



**AUTOMATISIERTE VIRTUELLE  
REKONSTRUKTION  
FRAGMENTIERTER DOKUMENTE**

# RETTUNG FÜR BESCHÄDIGTE KULTURELLE WERTE



Das Fraunhofer IPK in Berlin steht für Exzellenz in der Produktionswissenschaft mit starkem Digitalfokus – und für eine neuartige Technologie zur virtuellen Rekonstruktion zerstörter Dokumente und Artefakte. Die Technologie hat enormes Potenzial für kulturelle Institutionen und Forensiker auf der ganzen Welt.

Papier, Papyrus und Pergament sind essenzielle Kulturträger. Sie transportieren Informationen, können Wertsache sein oder Wissen und Erinnerung von Einzelpersonen oder Gemeinschaften speichern. Schriftdokumente erfüllen nicht nur im Moment ihrer Erstellung kommunikative Aufgaben, sondern noch Jahrhunderte oder Jahrtausende später, wenn spätere Generationen die Relikte ihrer Vorfahren studieren. Werden Dokumente jedoch vorsätzlich oder versehentlich beschädigt, zerrissen oder geschreddert, bedeutet das oft den Verlust der Überlieferung, da Wiederherstellung meist zeit- und aufwändig und teuer ist – wenn sie überhaupt möglich ist.

Seit 2006 hat die Forschungsarbeit des Fraunhofer IPK die Möglichkeiten in diesem Bereich revolutioniert: Das Institut hat eine Technologie entwickelt, mit der Computer beschädigte Dokumente aus

ihren Einzelteilen virtuell zusammensetzen. Ursprünglich entworfen, um die geschredderten Archivbestände des DDR-Staatssicherheitsdienstes wieder lesbar zu machen, wird das »ePuzzler«-System seitdem in vielfältigen anderen Bereichen eingesetzt, auch außerhalb Europas. Es unterstützt die Rekonstruktion von beschädigten Dokumenten wie den Beständen des 2009 eingestürzten Historischen Archivs der Stadt Köln oder des 1994 durch einen Bombenanschlag zerstörten Sitzes der Asociación Mutual Israelita Argentina (AMIA) in Buenos Aires. Im forensischen Einsatz wird das System zur Sicherung von Dokumenten als Beweismaterial genutzt. Zudem ist sein Einsatzbereich nicht mehr auf zweidimensionale Dokumente beschränkt: Beschädigte Fresken und andere 2,5-dimensionale kulturelle Schätze werden ebenfalls mit der Technologie gerettet.

## Industrielle Technologie auf kultureller Mission

Auf den ersten Blick liegen Welten zwischen industriellen Technologien und historischen Dokumenten. Warum setzt sich ein Forschungsinstitut, das sich modernen Fertigungstechnologien verschrieben hat, für die Dokumentenrekonstruktion ein? Die Antwort liegt in der Expertise des Fraunhofer IPK auf dem Gebiet der Bildanalyse und dem maschinellen Sehen. Maschinen können nur dann

autonom arbeiten, wenn sie einen Gegenstand, seinen Zustand und seine Position »erkennen« können. Bildverarbeitung und Mustererkennung sind daher bereits seit den 1980er Jahren ein wichtiger Teil der Arbeit des Fraunhofer IPK. Sie werden bei der Oberflächenanalyse in der Qualitätssicherung ebenso eingesetzt wie bei der Steuerung von Handhabungs- und Montageprozessen oder beim Monitoring der Sicherheit von Arbeitenden in Gefahrenbereichen.

Dem persönlichen Interesse und Einsatz von IPK-Wissenschaftler Dr. Bertram Nickolay ist es zu verdanken, dass das technische Know-how aus diesem Gebiet auf den Kulturbereich übertragen wurde. Die von Dr. Nickolay geleitete Abteilung Maschinelles Sehen ist heute ein internationaler Vorreiter in der automatisierten Bildverarbeitung für virtuelle Dokumentenrekonstruktionen.

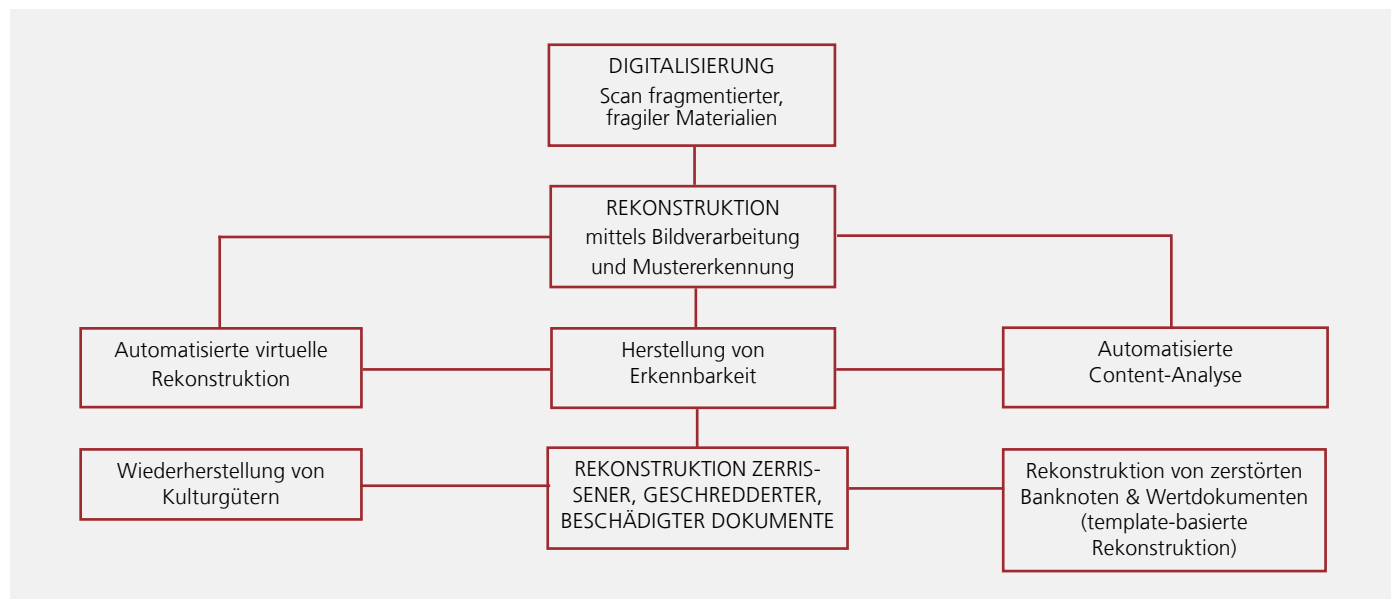
### Der Rekonstruktionsprozess

Die Dokumentenrekonstruktion umfasst drei Schritte: Damit die Fragmente vom Computer verarbeitet werden können, müssen sie zuerst hinein – sie müssen also digitalisiert werden. Dies ist angesichts der vielfältigen Digitalisierungstechnologien am Markt ein vermeintlich

zu vernachlässigender Punkt. Schon in frühen Entwicklungsphasen des ePuzzlers zeigte sich jedoch, dass die Digitalisierung ein Thema war, das zusätzlicher Entwicklungsarbeit bedurfte.

Nach der Digitalisierung evaluiert der ePuzzler die digitalen Fragmente und verbindet sie schrittweise zu vollständigen Dokumenten. Wieweit sich dieser Prozess automatisieren lässt, hängt vom Zustand der Dokumente und der Art und Schwere der Beschädigungen ab: Während größere, nicht weiter beschädigte Schnipsel leicht weitgehend automatisiert verarbeitet werden können, benötigen andere Befundsituationen, wie sehr kleine Fragmente oder andere Schäden, mehr manuelle Mitarbeit.

Auch der Umfang der erforderlichen Nachbearbeitung hängt vom jeweiligen Dokument ab. In vielen Fällen reicht es, einzelne Seiten zusammenzufügen. Bei manchen Dokumenten ist zusätzliche Bildbearbeitung nötig, um die Lesbarkeit zu verbessern. Umfangreichere Quellen bedürfen zudem automatischer Inhaltsanalysen, um verarbeitet werden zu können. Diese Aufgaben sind daher ein wichtiger Aspekt der laufenden Forschungsarbeit.





### SCANNEN AUF HÖCHSTEM NIVEAU

Die Digitalisierung fragmentierter Dokumente für die virtuelle Rekonstruktion erwies sich als Herausforderung. Zu Beginn der Arbeit am ePuzzler hatten die Entwickler angenommen, sie könnten einen marktüblichen Scanner verwenden. Doch bald zeigte sich, dass kein Gerät am Markt die Anforderungen der automatisierten Rekonstruktion erfüllen konnte.

Die Anforderungen an die Digitalisierung sind enorm: Fragmente jeder Größe müssen beidseitig, ohne Reflektionen und Schatten sowie farb- und geometrietreu gegenüber den Originalen erfasst werden. Sonst können Zusammenhänge zwischen Schnipseln, wie identische Färbung oder gemeinsame Außenkanten, nicht identifiziert werden. Daher müssen Farbabweichungen in der Lichtquelle des Scanners und Unregelmäßigkeiten bei dessen Bewegung vermieden werden. Zudem müssen die Fragmente wie im Bluescreen-Verfahren vor einem Hintergrund digitalisiert werden, von dem sie sich pixelgenau freistellen lassen. Damit Fragmente beliebiger Zahl in annehmbarer Zeit verarbeitet werden können, sind hohe Durchsatzraten erforderlich. Als das Entwicklungsteam sich zunehmend stärker fragmentierten, empfindlichen Dokumenten zuwandte, entstand zudem die Herausforderung, diese zu digitalisieren, ohne sie zusätzlich zu beschädigen.

Am Ende war klar, dass ein neuer, maßgeschneiderter Digitalisierungsansatz nötig war. In Kooperation mit der MFB MusterFabrik Berlin GmbH entwickelte das Fraunhofer IPK eine neue Art Dokumentenscanner, der alle Anforderungen erfüllt. Das Gerät erlaubt hochpräzise und schnelle Scans von Fragmenten fast jeder Größe, bei denen die digitalen Kopien Farbe und Form der Originale exakt wiedergeben. Beim Scannen werden neben dem Scanbild auch Durchlichtaufnahmen angefertigt, die die klassische Bluescreen-Maskierung überflüssig machen und damit das Freistellen erleichtern. Für den Scan werden die Fragmente in Objektträger aus zwei Glasscheiben gelegt, die sie vor Druck und Reibung schützen. Kulturinstitutionen weltweit zeigen großes Interesse an der Technologie, nicht nur für Rekonstruktionszwecke, sondern auch zur Digitalisierung empfindlicher Dokumente, um deren Inhalt vor Verlust durch Zerfall zu bewahren.



↘ Oft können beschädigte Dokumente nicht direkt in den Scanner geschickt werden. Ihre Seiten müssen sorgfältig getrennt und geglättet sowie verklemmte Teile vorsichtig vom Rest des Dokuments getrennt werden, ehe eine Digitalisierung möglich ist.

### ePUZZLER UND MEHR

Das Herzstück der virtuellen Rekonstruktion ist der »ePuzzler«, eine Software, die mit komplexen Bildbearbeitungs- und Mustererkennungstechnologien digitale Fragmente zu ganzen Seiten zusammensetzt. Zusätzlich stellt sie Werkzeuge bereit, um unsichere oder mehrdeutige Rekonstruktionen zu prüfen und zu korrigieren.

Der ePuzzler arbeitet ähnlich wie ein Mensch beim Puzzeln: Die Software berechnet zunächst verschiedene Merkmale der Fragmente wie Kontur, Farbe, Beschriftung oder Linierung. Ähnliche Fragmente werden mittels intelligenter Suchraumreduktion in Untermengen



zusammengefasst, in denen die eigentliche Rekonstruktion stattfindet. Dabei werden die Schnipsel entlang ihrer Konturen verglichen. Passen zwei Schnipsel zusammen, werden sie digital verklebt und bei der weiteren Rekonstruktion als größeres Fragment berücksichtigt. Die Technologie erhielt 2013 den EARTO Innovationspreis.

Doch in vielen Fällen reicht es nicht, einzelne Seiten zu rekonstruieren. Besonders wenn Handschriften Wasserschäden aufweisen, verschmutzt oder zerfallen sind, muss mit digitalen Methoden die Lesbarkeit verbessert werden. Ein vielversprechender Ansatz ist die Nutzung eines breiteren Lichtspektrums im Digitalisierungsprozess. Automatische Bilderkennungstechniken trennen nach der Rekonstruktion Vordergrund und Hintergrund oder erhöhen den Kontrast zwischen Text und Hintergrund. Das Ergebnis solcher Schriftrekonstruktionen kann dann über das beschädigte Original gelegt werden.

Um die automatisierte Formierung mehrseitiger Dokumente und Archivalien aus rekonstruierten Einzelseiten zu unterstützen, wird die Rekonstruktion perspektivisch durch Inhaltsanalyse ergänzt werden. Die Forschung adressiert bereits die Identifikation verschiedener Schreiber anhand ihrer Handschrift sowie das Erkennen und Auslesen von Wasserzeichen, Stempeln und Ähnlichem. Dazu werden die relevanten Bildmuster mit Machine-Learning-Algorithmen wie Deep Learning und neuronalen Netzen analysiert.

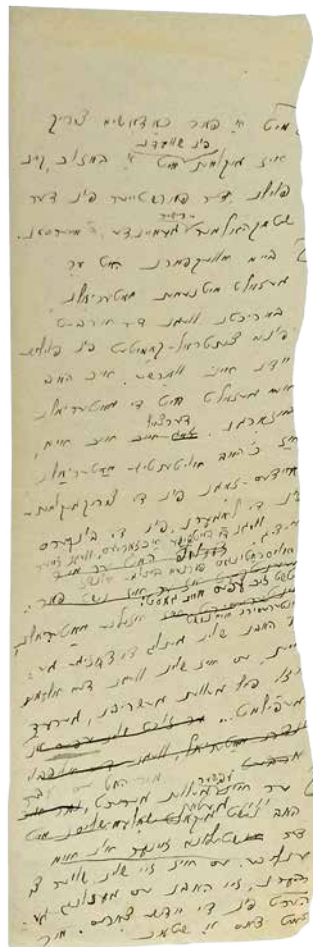
↘ Ein großer Unterschied zwischen virtueller Rekonstruktion und einem Puzzlespiel: In vielen fragmentierten Dokumenten fehlen Teile, und die Rekonstruktion muss mit diesen Lücken zurechtkommen.

## NICHT NUR PAPIERFETZEN

In einem aktuellen Projekt rekonstruiert das Fraunhofer IPK Bestände der Asociación Mutual Israelita Argentina (AMIA) in Buenos Aires, dem Zentrum der jüdischen Gemeinde in Argentinien. Am 18. Juli 1994 zerstörte ein Bombenanschlag das Gebäude der AMIA, wobei 85 Menschen getötet, 300 verwundet und mehr als 400 umliegende Häuser und Geschäfte beschädigt oder zerstört werden. Betroffen waren auch Archiv und Bibliothek der Fundación IWO, Idisher Visnshaftlejer Institut – Instituto Judío de Investigaciones. Das Forschungsinstitut soll das Wissen über die Geschichte des jüdischen Lebens mit Fokus auf Geschichte und Kultur des osteuropäischen Judentums vertiefen. Seine Archive und Bibliotheken zählen zu den weltweit wichtigsten Quellen für die Erforschung jüdischen Lebens und jüdischer Geschichte in Europa, jiddischer Sprache, Literatur und Folklore, der verschiedenen Aspekte des Shoah und der Geschichte jüdischer Einwanderung in Amerika.

Das IWO hütet eine einzigartige Sammlung jiddischer Dokumente und Bücher sowie historische Quellen zur jüdischen Geschichte Argentiniers und Veröffentlichungen, Dokumente und Artefakte, die vor der Zerstörung durch die Nationalsozialisten aus Europa gerettet wurden. Diese Bestände sind ein aussagekräftiger Beleg für die Bedeutung der virtuellen Rekonstruktion, die weit über die Wiederherstellung zerrissener Unterlagen hinausgeht. In den IWO-Archiven lagern dokumentarische Nachlässe jüdischer Persönlichkeiten, die keine Berühmtheiten waren, innerhalb der jüdischen Gemeinde jedoch große Bedeutung erlangten oder Aufzeichnungen hinterließen, die für die Erforschung bestimmter historischer Fragen essentiell sein können.

Eine dieser weniger bekannten Persönlichkeiten ist Tania Fuks, deren handschriftlicher Nachlass am IWO verwahrt wird. Selbst eine Geflüchtete, bereiste sie nach dem Zweiten Weltkrieg Flüchtlingslager und schrieb detaillierte Berichte über die Situation der Geflüchteten. Teile ihrer Berichte wurden in den fünfziger Jahren veröffentlicht, der Großteil ist bis heute unveröffentlicht. Ihre Notizbücher wurden bei dem Anschlag von 1994 schwer beschädigt – ein beredtes Beispiel für den Erinnerungsverlust, der mit der Zerstörung von Archivalien einhergeht.



TANYE (TANIA) FUKS (1896 – 1950)

Seit Beginn ihrer journalistischen Karriere im Jahr 1922 schrieb Tania Fuks für verschiedene jüdische, meist jiddischsprachige Zeitungen. Sie überlebte Deportation, Ghetto und Konzentrationslager und lebte danach in verschiedenen Flüchtlingslagern in Nachkriegsdeutschland. Ihr Weg führte sie schließlich über Frankreich und Uruguay nach Argentinien. Neben ihren journalistischen Arbeiten umfasst ihr Oeuvre Übersetzungen und ein autobiographisches Buch über ihre Kriegserlebnisse. Ihre Position als Kulturdirektorin der jiddischen Sektion des AMIA machte sie zu einer treibenden Kraft der jüdischen Renaissance nach Krieg und Shoah.



### KAMPF GEGEN DEN ZAHN DER ZEIT IN ARCHIVEN WELTWEIT

Die Sicherung der IWO-Dokumente ist ein hervorragendes Beispiel für die Aktivitäten des Fraunhofer IPK zur Bewahrung kultureller Werte, aber es ist nur eines von vielen. Ein laufendes Projekt mit dem Matenadaran – Mesrop-Maschtoz-Institut für alte Manuskripte in Armenien zeigt, dass neben menschlicher Gewalt oder Naturkatastrophen auch andere Gründe Anfragen nach den Rekonstruktionskompetenzen des Fraunhofer IPK motivieren.

Mit circa 23 000 Handschriften und 30 000 anderen Dokumenten auf Armenisch, Persisch, Arabisch und in anderen Sprachen bewahrt das Matenadaran eine der weltweit größten Sammlungen mittelalterlicher Bücher und Schriften. Obwohl die Manuskriptsammlung des Matenadaran laufend archivalisch und konservatorisch betreut wird, haben neue Studien gezeigt, dass sich große Teile der Sammlung in erschreckendem Zustand befinden. Das Matenadaran misst der Restaurierung und physischen Rekonstruktion der beschädigten Dokumente höchste Priorität bei. Ein besonders fordernder Fall ist eine der frühesten erhaltenen Kopien des Gebetbuchs von Grigor von Narek, das auf das 13. oder 14. Jahrhundert datiert wird.

Armenische Christen nutzen das Narek-Gebetbuch bis heute. Der Sicherung der frühen Kopie kommt große Bedeutung zu, da das Original aus dem 10. Jahrhundert verloren ist.

Problematisch für die Restauratoren ist, dass bereits eine starke Fragmentierung und Durchmischung von Teilen der Buchseiten stattgefunden hat. Das Fraunhofer IPK wurde daher beauftragt, rekonstruktionsfähige Digitalisate der Fragmente zu erstellen und eine experimentelle virtuelle Rekonstruktion des Gebetsbuches zu versuchen. Die virtuelle Rekonstruktion soll später als Vorlage für eine physische Wiederherstellung dienen – eine vermeintlich unmögliche Aufgabe angesichts der Tatsache, dass die Kanten der Fragmente ebenfalls stark beschädigt sind. Doch die IPK-Experten konnten die Machbarkeit nachweisen und eröffnen damit ganz neue Perspektiven für die Rettung archivalischer und bibliothekarischer Schätze auf der ganzen Welt.



Die Rekonstruktion beschädigter Dokumente bleibt eine kosten- und zeitintensive Aufgabe. Doch der Aufwand lohnt sich, wenn dadurch unschätzbare kulturelle Werte für künftige Generationen gerettet werden.

## KONTAKT

Dr.-Ing. Bertram Nickolay  
Telefon: +49 30 39006-201  
bertram.nickolay@ipk.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Jan Schneider  
Telefon: +49 30 39006-203  
jan.schneider@ipk.fraunhofer.de

## IMPRESSUM

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen  
und Konstruktionstechnik IPK  
Pascalstr. 8-9  
10587 Berlin

Telefon: +49 30 39006-0  
Fax: +49 30 39110-17  
info@ipk.fraunhofer.de  
www.ipk.fraunhofer.de

## Herausgeber

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

## Redaktion

Katharina Strohmeier  
Jan Schneider

## Layout

Andy King

## Bilder

Asociación Mutual Israelita Argentina (AIMA) (1, 2, 4r, 5, 6l, 7r)  
Fraunhofer IPK/Katharina Strohmeier (4l)  
»Marc Turkow« Center at AMIA (6r)  
Matenadaran – Mesrop-Maschtoz-Institut für alte Manuskripte (7l)

## PARTNER

MUSTER  
FABRIK  
BERLIN .

Die Projekte mit der Fundación IWO und dem Matenadaran, die in dieser Broschüre beschrieben werden, werden gefördert von:



Auswärtiges Amt