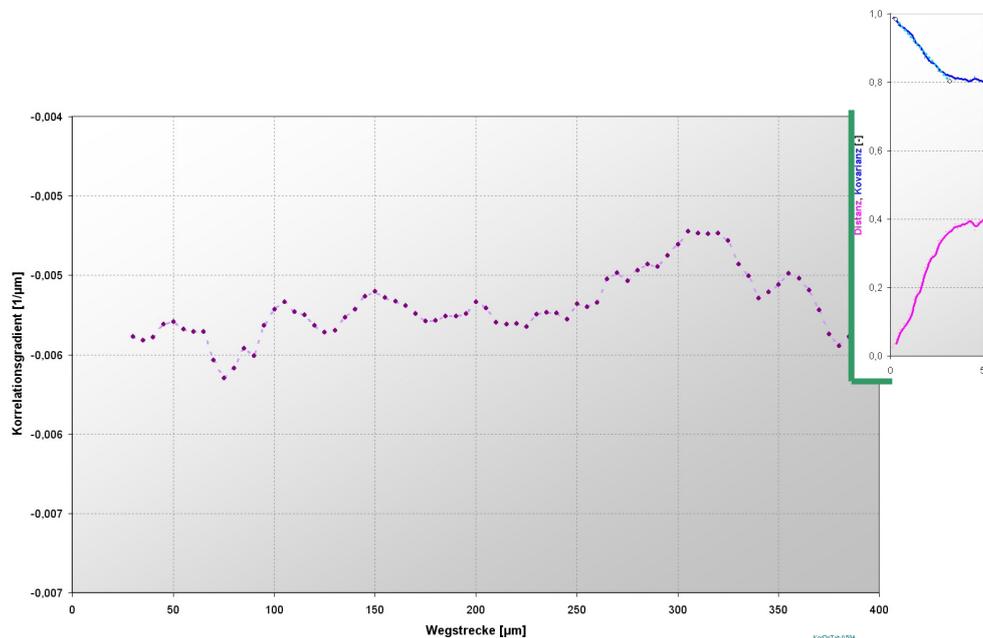


b) Für den Laborbetrieb

Bild 35: Programmoberflächen zum Gerätebetrieb

der Bewegungsmessung und Formveränderung einzelner Speckles auf die Veränderungen in der Mikrostruktur der Fasermaterialien rückgeschlossen werden. In Serienmessungen

werden die optischen Parameter Laserintensität, Primärfokussierung, Projektivblende und – brennweite systematisch variiert. Die Auswertung von Meßmaterial aus den laufenden Versuchen dient zur Spezifikation der Meß- und Rechenmethode: (i) Toleranzen in der Messung und Auswertung nach Justage und Korrekturen; (ii) Bildhelligkeit, Kontrast und Weißabgleich im Zusammenhang mit Bildträgern unterschiedlicher Absorptionseigenschaften; (iii) Störeinfluß durch die Umgebungsbeleuchtung. Interessant sind hier vor allem in der restauratorischen Praxis auftretende Fragen nach der Fleckigkeit der Bildträger z.B. durch Verleimung und verklebtes Fremdgewebe. Auch muß die Auswirkung von Verfärbungen und Schmutz bewertet werden. Schwingungen der Bildträger während der Meßserien sind auszuschließen. Zeitabschnitte in Videosequenzen mit Vibrationen können in der Auswertung herausgefiltert werden. Bild 36 zeigt den Gradienten einer Korrelationsfunktion mit der Korrelationsdistanz  $7,2 \mu\text{m}$  entlang eines vertikalen Streifens im Bildträger aus dem 19. Jahrhundert.



**Bild 36: Korrelationsfunktion entlang eines Streifens, Längenabschnitts  $400 \mu\text{m}$  mit gespreiztem Ordinatenmaßstab; eingeblendeter Ausschnitt mit markierter Steigungsgeraden**

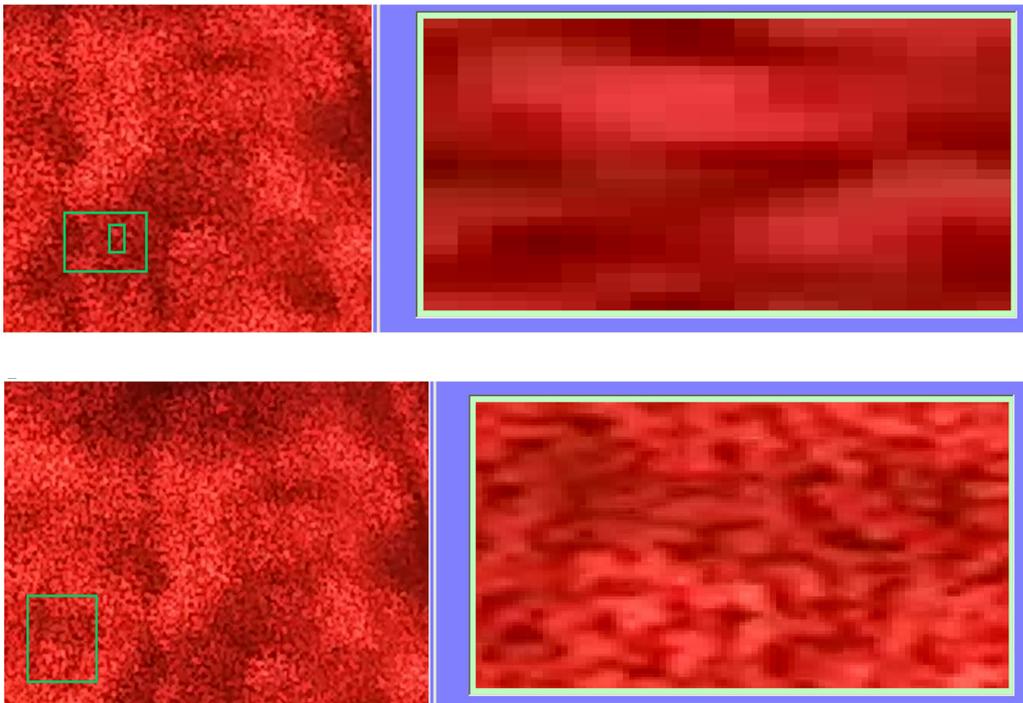
Die Auswertung verschiedener Proben aus Tabelle 1, S. 11 zeigt, daß der mittlere Korrelationsgradient durch die Mikrostruktur der Fasern bestimmt wird. Das Bestimmtheitsmaß (Quadrat des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten) liegt mit  $0,969 \pm 0,028$  nahe bei 1, die Fehlerstreuung bei 2,9%. Die Approximation des Korrelationsgradienten ist somit recht genau. Dessen Mittelwert beträgt hier  $-0,00519 \mu\text{m}^{-1}$  mit Fehlerstreuungen  $\approx 5\%$ . Die Makrostruktur des Gewebefachs führt zu langwelligen Schwankungen um den Mittelwert. Dieser empirische Befund wird durch Meßserien an den verschiedensten Laborproben und musealen Bildträgern in unterschiedlichen Alterungszuständen verifiziert. Wie häufig in der optischen Meßtechnik ist in den Bildserien noch viel mehr Information enthalten, die beispielsweise mit Methoden der visuellen Bildverarbeitung interpretiert werden kann, vgl. z. B. [117].

### Korrelations- und Distanzfunktionen

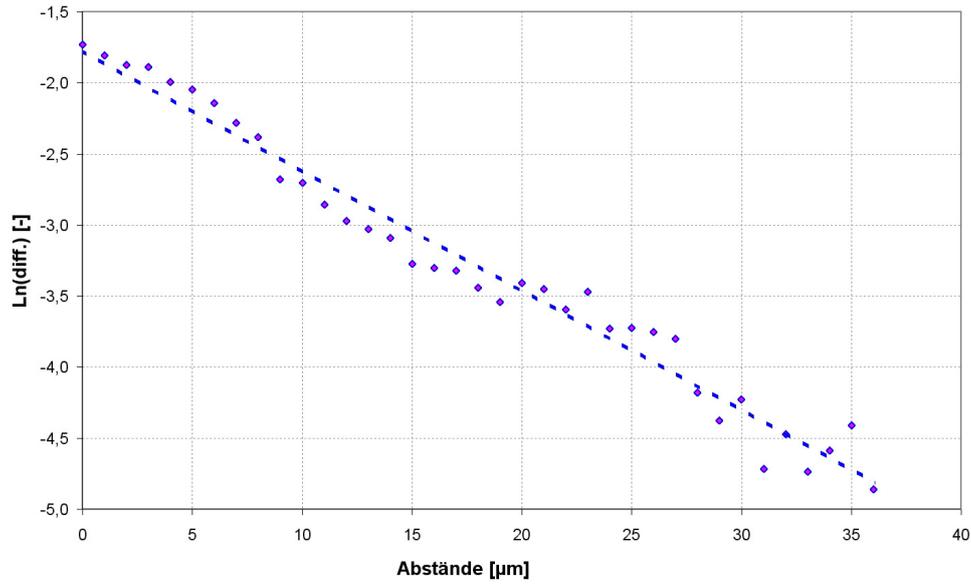
Die in der Bildebene ungleichmäßige Speckleintensität resultiert aus der Kantenemission des Halbleiterlasers, spielt aber infolge des in der Laufrichtung der Videoaufnahme beibehaltenen Intensitätsmusters keine Rolle. Aufeinanderfolgende Frames können hinsichtlich der Probenbewegung auch bei inhomogener Speckleausleuchtung berechnet werden. Um ein geeignetes Mischsignal aus der Laserwellenlänge 650 nm und der diffusen Lichtstreuung zu erhalten, werden die RGB-Farbpixel in ein modifiziertes Rotsignal umgerechnet

$$f_{RM}(x, y) = (6 f_R(x, y) + f_G(x, y) + f_B(x, y)) / 8$$

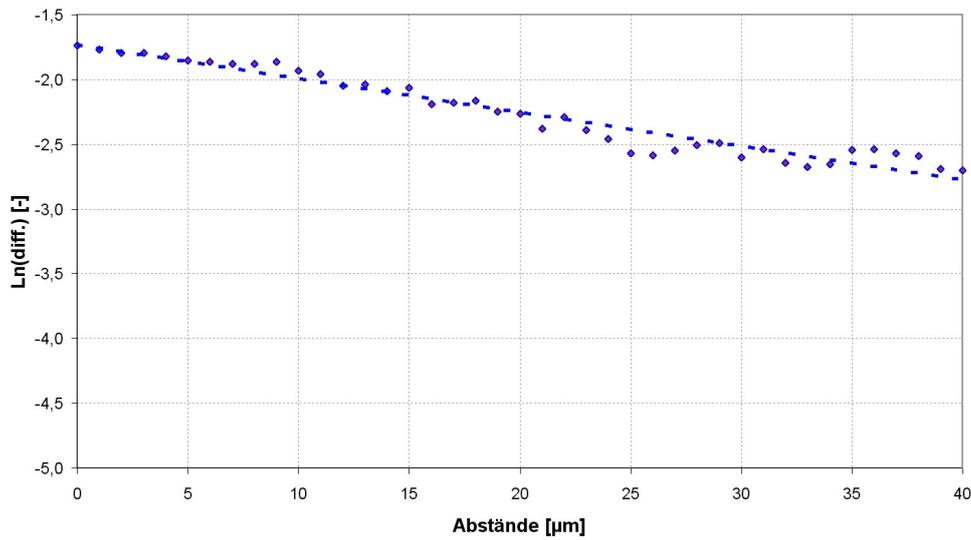
Bild 37 zeigt an 2 Beispielen links die aus den Specklepattern entnommenen Bildausschnitte und rechts eine Verzerrung derselben in  $x$ -Richtung. Damit läßt sich die laterale Intensitätsverteilung über die Wegstrecken  $\Delta x$  visuell kontrollieren. Bild 38 zeigt den Verlauf der optischen Distanz und der Korrelation aus den Gleichungen auf S. 36 für Messungen an *neuer*, unbehandelter bzw. an *alter* Leinwand. Aus den Übergängen der näherungsweise Exponentialfunktionen zu den Asymptoten werden die charakteristischen Strecken homogener Strukturelemente in den Proben berechnet. Das Meß- und Rechenverfahren ist stabil, was sich aus dem Verlauf der optischen Distanz- und Korrelationsfunktionen ergibt. Die Korrelation über geometrische Distanzen  $\geq 100 \mu\text{m}$  mit Werten im Intervall  $\approx 0.75$  bis  $\approx 0.84$  weist die makroskopische Homogenität der Gewebe über mehrere Gewebefächer hinweg nach. Über kurze Distanzen ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen dem *alten* und dem *neuen* Leinen, die durch die unterschiedliche Mikrostruktur der Fasern verursacht werden, Zahlenwerte in der Tabelle 3 auf S. 45.



**Bild 37: Programmoberflächen mit verschiedenen Ausschnitten der Specklepattern (links) und herausgezogenen Verteilungen des modifizierten Rotsignals (rechts)**



a) an „neuem Leinen“



b) an „altem Leinen“

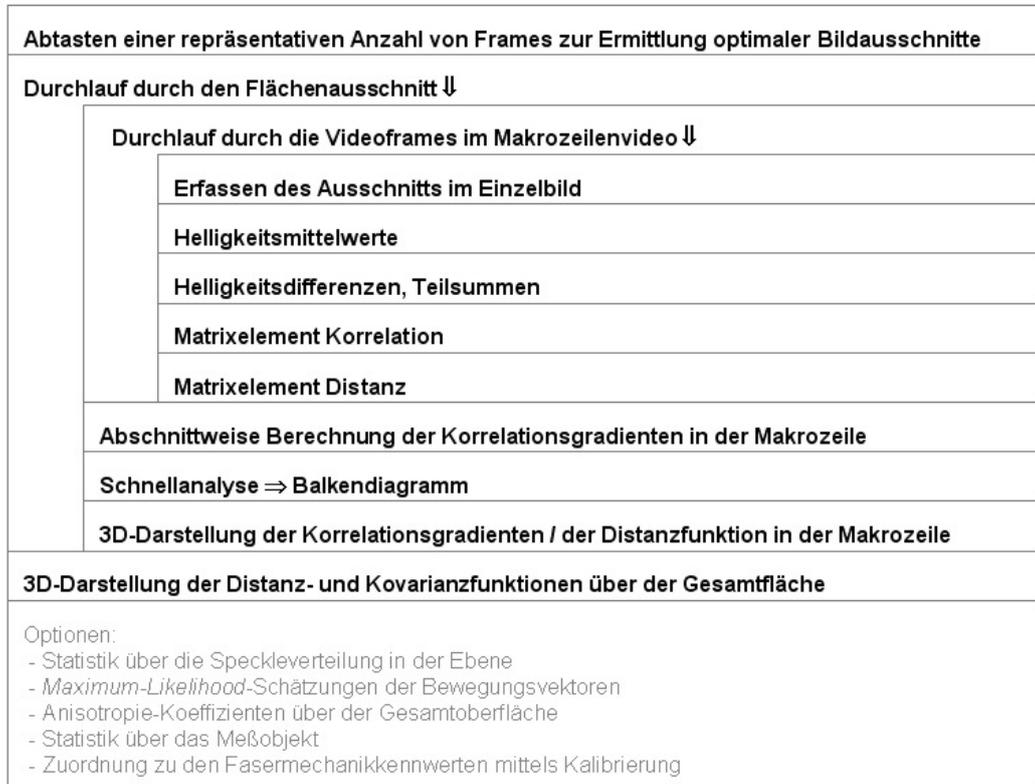
Bild 38: Optische Distanz- und Korrelationsfunktionen der Wegstrecken, logarithmierte Differenzen zu den Asymptoten

Tabelle 3 : Distanz- und Korrelationswerte

Leinwand- probe	Asymptoten		Rel. Fehler	Abkling- strecke
	Distanz	Korrelation		
neu	0.3544±0.0119	0.8226±0.0061	±0.74%	12 µm
alt	0.3226±0.0472	0.8391±0.0237	±2.8%	38 µm

## Ergebnisdarstellung

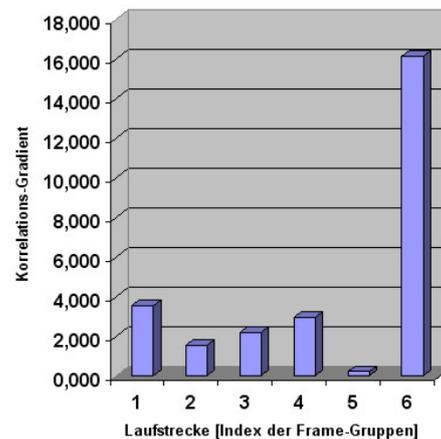
Während das Optiksystm eine Makrozeile abfährt, Bild 31 auf S. 39, sind der Betriebsrechner und der Mikroprozessor durch die Kamerasoftware mit 14% CPU-Leistung verhältnismäßig gering ausgelastet. Deshalb kann parallel zur laufenden Videoaufnahme das Auswertungsprogramm des letzten abgelegten Videos gestartet werden, Bild 39.



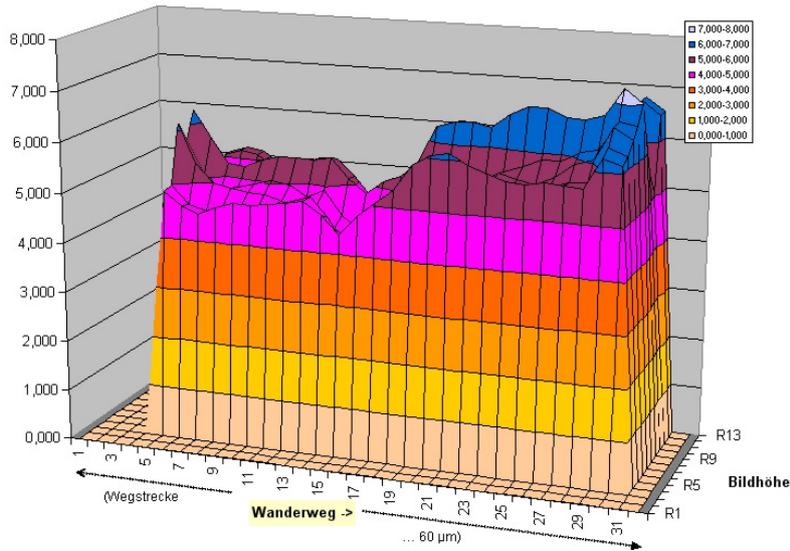
**Bild 39: Programmschema zur Geräteansteuerung mit Aufruf des Auswertungsprogramms**

Während der laufenden Messung zeigt die Anwendung abschnittsweise Balkendiagramme, Diese zeigen den Fortgang der Messungen an, so beispielsweise den Grad der Veränderungen in den Korrelationsgradienten, Bild 40.

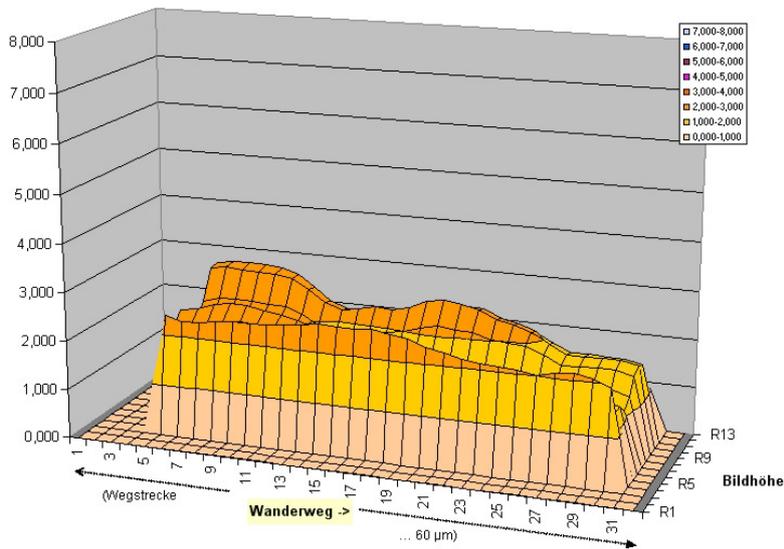
Verlauf über Streckenabschnitte



**Bild 40: Balkendiagramm zur Schnellanzeige der Auswertung**



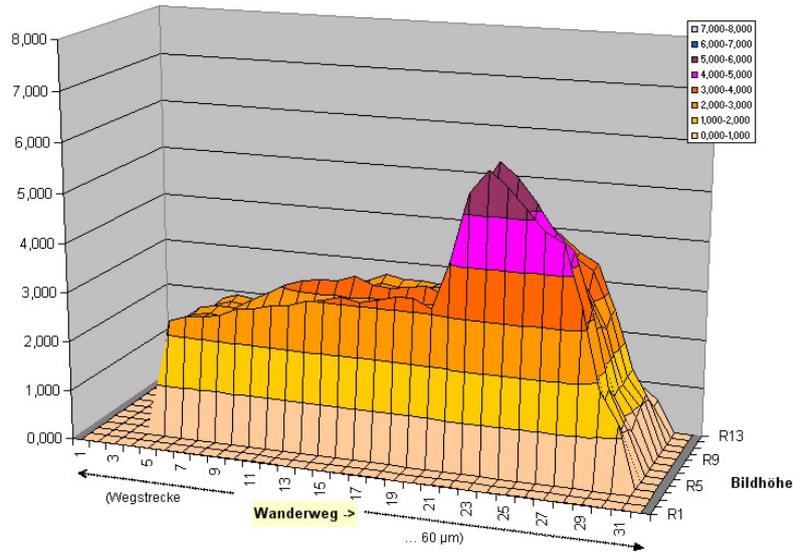
a) Alte Leinwand



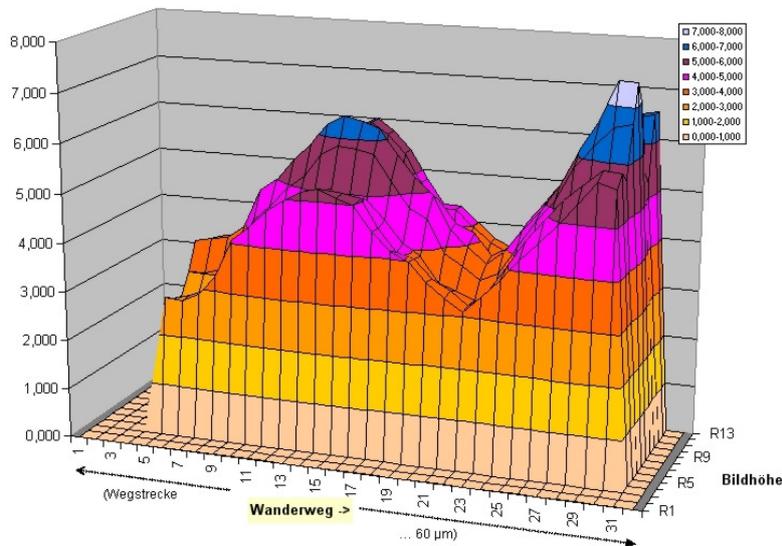
b) Neue Leinwand

**Bild 41: Höhenprofile zu Mikrostruktureigenschaften aus den Speckleserien:  
Verteilung des Korrelationsgradienten über der Bildfläche**

Die Auswertung der Frames im horizontalen Streckenvideo greift einen Flächenausschnitt der Abmessung ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) sowie der Eckenkoordinaten ( $x_i$ ,  $y_i$ ) heraus und läuft durch die Framesequenz im Video entlang der horizontalen Bildachse. In dieser Teilfläche werden die Distanz- bzw. Korrelationsfunktionen sowie die Regressionsfehler berechnet und in ein Datenfeld eingetragen. Entsprechend dem Alterungsmodell (Abschnitt 7, S. 50) entspricht diese Darstellung der Spanne zwischen hohem und niedrigem Kristallisationsindex, also gealterter und neuer Leinwand mit den jeweils erhöhten bzw. geringeren Dehnungs- und Faserbruchempfindlichkeiten. Die Berechnung erfolgt in verschiedenen Auflösungen, bei Rauschen mit



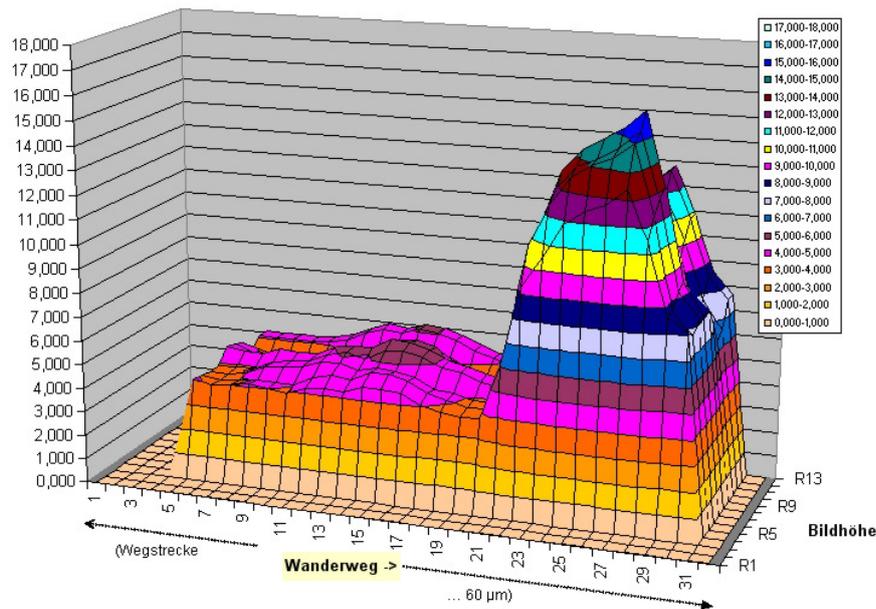
**c) Kleinflächige, punktuelle Strukturunterschiede im historischen Gewebe**



**d) Mikroskopisch inhomogenes historisches Gewebe**

**Bild 41: Höhenprofile zu Mikrostruktureigenschaften aus den Speckleserien: Verteilung des Korrelationsgradienten über der Bildfläche**

lokaler Glättung bzw. Überblendung. Bild 41 a) bis e) zeigt auszugsweise die lokalen Verläufe aus verschiedenen Leinwänden bzw. Bildträgern. Die Korrelationsgradienten können in ein Falschfarbenfeld umgerechnet werden, indem beispielsweise das obere Quantil für niedrige Korrelation (hohe Distanz) in Rot und das untere Quantil für große Korrelation (geringe Distanz) in Grün dargestellt wird. Damit kann eine Landkarte für die



**e) Historisches Gewebe mit lokalen Brüchen**

**Bild 41: Höhenprofile zu Mikrostruktureigenschaften aus den Speckleserien:  
Verteilung des Korrelationsgradienten über der Bildfläche**

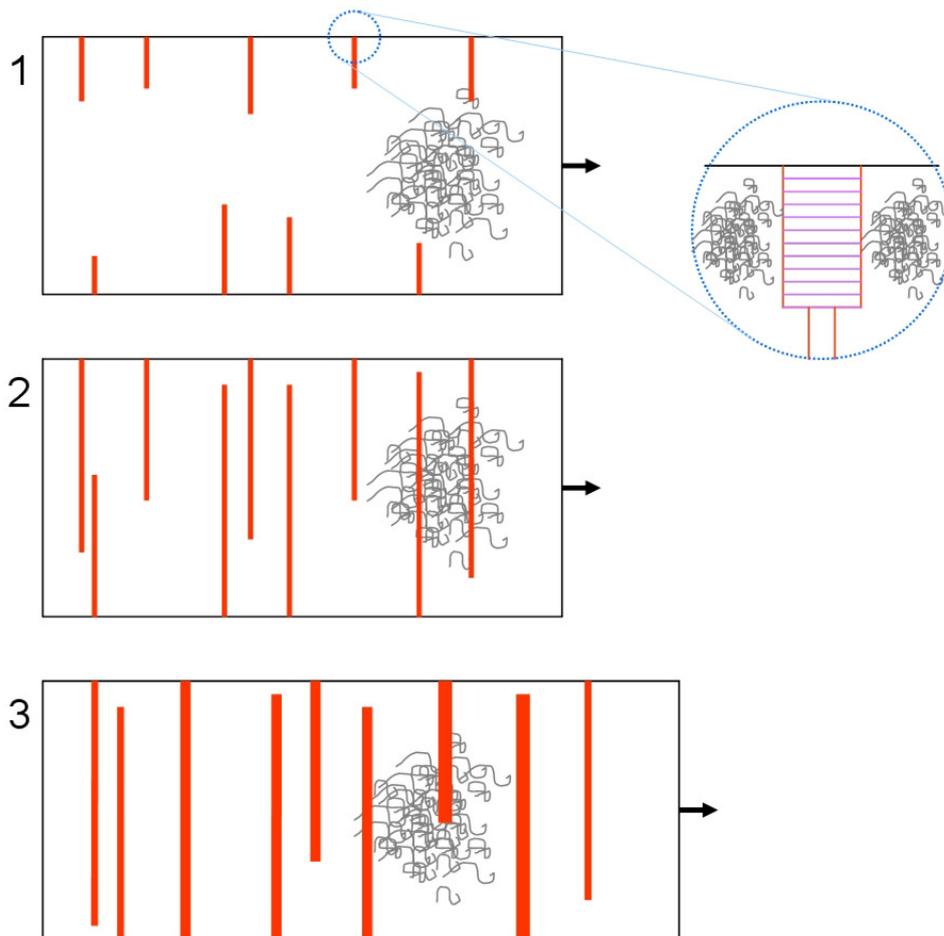
lokale Fehleranfälligkeit der Bildträger erstellt werden. Das Datenmanagement und die Tests der Algorithmen arbeiten wie folgt:

- Steuerungsprogramm mit Interrupts durch Meßprogramm und durch Tasten
- Etappenweise Datenablage und Sicherung auf verschiedenen Rechnern und Wechseldatenträgern
- Überprüfung der Softwareentwicklung durch die Verwendung simulierter Meß- und Steuerungsdaten
- Kommentierung; Bedienungsanleitungen

Gespeichert und dem jeweiligen Versuchszweck angepaßt werden die Steuerungswerte wie die Laser- und Lampenintensität, die Fahrgeschwindigkeiten und Frameraten der Videoaufnahmen (und somit die sich ergebende Bildfrequenz entlang der Meßstrecke). Zur weiteren Softwareentwicklung können die modernen Methoden des *Requirements Engineerings* berücksichtigt werden, d.h. die physikalisch-technischen Systemanforderungen werden zunächst in einer Klassenmethode hinsichtlich der kausalen Zusammenhänge der Operanden analysiert und anschließend in eine Sequenz umgesetzt, vgl. z. B. [118]. Während die zerstörungsfreie Meßmethode in den quantitativen Zusammenhang der Materialstruktur mit deren eingprägten mechanischen Eigenschaften zu bringen ist, wird in der Einbeziehung restauratorischer Bewertungen Neuland betreten, vgl. Abschnitt 14 auf S. 62 dieses Berichts.

## 7 Bewertung von Schädigungen in textilen Bildträgern

Was kann nunmehr die zerstörungsfreie Speckletechnik hinsichtlich einer Bewertung der *Materialmechanik* leisten? Zunächst wird ein quantitativer Zusammenhang der Specklepatern mit der Mikrostruktur der Fasern im Gewebe hergestellt. Sodann existiert ein Zusammenhang der Mikrostruktur mit den mechanischen Eigenschaften der Gewebe. Aus beidem kann hier in diesem Projekt erstmalig ein quantitativer Rückschluß aus der zerstörungsfreien Specklemeßtechnik auf die zeitabhängigen Kriech- und Brucheigenschaften gezogen werden. Mit Blick auf die normalerweise in den Materialwissenschaften über Jahrzehnte laufenden Entwicklungen führt eine derartige Modellbildung zunächst zu einer Arbeitshypothese.



**Bild 42: Strukturmodell zur Mosaikbildung in semikristallinen Faserzellwänden aus kristallinen und amorphen Makromolekülen**

Zur Interpretation unserer zerstörungsfreien Meßmethode der Mikrostruktur unterschiedlich gealterter textiler Bildträger können die folgenden Annahmen getroffen werden. Im Verlaufe des langzeitigen Alterungsprozesses des semikristallinen Materials wachsen die kristallinen Zonen auf Kosten der amorphen Zonen. Dieser Prozeß erhöht die Sprödbrechempfindlichkeit der Faserzellwände. Die Bruchdehnung nimmt ab. Unter gegebenen Belastungsbedingungen nimmt die Wahrscheinlichkeit des Faserbruches zu. Dieser Ablauf kann mittels der Abbildung durch die Specklepatern verfolgt werden. Die integrierende Korrelationsfunktion der Specklepatern charakterisiert die mittlere Länge der kristallinen Zonen entlang

der Fasern. Diese wächst mit fortschreitendem Alterungsprozeß weiter an. Neue Garne mit einem hohen Volumenanteil der amorphen Makromoleküle ergeben kürzere Korrelationsdistanzen in der Größenordnung von  $\approx 10$  bis  $20 \mu\text{m}$ . Garne aus historischen Kulturobjekten oder künstlich gealterte Garne ergeben Korrelationsdistanzen zu  $\geq 30 \mu\text{m}$ . Die Kriech- und Brucheigenschaften der Fasern werden durch die Veränderungen im mikroskopischen Aufbau der Zellwände bestimmt <sup>[119]</sup>. Dabei wird angenommen, daß in den semikristallinen Materialien die kristallisierten Zonen auf Kosten der amorphen wachsen. Bild 42 auf S. 50 zeigt schematisch die Mosaikbildung im Aufbau der Fasern, die einer Berechnung der belastungsabhängigen Strukturentwicklung zugrunde gelegt werden kann. Dabei setzen die Faserbrüche im Verlauf der anelastischen Verformung an Stellen größter Zugspannung ein und schwächen im weiteren Verlauf der Verformung das Gewebe. Das makroskopische mechanische Verhalten der Gewebe unter der Einwirkung wechselnder Zugkräfte wird durch die Kraftübertragung im Gewebefach auf die Garne und innerhalb dieser auf die Fasern bestimmt <sup>[89]</sup>. Dabei hängen die Flächenpressung und die Scherreibung der Garne im Gewebefach empfindlich vom zeitabhängigen Kriechen der Fasern ab. Mit zunehmender Verformung verdichtet sich das Garnvolumen ebenso, wie die Kontaktflächen der Fasern anwachsen. Die Specklepattern in der Gewebeebe können somit als empfindliches Meßwerkzeug für die mikrostrukturelle Homogenität und damit für die mechanischen Eigenschaften „junger“ Bildträger bzw. Inhomogenität lokal bruchempfindlicher, gealterter bzw. historischer textiler Bildträger aufgefaßt werden. Aus der mit großem Tempo fortschreitenden Entwicklung der optischen Meßmethoden für Biologie-, Medizin- und Materialanwendungen ist hierzu ein weiter wachsendes Verständnis zu erwarten. Die Verfolgung *einzelner* Speckles mit neuen Rechenwerkzeugen kann noch weit mehr Information liefern, als dies bisher möglich ist.

## 8 Die neue Meßtechnik als Hilfsmittel für die restauratorische Anwendung

Die Restaurierungstechnik liefert hauptsächlich qualitative Aussagen auf der Grundlage langjähriger Beobachtung der Museumsobjekte. Hier spielt die persönliche Erfahrung des Beobachters für die Objektbeurteilung eine wesentliche Rolle. Beispielsweise können Vergleiche mit empirisch festgestellten Schädigungen zur Beurteilung vorliegender Objekte herangezogen werden. Demgegenüber liefern die physikalischen Messungen quantitative Aussagen zu speziellen Eigenschaften der Untersuchungsobjekte. Im einzelnen sind dies die Kenngrößen der Kriechverformung entsprechend der mechanischen Belastung der Bildträger in der Bildrahmenkonstruktion sowie die optischen Parameter aus den Mikrostrukturen. Somit gilt es, die spezifischen physikalischen Aussagen mit den eher ganzheitlichen restauratorischen Aussagen zusammenzubringen. Die restauratorische Bewertung zum Zustand der textilen Bildträger orientiert sich an den folgenden Kriterien.

- Geweberapport mit Fehlstellen
- Verspannung im Rahmen
- Beschreibung und fotografische Dokumentation insbesondere ungleichmäßiger Stellen
- Streifeninterferometrie zur Makrobewegung
- Infrarot- und Röntgenfluoreszenzbefunde des Bildaufbaues, resultierend aus der Verteilung organischer bzw. anorganischer Stoffe
- Physikalische und chemische Analysen z. B. flüchtiger Komponenten
- Klassifikation der Craquelés in der Malschicht

Um nun die Materialmechanik und die zerstörungsfreie Meßtechnik in die Praxis der Restaurierungstechnik einzubringen, kann ein Beispielkatalog erstellt werden. Dieser faßt die neue Meßtechnik mit den praktischen restauratorischen Beobachtungen und Maßnahmen zusammen. Der *Katalog zerstörungsfreie Meßtechnik für Bildleinwände* umfaßt die Spezifikationen:

**Objektbeschreibung**

- Kulturgut
- Standort
- Restauratorische Bewertung

**Strukturdetails**

- Gesamtbild zur Kartographierung der zerstörungsfreien Prüfung
- Visuell erkennbare Besonderheiten
- Schäden mit Makrobildern im visuellen Spektralbereich
- IR-Bilder zur Tiefenstruktur
- Streulichtprofile mit Zuordnung
- Speckleprofile in beiden Ebenenachsen

**Bewertung des Alterungszustandes und Prognose**

- Gewebespannung; insbesondere die lokalen Maxima ./ Minima
- Garne im Gewebefach: Homogenität, Festigkeit, Anisotropie; Garndrehung
- Garnbrüche, Geweberisse, Löcher und andere lokale Schäden
- Kriechgeschwindigkeit, lokalisierte Fehlerrisiken
- Fasern: Kristallisation, Reckung, mikroskopische Bruchdehnung und -festigkeit

Die neue, zusammenfassende Beschreibung der Struktur von Bildträgern und Textilien in Kulturgütern orientiert sich an verschiedenen technischen Sammelwerken zur elektronischen Aufbau- und Verbindungstechnik <sup>[120]</sup>, zur Textiltechnik <sup>[121]</sup> sowie zu verschiedenen Projektanwendungen in <sup>[122]</sup>. Die neue Dokumentation wird in enger Abstimmung mit der restauratorischen Expertise weiterentwickelt, die Stichworte lauten: Präventive Konservierungsmaßnahmen, Kontrolle und Regelung der Klimabedingungen, Lichtschutz und Schutz vor Schädigungen, Hinweise zu praktischen Kriterien und restauratorischen Techniken.

## Diskussion

### 9 Beitrag zum Verständnis des Materialverhaltens in der Restaurierungstechnik

Bereits frühere Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften pflanzlicher Faserzellstrukturen zeigen unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Kennlinien, die von der räumlichen Orientierung der Kräfteinwirkung in der Längsachse oder in transversaler Richtung der Zellen abhängen <sup>[67]</sup>. Neuere Messungen der Zugverformung am Lumen, d. i. der von den Zellwänden umschlossene Innenbereich der Zellen <sup>[28, 63]</sup>, sowie die Untersuchung der Knickbänder in Flachsfasern <sup>[72]</sup> erklären die mikroskopischen Verformungsmechanismen der semikristallinen Zellwände. Wesentlich für die Verformungseigenschaften ist dabei der mittels Röntgenbeugung definierte Kristallinitätsgrad <sup>[123]</sup>. Zusammenfassend ist festzustellen, daß ein enger Zusammenhang besteht zwischen dem Alterungsverhalten der semikristallinen Zellwände, der reduzierten Bruchspannung und dem darauf bezogenen Kriechverhalten der Pflanzenfasern. Ein erster Anlauf zu zerstörungsfreien Messungen an sich mit fortschreitender Alterung ändernden Mikrostrukturen semikristalliner Leinwände wird mittels einer Streulichtmessung entlang neuer und künstlich gealterter semikristalliner Fasern unternommen <sup>[91]</sup>. Die wesentlichen Untersuchungen zur Mikromorphologie der Pflanzenfasern und zu deren Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften werden im Berichtszeitraum in den französischen Instituten INRAE, *Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement* in Nantes sowie in der *Université Bretagne Sud* in Lorient durchgeführt. Ein wichtiges Ergebnis betrifft die Unterscheidung der mikroskopischen von der makroskopischen Ausdehnung <sup>[124]</sup>, im einzelnen die Punkte:

- Molekulare Bruchmechanik <sup>[125]</sup>
- Fasermechanik <sup>[25, 28, 38]</sup>
- Anelastizität und viskoelastisches Fließen <sup>[58]</sup>
- Hanf aus verschiedenen Wachstumsbedingungen <sup>[66]</sup>
- Kriechen von Hanf in Abhängigkeit von der Luftfeuchte, s. Abschnitt 3 dieses Berichts
- Degradation und Bruch in Pflanzenfasern und in synthetischen Polymeren <sup>[32, 126]</sup>
- Feuchtedehnung in Längsrichtung der Fasern, vgl. den Feuchteeinfluß in Abschnitt 3 dieses Berichts, <sup>[127]</sup>
- Mechanisch induzierte Chemisorption <sup>[128]</sup>

Intensiv untersucht wird die plastische Verformung naturnaher Verbundmaterialien mittels der Funktionen für transversale und axiale Dehnung <sup>[25, 128]</sup>. Die Strukturveränderungen unter gleichbleibender oder langsam sich verändernder Dauerbelastung bestehen in einer Aushärtung der Zellwände, verbunden mit inhomogenem Kriechen der schräg zur Faserachse liegenden Makromoleküle. Beobachtet wird im Anschluß an langandauerndes Übergangskriechen ein Porenwachstum bis zum Faserbruch. Neben der mechanischen Vorgeschichte spielt die Feuchte eine große Rolle <sup>[60]</sup>. So zeigt eine aktuelle Untersuchung von Flachs als Bestandteil von Verbundwerkstoffen, daß relative Feuchtegehalte im Bereich zwischen etwa 75% und 98% zur Bildung von Mikroporen führen, woraus sich dann eine Abnahme der Bruchfestigkeit ergibt <sup>[17]</sup>. Die Fasern in den textilen Bildträgern weisen eine komplizierte Molekularstruktur auf, in der generell eine Verfestigung mit verringerter Bruchdehnung

beobachtet wird. Insbesondere bestehen die Zellwände in Flachs, Hanf und Baumwolle aus einer semikristallinen Mischung der Polysaccharide mit amorphen und teilweise kristallinen Zonen. Die semikristalline Mikrostruktur der Fasermaterialien bewirkt, daß die amorphe Zone den größeren Teil der Verformung trägt. Dagegen verformen sich die gereckten Makromoleküle in der kristallinen Zone nur wenig, bis sie brechen. Neuere Untersuchungen zur Topographie finden auch im weichen Zellinneren (Lumen) eine gewisse Porosität und die dadurch bestimmte Bruchmorphologie <sup>[28]</sup>. Daraus ergibt sich eine systematische Wechselwirkung zwischen der Mikrostruktur und den mechanischen Eigenschaften <sup>[72]</sup>. Eine wichtige Einzelheit betrifft die erst kürzlich entdeckten Mikrofibrillen. Das sind Knickwände, deren Beitrag zum zeitabhängigen viskoelastischen Kriechen erst noch erforscht werden muß.

Hinsichtlich der Interpretation der hier beschriebenen zeitlichen Nachwirkung stehen verschiedene Modelle zur Verfügung. Diese beschreiben abschnittsweise das zeitliche Fließverhalten der linearen wie auch nichtlinearer viskoelastischer Materialien. Allerdings ist die experimentelle Datenlage aus zeitabhängigen Kriechversuchen an Naturfasern begrenzt. Dennoch kann vermutet werden, daß auch in diesen Materialien die grundlegenden Mechanismen der Relaxation der Molekülketten, der Spaltrißbildung und des Porenwachstums ablaufen, wie sie schon vor Jahrzehnten für synthetische Materialien gefunden wurden <sup>[129]</sup>. Neuere Untersuchungen belegen diese Aussage, wonach die Molekülphysik das zeitabhängige Übergangs- und das stationäre Kriechen synthetischer Materialien erklären kann, vgl. z. B. <sup>[130]</sup>. Die Verformung der thermoplastischen semikristallinen Materialien wird demnach eingeteilt in die Abschnitte (i) elastische Dehnung, (ii) plastische Verformung und (iii) Abgleiten der Molekülketten <sup>[58]</sup>. Dadurch werden die Prozesse der Molekülreckung und der intermolekularen Abgleitung in den semikristallinen Polymeren abgeleitet aus der Molekülstruktur mit den kovalenten innermolekularen und van der Waals-Bindung zwischen benachbarten Molekülen. Möglicherweise kann ein analoges Modell für die Flachsfasern entwickelt werden.

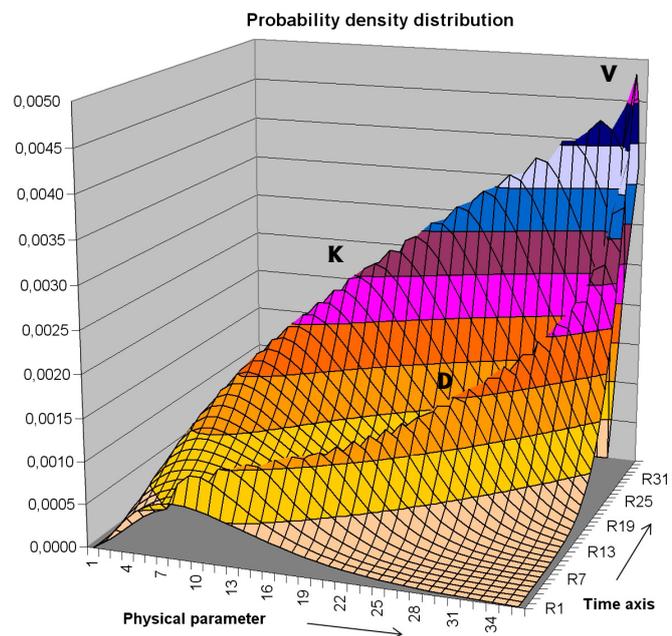
Aus Sicht der Gemälderestaurierung schreiben Stephen Hackney und Gerry Hedley, daß *Leinwand mit zunehmender Alterung schwächer wird* <sup>[8]</sup>. Die Modellierung der Degradationskinetik erfordert eine quantitative Formulierung der zeitabhängigen Kriechgeschwindigkeiten mit Bezug auf die sich verändernde Mikrostruktur und vor allem auf die reduzierte Bruchfestigkeit und das damit verbundene Risiko einer lokalen Schädigung. Damit läßt sich die Einführung der Specklemethode als zerstörungsfreie Meßmethode unmittelbar begründen. Zur Interpretation der Verläufe der Specklepattern entlang der Fasern im Gewebe kann die Mie-Streuung des Laserlichts in einzelnen Baumwollfasern herangezogen werden <sup>[131]</sup>. Dazu ist ein entsprechender rechentechnischer Aufwand erforderlich. Ein direkter Zusammenhang zwischen den streulichtoptisch gemessenen Mikrostruktureigenschaften und der Änderung der viskoelastischen Parameter kann aus Befunden an synthetischen Fasern hergeleitet werden, ist jedoch für die Naturfasern noch nicht verfügbar.

Zur Prognose des mechanischen Alterungsverhaltens der Bildträger ist ein Modell erforderlich, das die mit der langandauernden Belastung zunehmende Schwächung der Materialien beschreibt. Messungen der Linienspannung im Zugversuch sollen im Modell deren Abnahme über Zeitabstände bis zu  $\approx 31$  Jahren liefern. Die gemessenen Punkte reichen jedoch nur bis zu 4.1 Jahren mit einer Streuung zwischen  $\approx 1$  und  $3 \text{ Ncm}^{-1}$ , zitiert aus dem Workshop <sup>[60]</sup>, in der Darstellung in <sup>[59]</sup>. Die heute zur Verfügung stehenden Modelle sind auf homogene synthetische Polymere abgestimmt. Für die Bildträger muß ein neues Alterungsmodell deren beobachtete strukturelle Inhomogenität berücksichtigen, vgl. Abschnitt 6 dieses Berichts. Qualitativ unterschiedlicher Ansätze können verwendet werden:

- *Black Box*-Betrachtung mit einem Schädigungsfaktor ohne Bezug zur Struktur
- Einbeziehung des mit fortschreitender Schädigung zunehmenden Kristallinitätsgrades der Polysaccharid-Makromoleküle in den Zellwänden
- Die vom Kristallinitätsgrad abhängige Versprödung mit Abnahme der Bruchdehnung und Zunahme der Elastizitätsmoduli

Eine in vielen technischen Anwendungen komplexer Systeme umgesetzte Methode stammt ursprünglich aus der Elementarteilchenphysik. Dazu werden Annahmen getroffen zu einer Wahrscheinlichkeitsdichte von Fehlerereignissen. Im Falle der textilen Bildträger sind das die Faserbrüche als Funktion der Mikrostruktur und der Belastung. Mit einem Driftterm (wohin wandert das System?) und einem Rauschterm (wie schnell verflachen sich aufgebauete Spitzen?) ergeben sich aus der *Fokker-Planck-Gleichung* die unterschiedlichsten Entwicklungen <sup>[132, 133]</sup>. Es lassen sich kombinierte Mechanismen studieren, die zum Versagen führen, beispielsweise ein Kriechvorgang und ein Diffusionsausgleich, Bild 43.

**Bild 43: Statistische Modellrechnung zum gleichzeitigen Kriechen und Diffundieren:  
D = Diffusionskinetik  
K = Kriechkinetik  
V = lokales Versagen**



Einer konkreten Anwendung auf die Schwachstellenentwicklung in textilen Bildträgern steht allerdings noch entgegen, daß die Kenntnis der mikroskopischen Prozesse zur Zeit unzureichend ist. Erfahrungen mit besser bekannten Systemen, beispielsweise in der Mikroelektronik <sup>[134, 135]</sup>, lassen jedoch erwarten, daß diese oder verwandte Rechenmethoden auch hier zur Langfristprognose von Lebenserwartungswerten eingesetzt werden können.

## 10 Einfluß der Ergebnisse auf die Konservierung und Restaurierung

Die Malleinwände müssen verspannt werden, damit die Malschicht nicht bröckelt. Diese Verspannung wird bei größeren Bildern durch Keile vorgenommen. Neue Rahmen sind nach Aussage in ZRW beidseitig verspannbar. Die Ecken der Malleinwände sind somit mit dem Rahmen nicht fest verbunden. Moderne selbstspannende Rahmen werden mit Federn aufgebaut und vor allem für großformatige Bilder verwendet. Aus Kostengründen ist der häufigste Fall jedoch, daß die Keilrahmen nachgebessert werden müssen. Die meistverwendeten Holzrahmen sind elastisch und ändern ihre Abmessungen mit den auftretenden Temperatur- und Feuchteschwankungen. Die Spannung soll möglichst gleichmäßig in der Fläche verteilt werden. Ein Anwendungsbeispiel ist ein Deckengemälde im Erfurter Angermuseum, das beim Umbau mit einem modernen Spannrahmen versehen wurde und nunmehr nicht mehr durchhängt, die Malschicht bleibt glatt. Nach Aussage muß das Bild nicht mehr gewartet werden. Trotz günstiger Einzelfallentscheidungen können jedoch Probleme auftreten. Diese betreffen unter anderem:

- Transportschäden <sup>[24, 136]</sup>
- Schädigungen durch Korrosion und Partikel <sup>[18]</sup>
- Langzeitstabilität textiler Kunstobjekte <sup>[20]</sup>
- Geeignete Meßmethoden zu Schadensbildern von Kulturobjekten <sup>[23]</sup>
- Allgemeine Ratschläge zu Entscheidungen in der Restaurierungstechnik <sup>[19]</sup>

Mit weiteren praktischen Nachweisen wird die zerstörungsfreie Meß- und Rechenmethode einen Beitrag zur restauratorischen Entscheidungsfindung hinsichtlich der Transportfähigkeit, zu den Lagerungsbedingungen und vor allem zur Restaurierungspraxis der textilen Bildträger leisten. Die zerstörungsfreie Messung kann die strukturell stabilen von den mechanisch instabilen Bereichen der textilen Bildträger unterscheiden. Hintergrund ist die lokalisierte Messung und Auswertung, mit der sich die Bereiche unterschiedlicher Stabilität mit ausreichender Genauigkeit in der Bildebene zuordnen lassen. Dies gilt insbesondere für partiell geschädigte Flächenbereiche der Gewebe vor allem im Bereich der Spannvorrichtungen. Eine weitere Option für Anwendungen in der Restaurierungstechnik besteht darin, daß eine möglichst geringe stationäre Kriechgeschwindigkeit der textilen Bildträger erreicht werden soll. Eng damit verbunden ist die zu begrenzende Materialversprödung mit der Gefahr lokaler Faserbrüche. Die Kriechnachwirkung der textilen Bildträger kann auch in der Konstruktion des Rückseitenschutzes berücksichtigt werden. Weiterhin kann die Methode die Konstruktion der Spannvorrichtungen unterstützen, um eine lokalisierte Spannungskonzentration in der Gewebeebe vor allem großflächiger Gemälde zu vermeiden <sup>[59, 137]</sup>. Damit können auch mögliche Fehlentscheidungen, beispielsweise hinsichtlich der Verwendung einfacher Holzrahmen vermieden werden <sup>[138]</sup>. Möglicherweise kann die Specklepattern-Methode mittels einer speziell auf Schwachstellen ausgerichteten Korrelationsrechnung auch einen Beitrag zu speziellen restauratorischen Maßnahmen wie der Verklebung leisten.

Der geplante Katalog wird in Anlehnung an die technischen Beschreibungen in der Materialtechnik und Elektroniktechnologie entwickelt und ermöglicht den Eintrag der Kommentare aus der Restaurierungspraxis. Vorgesehen sind im Zusammenhang mit Herkunft, Beanspruchung und Strukturen quantifizierte Aussagen zu den Punkten (i) Beispielblatt für Gewebetypen; (ii) Strukturinformation; (iii) Mechanikinformation; (iv) Information zum Langzeitverhalten der Bildträger. Die Vorfelduntersuchung alterungsbedingter Stabilitätsverluste an Laborproben kann als grundlegende Entscheidungshilfe für alle zur Erhaltung der Objekte notwendigen Maßnahmen dienen. Die physikalischen Kriterien sind die Übergänge zwischen den Zuständen (i) alle Bindungen geschlossen; (ii) in geringem Maße begonnene Schädigung; (iii) ab einer zu definierenden Grenze geschädigt; (iv) Gefahr des teilweisen oder vollständigen Verlustes des textilen Kulturgutes bei weiteren Belastungen. Beabsichtigt ist eine restauratorische Einteilung nach den Kategorien:

- *Grün* für transport- und ausstellungsfähig unter den üblichen Bedingungen
- *Gelb* mit drohenden Brüchen in lateral begrenzten Flächenbereichen
- *Rot* für verbreitete Bruchempfindlichkeit; Transportverbot; besondere Lagerungsbedingungen; Notwendigkeit präventiver Maßnahmen

Erwartet wird, daß diese Einteilung auf Zustimmung seitens der Restauratoren in den Museen stößt, was der Disseminierung der neuen Meßtechnik förderlich sein sollte. Bei der Beurteilung des Bildträgers ist oft unsicher, ob dieser unter der Einwirkung der erforderlichen Flächenspannung die Malschicht ohne die Gefahr einer weiteren Rißbildung trägt und ein für die sichere Erhaltung der Malschicht ausreichender stabiler Spannungszustand erreicht wird. So entsteht beispielsweise die Frage nach Erfordernis einer Doublierung. Die restauratorische Beurteilung geht hierbei empirisch und eher qualitativ als quantifizierend vor <sup>[16, 139, 140]</sup>. Die präventive Konservierung erfordert Vorentscheidungen auch zum Umgang mit der Altrestaurierung wie z.B. Verklebung und Doublierung <sup>[22, 141]</sup>. Deshalb besteht ein Bedarf an grundlegender Information zur Planung und Durchführung restauratorischer Maßnahmen. Es wird erwartet, daß diese Information durch die Anwendung der zerstörungsfreien Meßtechnik zur quantitativen Beurteilung des Alterungszustandes der Gemäldeleinwände gewonnen werden kann.

## Öffentlichkeitsarbeit und weiteres Vorgehen

### 11 Laufende Arbeiten und weitere Disseminierung

Die Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner ZRW der Erfurter Museen gestaltet sich durch eine kontinuierliche Diskussion sowie durch den Austausch von Dokumenten mit konstruktiver Kritik derselben. Grundlage ist die Bereitstellung wertvollen Materials zur Untersuchung im ICR-Labor, beispielsweise eines Originalgemäldes und von Bruchstücken alter Bildträger, Bild 44 bis 46.



Bild 44: Gemälde aus dem 19. Jahrhundert (67 cm \* 57 cm)



Bild 45: Bruchstücke historischer Gewebe



Bild 46: Die Bildträgerleinwand des Gemäldes in Bild 44

Zum Projektabschluss wird eine erste Version des mobilen Geräts zur zerstörungsfreien Messung des Alterungszustandes von Bildträgern (und Geweben in Kulturgütern) für den praktischen Einsatz in den Restaurierungswerkstätten der Erfurter Museen auf Dauer bereitgestellt.

Die erste exemplarische Anwendung vor Ort erfolgt an Bildern aus dem Bestand der Erfurter Museen, Bild 47. Die Auswertung erfolgt entsprechend Abschnitt 6 dieses Berichts.

**Bild 47: Signatur auf der Leinwand einer Gemäldeskizze von Friedrich Nerly in den Restaurierungswerkstätten der Erfurter Museen mit einem Laserspecklepattern**



Untersuchungsbedarf besteht weiterhin an einem Panoramagemälde mit einer Breite von 123 m und einer Höhe von 14 m. Hier tritt in einem besonderen Fall zusätzlich zur Verspannung die hohe Zugbelastung der Leinwand durch das Eigengewicht auf. Weitere exemplarische Aufstellungen des Meßgeräts können nach Maßgabe der Personalkapazität in verschiedenen Restaurierungswerkstätten der Museen erfolgen. Parallel zur Geräteaufstellung vor Ort werden weitere Garn- und Gewebeproben sowie historische Gewebeausschnitte im Labor stationären Zugversuchen mit Lastwechseln unterzogen. Damit soll die vorhandene experimentelle Grundlage erweitert werden, mit welcher Kriechgeschwindigkeit die belasteten Leinwände über lange Zeitabschnitte irreversibel relaxieren. Die Auflösung der Meßvorrichtung im ICR-Labor liegt z. Zt. für  $\approx 10$  cm lange Gewebeproben bei  $<10^{-9}$  (N/m) $s^{-1}$ . Theoretisch sollte damit eine Abweichung der Dehnungsrelaxation im %-Bereich über  $>10$  Jahre zu extrapolieren sein. Mit den Ergebnissen soll ein allgemein verwendbares Modell zur Viskoelastizität der Bildträger entwickelt werden, das als eine mögliche Bewertungsgrundlage zur Beurteilung der Gemäldeleinwände verwendet werden kann. Die Specklepattern-Meßtechnik wird apparativ handhabbar in den Restaurierungswerkstätten zu Verfügung gestellt. Zunächst ist zusätzlich zum Gerät in den Zentralen Restaurierungswerkstätten der Erfurter Museen in weiteres Gerät ist für den Einsatz in anderen Museen vorgesehen. Ein Gerät verbleibt für Versuchszwecke im Labor.

Hinsichtlich der Zusammenarbeit mit den Zentralen Restaurierungswerkstätten sei auf die gemeinsamen Veröffentlichungen verwiesen <sup>[39, 90, 91, 142]</sup>.

## Fazit

### 12 Methodik mit Anwendungen

Bilder und andere Kulturgegenstände mit textilen Komponenten sind im Laufe der Zeit Alterungsprozessen unterworfen. Insbesondere die Bildleinwände sind in den Depots, vor allem aber in den Ausstellungsräumen der Museen Temperaturschwankungen, Licht, Feuchte und beim Transport auch mechanischen Einwirkungen ausgesetzt. Um die erforderlichen Restaurierungsmaßnahmen mit den unvermeidlichen Einflüssen der Umgebung optimal abzustimmen, ist die Kenntnis des aktuellen Stabilitätszustandes in den Schwachstellen der Sammlungsgüter erforderlich. Die hier beschriebene Meßtechnik liefert quantitative Spezifikationen zur Haltbarkeit der Bildleinwände als Malschichtträger im Spannrahmen der Gemälde. Wesentliches Ziel der praktischen Anwendung ist es, die Restauratoren in ihren praktischen Maßnahmen zu unterstützen, die zum Erhalt der Kulturgüter gegen anthropogene Einflüsse erforderlich sind. Die Ergebnisse dieser Geräteentwicklung können als ein erster Lösungsansatz zur Fragestellung gesehen werden, wie sich Veränderungen in der Mikrostruktur der Bildleinwände bestehend aus semikristallinen Polymeren im Verlaufe langer Alterungsperioden auf die Viskoelastizität auswirken, und wie diese an textilen Objekten des kulturellen Erbes zerstörungsfrei gemessen werden können. Insbesondere leistet die Feststellung mikrostruktureller Eigenschaften mittels der zerstörungsfrei gemessenen Specklepatern und der daraus berechneten Korrelationsfunktionen einen Beitrag zur restauratorischen Erhaltung und Stabilisierung von Gemälden auf textilen Bildträgern. Die jetzt begonnene praktische Anwendung wird sich mit dem Nachweis eines direkten Zusammenhangs zwischen der Mikrostruktur semikristalliner Faserzellwände und den Kriech- und Brucheigenschaften über längere Zeiträume befassen.

Der Geräteaufbau ist einfach zu bewerkstelligen. Das Gerät arbeitet robust, vorausgesetzt eine vorsichtige Handhabung. Der automatisierte Meßbetrieb wird übersichtlich in einer Windows-Oberfläche dargestellt. Dort lassen sich die Funktionsknöpfe Meßstart, Laser einschalten, Unterbrechung und Rückfahrt zur Ausgangsposition, Start der Auswertung und Nothalt mit Abbruch sind selbsterklärend. Diese Aktionen können auch der Einfachheit halber durch Knopfdruck am Steuerungsgerät direkt aufgerufen werden.

Im einzelnen ist die ursprünglich in der Projektbeschreibung vorgesehene Methode der Streulichtmessung durch die vorteilhafte Specklepattern-Methode ersetzt worden, weil diese wesentliche meß- und auswertetechnische Vorteile bietet. Die Messungen laufen in Minutenschnelle. D.h. verschiedene Flächenbereiche der Objekte lassen sich zeitsparend abrastern. Im Verlauf der Aufnahmen geben einfache Balkendiagramme einen ersten Eindruck vom Gewebezustand. Die detaillierte Auswertung von Flächenbereichen ist allerdings noch zeitaufwendig, kann aber selbständig und ohne Aufsicht ablaufen.

Wenn sich museumspraktische Untersuchungen beispielsweise mit der Frage befassen, wie die Leinwandstrukturen wechselnder Luftfeuchtigkeit in einer kleinräumigen Umgebung <sup>[143]</sup> oder eher den generellen klimatischen Bedingungen in den Museumsgebäuden folgen <sup>[9, 61, 144]</sup>, so kann die zerstörungsfreie Messung an solchen Objekten eine Entscheidungshilfe bieten. Von Interesse sind dabei auch die historischen Objekte <sup>[26]</sup>.

### 13 Gerätetechnik, Software und Laborpraxis

Die experimentell ermittelte Konfiguration der Meß- und Rechentechnik stellt einen ersten Ansatz für die automatisierungsfähige Meß- und Auswertungstechnik zur quantitativen Bestimmung des Alterungszustandes von Geweben in den Kulturgütern dar. Aus den bisher durchgeführten Versuchen geht hervor, daß der Aufbau einfach und robust gegen Dejustage ist. Die heute verfügbare Kameratechnik ermöglicht die Verlagerung des unvermeidlichen Justageaufwandes in das Rechenprogramm. Die Specklemethode kommt der Tendenz entgegen, die Physik (hier die Optik und die Mechanik) zu vereinfachen und die physikalischen Anforderungen nach Genauigkeit und Reproduzierbarkeit ebenfalls in die Rechentechnik zu verlagern. Zu klären sind allerdings die Störeinflüsse durch Staub, Klebstoffe, Beschichtungen, Unebenheiten der Gewebe, Risse und Löcher (hierzu kann im Katalog ein Paket „Störungen“ eingerichtet werden, vgl. Abschnitt 8 dieses Berichts).

Die Geräteanwendung läuft in der Restaurierungswerkstatt vollautomatisch ab. Im Labor wird zwecks Überwachung auf die explizite Version umgeschaltet. Nach der Positionierung vor dem Meßobjekt wird das Gerät alle erforderlichen Aktionen selbsttätig vornehmen: Selbstprüfung, automatisierte Kalibrierung des Lasers und Einstellung der Kamera, Aufnahme der Speckle-Videos, deren Auswertung und Ergebnisverdichtung bis zur anschaulichen Ergebnisdarstellung. Die Restauratorin / der Restaurator soll nicht mit für sie / ihn überflüssiger Information belastet werden. Deshalb werden in der weiteren Entwicklung die erforderlichen Funktionen in ein einziges, modular aufgebautes Softwarepaket integriert. Weiterhin zeigt die Erfahrung, daß eine Ferndatenübertragung mit Sammlung von Steuerungs- und Ergebnisdaten im ICR-Labor von großem Nutzen ist. Wesentlicher Bestandteil der Entwicklung ist ein integrales Sicherheitskonzept mit durchgehendem Qualitätsmanagement. Die zukünftige Qualitätssicherung folgt der Nicht-Routineanwendung von Meßgeräten, vgl. z. B. <sup>[145]</sup>. Die Programmentwicklung folgt den internationalen Standards für die Softwaredokumentation, hier z.B. <sup>[146]</sup>. In der Weiterentwicklung soll zur Beschleunigung der Auswertung eine kommerzielle Bilddatenverarbeitung mit schnelleren Rechnern und *Frame Grabber* eingesetzt werden. Die Funktionsdauer der bisher eingesetzten kostengünstigen Halbleiter-Laserdioden macht einen Wechsel nach einigen 100 Stunden Betriebsdauer erforderlich. Hier hilft nur der Einsatz wesentlich kostenintensiverer Laser. Das speziell entwickelte Softwareprojekt orientiert sich an den aktuellen Anforderungen zur Sicherheit und Portierung von Software (Extreme-Programmierung, *Rational Unified Process*, Einbeziehung des Anwenders, in diesem Fall der Restauratoren). Implementiert wird die Fernwartung über einen VPN-Tunnel zum Gerätebetrieb, zur Datensicherung und zum Überspielen aktueller Updates. Sollte vor Ort keine Internetverbindung vorhanden sein oder das lokale Netzwerk eine solche verbieten, so wird die Datenübertragung über Datentelefonie vorgenommen.

## 14 Komplexitätsprobleme, Weiteres

Der Gesamtaufbau der textilen Bildträger mit der durch *Craquelé* teilgeschädigten Malschicht stellt ein mehrkomponentiges mechanisches System dar. Die Spannungsrisse gehen häufig durch die Malschichten hindurch so, daß die zeitabhängige Dehnung des textilen Bildträgers zwar zur gegenseitigen Bewegung der Schichtplatten führt, ein weiteres Abplatzen derselben noch nicht oder nur in reduziertem Ausmaß stattfindet <sup>[147]</sup>. Somit kann die in diesem Bericht untersuchte Dehnung der textilen Bildträger zwar über Schwachstellen Auskunft geben, jedoch noch keine Aussage zum mechanischen Gesamtsystem Gemälde als mechanische Kombination aus Malschicht, Bildträger und Rahmen liefern.

Allgemeine Aussagen zur quantifizierenden Bewertung von Kulturgütern, insbesondere am Beispiel kultureller Architekturobjekte <sup>[148, 149]</sup> basieren ebenso wie die konventionelle technische Zuverlässigkeitsbewertung (Anschnitte 7 und 9 dieses Berichts) auf der Gruppierung statistischer Aussagen. Ziel ist dabei in unserem Falle, die physikalischen Messungen (mechanische an Modellproben, zerstörungsfreie an den Bildträgern) mit der breiten restauratorischen Beschreibung insbesondere von Schwachstellen und erkennbaren Schäden zu verknüpfen. Eine mögliche Berechnungsmethode ist die unscharfe Logik, *fuzzy logics*, wie sie beispielsweise in der sog. „künstlichen Intelligenz“ eingesetzt wird. Die *fuzzy logics* weist qualitativen Aussagen Zahlenwerte zu, mittels derer sich zusammenfassende Bewertungen komplexer Systeme berechnen lassen <sup>[150]</sup>. In den Modellen unscharfer Mengen können Elemente nur bis zu einem Grad einer vorgegebenen Menge angehören. Dieser Zugehörigkeitsgrad wird durch eine Zahl im Intervall  $[0, 1]$  ausgedrückt. Dabei bedeutet 0 keine und 1 eine volle Zugehörigkeit. Unscharfe Begriffe wie „weich“ oder „fest“, „verformbar“ oder „spröde“, „rißempfindlich“ oder „stabil“ lassen sich durch unscharfe Mengen beschreiben. Sie werden als linguistische Werte bezeichnet. Ein Wertebereich wird in linguistische Werte aufgeteilt, so daß jeder Wert mindestens einer unscharfen Menge angehört. Diese Aufteilung wird als unscharfe Fuzzy-Zerlegung bezeichnet mit dem schrittweisen Vorgehen: Parameterzerlegungen → Liste möglicher Fuzzy-Mengen mit linguistischen Werten → Liste von Operationen, z. B. zu Komplementär- und Vereinigungsmengen, Durchschnittsmenge usw. → Regelsystem mit Fuzzifizierung der Eingangsgrößen → Interferenz und Komposition der Regeln → Defuzzifizierung der Ausgangsgrößen. Als Ausgangsgröße kann ein Stellwert definiert werden, dessen Größe letztendlich den linguistischen Aussagen „robust“, „transportfähig“, „empfindlich und unter geschützten Bedingungen transportfähig“, „nur geschützt im Depot lagerfähig“ zugeordnet wird.

Die zukünftige Arbeit besteht in der Erzeugung von Meßdaten sowohl in den Restaurierungswerkstätten wie auch im Labor. Die Daten werden dokumentiert und lassen sich dann mit verschiedenen Methoden, möglicherweise mit *fuzzy logics* auswerten.

## Literaturangaben

- [ 1] Young C, A W Katlan,  
*History of fabric supports,*  
Stretchers, tensioning, and attachments,  
in: Hill Stoner J, R Rushfield (eds.),  
Conservation of easel paintings,  
Routledge/Taylor & Francis(London, 2021).
- [ 2] Buckley B A,  
*Stretchers, tensioning, and attachments,*  
in: Hill Stoner J, R Rushfield (eds.),  
Conservation of easel paintings,  
Routledge/Taylor & Francis(London, 2021).
- [ 3] Harrison P, M F Alvarez, D Anderson,  
Towards comprehensive characterization and  
modelling of the forming and wrinkling mechanics of  
engineering fabrics,  
Int. J. Solids and Structures 154(2018), 2-18.
- [ 4] VDR,  
Tragfähig?! — Konservierung und Technologie  
textiler Bildträger, Tagung der Fachgruppe Gemälde  
(Dresden, 2022).
- [ 5] Städel Museum, Frankfurt (auch viele andere  
Museen z.B. in Albi, Altenburg, Basel, Berlin,  
Chemnitz, Chur, Coburg, Dresden, Hamburg,  
Leipzig, Marseille, Meiningen, München, Narbonne,  
Rostock, Wien u.v.m.) zeigen Dehnungen in der  
Leinwand und die damit verbundene Craquelée in der  
Malschicht.
- [ 6] Melelli A, G Roselli, N Proietti, A Bourmaud, O  
Arnauld, F Jamme,  
Chemical, morphological and mechanical study of  
the ageing of textile flax fibers from 17th/18th-  
century paintings on canvas,  
Journal of Cultural Heritage 52(2021), 202-214.
- [ 7] Melelli A, O Arnauld, G Roselli, G Di Girolami, F  
Jamme, J Beaugrand, A Bourmaud,  
Investigation of flax yarns from Italian paintings  
using AFM mechanical characterization;  
14th Int. Conf. On Local Mechanical Properties  
(Prag, 2019).
- [ 8] Hackney S, G Hedley,  
Measurements of the ageing of linen canvas,  
Studies in Conservation 26(1981), 1-14.
- [ 9] Michalski S,  
Paintings — their response to temperature, relative  
humidity, shock, and vibration,  
in: Works of Art in Transit, ed. M F Mecklenburg,  
National Gallery of Art (Washington, 1991), 223-  
248.
- [ 10] Hackney S,  
On canvas: Preserving the structure of paintings,  
The Getty Conservation Institute(2020).
- [ 11] Reedy T J, C L Reedy,  
Statistical analysis in art conservation research,  
The Getty Conservation Institute (1988).
- [ 12] Hackney S, G Hedley,  
Linen canvas artificially aged,  
Proc. ICOM Committee for Conservation  
(Copenhagen, 1984), 70-75.
- [ 13] Folch M O,  
Non-destructive condition assessment of painting  
canvases using NIR spectrometry,  
Diss. Universitat de Barcelona(2011).
- [ 14] von Reden A,  
Studien zum hygri-schen Verhalten gealterter  
Leinwände,  
Diss. Hochschule für Bildende Künste(Dresden,  
2018).
- [ 15] Restau-ro (Hrsg.),  
Das Restauratoren Handbuch 2018/2019,  
Callwey(2018).
- [ 16] Hein N,  
Die materielle Veränderung von Kunst durch  
Transporte – Monitoring und  
Transportschadensbewertung an Gemälden durch das  
Streifenprojektionsverfahren,  
Diss. SABK (Stuttgart, 2015).
- [ 17] Pantaloni D, A Melelli, D U Shah, C Baley, A  
Bourmaud,  
Influence of water ageing on the mechanical  
properties of flax/PLA non-woven composites,  
Polymer Degradation and Stability 200(2022),  
no.109957.
- [ 18] Uring P, A Chabras, S C Alfaro,  
Textile ageing due to atmospheric gases and particles  
in indoor cultural heritage,  
Environmental Sci Pollution Rs. 28(2021), no. 11,  
66340-66354.
- [ 19] Iliș D C, L Indrie, T Caciora, G V Herman, A  
Hundiadi, M Sandor, A V Albu, M A Costea, C Moș,  
M Safarov, E Tarcău, E Pantea,  
Heritage textiles an integrated approach for assess-  
ment and future conservation,  
industria textilă 73(2022), no. 2, 159-164.
- [ 20] Pop M V,  
The cultural sustainability of the textile art object,  
in Handloom Sustainability and Culture,  
eds. M Á Gardetti, S S Muthu,  
Springer ( Singapore, 2022), 119-133.
- [ 21] Böhme N, M Anders, T Reichelt, K Schuhmann, A  
Bridarolli, A Chevalier,  
New treatments for canvas consolidation and  
conservation,  
Heritage Sci. (2020),8:16.

- [ 22] Schwaller P, M Konietzny,  
Mikrotechnik in der Gemälderestaurierung,  
spirit(2019), 2/2019.
- [ 23] Radulescu C, R Radvan, M Dinu, G Roşu, A Ispas,  
C Popescu, H Fischer, P Rödel, L Chiriac, G Nicula,  
Preservation of the European cultural heritage of the  
historical textile artefacts from museum collections,  
15th Autex World Textile Conf. (Bucharest, 2015),  
ResearchGate no. 279754986.
- [ 24] Burmester A, M Müller,  
The registration of transportation damage using  
digital image processing,  
Z. Kunsttechnol. U. Konservierung 6 (1992), no. 2,  
335-345.
- [ 25] Placet V , M Blot, T Weemaes, H Bernollin, G  
Laurent, F Amiot, C Clevy, J Beaugrand,  
Transverse compressive properties of natural fibers  
determined using micro mechatronic systems and 2D  
full-field measurements,  
4th Int. Conf. on Natural fibers ICNF(Porto, 2019),  
303-308.
- [ 26] Melelli A, D U Shah, G Hapsari, R Cortopassi, D  
Sylvie, O Arnould, V Placet, D Benazeth, J  
Beaugrand, F Jamme, A Bourmaud,  
Lessons on textile history and fibre durability from  
na 4.000-year-old Egyptian flax yarn,  
Nature Plants 7(2021), no. 9, 1-7.
- [ 27] Grégoire M, P Ouagne, B Barthod-Malat, P Evon, L  
Labonne, V Placet,  
Extraction de fibres de lin oléagineux pour des  
applications textiles techniques: influence des  
paramètres de prétraitement sur le rendement en  
fibres, la répartition granulométrique et les  
propriétés mécaniques,  
J: Composite and Adv. Materials 29(2019), no. 1,  
107-112.
- [ 28] Richely E, S Durand, A Melelli, A Kao, A  
Magueresse, H Dhakal, T Gorshkova, F Callebert, A  
Bourmaud, J Beaugrand, S Guessasma,  
Novel insights into the intricate shape of flax fibre  
lumen,  
Fibers (2021), 9, 24://doi.org/10.3390/fib9040024.
- [ 29] Beaugrand J, M Nottez, J Konnerth, A Bourmaud,  
Multi-scale analysis of the structure and mechanical  
performance of woody hemp core and the  
dependence of the sample location,  
Industr. Crops and Products 60(2014), 193-204.
- [ 30] Nechyporchuk O, K Kolman, M Oriola, M  
Persson, K Holmberg, R Bordes,  
Accelerated ageing of cotton canvas as a model  
for further consolidation practices,  
J. Cultural Heritage 28(2017), 183-187.
- [ 31] Jabbar A, J Militký, J Wiener, M U Javid, S  
Rwawiire,  
Tensile, surface and thermal characterization of jute  
fibres after novel treatments,  
Indian J. of Fibre and Textile Res. 41(2016), 249-  
254.
- [ 32] Beaugrand J, S Guessasma J-E Maigret,  
Damage mechanisms in defected natural fibers,  
Scientific Reports (2017), DOI:10.1038/s41598-017-  
14514-6.
- [ 33] Beaugrand J, S Guessasma,  
Scenarios of crack propagation in bast fibres:  
Combining experimental and finite element  
approaches,  
Composite structures 133(2015), DOI:  
10.1016/j.compstruct.2015.07.119.
- [ 34] Lee B, E Pires, A M Pollard, J S O McCullagh,  
Species identification of silks by protein mass  
spectrometry reveals evidence of wild silk use in  
antiquity,  
Sci. Repts. 12(2022), no. 4579.
- [ 35] Beaugrand J, C Goudenhooff, C Alvarado, M-F  
Devaux, C Rivard, S Durand, H Chauvet, M  
Réfrégiers, F Jamme, F Guillon, C Baley, A  
Bourmaud,  
Evolution of the flax cell wall composition during  
development and after gravitropism by synchrotron  
fluorescence imaging,  
Ind. Crops & Products 175(2021), no.114256.
- [ 36] Chiriu D, P C Ricci, G Cappellini, C M Carbonaro,  
Ancient and modern paper: Study on ageing and  
degradation process by means of portable NIR  $\mu$ -  
Raman spectroscopy,  
Microchemical J. 138(2018),26-34.
- [ 37] Urstöger G, A Kulachenko, R Schemnach, U Hirn,  
Microstructure and mechanical properties of free and  
restrained dried papaer: A comprehensive  
investigation,  
Cellulose 27(2020), 8567-8583.
- [ 38] Richely E, A Bourmaud, V Placet (U Franche-  
Comté), S Guessasma, J Beaugrand,  
A critical review of the ultrastructure, mechanics and  
modelling of flax fibres and their defects,  
Progr. Mat. Sci. 124(2021), no. 100851.
- [ 39] Hieber H, K Kosicki,  
Langzeitstabilität und zerstörungsfreie Messung an  
textilen Bildträgern von Gemälden,  
eingereicht bei Zeitschr. f. Kunsttechnologie u.  
Restaurierung.
- [ 40] Goudenhooff C,  
Multi-scale characterization of flax stems and fibers:  
structure and mechanical performance,  
Diss U Bretagne Sud(2018).

- [ 41] Henniges U, M Hasani, A Potthast, G Westmann, T Rosenau,  
Electron beam irradiation of cellulosic materials — opportunities and limitations,  
Materials 6 (2013), 1584-1598.
- [ 42] Polvi J, K Nordlund,  
Low-energy irradiation effects in cellulose,  
J Appl Phys. 115(2014),no.02,paper023521.
- [ 43] Bourmaud A, L Pinsard, E Guillou, E De Luycker, M Fazzini, J Perrin, T Weitkamp, P Ouagne,  
Elucidating the formation of structural defects in flax fibres through synchrotron X-ray phase-contrast microtomography,  
Industr. Crops & Products, to be published(2022).
- [ 44] Richely E, A Bourmand, H Dhakal, Z Zhang, J Beaugrand, S Guessasma,  
Exploring the morphology of flax fibres by X-ray tomography and the related mechanical response by numerical modelling,  
Composites A 160(2022), no. 107052.
- [ 45] Richely E, L Nuez, J Pérez, C Rivard, C Baley, A Bourmaud, S Guessasma, J Beaugrand,  
Influence of defects on the tensile behaviour of flax fibres: Cellulose microfibrils evolution by synchrotron X-ray diffraction and finite element modelling,  
Composites Part C 9(2022), no. 100300.
- [ 46] Bunsell A R,  
Handbook of properties of textile and technical fibres,  
The Textile Institute Book Series, Woodhead Publ.(2018).
- [ 47] Boudjellel Moulay A, B B Bouiadjera, M Elmeguenni, El B O Chick,  
Plastic instability during stretching solid polymers,  
3<sup>rd</sup> Int.Conf. Fracture Mechanics(Alger, 2016).
- [ 48] Queyroy S,  
Molecular dynamics prediction of elastic and plastic deformation of semi-crystalline polyethylene,  
Int.J.for Multiscale Computational Engineering 9(2011), no.1, 119-136.
- [ 49] Hosoya T, M Bacher, A Potthast, T Elder, T Rosenau,  
Insights into degradation pathways of oxidized anhydroglucose units in cellulose by  $\beta$ -alkoxy-elimination: A combined theoretical and experimental approach,  
Cellulose 25(2018), 3797-3814.
- [ 50] Potthast A, M Kostic, S Schiehser, P Kosma, T Rosenau,  
Studies on oxidative modifications of cellulose in the periodate system: Molecular weight distribution and carbonyl group profiles,  
in Holzforschung 61 (2007).
- [ 51] Kracht K, T Kletschkowski,  
From art to engineering: A technical review on the problem of vibrating canvas; Part I: Excitation and efforts of vibration reductions,  
Mechanical. Engg. 15(2017), no. 1, 163-182.
- [ 52] Ramsay B,  
Travelling exhibitions and transportation paintings, in: Hill Stoner J, R Rushfield (eds.),  
Conservation of easel paintings,  
Routledge/Taylor & Francis(London, 2021).
- [ 53] Malešič J, J Kolar, M Strlič, D Kočar, D Fromageot, J Lemaire, O Haillant,  
Photo-induced degradation of cellulose,  
Polymer degradation and Stability 89(2005), 64-69.
- [ 54] Verband der Restauratoren,  
Im Fokus: Licht!  
Konferenz der Fachgruppe Präventive Konservierung (Weimar, 2019-09-26/28).
- [ 55] Ankersmit B, M Stappers,  
Management of indoor climate risks in museums,  
Springer-Verl.(2017).
- [ 56] Maekawa S, V L Beltran, M C Henry,  
Environmental management for collections — alternative preservation strategies for hot and humid climates,  
Tools for conservation,  
The Getty Conservation Institute(2015).
- [ 57] Der *Technology Readiness Level (TRL)* bzw. technologische Reifegrad ist eine von der NASA definierte Skala zur Bewertung des Entwicklungsstandes neuer Technologien — *TRL 5* bezeichnet einen Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
- [ 58] Wu C, R Wu, W Xia, L-H Tam,  
Understanding creep behavior of semi-crystalline polymer via coarse-grained modeling,  
Polymer Physics 57(2019), no.24, 1779-1791.
- [ 59] Hartin D D, E Hagan, S Michalski, M Choquette;  
CCI lining project: Testing of lined model paintings from Fraction of a second to decades,  
ResearchGate, publ. no. 263887942(2011).
- [ 60] Cardinali M (coordinator)  
Structural treatments on double-sided paintings,  
Expert Meeting (Torino, Köln, Roma, Washington, Ottawa, 2020-11-23/24).
- [ 61] Michalski S,  
Stuffing everything we know about mechanical properties into one collection simulation,  
in: Ashley-Smith (2013), 349-362.
- [ 62] Morita H, A Miyamoto, M Kotani,  
Recoverable and destructively deformed domain structures in elongation process of thermoplastic elastomer analyzed by graph theory,  
Polymer 188(2020), no. 122098.

- [ 63] Arnould O, D Siniscalco, A Bourmaud, A Le Duigou, C Baley, Better insight into the nano-mechanical properties of flax fibre cell walls, *Industr. Crops and Products* 97(2017), 224-228.
- [ 64] Shi F, Modeling stretching-relaxation properties of yarns, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 21(2013), no.2, 51-55.
- [ 65] Cihan M, Experimental and numerical investigation of the mechanical and dynamic performance of flax/E-glass hybrid composites, Diss. U Southampton(2020).
- [ 66] Réquillé S, B 3, M Grégoire, S Musio, M Gautreau, L Nuez, A Day, P Thiébeau, F Philippe, B Chabbert, A Chamussy, D U Shah, J Beaugrand, V Placet, J-C Benezet, A LeDigou, M Bar, L Malhautier, E De Luycker, S Amaducci, C Baley, A Bergeret, A Bourmaud, P Ouagne, Exploring the dew retting feasibility of hemp in very contrasting European environments: Influence on the tensile mechanical properties of fibres and composites, *Industr. Crops & Products* 164(2021), no. 11337.
- [ 67] Song J, F Liang, F Shi, Stress relaxation properties of yarns, *J. Textile Res.* 28(2007), no. 6, 40-44.
- [ 68] Placet V, O Cisse, V Guicheret-Retel, F Trivaudey, L Boubakar, Viscoelastic behaviour of single hemp fibre under constant and cyclic humidity environment —experimental and modeling, 20th Int. Conf. Compos. Mat. (Copenhagen, 2015).
- [ 69] Corigliano A, Damage and fracture mechanics techniques for composite structures, *Comprehensive Structural Integrity* 3(2003), 459-539.
- [ 70] Kohlrausch R, Theorie des elektrischen Rückstandes in der Leidener Flasche, *Ann. Phys. U. Chemie* 167(1854), 179-214.
- [ 71] Ram M (ed.), Reliability engineering — methods and applications, CRC Taylor & Francis (2019).
- [ 72] Melelli A, S Durand, O Arnaud, E Richely, S Guessasma, F Jamme F, J Beaugrand, A Bourmaud, Extensive investigation of the ultrastructure of kink-bands in flax fibres, *Industr. Crops & Products* 164(2021), no. 113368.
- [ 73] Rossi M (ed.), Colour and colorimetry, multidisciplinary contributions, Gruppo del Colore, Milano (2014).
- [ 74] Clementi C, G Basconi, R Pellegrino, A Romani, mus tinctorius: A photophysical study of the main coloured species for artwork diagnostic purposes, *Dyes and Pigments* 103(2014), 17-137
- [ 75] Cruz da Silva A M, History, materials and techniques of an artist`s book: *La Légende de Saint Julien L`Hospitalier* by Amadeo de Souza-Cardoso, Diss. U Lisboa(2017).
- [ 76] Proniewicz L M, C Paluszkiewicz, A Wesełucha-Birczynska, A Baranski, D Dutka, FT\_IR and Raman Study of hydrothermally degraded groundwood containing paper, *J. of Molecular Struct.* 614(2002), 345-353.
- [ 77] Maev M G, F Seviaryn, Application of non-linear acoustics for quality control and material characterization, *J Appl Phys.* 132(2022), no.161101.
- [ 78] Nguyen Q, C Breitkopf, Determination of diffusion coefficients using impedance spectroscopy data, *J.Electrochem.Soc.*165(2018),no.14,E826-E831.
- [ 79] Quaddoumi N, et al., Detecting defects in outdoor non-ceramic insulators using near-field microwave non-destructive testing, *IEEE Trans. Diel.* 17(2010), no.2,402-407.
- [ 80] Tiwari N K, et al, Near field planar microwave probe sensor for nondestructive condition assessment of wood products, *J Appl Phys.* 123(2018), no.224502.
- [ 81] Schickert M, F Bonitz, A transmission-tomographic imaging setup combining elastic and electromagnetic wave functionality, 19<sup>th</sup> World Conf. Nondestructive Testing (2016).
- [ 82] Burgholzer M T, et al, Three-dimensional thermographic imaging using a virtual wave concept, *J Appl Phys.* 121(2017), no.105102.
- [ 83] Agarwal U P, S A Ralph, R S Reiner, C Baez, New cellulose crystallinity estimation method that differentiates between organized and crystalline phases, *Carbohydrate Polymers* 190(2018), 262-270.
- [ 84] Terinte N, R Ibbett, K Schuster, Overview on native cellulose and microcrystalline cellulose I Structures studied by X-ray diffraction (WAXD): Comparison between measurement techniques, *Leipziger Berichte* 89(2011), 118-131.
- [ 85] Park S, D K Johnson, C I Ishizawa, P A Parilla, M F Davis, Measuring the crystallinity index of cellulose by solid state <sup>13</sup>C nuclear magnetic resonance, *Cellulose* 16(2009), 641-647.

- [ 86] Queiroz A L P, B M Kerins, J Yadav, F Farag, W Faisal, M E Crowley, S E Lawrence, H A Moynihan, A-M Healy, S Vucen, A M Crean, Investigating microcrystalline cellulose crystallinity using Raman spectroscopy, Cellulose, <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04093-1>(2021).
- [ 87] Ioelovich M, I F Kaimin, G P Veveris, The crystallization of amorphized cellulose, Polym. Sci. 24(1982),1382-1387.
- [ 88] Geo. Gleistein & Sohn GmbH, 2877 Bremen (Anmelder), Hieber H (Erfinder), Verfahren und Vorrichtung zur, insbesondere automatischen, zerstörungsfreien Prüfung des, insbesondere lokalen, Verschleißzustandes eines linien- oder flächenförmigen textilen Gebildes aus oder enthaltend Polymerfasern, Patent DE 12017105806 (2018).
- [ 89] Hieber H, M Buckel, A Neuner, Strukturmodell zum Verschleiß von Polyethylen-Seilen, 6. Fachkolloquium InnoZug (Chemnitz, 2014).
- [ 90] Hieber H, K Kosicki, Zerstörungsfreie Messung des Alterungszustandes von Bildleinwänden, Workshop InnOkultur (Berlin, 2017).
- [ 91] Hieber H, K Kosicki, Non-destructive measurement of the ageing state of painted canvas, *accepted for* The 12<sup>th</sup> Baltic States Triennial Conservators' Meeting "RESEARCH. DILEMMAS. SOLUTIONS.", Vilnius, Lithuania, 27-30 May 2020.
- [ 92] Wang D, et al, Optics based biomedical imaging:Principles and applications, J Appl Phys. 125(2019), no.191101.
- [ 93] Richter V, Integration winkelaufgelöster Streulichtmessungen in die Mikroskopie, Diss. U Ulm(2015).
- [ 94] Zinke A, C Yuksel, A Weber, J Keyser, Dual scattering approximation for fast multiple scattering in hair ACM Siggraph Conf.(2008).
- [ 95] Cao P, J H Wu, Shape recognition of acoustic scatterers using the singularity expansion method, J Appl Phys. 121(2017), no.105103.
- [ 96] Sharples S D, et al., Rapid imaging of microstructure using spatially resolved acoustic spectroscopy, 1<sup>st</sup> Int.Symp.Laser Ultrasonics(2008), paper
- [ 97] Demant C, B Streicher-Abel, P Waszkewitz, Industrielle Bildverarbeitung, Springer(2003).
- [ 98] Axelsson M, Image analysis for volumetric characterization of microstructure, Diss. Swed. U. Agricult. Sci. (Uppsala,2009).
- [ 99] Tian G Y, R S Lu, D Gledhill, Surface measurement using active vision and light scattering, Optics and Lasers in Engineering 45(2007), no.1, 131-139.
- [100] Zhang N F, Evaluation of measurement uncertainty from a nonstationary process, Meas.Sci.Technol.30(2019), no 6, doi=10.1088/1361-6501/ab048e.
- [101] Berfield T A, J K Patel, R G Shimmin, P V Braun, J Lambros, N R Sottos, Micro- and nanoscale deformation measurement of surface and internal planes via digital image correlation, Experimental mechanics 47(2007), 51-62.
- [102] Lee Blaire, O Sosnovtseva, C M Sørensen, D D Postnov, Multi-scale laser speckle contrast imaging of microcirculatory vasoreactivity, Biomed. Opt. Express 13(2022), no. 4, 2312-2322.
- [103] Schweickhardt L, A Tausendfreund, D Stöbener, A Fischer, Noise reduction in high-resolution speckle displacement measurements through ensemble averaging, Appl. Optics 60(2021), no. 7, 1871-1880.
- [104] Schweickhardt L, A Tausendfreund, D Stöbener, A Fischer, Speckle pattern modulation for high-resolution displacement measurements, SPIE Proc. Vol. 11782 (2021),doi.org 10.1117/12.2591847.
- [105] Evanschitzky P, Simulationsgestützte Oberflächendiagnostik mittels Speckle-Interferometrie, Diss. TU München (2002).
- [106] Bender N, H Yilmaz, Y Bromberg, H Ciao, Customizing speckle intensity statistics, Optica 5(2018),no.5, 595-600.
- [107] Buijs J, J van der Gucht, J Sprakel, Fourier transforms for fast and quantitative laser speckle imaging, Sci.Repts.9(2019), no. 13279.
- [108] Zhao J, Y Sang, F Duan, The state of the art of two-dimensional image correlation computational method, Engineering Reports (2019), no. e12038.
- [109] International Digital Imaging Correlation Society, Annual Int. DIC Conf, (Boston MA, 2022-11-07/-10).
- [110] Blenkinsopp R, J Roberts, A Harland, P Sherrat, P Smith, T Lucas, A method for calibrating a digital image correlation system for full-field strain measurements during large deformations, Appl.Sci.9(2019),2828.

- [111] Földesy P, M Siket, I Jánoki, K Demeter, Á Nagy, Ensemble averaging laser speckle contrast imaging: statistical model of improvement as function of static scatterers, Opt. Express 29(2021), no. 18, 428394.
- [112] elektrotechnik Automatisierung, Sonderausgabe Robotik und Automation (Juni 2020).
- [113] Weber W, Validierungsgerechtes Entwickeln von Medizinprodukten, Elmug Workshop(2016).
- [114] Moumouris S, Einführung in die sicherheitskritische SW Entwicklung— Segregation von Anwendungen, presentation SBB CFF FFS Infrastruktur(2020).
- [115] Bishop C M, Pattern recognition and machine learning, Springer(New York, 2016).
- [116] Arróyave R, D Khatamsaz, B Vela, R Couperthwaite, A Molkeri, P Singh, D D Johnson, X Quian, A Srivastava, D L Allaire, A perspective on Bayesian methods applied to materials discovery and design, MRS Comm. XX(2022), DOI: 10.1557/s43579-022-00288-0.
- [117] Bovik A (ed.), Handbook of image and video processing, 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier(2005).
- [118] Balzert H, Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering, Spektrum(2008).
- [119] Lefeuvre A, A Bourmaud, L Lebrun, C Morvan, C Bailey, A study of the yearly reproducibility of flax fiber tensile properties, Industr. Crops and Products 50(2013), 400-407.
- [120] IPC Elektronik-Montagerichtlinien IPC J-STD-001 und IPC-A-610.
- [121] Eichhorn S, J W S Hearle, M Jaffe, T Kikutani (eds.), Handbook of textile fibre structure, Vol.2: Natural, regenerated, inorganic and specialist fibres, Woodhead Publishing(2009).
- [122] ICR, - Bruchbild- und Oberflächenkatalog zu Al- Dick drahtverbindungen in Leistungsbauerelementen (1996), - Technical assistance and know-how transfer for production of pressure sensor elements in MEMS and ASIC (2009), - Methods for physical reliability specification of flexible board materials with use of the time- and temperature-dependent mechanical data, EU-Projekt Nr. COOP-CT-2004-513163.
- [123] Moryganov A P, A E Zavadskii, V G Stokozenko, Special features of X-ray analysis of cellulose crystallinity and content in flax fibres, Fibre Chemistry 49(2018), 382-387.
- [124] Garat W, S Corn, M Le Moigne, J Beaugrand, A Bergeret, Analysis of the morphometric variations in natural fibres by automated laser scanning: Towards an efficient and reliable assessment of the cross-sectional area, Composites A 108(2018), 114-123.
- [125] Awaja F, S Zhang, M Tripathi, A Nikiforov, N Pugni, Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, Progr.Mat.Sci. 83(2016), 536-537.
- [126] Thuy M, M Pedragosa-Rincón, U Niebergall, H Oehler, I Alig, M Böhning, Environmental stress cracking of high-density polyethylene applying linear elastic fracture mechanics, Polymers 14(2022), no. 2415.
- [127] Cisse O, V Placet, V Guicheret-Retel, F Trivaudey, M L Boubakar, Creep behaviour of single hemp fibres. Part I: Viscoelastic properties and their scattering under constant climate, J. Mater. Sci. (2015), researchgate no. 273328734.
- [128] Guicheret-Retel V, O Cisse, V Placet, J Beaugrand, M Pernes, M L Boubakar, Creep behaviour of single hemp fibres. Part II: Influence of loading level, moisture content, and moisture variation, J. Mater. Sci. (2015), researchgate no. 270650163.
- [129] Bueche F, Tensile strength of plastics: Effects of flaws and chain relaxation, J Appl Phys. 29(1958),no.08,1231-.
- [130] Nikolov S, R A Lebensohn, D Raabe, Self-consistent modeling of large plastic deformation, texture and morphology evolution in semi-crystalline polymers, J.Mech.Phys.Sol.54(2006),1350-1375.
- [131] Aslan M, J Yamada, M P Mengüç, I. A. Thomasson, Characterization of individual cotton fibers via light-scattering experiments, J. Thermophysics and Heat Transfer 17(2003), no.4, 442-449.

- [132] Liu W, C K L Kou, K H Park, H K Lee,  
Solving the inverse problem of time independent  
Fokker-Planck equation with a self supervised neural  
network method,  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-94712-5>(2021).
- [133] Chertkov A, I Oseledets,  
Solution of the Fokker-Planck equation by cross  
approximation method in the tensor train format,  
*frontiers in Artificial Intelligence*(2021), DOI:  
10.3398/frai.2021.668215.
- [134] Hieber H,  
Residual lifetime prognostics,  
4<sup>th</sup> Int. Worksh. Area Array Packgg. Technol.  
(Berlin, 2002).
- [135] Hieber H, H Gropius,  
From degradation kinetics in PV modules to residual  
lifetime prognostics,  
36<sup>th</sup> EU PVSEC (Warszawa, 2019), 4AV.1.48.
- [136] Bäschlin N, M Läuchli, C Palmbach, A Hoess, M  
Ryser, T Fankhauser, K Sautter,  
Transport fragiler Gemälde —Forschungsergebnisse  
und Anwendungsbeispiele,  
[https://gemaeldetransport.ch/kti/wp-content/uploads/  
2016/03/ZKK-2015-2\\_Transporte.pdf](https://gemaeldetransport.ch/kti/wp-content/uploads/2016/03/ZKK-2015-2_Transporte.pdf).
- [137] Idelson A I,  
About the choice of tension for canvas paintings,  
*CeROArt*, no. 4(2009).
- [138] Hackney S, J Reifsnnyder, M te Marvelde, M  
Scharff,  
*Lining easel paintings*,  
in: Hill Stoner J, R Rushfield (eds.),  
*Conservation of easel paintings*,  
Routledge/Taylor & Francis(London, 2021).
- [139] Richardson E, et al.,  
State of the art: Non-invasive interrogation of  
textiles in museum collections,  
*Microchimica Acta* 162(2008), no.3,303-312.
- [140] Luxford N,  
Reducing the risk of open display: Optimising  
the preventive conservation of historic silks,  
Diss. U Southampton(2009).
- [141] Flock H,  
Einzelfadenverklebung in der  
Gemälderestaurierung: Klebstoffe,  
Prüfsystematik und Ergebnisse,  
Diss. U Saarland(2020).
- [142] Hieber H, K Kosicki,  
Methodenentwicklung zur zerstörungsfreien  
Messung ds Stabilitätszustandes gealterter Gewebe in  
Kulturgütern,  
In: *Tragfähig?! — Konservierung und Technologie  
textiler Bildträger*, Tagung der Fachgruppe Gemälde,  
VDR (Dresden, 2022).
- [143] Andersen C K,  
Lined canvas paintings, mechanical properties and  
structural response to fluctuating relative humidity,  
exemplified by the collection of Danish golden Age  
paintings at Statens Museum for Kunst (SMK, 2013).
- [144] Ashley-Smith J,  
Climate for culture — Report on newly gathered  
knowledne on damage functions,  
EU Project 226973 (2013).
- [145] GDCh,  
Qualitätssicherung in Forschung und Entwicklung  
und Nicht-Routineanalytik,  
Eurachmed/D(Frankfurt/M., 2001).
- [146] PTB,  
Richtlinien für die Softwaredokumentation,  
ab Version PTB-RSE-D2.4
- [147] Bucklow S,  
*The classification of craquelure patterns*,  
in: Hill Stoner J, R Rushfield (eds.),  
*Conservation of easel paintings*,  
Routledge/Taylor & Francis(London, 2021).
- [148] Prieto A J, I Turbay, R Ortiz, P Ortiz,  
A Fuzzy logic approach to preventive conservation of  
cultural heritage churches in Popayán, Colombia,  
*Int. J. Architect. Heritage* (2020),  
DOI: 10.1080/15583058.2020.1737892.
- [149] Prieto A J, J M Macias-Bernal, A Silva, P Ortiz,  
Fuzzy decision-support system for safeguarding  
tangible and intangible cultural heritage,  
*Sustainability* 11(2019), no. 3953.
- [150] Soleimani M, F Campean, D Neagu,  
Diagnostics and prognostics for complex systems: A  
review of methods and challenges,  
*Qual. Reliab. Engng. Int.* 37(2020), 3746-3778.
- [151] Hieber H, G Mehl, H Gropius,  
Specklepattern-Mikroskopie semikristalliner  
Polymere,  
Poster in: 13. Jenaer Lasertagung (2022-11-03/-04).

## Anerkennung

Der Autor dankt Frau Dipl.-Ing. G. Mehl für die andauernde tatkräftige Unterstützung im Projekt; Herr H. Gropius hat Wesentliches zur Gerätekonstruktion beigetragen; verwiesen sei auf die jüngste gemeinsame Veröffentlichung <sup>[151]</sup>. Besonders hervorzuheben der intensive Austausch mit der Chefredaktorin der Erfurter Museen, Frau K. Kosicki, insbesondere auch für die Bereitstellung von Probenmaterial und Gemälde im ICR-Labor. Frau Kosicki ist von Anfang an kritische Begleiterin und Ideengeberin in vielen Einzelheiten, gemeinsame Veröffentlichungen <sup>[39, 90, 91, 142]</sup>. Auch wird die Erstinstallation des Meßgeräts in den Restaurierungswerkstätten der Erfurter Museen vorgenommen. Weiterer Dank gebührt Herrn K. Katzer, Abteilungsleitung Konservierung der Klassikstiftung Weimar, für die Bereitstellung großflächiger Gemäldeausschnitte.

Experimentelle und rechentechnische Daten können bei Bedarf über die Homepage [www.icrjena.eu](http://www.icrjena.eu) angefordert werden.

## Epilog

„... brauchbar ist eine Maschine erst dann, wenn sie von der Erkenntnis unabhängig geworden ist, die zu ihrer Erfindung führte.“

Friedrich Dürrenmatt in seiner Komödie *Die Physiker*