

# CUNEIFORM

## 3D-Joins und Schriftmetrologie

G.G.W. Müller<sup>1</sup>, G. Wilhelm<sup>2</sup>, F. Weichert<sup>3</sup>, M. Cammarosano<sup>1,2</sup>, D. Fisseler<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Institut für Altertumswissenschaften, Lehrstuhl für Altorientalistik  
<sup>2</sup>Akademie der Wissenschaften und der Literatur, Mainz  
<sup>3</sup>Technische Universität Dortmund, Fakultät Informatik, Lehrstuhl für Graphische Systeme (LS7)



### Teilprojekte

#### Teilprojekt 1 (Universität Würzburg):

Identifikation charakteristischer Eigenschaften von Schriftzeichen und Analyse von Schriftmerkmalen zur Klassifizierung von Tontafel(fragmente)n

#### Teilprojekt 2 (AdW Mainz):

Aufbereitung und Akquisition von 3D-Daten zur Schrift- und Fragmentanalyse

#### Teilprojekt 3 (TU Dortmund):

Automatisierte 3D-Rekonstruktion, Merkmalsextraktion und Analyse

### Wissenschaftlicher use case

Für die Altorientalistik besteht die Notwendigkeit zur zeitlichen und qualitativen Effektivierung der dreidimensionalen Rekonstruktion von zerbrochenen antiken Schriftträgern und Fragmenten sowie der Analyse entsprechender Texte, insbesondere wenn die textinternen Kriterien für eine Rekonstruktion insuffizient sind, da die Anzahl zu rekonstruierender Objekte groß ist und manuelle Rekonstruktionen sowie Analysen sehr zeitaufwendig sind. Beispielsweise wurden im Falle der altorientalistischen Keilschrift bisher über 500.000 Texte und Fragmente gefunden.

Besonders in großen Bibliotheken wie der des Assurbanipal in Niniwe oder den Palast- und Tempelbibliotheken der Hethiterhauptstadt Hattuscha liegen sehr viele große Tafeln in Form von Fragmenten ohne Topologieinformation vor. Daher besteht die Notwendigkeit zur automatisierten Rekonstruktion sowie zur vorausgehenden Analyse der Schrift- und Strukturmerkmale der Fragmente im Hinblick einer Vorsortierung. Die speziellen Anforderungen zur dreidimensionalen Rekonstruktion von fragmentierten Tontafeln und zur Analyse von Keilschriften unter den Anforderungen Robustheit, Skalierbarkeit, Automatisierbarkeit und Güte erfordert die Entwicklung grundsätzlich neuer Verfahren und Konzepte seitens der Informatik.

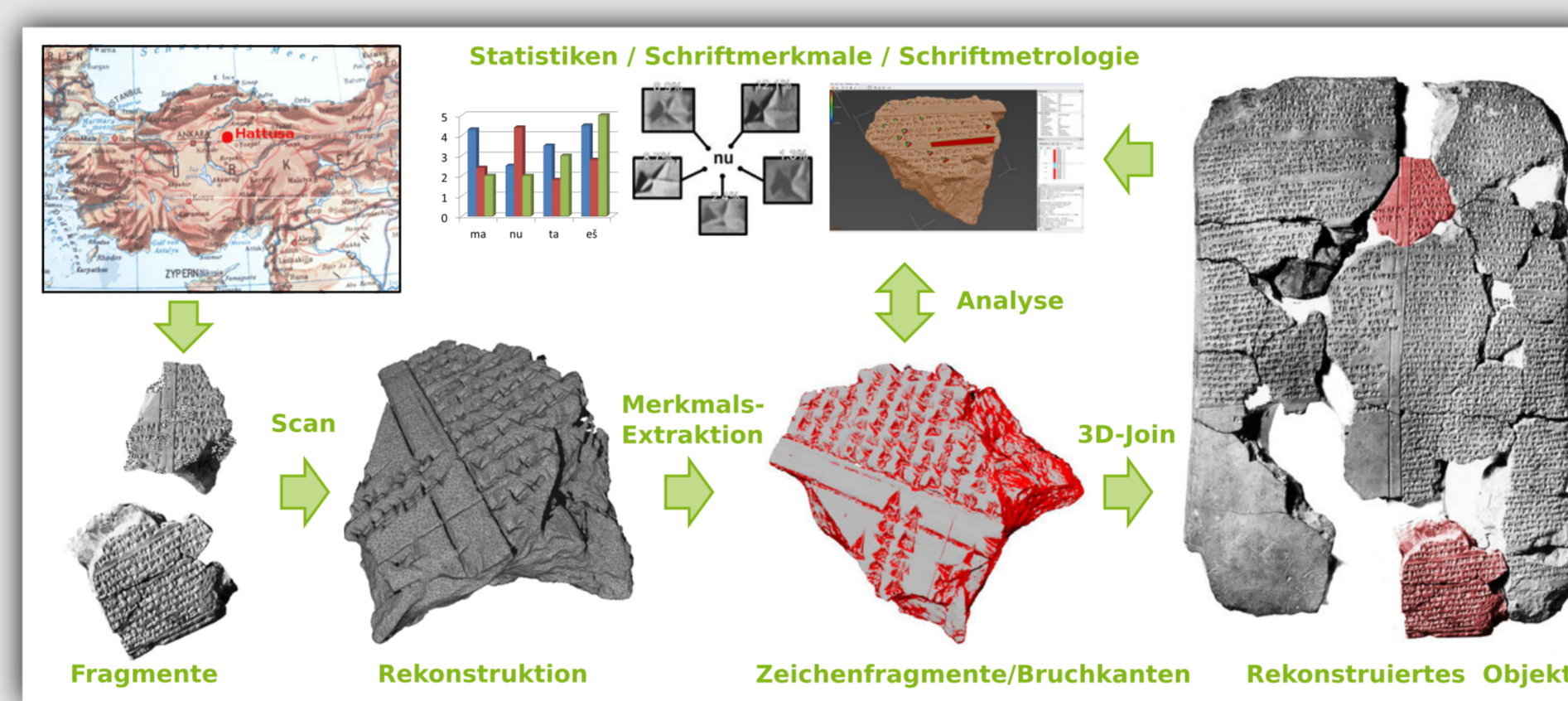
Durch die generische Projektierung eröffnen die Methoden zur Rekonstruktion und statistischen Schriftanalyse darüber hinaus durch die Identifikation von Schreibern sowie Tätigkeits- und Beziehungsclustern neue Forschungsfelder, erlauben die Adaption auf andere Inschriften-gattungen und den Transfer auf Bereiche jenseits der Altertumswissenschaften.

### Projektbeschreibung

Das interdisziplinäre Forschungs- und Entwicklungsprojekt „3D-Joins und Schriftmetrologie“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), erforscht unter der Leitung des Verbundkoordinators Prof. Dr. Gerfrid G.W. Müller nachhaltige Konzepte und Methoden zur Erhebung von Schriftmerkmalen, im weiteren Sinne auf fragmentierten Tontafeln mit Keilschrift, zu deren Sortierung nach quantifizierbaren Merkmalen und schließlich der dreidimensionalen Rekonstruktion der einzelnen Tontafeln über die Konturen der Fragmente mit größter Merkmalsübereinstimmung.

Das Forschungsvorhaben ist ein Gemeinschaftsprojekt der Würzburger Altorientalistik, der Akademie der Wissenschaften und der Literatur in Mainz sowie Informatikern an der Technischen Universität Dortmund.

Grundlage der Bearbeitung sind dreidimensionale Punktwolken, die durch hochauflösende 3D-Scanner akquiriert werden. Zur Untersuchung der Punktwolken werden am Lehrstuhl für Graphische Systeme der TU Dortmund unter Leitung von Dr. Frank Weichert neuartige Methoden zur zuverlässigen Detektion von Keilschriftzeichen, 3D-Rekonstruktion von Schriftträgern und Analyse von Schrift(gattungen) entwickelt. Als Materialgrundlage werden in erster Linie Keilschrifttexte aus der antiken Hethiterhauptstadt Hattuscha (ca. 30.000 Texte und Fragmente) dienen, die seit 2001 von der UNESCO als „Memory of the World“-Kulturerbe geführt werden, und mit deren Aufarbeitung die Forschungsstelle „Hethitische Forschungen“ der Akademie der Wissenschaften und der Literatur in Mainz unter Leitung von Prof. Dr. Dr. h.c. Gernot Wilhelm federführend befasst ist.



Verarbeitungspipeline für Keilschrifttafel Fragmente

### Methoden

Die Erarbeitung tragfähiger Methoden zur nachhaltigen (Schrift-) Analyse setzt eine suffiziente Extraktion salienter Merkmale für Schriftzeichen voraus. Dies beinhaltet initial Artefakte infolge verrauschter Daten, von Auflösungsdefiziten und Abtastlücken - eventuell als Randeffekt einer Fusion von Datenquellen - mittels geeigneter Filtertechniken der Netzglättung, Umvernetzung oder Netzreparatur zu kompensieren. Ergebnisse der direkten Musterverwendung, aus transformationsbasierten Verfahren und Sampling basierten Matting-Techniken repräsentieren in Kombination mit statistischen Dekompositionsmethoden die Datenbasis für (un)überwachte Klassifikationsverfahren.

Die im Rahmen des Projekts verwendeten Manuskripte werden mit Hilfe eines mobilen Breuckmann OPTOTOP 3D-Streifenlichtscanners der AdW-Mainz digitalisiert. Dabei bietet der verwendete 3D-Scanner eine Erfassungsgenauigkeit von 30µm und ist unter Verwendung der Scan-Software OPTOCAT in der Lage, multiple Aufnahmen eines Objekts zu einem digitalen Gesamtmodell zu fusionieren. Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle den kooperierenden türkischen Museen, die eine digitale Erfassung von Manuskripten im Zeitraum 2011-2014 ermöglicht haben, konkret dem Anadolu Medeniyetleri Müzesi in Ankara und den Istanbul Arkeoloji Müzesi in Istanbul.

Zur Erhöhung der Robustheit kommen (semi-)automatische, parametrisierbare Methoden zum Tragen respektive zur Parametrisierung der Methoden (proaktive) Optimierungsverfahren, auch eine „Selbstoptimierung“ des Gesamtklassifikators im Rahmen einer Klassifikator-kaskade. Die Entwicklung neuer Algorithmen zur dreidimensionalen Rekonstruktion fragmentierter Schriftdokumente (Keilschrifttafeln) beinhaltet Textur- oder Merkmals-basierte Registrierungsverfahren mit inhärenten rigiden und nicht-rigiden (elastischen) Transformationen, insbesondere unter vereinheitlichter Nutzung von Merkmalen aus der Schriftausprägung und -typisierung.

Die gewonnenen Schriftmerkmale werden einer metrologischen, dreidimensionalen Analyse unterzogen, um ihre philologische Relevanz im Kontext der Identifikation von Handschriften und Schreibern zu ermitteln. Dabei bildet die Identifikation potentiell relevanter Merkmale die Ausgangsbasis für eine philologische Anforderungsbeschreibung an die zu entwickelnden Analysewerkzeuge. Diese werden dann mit Methoden der Informatik prototypisch in einem Softwaredemonstrator so umgesetzt, dass eine philologische Untersuchung spezifischer Merkmale möglich ist.

### Forschungsergebnisse

Ausgehend von einer strukturierten Identifizierung und Darstellung des Ist-Zustandes im Bereich der Analyse und dreidimensionalen Rekonstruktion von Schrifttafeln und -zeichen wurden Aspekte und Komponenten der Keilschrift durch einen dreidimensionalen und metrologischen Ansatz an verschiedenen Keilschriftmanuskripten untersucht. Gemäß der Vorhabensprojektierung wurde dabei nicht von der üblichen zweidimensionalen Erscheinung des Schriftbildes ausgegangen, sondern von der tatsächlichen dreidimensionalen Form, da die dritte Dimension eine weitere bedeutsame Merkmalsebene repräsentiert.

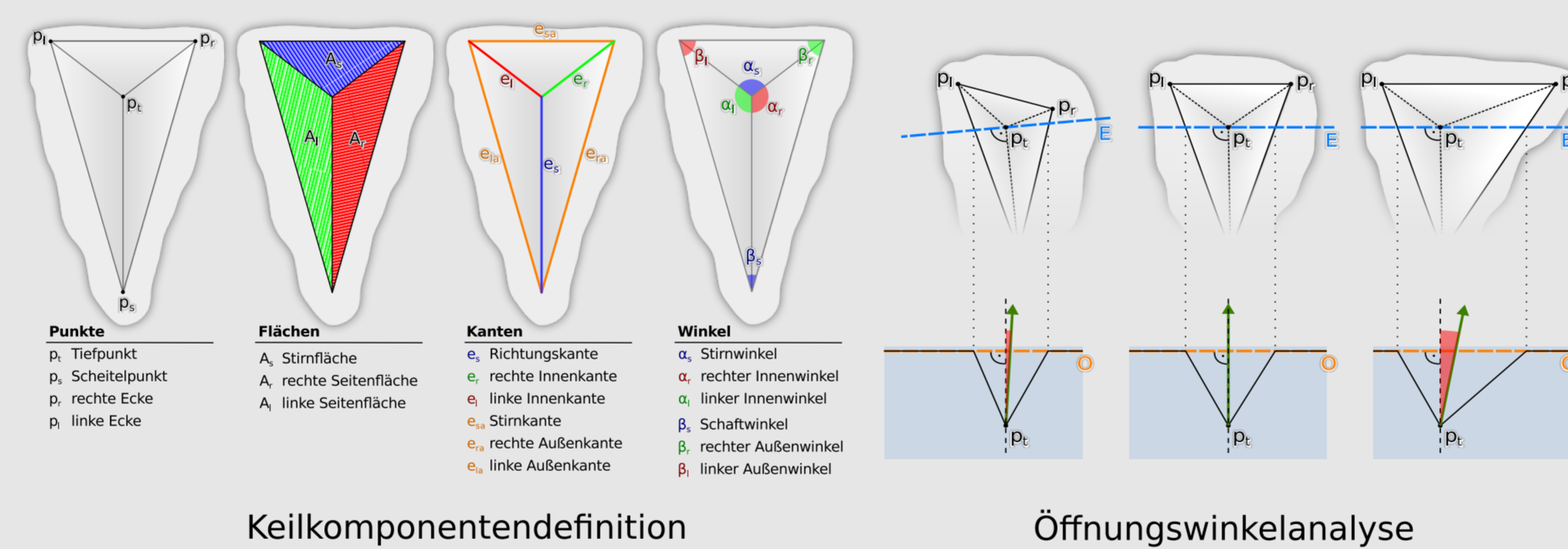
In interdisziplinärer Zusammenarbeit wurde zuerst ein Referenzrahmen und eine Terminologie für die drei-dimensionale Beschreibung des Keils generiert werden (Regelgeometrische Beschreibung des Keils). Zudem wurden verschiedene Faktoren identifiziert und an ausgewählten digitalisierten Manuskripten validiert, welche die Geometrie eines Keileindrucks bedingen (Ausprägung und Variation der Basisgeometrie).

Besondere Berücksichtigung wurde auch der Analyse der Trajektorie des Griffels beim Schreibprozess gewidmet. Es manifestierte sich dabei, dass die Trajektorie des Griffels im Bezug zur Tafeloberfläche sowie Drehungen und Bewegungen während des Eindruckprozesses die Geometrie des Keileindrucks als auch die Beziehung zwischen den Winkeln der Schreibspitze und den Innenwinkeln der einzelnen Keileindrücke signifikant beeinflussen. Durch ihre schriftkontextbedingte Variation stellen diese Aspekte wichtige Schriftmerkmale dar. Bei den Untersuchungen wurde deutlich, dass die kleinste Analyseeinheit nicht dem (ganzen) Keileindruck entspricht, sondern dessen Merkmalen (Winkel, Kantenlängen), die automatisiert erfasst und gemessen werden können. Die hierdurch eruierten Merkmale und Merkmalskombinationen erlauben bereits eine Differenzierung von Fragmentgruppen.

Durch die Automation der Extraktion von Keileindruckkonstellationen, die Keilschriftzeichen(komponenten) konstituieren, wird die systematische Evaluation der nächsthöheren Merkmalsebene betrieben, die maßgeblich für die Bestimmung von Schreiberidiosynkrasien ist. Die detektierten Keildaten werden in eine Datenbank importiert. Über ein Interface können Keilgruppen oder Keilschriftzeichen direkt auf dem Tontafelmodell definiert werden und direkt aus dem Modell oder skriptgesteuert in der Datenbank nach gleichen Konstellationen gesucht werden.

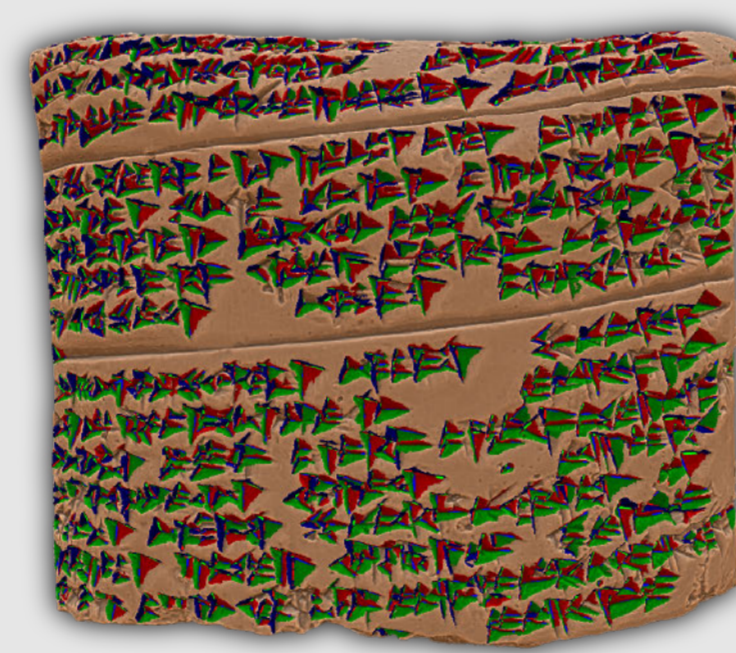
Aus der Datenbank erfolgt nach der Verifizierung des Suchergebnisses auch die Zuordnung der positionsspezifischen Keileigenschaften innerhalb eines Keilschriftzeichens (Konstellation). Der dabei gewonnene, hochdimensionale Merkmalsvektor erweitert den Merkmalsraum beträchtlich und lässt eine weit präzisere Gruppierung der Fragmente als die alleinige Betrachtung der Keilmerkmale.

Die in der statistischen Analyse ähnlichsten Fragmente können in den „CuneiformAnalyser“ geladen und unter Berücksichtigung von Layoutinformationen (z.B. Zeilenabstände, Abschnittstrenner, Tafelkrümmung) virtuell rekonstruiert werden.

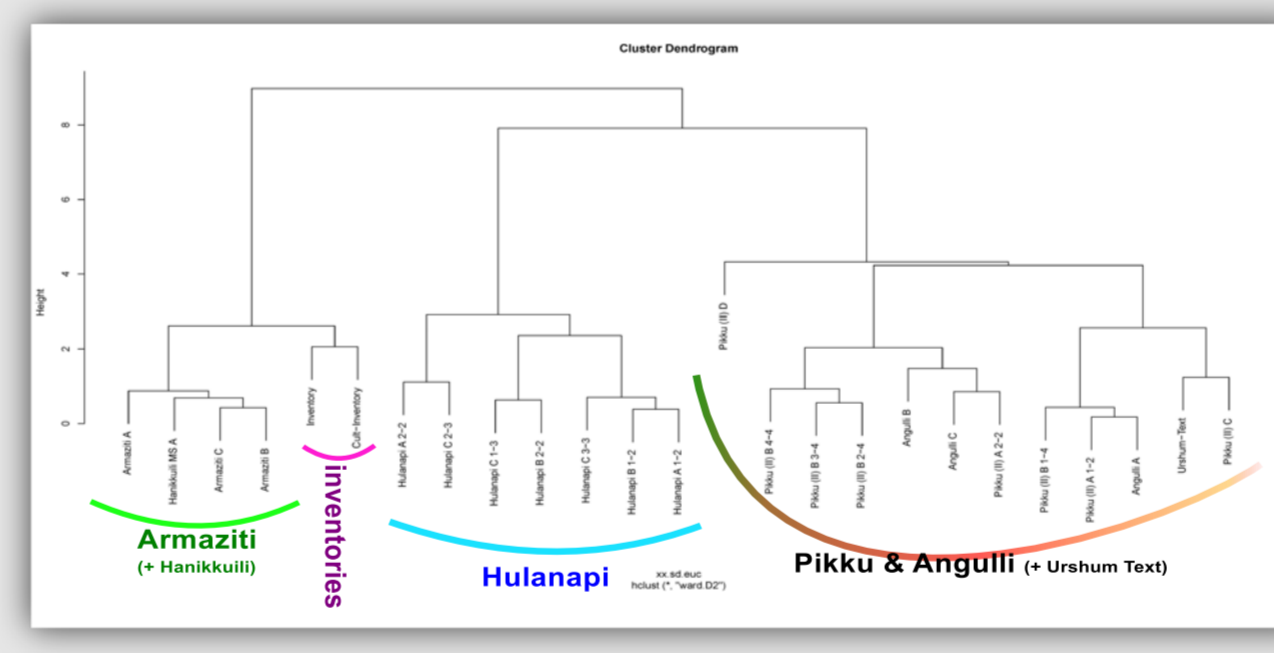


Keilkomponentendefinition

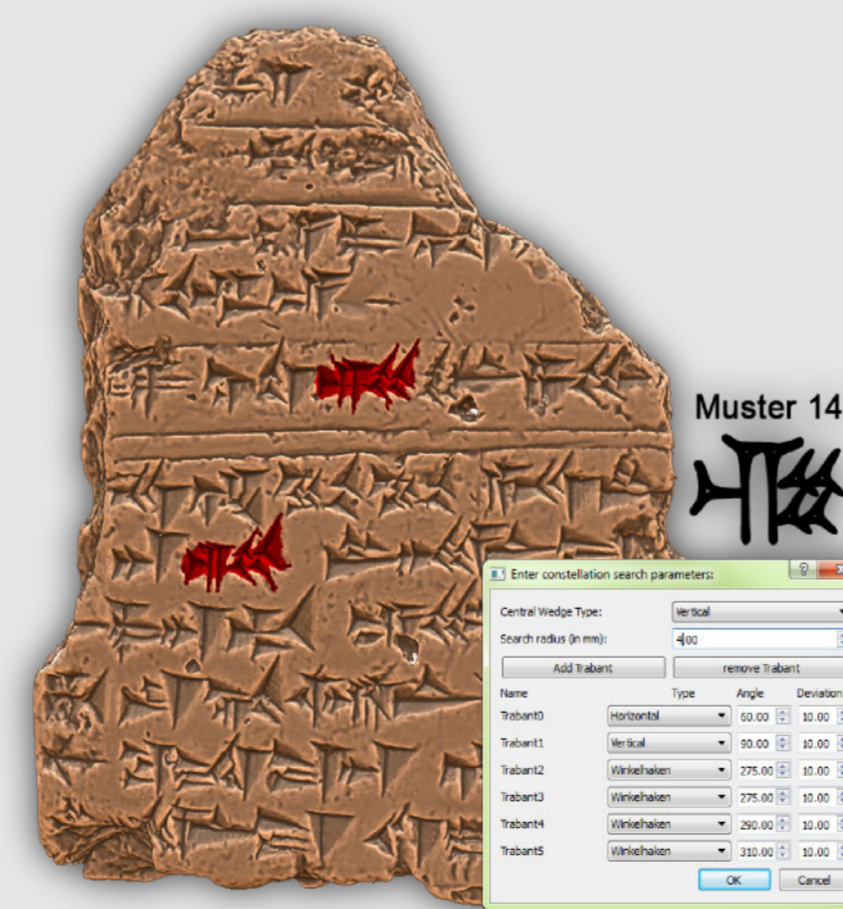
Öffnungswinkelanalyse



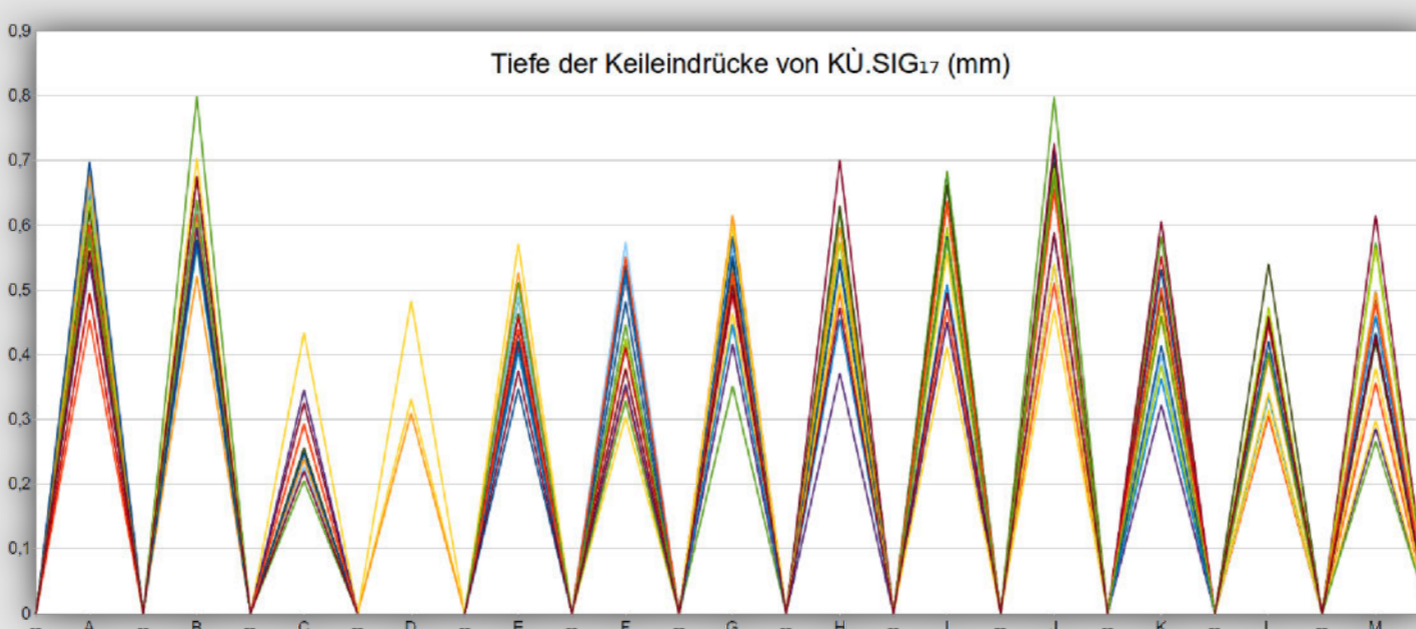
Automatische Extraktion von Keileindrücken



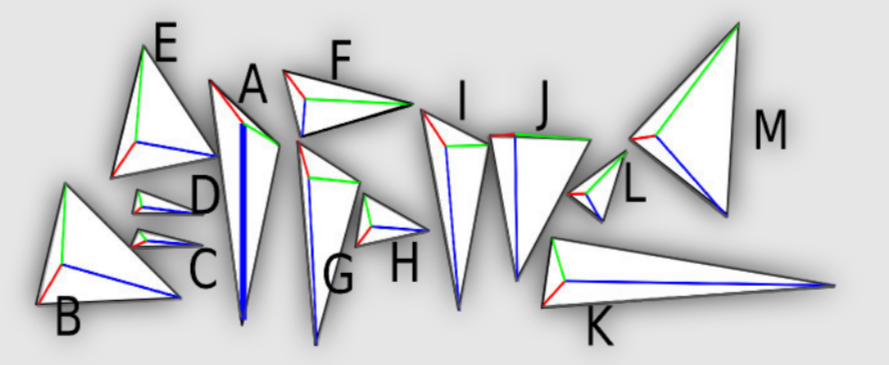
Clusteranalyse von Tafelfragmenten nach Keileigenschaften



Generierung einer Suchabfrage nach Zeichen



Keilschriftzeichen für „Gold“: Empirische Verteilung aller Instanzen eines Merkmals auf einer Tontafel



Keilpositionsschema des Zeichens für „Gold“

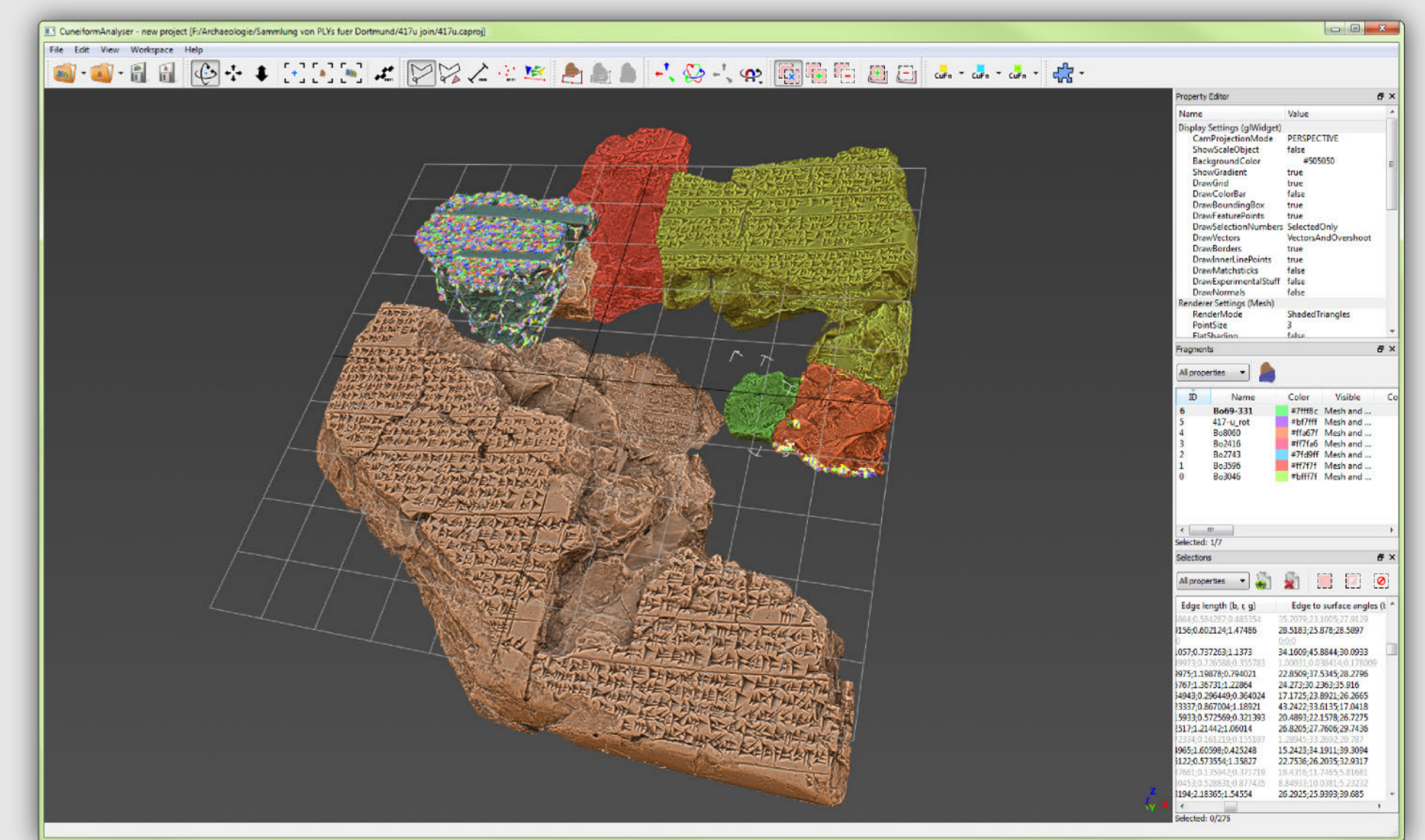


„Sandwich-Join“ einer Tontafel

### Softwaredemonstrator „CuneiformAnalyser“

Im Rahmen des Projekts werden am Lehrstuhl für Graphische Systeme der TU Dortmund Algorithmen und Methoden zur Analyse und Weiterverarbeitung digitalisierter Keilschrifttafeln entwickelt und in den Softwaredemonstrator „CuneiformAnalyser“ integriert, der auf eine interaktive Verarbeitung großer Datenmengen ausgelegt ist. Neben der Hervorhebung philologisch relevanter Merkmale werden umfangreiche Analyse- und Statistikfunktionalitäten bereitgestellt, die auf den dreidimensionalen Grundelementen der Keilschrift operieren und diese neuartigen philologischen Untersuchungsmethoden zugänglich machen. Dabei werden durch die aktuelle Entwicklungsversion von „CuneiformAnalyser“ folgende, Funktionsmerkmale bereit gestellt:

- Interaktive Anzeige und Bearbeitung hochauflöster 3D-Scans.
- Kontrastoptimierte, realistische Darstellung digitalisierter Artefakte mittels Radiance-Scaling.
- Umfangreiche Geometrie-Selektionsfunktionen auf Dreiecksnetz- und Punktwolkenebene.
- Selektions-gekoppelte Annotationswerkzeuge zur Beschreibung von Keileindrücken und Zeichen.
- Automatische Segmentierung von Keileindrücken mit Extraktion von Seitenflächen, Kanten und Krümmungen.
- Berechnung und Visualisierung von philologisch relevanten, aus der Segmentierung abgeleiteten Merkmalen, wie z.B. Richtungskante, Innenwinkel und Außenwinkel.
- Auswertungs- und Exportfunktionen für extrahierte Merkmale.
- Manuelle Bemessungsfunktionen.
- Projektmanagement mit fragmentübergreifender Analyse
- Werkzeuge für manuelles Joining.



Softwaredemonstrator „CuneiformAnalyser“

