



Fraunhofer

IPK

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSANLAGEN UND KONSTRUKTIONSTECHNIK

AUTOMATISIERTE VIRTUELLE REKONSTRUKTION





»» Die virtuelle Rekonstruktion verbindet Hightech mit gesellschaftlich-kultureller Relevanz. ««

Dr.-Ing. Bertram Nickolay, Leiter der Abteilung Sicherheitstechnik

3	Vorwort
4	Interview: Puzzeln für die Aufarbeitung
6	Der Gesamtprozess
10	Erhaltung und Wiederherstellung von Kulturgütern
14	Strategische Partner
15	Impressum



Das Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK ist weltweiter Vorreiter auf dem Gebiet der automatisierten virtuellen Rekonstruktion zerstörter Dokumente. Damit wird beschädigtes Archivgut oder Beweismaterial wieder auswertbar. Künftig werden auch zerbrochene Gegenstände wie beispielsweise Fresken virtuell nachgebildet.

Das Fraunhofer IPK in Berlin steht seit über 30 Jahren für Exzellenz in der Produktionswissenschaft. Es betreibt angewandte Forschung und Entwicklung für die gesamte Bandbreite industrieller Aufgaben – von der Produktentwicklung über den Produktionsprozess und die Wiederverwertung von Produkten bis hin zu Gestaltung und Management von Fabrikbetrieben. Analog dazu gliedert sich das Institut in die sechs Geschäftsfelder Unternehmensmanagement, Virtuelle Produktentstehung, Produktionssysteme, Automatisierungstechnik, Füge- und Beschichtungstechnik sowie Medizintechnik. Das Institut legt besonderen Wert darauf, produktionstechnische Lösungen auch über den industriellen Bereich hinaus anwendbar zu machen, etwa in den Bereichen Medizin, Verkehr und Sicherheit.

Im Geschäftsfeld Automatisierungstechnik beschäftigt sich die Abteilung Sicherheitstechnik seit Anfang der 1980er Jahre mit der Entwicklung bildauswertender Systeme für den Einsatz unter schwierigen Umgebungsbedingungen. Durch systematische Forschungsarbeiten wurden lernende Methoden entwickelt, die die Lösung komplexer Mustererkennungsaufgaben ermöglichen. So konnten Systeme zur Erkennung biometrischer Merkmale, zur Überwachung der Bewegungen von Personen und Fahrzeugen sowie zur Interpretation von Dokumenten realisiert werden, die international richtungsweisend sind.

Die prominenteste Anwendung ist jedoch eine Technologie, die einen wertvollen Beitrag zum Erhalt von Kulturgut, zur historischen Forschung und Aufarbeitung sowie für die Forensik leisten wird: die automatisierte virtuelle Rekonstruktion zerrissener, geschredderter oder anderweitig beschädigter Dokumente. Dabei werden gescannte Fragmente von Dokumenten

mit automatisierten Verfahren am Computerbildschirm zusammengesetzt. Das System wird realisiert, um zerrissene Akten des DDR-Staatssicherheitsdienstes wieder lesbar zu machen. Doch auch Experten anderer Fachrichtungen – Altorientforscher ebenso wie Archivare und Kriminologen – beobachten die Entwicklungsarbeit mit großem Interesse. Die Technologie verspricht ihren Disziplinen einen enormen Informations- und Machbarkeitszugewinn. Papier, Papyrus und Pergament spielen seit Jahrtausenden als Kulturträger eine wichtige Rolle. Werden sie jedoch vorsätzlich oder versehentlich beschädigt, mussten die darauf gespeicherten Informationen bisher als verloren gelten, wenn die Wiederherstellung einen zu großen Zeit- oder Personalaufwand erfordert hätte – sofern sie überhaupt möglich war. Die Forschung und Entwicklung des Fraunhofer IPK wird diese Situation grundsätzlich verändern.

Dabei spielt eine wichtige Rolle, dass die Abteilung Sicherheitstechnik nicht nur Algorithmen zur virtuellen Rekonstruktion zweidimensionaler Objekte erarbeitet. Sie berücksichtigt einerseits sämtliche Prozesse in deren Umfeld. So werden etwa Konzepte zur zeiteffizienten und hochauflösenden Digitalisierung des Ausgangsmaterials sowie zur Langzeitarchivierung, Erschließung und Auswertung der rekonstruierten Dokumente erarbeitet. Andererseits befasst sich die Abteilung mit Szenarien, in denen die Wiederherstellung des physischen Ausgangsmaterials angestrebt ist. Dies berührt nicht nur den Bereich Papier, sondern auch dreidimensionale Objekte wie Fresken oder Plastiken. Zur Unterstützung physischer Rekonstruktion sind neben Systemen für eine expertenunterstützte virtuelle (Vor-) Rekonstruktion auch Robotik-Lösungen angedacht, die Fragmente halten, sensibel einpassen und zusammenfügen sollen.

Gespräch mit Dr.-Ing. Bertram Nickolay, Leiter der Abteilung Sicherheitstechnik

Das größte Puzzle der Welt

Im Herbst 1989 begannen Mitarbeiter des Ministeriums für Staatssicherheit (MfS) der DDR, Unterlagen über Bespitzelungsvorgänge zu vernichten. Der Großteil des Materials wurde »vorvernichtet«, also – nachdem die Akten-Schredder heiß gelaufen waren – per Hand zerrissen. Später sollten die Schnipsel endgültig vernichtet werden. So weit kam es jedoch nicht. Gerüchte über die Vernichtungsaktionen veranlassten DDR-Bürger ab dem 4. Dezember 1989, die Dienststellen des MfS zu stürmen. Dabei wurden über 15 000 Säcke mit rund 600 Millionen Schnipseln sichergestellt. 1995 begann die Bundesbehörde für die Unterlagen des Staatssicherheitsdienstes der ehemaligen DDR (BStU) mit der manuellen Rekonstruktion des Materials. Dabei zeigte sich, dass die zerrissenen Unterlagen besonders brisante Informationen enthalten. Sie bezeugen etwa die psychische Zersetzung von Regimekritikern und dokumentieren die Zusammenarbeit sogenannter Inoffizieller Mitarbeiter (IM) mit SED und Staatssicherheit. Die Vernichtung der Akten zielte wohl meist darauf ab, Mitarbeiter vor Enttarnung und Strafverfolgung zu schützen. Im Interesse der Aufarbeitung von DDR-Unrecht ist eine Rekonstruktion daher dringend geboten.



PUZZELN FÜR DIE AUFARBEITUNG

Dr. Bertram Nickolay ist Leiter der Abteilung Sicherheitstechnik. Der aus dem Saarland stammende Diplom-Ingenieur arbeitet nun schon seit 1977 am Fraunhofer IPK. Er hatte die Idee, ein System zu entwickeln, das zerrissene Stasi-Akten automatisiert virtuell rekonstruieren kann. Entstanden ist der ePuzzler – ein auf komplexen Algorithmen basierendes Computersystem, das einen entscheidenden Beitrag zur Aufarbeitung der jüngsten deutschen Geschichte leisten soll.

Woher kam die Idee, den ePuzzler zu entwickeln?

Mitte der 1990er Jahre erfuhr ich über Medienberichte und Gespräche mit Stasi-Opfern, dass im bayerischen Zirndorf Mitarbeiter der BStU zerrissene Geheimdienstakten per Hand zusammenfügen. Da fragte ich mich: Kann man das Problem nicht automatisiert lösen? Die Akten per Hand zu rekonstruieren würde, so schätzte man, einige hundert Jahre dauern. Wir waren sicher, dass sich mit automatisierter virtueller Rekonstruktion der Zeitaufwand auf einen Bruchteil reduzieren ließe.

Weshalb möchten gerade Sie das Stasi-Puzzle lösen?

Mein Team hat über Jahre Kompetenzen in der Automatisierung visueller Prozesse auf Basis von Mustererkennung und digitaler Bildverarbeitung erworben. Dadurch hatten wir das notwendige Know-how, um uns dieser komplexen Aufgabe zu stellen. Zudem habe ich eine persönliche Motivation: Ich habe viele Freunde unter den ehemaligen DDR-Bürgerrechtlern. Einer war der Schriftsteller Jürgen Fuchs, der 1999 mit nur 48 Jahren an Krebs starb. Es ist möglich, dass die Krankheit von heimlicher Bestrahlung während seiner Stasi-Haft verursacht wurde. Man vermutet, dass Regimekritiker in den Gefängnissen gezielt radioaktiv bestrahlt wurden. Wenn das ein rekonstruiertes Blatt Papier beweisen könnte, wäre ich zufrieden.

Wie kam das Projekt zustande und gab es Widerstände?

Das Projekt entstand aufgrund meiner Initiative, doch es war leider kein Selbstläufer. Heute erfährt es eine große internationale Medienresonanz, doch es war immer wieder erforderlich, dass ich aktiv wurde und die der BStU übergeordneten Ministerien und Abgeordnete mehrerer Bundestagsausschüsse an einen Tisch holte, um sie von der Machbarkeit und Innovationskraft des Projekts zu überzeugen. Als dann 2002 der Deutsche Bundestag eine Machbarkeits- und Konzeptstudie international ausschrieb, haben wir diese gewonnen: Wir konnten als einziger Bewerber anhand der Original-Schnipsel beweisen, dass das Problem lösbar ist. Doch erst 2007 beauftragte uns das Beschaffungsamt des Bundesinnenminis-

teriums, in einem Pilotprojekt ein Verfahren zur virtuellen Rekonstruktion zu entwickeln. Dabei werden zunächst 400 Säcke verarbeitet. Die Pilotphase läuft sehr gut, wir wollen sie Ende 2011 abschließen.

Wie wichtig sind die zerrissenen Stasi-Akten?

Die zerrissenen Unterlagen sind ein wichtiges Erbe der friedlichen Revolution. Nach Angaben der BStU sind es primär Akten aus den letzten 20 Jahren der DDR, die besonders brisant und aufschlussreich sind. Zudem: Wenn sich ein Machtapparat so viel Mühe gibt etwas zu vernichten, muss es doch wichtig sein.

Gibt es mit dem ePuzzler vergleichbare Systeme? Und kann man die Technologie auch anderweitig einsetzen?

Die Rekonstruktions-Technologie des Fraunhofer IPK ist wohl weltweit einmalig. Auch wenn vereinzelt anderswo Entwicklungsarbeiten laufen – keiner ist so weit wie wir. Eigentlich ist das erstaunlich, denn Anfragen aus aller Welt zeigen den enormen Bedarf für diese Technologie. Wir dachten zu Beginn, dass die Stasi-Akten ein Einzelfall seien. Doch dann baten uns andere Länder, wie Polen und Tschechien, um Hilfe bei der Rekonstruktion zerrissener und geschredderter Unterlagen. Auch für Kriminal- und Finanzbehörden haben wir schon Dokumente und sogar Fahrzeugkennzeichen rekonstruiert. Außerdem übertragen wir die Technologie auf die Rekonstruktion von Objekten, etwa auf zerstörte Fresken. Hier kooperieren wir bereits mit Archäologen und Kunstwissenschaftlern.

Wie wichtig ist Ihnen persönlich diese Arbeit?

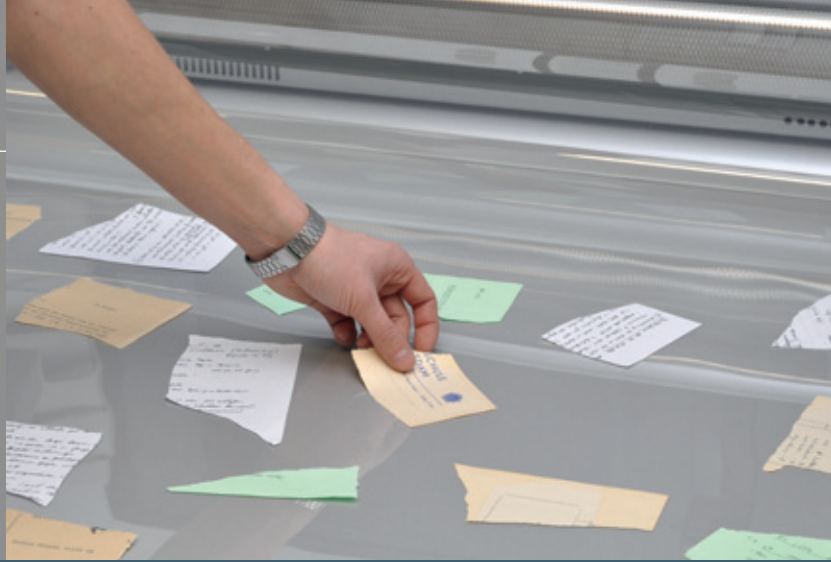
Sehr wichtig. Ich bin mit Leib und Seele Wissenschaftler, die technische Komponente des Projektes war für mich als Ingenieur eine spannende Herausforderung. Doch vor allem die Freundschaft zu Jürgen Fuchs und anderen Verfolgten bestärken mich immer wieder, nicht locker zu lassen. Ich möchte einen Beitrag zur Aufklärung leisten. In der Arbeit meines Teams ergänzen sich Hightech und gesellschaftliche Relevanz auf einzigartige Weise.

DER GESAMTPROZESS

Mit dem am Fraunhofer IPK entwickelten System zur automatisierten virtuellen Rekonstruktion können digitale Abbilder der Fragmente zerrissener und beschädigter Dokumente computerunterstützt zusammengesetzt werden – etwa um Dokumente lesbar zu machen, bei denen die händische Rekonstruktion der Originale entweder gar nicht mehr möglich ist oder zu zeitaufwendig wäre. Das Verfahren wird derzeit hauptsächlich für die Wiederherstellung zweidimensionaler Objekte verwendet – wie Papier oder Pappe.

Die gesamte Rekonstruktion gliedert sich in drei Prozessschritte: Um die Fragmente virtuell verarbeiten zu können, müssen sie zunächst digitalisiert werden. Dann verarbeitet der ePuzzler die Digitalisate und setzt sie automatisiert zu vollständigen Seiten zusammen. Der dritte Schritt greift über die Rekonstruktion einzelner Seiten hinaus: Er umfasst Mechanismen zur automatisierten Formierung rekonstruierter Seiten zu vollständigen Akten und zu deren inhaltlicher Erschließung. Solche Werkzeuge sind vor allem für die Auswertung großer Mengen von Ausgangsmaterial nötig, wie im Falle der zerrissenen Stasi-Akten.





DIGITALISIERUNG



Vor der virtuellen Rekonstruktion müssen digitale Abbilder des Ausgangsmaterials erstellt, Fragmente also gescannt werden. Vorab sind eine Reihe vorbereitender Arbeitsschritte erforderlich. Dazu gehört etwa, die Fragmente zu vereinzeln, sie wenn nötig zu säubern sowie welliges und geknicktes Material möglichst zu glätten und Büro- oder Heftklammern zu entfernen.

Bei der Digitalisierung werden für die Rekonstruktion wichtige Metainformationen erfasst. Wenn etwa Papierschnipsel zusammengeheftet sind, wird diese Information konserviert, sodass auch die rekonstruierten Seiten als zusammengehörig erkannt werden. Zudem werden Informationen zum Material sowie zur groben inhaltlichen und zeitlichen Klassifikation in den Metadaten fixiert. Der Erhalt dieses »Vorwissens« steigert die Performanz des Puzzleprozesses erheblich und ermöglicht die Formierung mehrseitiger Dokumente aus Einzelseiten.

Damit die Digitalisate möglichst akkurat und fehlerfrei zusammengesetzt werden können, muss das Scanverfahren sehr hohe Anforderungen erfüllen. Es muss Fragmente jeder Größe – auch sehr kleine – beidseitig, ohne Reflektionen und Schatten sowie farb- und geometrietreu gegenüber den Originalen erfassen. Sonst können Zusammenhänge zwischen Schnipseln, wie eine identische Färbung oder gemeinsame Außenkanten, nicht identifiziert werden. Außerdem müssen die Fragmente wie im Bluescreen-Verfahren vor einem Hintergrund digitalisiert werden, von dem sie sich pixelgenau freistellen lassen. Schwarze und weiße Hintergründe gängiger Paperscanner sind dafür ungeeignet. Bei großen Mengen von Ausgangsmaterial – wie bei den Stasi-Schnipseln – wird ein Durchsatz von tausenden von Schnipseln pro Stunde angestrebt, wobei das Scangut physisch nur minimal belastet werden darf. Derzeit existiert kein Gerät, das alle Anforderungen erfüllt. In Kooperation mit Herstellern werden daher Geräte eigens für ihre Eignung im Prozess der virtuellen Rekonstruktion angepasst.

Eine der größten Herausforderungen besteht darin, Farb- und Geometrieabweichungen auf ein tolerierbares Maß zu begrenzen. Diese Abweichungen können dem Altern der Lichtquelle, dem Scanverfahren oder dem Einsatz mehrerer Scanner geschuldet sein. Farbdifferenzen werden mithilfe von Farbmanagementsystemen ausgeglichen. Ungenauigkeiten in der Abbildung der Form sind weit schwieriger nivellierbar. Zudem unterscheiden sie sich je nach Scanverfahren. Beim Zeilenscan wird das Scangut an einer Kamera vorbei bewegt und dabei zeilenweise erfasst. Für eine konstante Auflösung ist daher eine extrem stetige Bewegung notwendig, die mechanisch nur sehr schwer zu realisieren ist. Matrixscanner dagegen erfassen eine gesamte Vorlage auf einmal. Dabei auftretende Abbildungsfehler können in Maßen rechnerisch kompensiert werden.

Auch die beidseitige Erfassung erfordert gut durchdachte Lösungen. Eine eindeutige Zuordnung von Schnipselvorder- und -rückseite ist nur möglich, wenn beim Scannen die Ausrichtung beider Schnipselseiten zueinander konstant ist. Dies erreicht man durch gleichzeitiges Scannen beider Seiten oder durch Zuführungsverfahren, bei denen die Schnipsel während des Wendens fixiert bleiben.

Des Weiteren werden Trägermaterialien benötigt, die Fragmente vor Reibung und Druck schützen, zum Beispiel Folientaschen. Diese können jedoch weitere Abbildungsfehler verursachen. Digitalisierung ohne Schattenwurf ist nur bei sehr dünnen Folien möglich. Besonders schwierig wird die Ausleuchtung, wenn zerbrechliche Fragmente im Scangerät zum Beispiel durch Glasplatten geschützt werden müssen. Insgesamt ist die Digitalisierung also ein aufwendiges Forschungsfeld, das parallel zur Entwicklung von Rekonstruktionssoftware aktiv vorangetrieben wird.



DER ePUZZLER



Das Herzstück des Systems zur automatisierten virtuellen Rekonstruktion ist der ePuzzler; hier findet die eigentliche virtuelle Wiederherstellung zerrissener Seiten statt. Der ePuzzler ist eine vom Fraunhofer IPK entwickelte Rekonstruktionssoftware, die mithilfe komplexer Algorithmen der Bildverarbeitung und Mustererkennung gescannte Papierfragmente automatisiert zu vollständigen Seiten zusammensetzt. Außerdem stellt sie Werkzeuge zur Verfügung, um fragwürdige oder doppeldeutige Puzzleergebnisse manuell zu prüfen und zu korrigieren.

Der ePuzzler gliedert sich in die drei Hauptkomponenten Merkmalsextraktion, Suchraumreduktion und Matcher. Da sich bei zerrissenem Papier keine zwei Schnipsel exakt gleichen, lässt sich vorab nicht bestimmen, wie oft und in welcher Abfolge die verschiedenen Module während eines Rekonstruktionsvorgangs ineinander greifen müssen. Daher sind sie durch ein komplexes Softwareframework in einen nicht deterministischen, adaptiven Workflow eingebettet. Die Methodik der virtuellen Rekonstruktion gleicht der eines Menschen beim Puzzeln. Er entscheidet anhand einer Vielzahl von Merkmalen, ob zwei Teile zusammen passen oder nicht. Ana-

log zur menschlichen Vorgehensweise berechnet der ePuzzler zunächst verschiedene Merkmale der Schnipsel wie Kontur, Papierfarbe, Schrift oder Linierung. Sie werden genutzt, um den kombinatorischen Aufwand beim Puzzeln zu reduzieren – das ist speziell bei großen Datenmengen wichtig. Ähnliche Schnipsel werden daher mittels intelligenter Suchraumreduktion in Untermengen zusammengefasst. Innerhalb der reduzierten Mengen findet dann die eigentliche Rekonstruktion, das Matchen, statt. Dabei werden Schnipsel entlang ihrer Konturen auf Merkmalsübereinstimmung verglichen. Passen zwei Schnipsel zusammen, werden sie digital verklebt und bei der weiteren Rekonstruktion als größeres Fragment berücksichtigt.

Gelegentlich können Mehrdeutigkeiten dazu führen, dass der ePuzzler nicht entscheiden kann, ob zwei Teile tatsächlich zusammen gehören. Dann werden die bisher erzielten Teilrekonstruktionen gesammelt und zu einem geeigneten Zeitpunkt automatisch an sogenannte Nachbearbeitungsplätze geleitet. Hier legt das System einem menschlichen Bearbeiter eine Auswahl der wahrscheinlichsten Rekonstruktionspartner vor, so dass die Ergebnisse interaktiv vervollständigt werden können.

Spezielle Aufgabe: geschredderte Dokumente

Innerhalb der virtuellen Rekonstruktion zweidimensionaler Objekte stellt die Rekonstruktion geschredderter Dokumente einen Sonderfall dar. Die Verfahren zur Merkmalsextraktion und zum Matching stehen hier vor extremen Herausforderungen: Die Fragmente haben eine uniforme Kontur, sodass sich die Rekonstruktion nur auf inhaltliche Merkmale und Farbverläufe stützen kann. Zudem sind die Fragmente nur wenige Millimeter breit und einige Zentimeter lang, sodass die inhaltlichen Merkmale aus nur wenigen Pixeln abgeleitet werden müssen. Daher wird bei

der Schredder-Rekonstruktion darauf verzichtet, den Inhalt in naheliegende Klassen wie »Schrift« oder »Linierung« einzuordnen. Stattdessen werden sämtliche Elemente auf einem Streifen – einschließlich der Papierfarbe – als geometrische Objekte behandelt, anhand deren Verteilung nach Regeln des binären Stringmatchings und der Wahrscheinlichkeit mathematisch mutmaßlich passende Nachbarn ermittelt werden. Das Ergebnis ist damit ein geometrisch naheliegendes, nicht unbedingt ein inhaltlich korrektes. Derzeit werden Schredder-Rekonstruktionen daher stets von einem menschlichen Betrachter überprüft.



AUFBEREITUNG & ERSCHLIESSUNG



Wenn am Ende eines Rekonstruktionsvorgangs eine korrekt und vollständig zusammengesetzte Seite vorliegt, ist dies bereits ein sehr wertvolles Ergebnis. Für die inhaltliche Auswertung sind Einzelseiten jedoch meist von relativ geringem Wert. Daher werden derzeit in Kooperation mit Partnern Mechanismen entwickelt, die künftig helfen sollen, aus rekonstruierten Seiten ganze Dokumente oder gar zusammenhängende Akten zu formieren. Hinzu werden Werkzeuge kommen, die die Erschließung großer Mengen virtuellen Materials erleichtern.

Unter Aktenformierung versteht man das Zusammenführen einzelner Seiten zu Dokumenten und mehrerer Dokumente zu Akten. In Archiven wird dieser Prozess derzeit händisch ohne Unterstützung durch Softwaretools durchgeführt. Doch mithilfe von Methoden der digitalen Bildverarbeitung, die mit denen des ePuzzlers vergleichbar sind, könnte die Formierung bis zu einem bestimmten Grad automatisiert werden.

Erste Ansätze in dieser Richtung stützen sich auf die Metadaten, die im Vorfeld erfasst oder während des Rekonstruktionsprozesses berechnet werden: Informationen zu Papierart und -farbe, Schrifttypen und -farben oder Linierung. Am Fraunhofer IPK wurden bereits Algorithmen zur Tabellen- und Formularerkennung entwickelt, die anhand von Vorlagen bekannte Formulartypen auf rekonstruierten Seiten erkennen. Ziel ist es, diese Verfahren so zu erweitern, dass sie aus wiederkehrenden Mustern selbständig weitere, unbekannte Formulartypen ableiten. Zudem werden die Extraktion von Layoutmerkmalen und der Handschriftenvergleich vorangetrieben. Damit sollen mittelfristig wiederkehrende Elemente wie etwa Seitenzahlen oder Kopfzeilen identifiziert werden, anhand derer Zusammenhänge zwischen Einzelseiten hergestellt werden können. Langfristig sollen auch Seiten gruppiert werden, die von der gleichen Hand oder mit der gleichen Schreibmaschine geschrieben wurden. Die Formierung würde so erheblich beschleunigt.

Auch für die formale und inhaltliche Erschließung rekonstruierter Dokumente besitzt die digitale Bildverarbeitung großes Potenzial. Mittels optischer Zeichenerkennung (OCR) könnte gezielt nach Schlagworten gesucht werden, anhand derer sich Dokumente einem bestimmten Kontext zuordnen lassen. So ließe sich nicht nur die Aktenformierung, sondern auch die Erstellung von Katalogeinträgen erleichtern. Dazu ist allerdings noch viel Forschungsarbeit nötig. So erlaubt der Stand der Entwicklung von OCR-Software bisher nur die Auswertung einer sehr begrenzten Zahl von Schrifttypen – die Technologien stoßen spätestens bei Hand- oder Frakturschrift an ihre Grenzen.

Schon bevor die genannten Verfahren im Archivwesen anwendbar sind, wird es notwendig sein, rekonstruierte Einzelseiten für Forschung und Aufarbeitung heranzuziehen, etwa wenn in Gerichtsprozessen über das Ausmaß von Aktivitäten der DDR-Staatssicherheit geurteilt werden soll. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Rechtsfähigkeit des digital erstellten Materials zu gewährleisten. Daher muss von der Digitalisierung bis zur Langzeitarchivierung der gesamte Prozess der virtuellen Rekonstruktion transparent ausgelegt sein. Zudem müssen die Prozessdaten – insbesondere die Schnipselbilder – durch den Einsatz gängiger Hash-Verfahren, mit deren Hilfe die Integrität und Vollständigkeit der Daten nachgewiesen werden kann, gegen Manipulation geschützt werden.

Trotz solcher Maßnahmen wird das virtuelle Material nicht in jedem Kontext ausreichen. Gelegentlich kann es notwendig sein, ein rekonstruiertes Original vorzulegen. Auch dieser Fall wird im Rekonstruktionsprozess berücksichtigt. Bereits bei der Digitalisierung erhält jeder Schnipsel eine eindeutige Kennung, die auf den Ablageort des Originals verweist. So können wenn nötig die Originalfragmente einer virtuell rekonstruierten Seite leicht gefunden werden, um sie physisch zusammenzusetzen.

ERHALTUNG UND WIEDERHERSTELLUNG VON KULTURGÜTERN

*Rechts: Fragmente
zerstörter Dokumente aus
dem Kölner Stadtarchiv*

Assistenzbasierte Rekonstruktion in der Ägyptologie

Dr. Friederike Seyfried, Direktorin der Ägyptischen Sammlung der Staatlichen Museen zu Berlin, plant gemeinsam mit dem Fraunhofer IPK ein einzigartiges Pilotprojekt zur computergestützten Zusammenführung fragmentierter Papyri.

Was versprechen Sie sich von diesem Projekt?

Die Papyrussammlung des Ägyptischen Museums wird derzeit von nur einer Restauratorin betreut. Die Zahl der Fragmente, die sie während der restauratorischen Arbeit zusammensetzen kann, ist aus diesem Grunde begrenzt. Stellen Sie sich den Informationsgewinn vor, wenn man sie mit virtuellen Verfahren unterstützen könnte! Außerdem besitzen wir Konvolute, die auf Sammlungen an mehreren Orten verteilt sind. Wenn man sie zumindest virtuell zusammenführen könnte, wäre das eine große Hilfe für die Forschung.

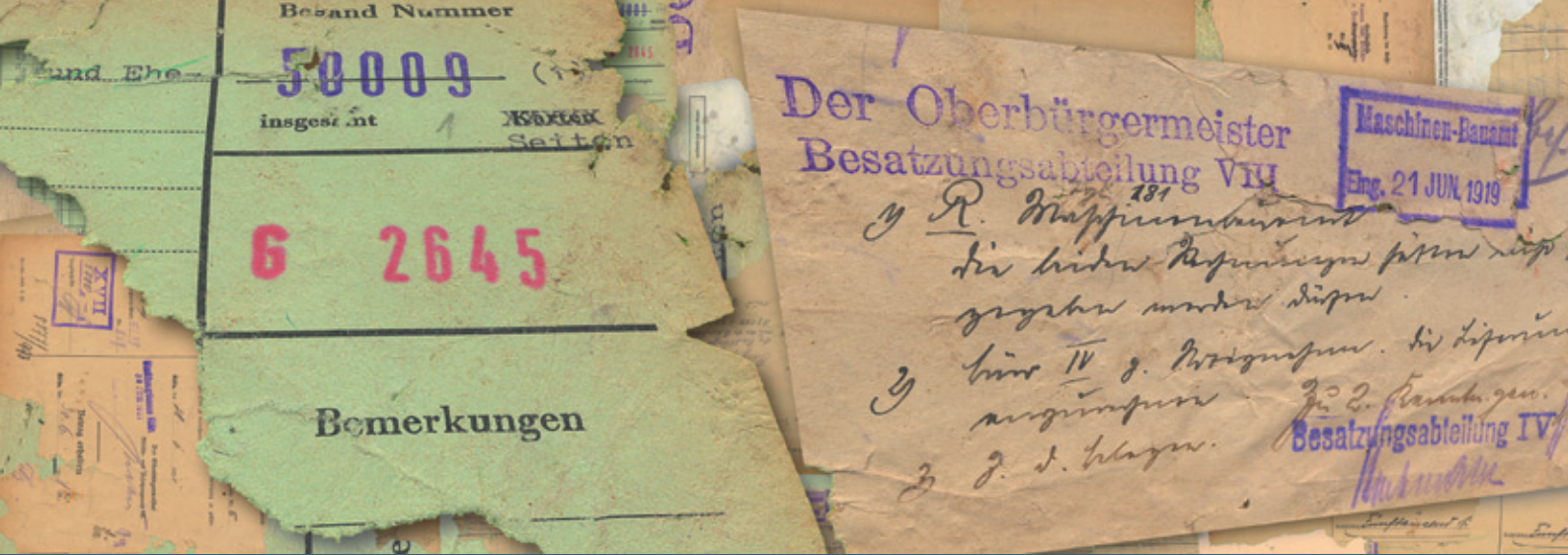
Warum muss das System expertengestützt sein?

Unsere Restauratorin kennt wie keine andere das hochsensible Material »Papyrus«. Sie kann etwa anhand des Faserverlaufs und der Machart Herkunftsorte und Datierungen der Herstellung näher eingrenzen. Solches Wissen kann man einem Computer kaum beibringen. Daher können wir auf das Expertenwissen des Restaurators – aber auch des Wissenschaftlers, der die Schrift entziffern kann – nicht verzichten. Dieses Wissen wird in die notwendige Softwareentwicklung mit einfließen, kann aber nie ersetzt werden.

Warum reicht bloße virtuelle Rekonstruktion nicht?

Weil wir nicht nur die rekonstruierten Schriften lesen möchten, sondern auch das zusammenhängende Material analysieren sollten. Die Herstellung von Papyrus ist in zeitgenössischen Quellen nicht dokumentiert. Wir können das Verfahren also nur am Material nachvollziehen. Virtuelle Abbilder geben nicht alle Details wieder, wir müssen also die Originale zusammensetzen – zumindest den Teil, der bei uns liegt. Auch da wird uns die virtuelle Rekonstruktion hoffentlich eine entscheidende Hilfe sein: Sie dürfte uns zeigen, ob wir überhaupt alle Teile eines Schriftstücks besitzen oder ob wichtige Fragmente davon eventuell zu anderen Sammlungen gehören oder schlicht verloren sind.

*Hochgradig beschädigte,
aber historisch einmalige
Papyri aus der Ägyptischen
Sammlung der Stiftung
Preußischer Kulturbesitz*



HIGHTECH TRIFFT EXPERTENWISSEN

Die automatisierte virtuelle Rekonstruktion ist ein sehr vielseitiges Werkzeug. Um sie noch effizienter zur Erhaltung und Wiederherstellung kulturell und gesamtgesellschaftlich relevanter Dokumente und Objekte einsetzen zu können, entwickeln die Wissenschaftler des Fraunhofer IPK assistenzbasierte Rekonstruktionssysteme, die das Wissen von Experten im Rekonstruktionsprozess nutzen und die physische Rekonstruktion von Kulturgütern ermöglichen.

Bei der assistenzbasierten Rekonstruktion werden zwei Ansätze unterschieden. Zum einen gibt es das Konzept der *assistenzbasierten virtuellen Rekonstruktion*. Ziel dieses Ansatzes ist wie bei der vollautomatisierten virtuellen Rekonstruktion die *virtuelle Wiederherstellung von Inhalten*. Die physischen Fragmente werden in der Regel nach der Digitalisierung nicht mehr benötigt und archiviert. Der Unterschied zwischen den beiden Verfahren besteht darin, dass das assistenzbasierte auf Fragmente ausgelegt ist, für die eine vollautomatisierte Wiederherstellung technisch nicht möglich ist, der Rekonstruktionsprozess also die aktive Mitarbeit eines menschlichen Betrachters erfordert. Beispiele sind die auf Seite 8 geschilderte Wiederherstellung geschredderter Unterlagen sowie die Lesbarmachung zerschnittener Kfz-Kennzeichen.

Daneben besteht die Vision eines *Assistenzsystems zur Unterstützung physischer Rekonstruktion*. Hier soll das Ergebnis einer virtuellen Rekonstruktion als Vorlage für die anschließende manuelle Rekonstruktion oder Restaurierung dienen. Derartige Systeme stellen hohe Anforderungen an den Workflow vor der Digitalisierung sowie nach der virtuellen Rekonstruktion. Da das Ziel dieses Ansatzes die *physische Wiederherstellung* der vorab digitalisierten Objekte ist, ist dabei der Einsatz eines leistungsfähigen, auf die Aufgabe zugeschnittenen Tracking-Systems erforderlich. Abhängig von der Aufgabenstellung ist zudem in zahlreichen Anwendungsfällen der physischen Rekonstruktion die Auswertung von Expertenwissen unerlässlich. Dabei kann es sich zum einen um Fachkenntnisse eines verantwortlichen Archivars oder Restaurators handeln – Angaben zum Fundort, zum Alter oder zu zeitgenössischen Besonder-

heiten, welche als a-priori-Wissen über die Metainformationen in die virtuelle Rekonstruktion einfließen. Zum anderen kann es sich um Erkenntnisse handeln, die erst im Prozess der virtuellen Rekonstruktion sichtbar werden – etwa inhaltliche Merkmale, die auf kleinen Fragmenten nicht, sehr wohl aber auf größeren Teilrekonstruktionen mehrerer Fragmente sichtbar sind. Der Computer kann dieses auf langjähriger Erfahrung basierende Expertenwissen nicht abbilden, dem Prozess der Wiederherstellung muss es jedoch zur Erzielung hoher Rekonstruktionsraten zur Verfügung gestellt werden.

Dieser Ansatz wird aktuell in der Praxis erprobt. Das Fraunhofer IPK plant in Kooperation mit der Ägyptischen Sammlung der Stiftung Preußischer Kulturbesitz ein System, das die physische Rekonstruktion eines Konvoluts hochgradig beschädigter, aber historisch einmaliger Papyri ermöglichen soll. Eine Rekonstruktion von Menschenhand ist wegen der gigantischen Menge kleinstteiliger Fragmente in überschaubarer Zeit nicht möglich. Die Aufgabe kann nur gelöst werden, wenn Expertenwissen und eine Lösung zur virtuellen Rekonstruktion zusammenwirken. Das gleiche gilt im Fall des eingestürzten Kölner Stadtarchivs. Auch hier kann ein auf Methoden des Fraunhofer IPK basierendes Assistenzsystem entscheidend dazu beitragen, weite Teile des historisch bedeutenden, durch die großen mechanischen Kräfte des Einsturzes erheblich beschädigten Archivguts zu rekonstruieren und zu restaurieren. Die Anwendbarkeit der Verfahren der virtuellen Rekonstruktion wurde im Auftrag der Stadt Köln bereits anhand einer 1000 Teile umfassenden, repräsentativen Stichprobe nachgewiesen.

ERHALTUNG UND WIEDERHERSTELLUNG VON KULTURGÜTERN

*Mithilfe virtueller
3-D-Rekonstruktion könn-
ten zum Beispiel in klein-
teilige Fragmente zerbro-
chene Wandfresken wieder
zusammengesetzt werden.*





VIRTUELLE 3-D-REKONSTRUKTION

Anwendungsgebiete für automatisierte virtuelle Rekonstruktion finden sich nicht nur bei zweidimensionalen Gegenständen wie Papier und Papyrus. Der dreidimensionale Bereich bietet gute Argumente für automatisierte Rekonstruktionsverfahren.

Archäologie und Denkmalpflege bedienen sich schon lange der Möglichkeit virtueller 3-D-Darstellung zerstörter Gebäude und Objekte. Allerdings existiert bisher kein Verfahren, um digitalisierte Einzelteile räumlicher Gegenstände automatisiert zusammensetzen. Virtuelle Rekonstruktion etwa zur Präsentation im Museum, ist bisher ein manueller Vorgang, der darauf aufbaut, dass bereits bekannt ist, welches Teil an welcher Position gehört. Dabei bieten sich automatisierte Rekonstruktionsverfahren gerade im dreidimensionalen Bereich an. Hier haben Restauratoren mit vielen Schwierigkeiten zu kämpfen: Zum einen müssen die Fragmente räumlich angeordnet werden – das ist nicht nur in der praktischen Umsetzung eine Herausforderung. Häufig ist auch die ursprüngliche Form des zu rekonstruierenden Objektes vorab unbekannt. Zum anderen fallen bei umfangreichen Ausgrabungen oder bei großflächigen Objekten wie Wandfresken große Mengen von Fragmenten an. Mit Unterstützung virtueller Verfahren kann ihre Sortierung und Anordnung enorm beschleunigt werden.

Konzepte für die automatisierte virtuelle Rekonstruktion dreidimensionaler Objekte entwickelt das Fraunhofer IPK etwa am Beispiel von rund 100 000 Fragmenten von Marmorplatten, die bei Ausgrabungen im türkischen Ephesus geborgen werden. Diese Objekte eignen sich gut für erste Versuche in diesem Bereich, da keine komplexe dreidimensionale Erfassung der Fragmente erforderlich ist. Stattdessen wird eine Rekonstruktion anhand von Oberflächeninformationen angestrebt, indem analog zum 2-D-Bereich Konturen und Texturen ausgewertet werden. Zusätzlich – und hier greift das Verfahren über die 2-D-Rekonstruktion hinaus – wird die Dicke der Platten an den Bruchkanten herangezogen, um das Finden von Fragmentenpaarungen zu unterstützen.

Diese Vorgehensweise stellt somit einen Zwischenschritt zu »echter« 3-D-Rekonstruktion dar: Ausgewertet wird eine 2-D-Aufnahme einer Seite des Objektes, ergänzt um Tiefeninformationen. Man kann das Verfahren daher als 2,5-D-Rekonstruktion interpretieren. Aus mehreren 2,5-D-Aufnahmen, die alle Bereiche der Oberfläche eines Objektes abbilden, können in einem weiteren Schritt vollständige 3-D-Objekte gebildet werden. Die größte Herausforderung besteht dabei darin, Objektoberflächen und Bruchflächen verlässlich voneinander zu separieren und entsprechende Sichten darauf zu generieren.

Voraussetzung für jegliche Form räumlicher virtueller Rekonstruktion sind Aufnahmegeräte mit ausreichender Abbildungsgüte, die sich für das jeweils zu rekonstruierende Material eignen. Üblich sind Laserscanner, die die Oberflächen punktwise abtasten, Laserschnittverfahren, die über Ebenenschnitte Tiefeninformationen ermitteln, oder topometrische Messsysteme, die mittels Triangulation von auf das Objekt projizierten Mustern Tiefeninformationen gewinnen. Denkbar sind aber auch weitere Verfahren zur Gewinnung von 3-D-Informationen, wie die Stereophotogrammetrie.

Die Aufnahme stellt einen wesentlichen Zeitfaktor bei der Verarbeitung dreidimensionaler Objekte dar. Aus diesem Grund werden am Fraunhofer IPK zunächst Konzepte entwickelt, um diesen Arbeitsschritt so automatisiert und performant wie möglich durchzuführen. Ein weiteres Arbeitsfeld liegt in der Entwicklung von Algorithmen zur 3-D-Rekonstruktion. Hier werden erfolgreich erprobte Methoden der 2-D-Rekonstruktion adaptiert und erweitert.

GEMEINSAM EIN GROSSES ZIEL VOR AUGEN

Die virtuelle Rekonstruktion ist eine fachlich wie gesellschaftlich relevante Herausforderung für Wissenschaft und Forschung. Gemeinsam mit einem weltweiten Netzwerk namhafter strategischer Partner aus den Bereichen Forschung und Industrie verfolgt das Team des Fraunhofer IPK das Ziel, die Potenziale der Rekonstruktion zukünftig weiter auszuschöpfen, um mit einzigartigen Innovationen den Technologiestandort Deutschland zu stärken.

Partner aus Forschung & Entwicklung

In der anwendungsorientierten Grundlagenforschung kooperiert das Fraunhofer IPK eng mit dem Institut für Rechnergestützte Automation (Computer Aided Automation, CAA) der TU Wien. Das Institut für Rechnergestützte Automation wird geleitet von Prof. Sablatnig, einer international anerkannten Schlüsselfigur der Mustererkennung. Seine Forschungsgruppe beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit dem Gebiet der Computer Vision, Bildverarbeitung und Mustererkennung und ist weltweit führend in der Anwendung der digitalen Bildverarbeitung in der Archäologie. Aufgrund ihrer herausragenden Forschungsergebnisse zu Methoden der automatischen Schrifterkennung entwickelt die Arbeitsgruppe Schrifterkennungsmodule für die Rekonstruktionsprojekte des Fraunhofer IPK.

Partner aus der Industrie

Wichtige Industriepartner des Fraunhofer IPK sind arvato services und die SAP Deutschland AG & Co. KG (SAP Deutschland). arvato services ist Teil des globalen Bertelsmann-Konzerns und einer der größten Anbieter professionellen Dokumentenmanagements in Deutschland. Als erfolgreiches Dienstleistungsunternehmen für effektive Lösungen, verfügt arvato services über langjährige Erfahrung in der Steuerung und Koordination von nationalen und internationalen Dienstleistungen mit komplexen Geschäftsmodellen. Da die Dienstleistungen im Bereich Dokumentenmanagement ein großes Leistungsspektrum umfassen, profitiert die virtuelle Rekonstruktion vom ele-

mentaren Scan- und Logistik-Know-how der arvato services. Aufgrund ähnlich gelagerter Dienstleistungen der Vergangenheit verfügt das Unternehmen über umfangreiches Prozess-Know-how in Bezug auf das Scannen, die elektronische Speicherung, die Bildbearbeitung sowie die Übermittlung von Lichtbilddaten in elektronisch aufbereiteter Form. Seit 2005 ist arvato services strategischer Partner des Fraunhofer IPK für Digitalisierungsaufgaben im Rahmen von Rekonstruktionsprojekten. Mit Beginn der Pilotphase des BSTU-Projektes ist arvato services als Unterauftragnehmer des Fraunhofer IPK involviert, um die zerrissenen Unterlagen zu digitalisieren. Angesichts der Schnipselmassen bewältigt das Unternehmen hierbei eine enorme logistische Herausforderung.

SAP ist, gemessen an der Marktkapitalisierung, der weltweit drittgrößte unabhängige Softwarehersteller für Unternehmen und Verwaltungen. Seit Anfang der 1990er Jahre entwickelt SAP integrierte Lösungen speziell auch für den öffentlichen Bereich (SAP Public Sector). Damit sind Organisationen in der Lage, ihre Geschäftsprozesse intern sowie mit Kunden, Partnern und Lieferanten erfolgreich zu organisieren und ihre betriebliche Wertschöpfung maßgeblich zu verbessern. Als führender Softwarehersteller unterstützt SAP das Fraunhofer IPK künftig bei der Produktentwicklung sowie bei Akquise, Durchführung und Vertrieb von 2-D-Digitalisierungs- und Rekonstruktionsprojekten. Zudem unterstützt SAP die Entwicklung von prozessbezogenen Benutzeroberflächen für die automatisierte virtuelle Rekonstruktion und die Integration von Textanalyse-Verfahren in die Dokumenteninterpretation für die Aktenformierung und -erschließung.

Auftraggeber als Innovationspartner

Doch nicht nur Partner aus Forschung, Entwicklung und Industrie waren und sind relevant für das Voranbringen der Technologien rund um die automatisierte virtuelle Rekonstruktion. Eine enge Partnerschaft besteht auch mit der Behörde der Bundesbeauftragten für die Unterlagen des Staatssicherheitsdienstes der ehemaligen DDR (BStU), der Auftraggeberin des Stasi-Schnipsel-Projektes. In ihren Archiven warten mehr als 15 000 Säcke mit zerrissenen Stasi-Unterlagen auf die Rekonstruktion, um sie archivisch erschließen und danach für Zwecke gemäß Stasi-Unterlagen-Gesetz (StUG) nutzen zu können. Dieses umfangreiche vorvernichtete Archivmaterial der Behörde und die im Februar 1995 in Zirndorf bei Nürnberg begonnene Rekonstruktion der Stasi-Unterlagen per Hand inspirierte das Fraunhofer IPK zu seinen innovativen technologischen Entwicklungen. Zwischen dem Institut und der BStU besteht eine enge Zusammenarbeit in dem Bestreben um die Aufarbeitung von Gewaltregimen. Zudem betreten die BStU und das Fraunhofer IPK immer wieder gemeinsam technologisches Neuland, wie im Bereich der computergestützten Formierung und Erschließung der virtuell rekonstruierten Stasi-Unterlagen.

Impressum

Herausgeber

Dr.-Ing. Bertram Nickolay
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstraße 8-9, 10587 Berlin
www.ipk.fraunhofer.de

Ansprechpartner



Dr.-Ing. Bertram Nickolay, Leiter der Abteilung
Sicherheitstechnik
Tel.: +49 30 39006-201
Fax: +49 30 391-7517
E-Mail: bertram.nickolay@ipk.fraunhofer.de



Dipl.-Ing. Jan Schneider, Projektleiter
Tel.: +49 30 39006-203
E-Mail: jan.schneider@ipk.fraunhofer.de

Redaktion: Nicole Kaiser, Jan Schneider,
Katharina Strohmeier

Gestaltung: Konstantin Heß

Fotos: Fraunhofer IPK: Gerold Baumhauer (1, 2, 3,
4, 7, 8, 9, 15), Jan Schneider (12,13)
Staatliche Museen zu Berlin, Ägyptisches Museum
und Papyrussammlung: Myriam Krutzsch (10)

