

Schriftmetrologie des Keils

Dreidimensionale Analyse von Keileindrücken und Handschriften

Michele Cammarosano, Gerfrid G. W. Müller, Denis Fisseler,
Frank Weichert

Summary

Cuneiform script is normally studied by means of two dimensional images, whether hand copies or photographs. The paper aims at exploring the potential of modern 3D data processing and analysis technologies to enhance the analysis of cuneiform script, focusing on its basic element, the wedge.

In order to establish a consistent terminological framework for the description of its components, the wedge is considered primarily in its idealized geometrical form, the tetrahedron. The factors that contribute to determine the actual shape of wedge impressions are subsequently singled out and discussed in detail. Finally, the results of an experimental analysis conducted on the wedges' inner angles of six Hittite tablets are presented, being only the 'thin edge of the wedge', in order to illustrate the potential of 3D techniques for script analysis and handwriting identification within cuneiform studies.

1. Einführung

In den letzten Jahrzehnten hat insbesondere in der Hethitologie die Paläographie eine zunehmende Bedeutung im Hinblick auf die zeitliche Einordnung von Dokumenten erlangt, da die eingeschränkte Verfügbarkeit expliziter Datierungen nachhaltige Restriktionen für derartige Analysen repräsentierte. Die konzeptionelle Basis der Untersuchungen manifestierte sich in der Abstraktion von primär zweidimensionalen Merkmalen für die belegten Formen von Keilschriftzeichen, welche für die datierbaren Texte charakteristisch erschienen. Insbesondere die Paläographie der hethitischen Landschenkungs-urkunden¹ hat gezeigt, dass nicht alle identifizierten Merkmale für die Datierung relevant sind. Allgemein besteht eine teilweise Limitierung der hypothetischen Definition und Charakterisierung von Schrifteigenschaften durch den Einsatz zweidimensionaler Reproduktionstechniken – die Bestimmung metrischer Kenngrößen ist grundlegenden Messungenauigkeiten unterworfen. Zudem erlaubte erst die Verfügbarkeit des Mainzer Photoarchivs über das Hethitologieportal² das Studium einer größeren Zahl von Schriftproben.

1 S. Rüster - Wilhelm 2012.

2 Hethitologieportal, <http://www.hethiter.net>.

Ausgehend von diesen Restriktionen zweidimensionaler Herangehensweisen wird innerhalb des Projektes „3D-Joins und Schriftmetrologie“³ eine durchgängig dreidimensionale Analyse von Schriftmerkmalen durchgeführt. Für die dreidimensionale Untersuchung der Keilschrift stellen gegenwärtig die am Anfang des 20. Jh. durchgeführten Studien von L. Messerschmidt und A. Clay die wichtigsten systematischen Beiträge dar.⁴ Der aktuelle Stand der Entwicklung moderner 3D-Digitalisierungstechnologien sowie der rechnergestützten Datenverarbeitung erlaubt aber die Betrachtung völlig neuartiger Forschungsperspektiven. Daher ist das Ziel des Forschungsprojektes „3D-Joins und Schriftmetrologie“ die Entwicklung moderner Konzepte und Algorithmen zur Schriftanalyse über eine Identifizierung und Klassifizierung von parametrisierbaren Schriftmerkmalen. Ausgehend von dieser Zielsetzung lassen sich die nachfolgenden, bedeutsamen Anwendungsszenarien ableiten:

1. Rekonstruktion heterogener Aspekte des Schreibprozesses durch Analyse von messbaren Komponenten der Keileindrücke, beispielsweise der Länge und Krümmung einzelner Kanten sowie verschiedener Winkel
2. Klassifikation und Charakterisierung von Handschriften und Schreibtraditionen auf Basis parametrisierter Eigenschaften
3. Rechnergestütztes „Joinen“ vorsortierter Fragmente, eine Option, die insbesondere bei großen Corpora von Genres formelhaften Inhalts bedeutende Vorteile bietet – beispielsweise im Fall der hethitischen Festrituale.

Im vorliegenden Beitrag werden die ersten Erkenntnisse und Konzepte des Forschungsprojektes zur Untersuchung dieser Anwendungsszenarien vorgestellt. Paragraph 2 thematisiert den generierten Referenzrahmen und eine neue Terminologie zur dreidimensionalen Beschreibung des Keils. Ausgehend von dieser regelgeometrischen Beschreibung des Keils erfolgt eine Untersuchung an ausgewählten digitalisierten Manuskripten, um die Bedeutung der Merkmale für die Geometrie eines Keileindrucks zu validieren (Ausprägung und Variation der Basisgeometrie). Diese Merkmale werden im Paragraph 3 unter folgenden differenzierten Aspekten diskutiert: Schriftträger, Schreibgriffel, Schreibprozess, Schriftkontext und postoperative Faktoren. Nach einer Erläuterung der Datenerfassung und des Messverfahrens (s. Paragraph 4) werden schließlich die Ergebnisse einer dreidimensionalen Untersuchung im Paragraph 5 dargestellt. Die Zielsetzung zur Identifikation distinkter Schriftmerkmale besteht dabei initial in einer Fokussierung auf die kleinsten Schriftkomponenten, welche sich auch auf Tontafelfragmente mit geringer räumlicher

3 Das Verbundprojekt „3D-Joins und Schriftmetrologie“ (<http://www.cuneiform.de>) wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und von Gerfrid G. W. Müller und Michele Cammarosano (Julius-Maximilians Universität Würzburg/Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz) sowie Frank Weichert und Denis Fissler (Technische Universität Dortmund) durchgeführt.

4 Clay 1906: 17–20; Messerschmidt 1906.

Ausdehnung beobachten lassen. Als minimale Analyseeinheit erweist sich dabei nicht die unitäre Einheit des Keileindrucks, sondern dessen Merkmale, welche exemplarisch analysiert werden. Die präsentierte Untersuchung fokussiert u. a. auf die Innenwinkel der Keileindrücke von sechs hethitischen Tontafeln, um das Potential eines dreidimensionalen und metrologischen Ansatzes zur Analyse der Keilschrifttexte zu veranschaulichen.

2. Regelgeometrische Beschreibung des Keils

Eine besondere Eigenschaft der Keilschrift manifestiert sich in dem Sachverhalt, dass diese Schriftart nicht auf einem Aufbringen oder einer Entnahme eines Stoffes auf respektive aus dem Schriftträger basiert, sondern auf einer Umgestaltung des Schriftträgers selbst.⁵ Das Grundelement der Schrift bildet dabei der Keil, ein typisiertes geometrisches Grundobjekt. Dieser entsteht durch das Eindringen einer Schreibgriffelspitze, die als dreiseitiger Polyederkegel abstrahiert werden kann, in die weiche Oberfläche einer Tontafel, wobei eine gewisse Menge Ton durch den verwendeten Schreibgriffel verdrängt wird. Der so entstehende Hohlraum auf der Oberfläche ist der eigentliche Keileindruck oder „Keil“. Dabei entspricht die idealisierte Form eines solchen Keils der eines Tetraeders, einem aus vier dreieckigen Seitenflächen, sechs Kanten und vier Ecken bestehenden geometrischen Grundkörper. Der Rand der zur Tafeloberfläche hin orientierten, offenen Seitenfläche des Tetraeders wird als Dreieck mit einer typischen pyramidenförmigen Vertiefung in seinem Inneren wahrgenommen, die der Oxforder Orientalist Thomas Hyde schon 1700 als „*dactulus pyramidalis seu cuneiformis*“ charakterisierte.

2.1 Referenzrahmen

Eine philologische Analyse von Keileindrücken vor dem Hintergrund der Bestimmung von charakteristischen Schriftmerkmalen erfordert eine genaue Beschreibung der geometrischen Grundelemente eines Keileindrucks, die nur unter Einführung einer dreidimensionalen Beschreibungsterminologie für Keileindrücke geleistet werden kann. Dafür muss zuerst ein eindeutiger Referenzrahmen für die dreidimensionale Beschreibung von Keileindrücken festgelegt werden. Die Terminologie für die Elemente des Keileindrucks wird nachfolgend im Paragraph 2.2 von der regelgeometrischen, abstrahierten Form des Tetraeders ausgehend bestimmt. Im Paragraph 3 werden definierte Faktoren, welche die tatsächliche Form der konkreten Keileindrücke bedingen, einzeln betrachtet.

5 An dieser Stelle sollen keine Imitationen der „originalen“ Keilschrift, z. B. durch Pinsel oder Ritzen, betrachtet werden.

Als Referenzelement für die geometrische Betrachtung des Keils wird die innere Kante des Keileindrucks festgesetzt, die eine eindeutige Orientierung des Keils bestimmt und somit dessen Achse darstellt. Die Festlegung eines solchen Referenzelements ist aber nur unter Einbeziehung des philologischen Kontexts möglich, da die Länge der inneren (und äußeren) Kanten durch verschiedene, teilweise nicht präzifizierbare Faktoren bedingt ist. Entsprechende Faktoren können beispielsweise individuelle Schriftneigungen oder die Zeichendichte innerhalb einer Zeile sein. Ein typischer Keil weist eine eindeutige Richtungspräferenz auf, d. h. eine der Innenkanten ist signifikant länger als die beiden anderen. Bei sehr ähnlichen Kantenlängen ist diese geometrische Richtungspräferenz jedoch nicht eindeutig (z. B. bei Winkelhaken oder besonders gedrängten waagerechten Keilen), sodass die Richtung eines Keils in abweichender Modalität definiert werden muss. Wird die Verwendung eines stiftähnlichen Schreibgriffels angenommen, so kann davon ausgegangen werden, dass dessen Hauptachse beim Eindrücken des Keils in den Ton eine bestimmte Orientierung aufwies. Die in Richtung der Hauptachse des Schreibgriffels erzeugte Kante soll im Folgenden unabhängig von ihrer Länge als das Referenzelement des Keils festgelegt und als „Richtungskante“ bezeichnet werden. Diese ist beim Vorhandensein einer signifikant längsten Kante mit deren Richtung identisch, aber auch für alle anderen Fälle definiert. Aus der Existenz einer eindeutig definierbaren Keilrichtung lässt sich ein allgemeines Darstellungsschema ableiten, bei dem der Keil aus einem positionsbestimmenden „Keilkopf“ und einem richtungsbestimmenden „Keilschaft“⁶ besteht.

2.2 Terminologie

Die im Folgenden definierte Terminologie soll eine eindeutige Referenzierung dreidimensionaler geometrischer Grundelemente ermöglichen, die zur Berechnung von statistischen Schriftmerkmalen herangezogen werden. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der verwendeten geometrischen Beschreibungselemente und deren Bezeichnungen anhand der schematischen Darstellung eines senkrechten Keils. Ausgezeichnete Punkte und Kanten sind mit Kleinbuchstaben, die Flächen mit Großbuchstaben und Winkel mit kleinen griechischen Buchstaben gekennzeichnet. Die Tafeloberfläche wird, zunächst ohne Annahmen über deren konkrete Form zu treffen, mit O bezeichnet.

6 Für den Ausdruck „Keilschaft“, der mit dem englischen Wort „tail“ korrespondiert, s. Rüter – Wilhelm 2012: 68.

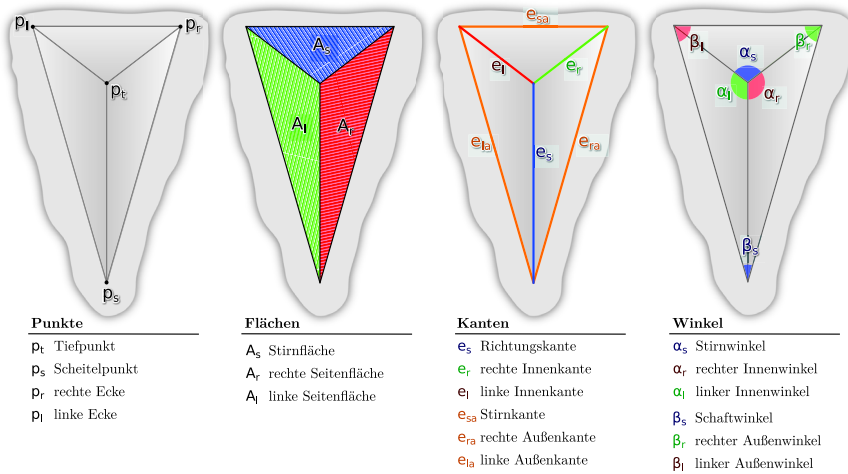


Abbildung 1: Übersicht zu den geometrischen Grundelementen Punkt, Fläche, Kante und Winkel eines Keils

2.2.1 Geometrische Grundelemente des Keils

Aus schrifttechnischer Sicht lassen sich im Keil initial zwei grundlegende Typen von Kanten unterscheiden, die drei in der Tafel Ebene⁷ liegenden, gemäß der typischen Betrachtungsrichtung der Tafel äußeren Kanten des Keils, welche ein Dreieck bilden sowie drei nach innen, sternförmig in einem Tiefpunkt zusammenlaufende Kanten. Der erste Typ soll in den weiteren Betrachtungen als Außenkante und der zweite Typ als Innenkante bezeichnet werden. Um die schon angesprochene Richtungscharakteristik des Keils zu berücksichtigen, werden der von der Tafel Ebene entfernteste Punkt p_t , in dem sich die drei Innenkanten treffen, als Tiefpunkt und der von dort aus die Keilrichtung bestimmende Punkt p_s als Scheitelpunkt bezeichnet. Ausgehend davon ist die Richtungskante e_s zwischen dem Tiefpunkt p_t und dem Scheitelpunkt p_s des Keils das wichtigste Referenzelement, da diese durch eine seitliche Kante des Schreibgriffels erzeugt wird und somit die bereits in den zweidimensionalen Repräsentationen wichtige Information über die Ausrichtung des Griffels enthält. Die verbleibenden zwei Innenkanten e_l und e_r werden basierend auf der Ausrichtung der Richtungskante orientierungsunabhängig als linke und rechte Innenkante bezeichnet. Auch die Benennung der Außenkanten und Seitenflächen orientiert sich an diesem Schema, sodass die Kanten e_{sa} , e_{la} und e_{ra} als Stirnkante sowie linke und rechte Außenkante bezeichnet werden.

⁷ Im Gegensatz zur „Tafeloberfläche“ bezeichnet der Begriff „Tafel Ebene“ die abstrakte, durch die Ecken p_s , p_l und p_r verlaufende Ebene.

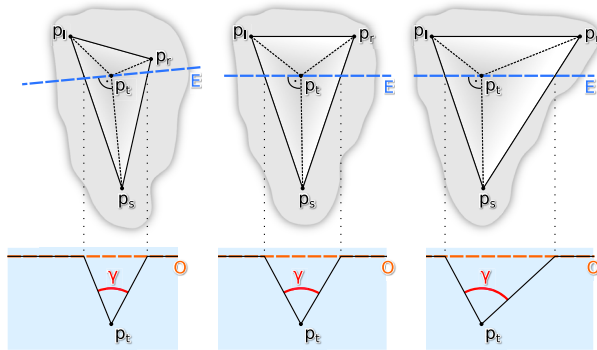


Abbildung 2: Beispiele für den Öffnungswinkel γ : **(oben)** Aufsicht mit eingezeichneter Zeilenschnittenebene E und **(unten)** Querschnittsansicht von E mit eingezeichneter Tafeloberfläche O

Neben den relevanten Punkten und Kanten des Keils werden weitere charakteristische Eigenschaften über die Seitenflächen und Winkel definiert. Die der Richtungskante gegenüberliegende Fläche wird dabei als Stirnfläche A_s bezeichnet und die verbleibenden zwei Flächen, konform zum bisherigen Benennungsschema, „rechte Seitenfläche“ A_r und „linke Seitenfläche“ A_l genannt. Für die Analyse des Keils sind ferner sechs primäre Winkel von besonderer Bedeutung, die drei paarweise zwischen den Innenkanten liegenden Innenwinkel α_s , α_l und α_r sowie die paarweise zwischen den Außenkanten liegenden Außenwinkel β_s , β_l und β_r . Der Winkel α_s wird als Stirnwinkel bezeichnet.

Ein weiterer Winkel, der ein wichtiges Schriftmerkmal darstellen kann, wird aus den primären Winkeln abgeleitet und als „Öffnungswinkel“ bezeichnet. Dieser soll im Wesentlichen als Maß für die Breite eines Keils dienen. Hierfür sei eine durch den Tiefpunkt des Keils verlaufende Querschnittenebene E definiert, deren Orientierung so festgelegt wird, dass E senkrecht zur Ebene durch p_s , p_l und p_r und senkrecht zur auf die Tafeloberfläche projizierten Richtungskante des Keils ist. Der Öffnungswinkel bezeichnet nun den auf dieser Ebene gemessenen Winkel γ zwischen der linken und rechten Seitenfläche des Keils (s. Abb. 2).⁸

8 In der älteren Fachliteratur bezeichnen die Termini „Keilwinkel“ (Messerschmidt 1906: 193) und „Kantenwinkel“ (Messerschmidt 1906: 191 und *passim*; Deimel 1932: 216; Falkenstein 1936: 5–6, mit Bezug auf Messerschmidt) prinzipiell den Öffnungswinkel. Diese Termini wurden aber etwas unspezifisch verwendet, da der betroffene Winkel nicht genau definiert ist (vgl. Messerschmidt 1906: 192 Abb. 4).

2.2.2 Geometrische Elemente des Schreibgriffels

Zusätzlich zu den geometrischen Elementen des Keils ist es zweckmäßig, auch für einige geometrische Elemente des Schreibgriffels konsistente Bezeichnungen festzulegen, die eine eindeutige Referenzierung ermöglichen. Dabei sind insbesondere die drei am Eindruck beteiligten Kanten des Griffels von Interesse, die im Weiteren als Schreibkanten bezeichnet werden sollen. Eine Differenzierung erfolgt ähnlich wie bei den Innenkanten dadurch, dass die ausgezeichnete, parallel zur Griffelhauptachse verlaufende Kante als Schneidkante und die verbleibenden zwei Kanten analog zu den Innenkanten als rechte und linke Schreibkante bezeichnet werden. Da die Außenpunkte im Keil p_s , p_l und p_r auf dem Griffel keine Entsprechung haben müssen, wird lediglich die Bezeichnung für die den Keil erzeugende, Polyederkegelförmige Spitze als „Schreibspitze“ festgelegt. Dies soll in Abgrenzung zum Begriff Griffelspitze geschehen, da dieser gelegentlich auch als Bezeichnung für den gesamten vorderen Teil eines Griffels Verwendung findet.

Eine Übersicht über die bisher definierten Bezeichnungen bietet Tabelle 1, in der auch entsprechende englische Begriffe zugeordnet werden.

3. Ausprägung und Variation der Basisgeometrie

Reale Keileindrücke lassen sich auf einem hohen Abstraktionsniveau durch die ideale Form eines Tetraeders approximieren, dessen Innenwinkel genau den Winkeln der Schreibspitze entsprechen. Die tatsächliche Form der Keileindrücke weicht in der Realität u. a. aufgrund der Beeinflussung durch nachfolgende Faktoren von dieser ab:

- 1) **Schriftträger:** Beschaffenheit des Tons während des Schriftprozesses, Form der Tafeloberfläche (s. Paragraph 3.1).
- 2) **Schreibgriffel:** Form, Ausmaße und Oberflächenbeschaffenheit des Schreibgriffels (s. Paragraph 3.2).
- 3) **Schreibprozess-bedingte Einflussfaktoren:** Varianten der zeitabhängigen relativen Bewegung von Ton und Griffel bei der Erzeugung des Keileindrucks (s. Paragraph 3.3).
- 4) **Schriftkontext-abhängige Einflussfaktoren:** Interaktion mit räumlich benachbarten Keilen (s. Paragraph 3.4).
- 5) **Postoperative Einflussfaktoren:** Trocken- und Brennprozess, Beschädigungen, Anlagerung von Fremdmaterial, Restaurierungen (s. Paragraph 3.5).

Ergänzend zu den aufgezeigten, dem Keileindruck immanenten Einflussfaktoren, manifestierten sich Abweichungen von der Idealform (der Keileindrücke), die ihren Ursprung im Messprozess haben. Bei den verwendeten 3D-Scans

Tabelle 1: Tabellarische Übersicht zur Terminologie

Element		Deutsch	Englisch
-	Allgemein	Keilkopf	head
-		Keilschaft	tail
-		Tafelebene	tablet plane
O		Tafeloberfläche	tablet surface
E		Querschnittebene	cross-sectional plane
p _s	Ecken	Scheitelpunkt	tail vertex
p _l		linke Ecke	left vertex
p _r		rechte Ecke	right vertex
p _t		Tiefpunkt	depth point
e _s	Innenkanten	Richtungskante	directional edge / spine
e _l		linke Innenkante	left inner edge
e _r		rechte Innenkante	right inner edge
e _{sa}	Außenkanten	Stirnkante	top outer edge
e _{la}		linke Außenkante	left outer edge
e _{ra}		rechte Außenkante	right outer edge
A _s	Seitenflächen	Stirnfläche	top face
A _l		linke Seitenfläche	left face
A _r		rechte Seitenfläche	right face
α _s	Innenwinkel	Stirnwinkel	top (inner) angle
α _l		linker Innenwinkel	left inner angle
α _r		rechter Innenwinkel	right inner angle
β _s	Außenwinkel	Schaftwinkel	tail (outer) angle
β _l		linker Außenwinkel	left outer angle
β _r		rechter Außenwinkel	right outer angle
γ	Abgeleitete Winkel	Öffnungswinkel	angle of aperture

von Keilschrifttafeln akkumulieren sich der genaue Zustand des aufgenommenen Objekts zum Erfassungszeitpunkt, die physikalische Genauigkeit des 3D-Scanners, die Einstellung der Messparameter, Messfehler, Signalrauschen und Modifikationen der erfassten Geometrie im Rahmen einer Nachbearbeitung zu einem komplexen Erfassungsprozess. Dabei bilden die Berücksichtigung und Betrachtung dieser die gemessene Form des Keils beeinflussenden Faktoren die notwendige Voraussetzung für die korrekte Bewertung der Rohdaten und den metrologischen Ansatz zur Analyse der Keilschrift.

3.1 Schrifträger

Bezüglich des Schrifträgers sind zwei relevante Elemente zu berücksichtigen: die Form der Tafeloberfläche und die Zusammensetzung des Tons. Dabei kann

die Tafeloberfläche flach oder in unterschiedlich starkem Maße gewölbt sein sowie Unregelmäßigkeiten aufweisen, wodurch die Form der Außenkanten und der Seitenflächen der enthaltenen Keileindrücke beeinflusst wird. Die Wirkung des Schreibgriffels auf den Ton hängt abgesehen von seiner Form von dessen chemikalischer Materialbeschaffenheit, seiner Feuchtigkeit, Viskosität und Festigkeit zum Zeitpunkt des Eindrückens ab. Durch diese Faktoren wird beispielsweise die Oberflächenrauheit des Tons oder das Vorhandensein charakteristischer Muster wie z. B. Schilfrohrstrukturen beeinflusst.

3.2 Schreibgriffel

Das Erscheinungsbild eines Keileindrucks wird im Wesentlichen durch die Form der verwendeten Schreibspitze des Griffels bestimmt – gemäß der Ausführungen im Paragraph 2 ist die idealisierte Form einer Schreibspitze ein dreiseitiger Polyederkegel. Der vorgeschlagenen Terminologie nach wird die jeweils zum Schreiben verwendete, parallel zur Griffelhauptachse verlaufende Kante des Griffels als „Schneidkante“ bezeichnet und die korrespondierende, von der Schneidkante erzeugte Innenkante des entsprechenden Keileindrucks „Richtungskante“ genannt. Da nur eine dreiseitige Spitze des Schreibgriffels in den Ton eingedrückt wird, spielt die Gesamtzahl der überdies in dem jeweils verwendeten Griffel vorhandenen Kanten keine Rolle. Trotz der naheliegenden Annahme der ausschließlichen Verwendung von drei- oder vierkantigen Griffeln, ist die Erzeugung von Keilen mit Griffeln höherer Kantenanzahl, wie Abbildung 3 zeigt, aus theoretischer Sicht nicht auszuschließen.

Abgesehen von der Interpretation ikonographischer Quellen und dem Fund von angeblichen Originalen⁹, konnten bisher zuverlässige Rekonstruktionen von alten Griffeln nur dann entstehen, wenn sich Besonderheiten oder bestimmte Regelmäßigkeiten im äußeren Erscheinungsbild der Keile beobachten ließen. Typische Beispiele für derartige Besonderheiten sind die Krümmung bestimmter Kanten bzw. Flächen von Keileindrücken. So beobachtete schon am Anfang des 20. Jahrhunderts L. Messerschmidt bei Tontafeln mesopotamischer Herkunft, dass die Keileindrücke unabhängig von ihrer Orientierung identische konstruktive Merkmale enthalten: Die rechte Keilfläche ist leicht gekrümmt und von glatter Oberflächenbeschaffenheit, während die linke Keilfläche eben ist und Faserabdrücke aufweist. Dies erlaubte die Ableitung der zwei wichtigen Thesen, dass einerseits das Fasermuster aus einem klar rekonstruierbaren Verfahren zur Erzeugung des Griffels aus einem Schilfrohr resultiert, und andererseits der so gewonnene Griffel stets mit derselben Griffelhaltung zum Schreiben verwendet wurde.¹⁰ Dabei konnten die beiden Thesen an zahlreichen Gruppen von untersuchten, aus verschiedener Perioden

9 Für eine Übersicht s. RIA 12 3/4 (2009), s.v. „Schreibgriffel“.

10 Messerschmidt 1906: 304–307.

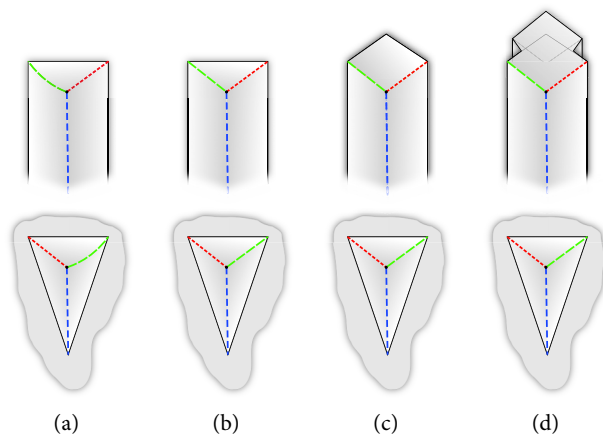


Abbildung 3: Darstellung zum Zusammenhang zwischen den Griffelformen (obere Reihe) und dem sich jeweils ausprägenden Keil (untere Reihe): (a) dreikantig mit gekrümmter rechter Kante, (b) dreikantig, (c) vierkantig und (d) vielkantig. Augenfällig ist, dass sich für die Griffelformen (b)–(d) keine Differenzierung der Keile manifestiert.

und Orten stammenden Tontafeln verifiziert werden, bei denen stets dasselbe Merkmal beobachtet werden konnte. Zum Eindrücken wurde stets dieselbe Schneidkante verwendet und die glatte, aus der Schilfrohrhaut stammende Seite stets zur Erzeugung der rechten Fläche des Keils.¹¹

Diese Schlussfolgerungen gelten aber nicht für alle Tafeln, sondern nur für die Tafeln, auf denen sich ein derartiges Merkmal beobachten lässt. Dabei muss betont werden, dass noch ungeklärt ist, wie groß der Anteil an gefundenen Tontafelfragmenten ist, die das Schilfrohrmerkmal tatsächlich aufweisen.¹² Zusätzlich ist zu beobachten, dass das Merkmal in manchen Schreibtraditionen allem Anschein nach gar nicht auftritt. Einen solchen Fall stellen die hethitischen Schriftquellen dar. Bei den Tontafeln, die aus der hethitischen Hauptstadt Hattuša stammen, sind die drei inneren Flächen der Keileindrücke stets flach und glatt, was auf die Verwendung eines anderen Griffeltyps hindeutet.

In den Fällen ohne sich ausprägendes „Rohrgriffel-Muster“, ist die Untersuchung im Hinblick der Verwendung der identischen Schneidkante hingegen schwieriger. Es ist zwar plausibel anzunehmen, dass prinzipiell stets die-

11 Messerschmidt 1906: *ibidem*; Powell 1981: 425–426; vgl. auch Marzahn 2003: 81; 87 Abb. 4.

12 Powell ist der einzige, der den Anteil bei den von ihm untersuchten Fragmenten beziffert (1981: 426). Das Schilfrohrmerkmal konnte Powell auf 10 bis 20 Prozent der Fragmente beobachten. Als Grund dafür wies er auf den (meistens schlechten) Zustand der Tafeloberfläche hin, wobei angemerkt werden kann, dass es zumindest in einigen Fällen nicht einmal die Möglichkeit gegeben ist, ein Muster zu beobachten. Erwähnenswert erscheint zudem, dass mehr als 3100 der damals untersuchten 4000 Tontafeln aus der Ur III-Zeit stammen.

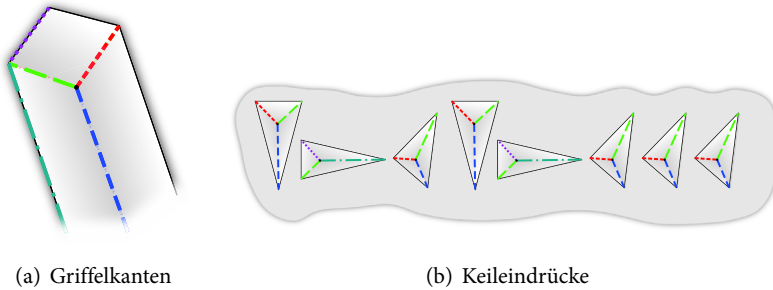


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines hypothetischen Schreibkantenwechsels bei waagerechten Keilen: (a) Griffelkanten und (b) Variationen von Keileindrücken

selbe Schneidkante genutzt wurde, die Möglichkeit der Verwendung mehrerer unterschiedlicher Schneidkanten in derselben Tafel ist aber nicht auszuschließen. Insbesondere muss die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass in bestimmten, von der Strichsequenz abhängigen Kontexten, wie z. B. in Kombination mit einer Drehung des Griffels, von manchen Schreibern oder eben ganze Schreibtraditionen jeweils eine sekundäre Schneidkante verwendet wurde (s. Abb. 4). Interessante Ansatzpunkte zur Untersuchung dieser Frage bestehen in einer sorgfältige Vermessung der Innenwinkel der Keileindrücke sowie in der Analyse von Spezialfällen, in denen z. B. ein sich abzeichnender Defekt des Griffels eine eindeutige Unterscheidung der Keilflächen erlaubt.¹³ Das Themengebiet der Rekonstruktion antiker Griffel soll im Rahmen dieses Artikels nicht vertieft werden, da hier ausschließlich eine Identifikation der Elemente, die zur Erzeugung der Form des Keils beitragen, thematisiert wird.

3.3 Schreibprozess-bedingte Einflussfaktoren

Neben den statischen Eigenschaften zur Variation des Keileindrucks, sind auch dynamische Einflussfaktoren durch den Schreibprozess zu beachten. Dieser Entstehungsprozess eines Keileindrucks ist ein zeitabhängiger Prozess, bei dem ein Schreibgriffel, definiert durch eine zeitabhängige Position und Orientierung im dreidimensionalen Raum, von außerhalb der Tontafel kommend in diese hinein und wieder heraus bewegt wird. Im Folgenden sollen unterschiedliche Ausprägungsmöglichkeiten dieser Bewegung beschrieben und ihre Auswirkungen auf die Form des erzeugten Keils aufgezeigt werden. Dabei wird eine genaue Beschreibung der Geschwindigkeit der ausgeführten Bewegung vernachlässigt, da diese im Rahmen der durch einen Schreibprozess vorge-

¹³ Für einen solchen Fall s. Abusch 1981.

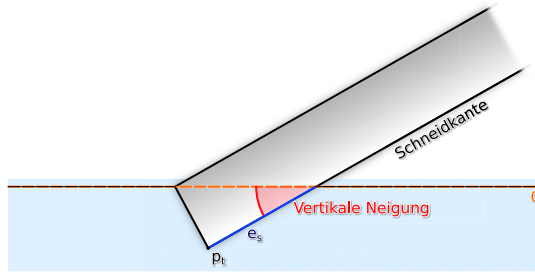


Abbildung 5: Schematische Darstellung der vertikalen Neigung (Seitenansicht)

gebenen Grenzen nur einen geringen Einfluss auf die in dieser Veröffentlichung untersuchten Ergebnisse zu haben scheint.

3.3.1 Bezugssystem

Zur Vereinfachung der Definition eines Bezugssystems soll die Tafeloberfläche lokal als eine ebene Fläche angenommen werden, welche durch die drei Austrittspunkte p_s , p_r und p_l definiert ist (Tafelenebene). Das verwendete kartesische Referenzkoordinatensystem wird derart orientiert, dass diese Ebene in der XY-Ebene des Koordinatensystems liegt und die X-Achse des Koordinatensystems mit der Schreibrichtung auf der Fläche identisch ist. Dadurch wird es möglich, die genaue Startposition des Schreibgriffels in der XY-Ebene zu vernachlässigen und nur noch eine startpositionsunabhängige Trajektorie in dem auf diese Weise definierten Bezugssystem zu betrachten, entlang derer sich Position und Orientierung des Griffels ändern.

Die Orientierung des Griffels wird dabei über drei Winkel beschrieben: horizontale Neigung der Schneidkante (d. h. der Winkel α zwischen der Schneidkante und der YZ-Ebene), vertikale Neigung der Schneidkante (d. h. der Winkel β zwischen der Schneidkante und der XY-Ebene) und Neigung des Öffnungswinkels (d. h. die Rotation des Griffels um die durch die Schneidkante definierte Achse). Die horizontale Neigung gibt gemäß der Ausführungen die Orientierung des Keils an, aus der abgeleitet werden kann, ob es sich um einen senkrechten, waagerechten oder schrägen Keil handelt. Die vertikale Neigung ist hingegen, wie in Abbildung 5 dargestellt, invers proportional zur Länge der Richtungskante: Je kleiner der Winkel β ist, desto flacher ist der Einstichwinkel des Griffels und desto größer ist die Länge der Richtungskante im Verhältnis zu den beiden anderen Innenkanten. Das Kippen des Griffels um seine Längsachse nach links oder rechts bestimmt zudem die variierende Neigung des Öffnungswinkels, wodurch sich das Größenverhältnis der linken und rechten Seitenfläche des Keils ändert (vgl. Abb. 6).

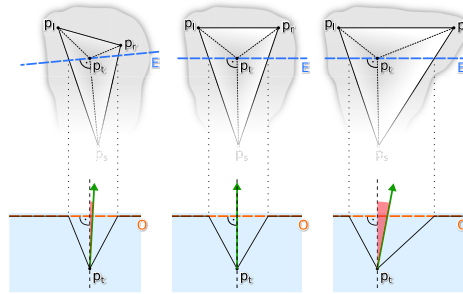


Abbildung 6: Schematische Darstellung zur Ausprägung der Neigung des Öffnungswinkels (oben) in der Aufsicht und (unten) im Querschnitt

3.3.2 Trajektorien und Abrollbewegungen

Unter Verwendung des im Paragraph 3.3.1 definierten Bezugssystems lässt sich eine ideale Trajektorie definieren, bei welcher der Griffel senkrecht zur Tafelenebene, d. h. entlang der Z-Achse, in die Tafel hinein und wieder heraus bewegt wird, ohne dass sich seine Orientierung im Verlauf des Vorgangs ändert. Ausgehend von dieser in der Realität nicht existierenden Idealbewegung sollen im Folgenden abweichende Typen von Trajektorien beschrieben und ihre Auswirkungen auf den entstehenden Keil betrachtet werden:

- lineare Bewegung ohne Veränderung der Orientierung,
- nicht lineare Bewegung und/oder eine sich ändernde Orientierung.

Als erste Gruppe seien Trajektorien mit einer linearen Bewegung ohne Veränderung der Orientierung definiert. In diesem Fall entsprechen die Innenwinkel des erzeugten Keileindrucks nur dann den Winkeln der Schreibkanten an der Griffelspitze, wenn deren Bewegungsbahn innerhalb des durch Verlängerung der Schreibkanten entstehenden Polyederkegels liegt (s. Abb. 7). Dies erklärt, weshalb bei manchen Tafeln, die Keileindrücke mit sogenanntem „schrägem Kopf“ aufweisen, offensichtlich verschiedene Neigungen des Keilkopfes in ein und demselben Fragment vorkommen.

Die zweite Gruppe umfasst Trajektorien mit einer nicht linearen Bewegungsbahn und/oder einer sich ändernden Orientierung. Derartige Griffelbewegungen sind dazu geeignet, Veränderungen der Innenkanten sowie der Innenwinkel hervorzurufen – Abbildung 8 veranschaulicht dies exemplarisch an zwei Fällen. Die Ausführung solcher Bewegungen ist komplexer, d. h. sie sind bezogen auf das erzeugte Endergebnis unökonomisch und verschlechtern in der Regel die Lesbarkeit der Schrift, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass sie meist unbeabsichtigt ausgeführt und nach Möglichkeit vermieden werden. Eine Ausnahme stellt die während des Eindrückens im Ton

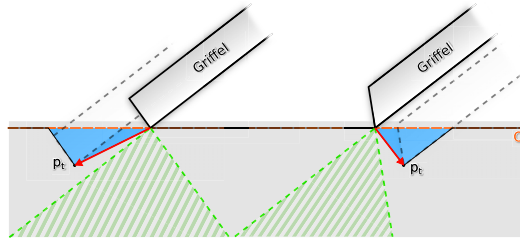


Abbildung 7: Schematische Darstellung (Seitenansicht) des durch Verlängerung der Schreibkanten entstehenden Polyederkegels (schräffelt) zweier verschiedener Griffel. Die außerhalb des Polyederkegels laufenden Bewegungsbahnen der Griffelspitze (Pfeil) führen zu Keileindrücken (grau schattiert), deren Innenwinkel von den Winkeln der Schreibkanten abweichen.

im Uhrzeigersinn ausgeführte leichte Drehung des Griffels um seine Schneidkante dar (vgl. Paragraph 3.3.1 zur Neigung des Öffnungswinkels).

Eine entsprechende Drehung, die zur Vergrößerung des Stirnwinkels führt, wird als „Abrollbewegung“ bezeichnet. Sie kann ein auffälliges und relevantes Schriftmerkmal sein, welches in der Geschichte der Keilschrift besonders im Kontext der Erzeugung des sogenannten Winkelhakens von Bedeutung ist (für ein konkretes Beispiel s. Paragraph 5.2.4). Wird eine solche Rotation mit einer Verschiebung der Schneidkante kombiniert, kann eine gewölbte rechte Seitenfläche entstehen. Das Aussehen der erzeugten Wölbung ist spiegelverkehrt zu der Ausprägung von Wölbungen, welche durch die Form eines Schilfrohr-Griffels erzeugt wurden (vgl. Paragraph 3.2).

3.3.3 Bewegungsarten

Die zuvor identifizierten Einzelfaktoren für die Klassifikation von Trajektorien wirken im Laufe des Schreibprozesses zusammen und können bewusst (in unterschiedlicher Ausprägung) sowie mit variabler Häufigkeit angewandt werden. Wenn die Intention (im Fall von bewussten und beabsichtigten Bewegungen) und die Ursache (im Fall der unbeabsichtigten) dieser Drehungen und Bewegungen betrachtet wird, lassen sich drei verschiedenen Bewegungsarten unterscheiden, die hier separat diskutiert werden sollen, obwohl meistens von einer Kombination auszugehen ist:

- 1) **Distinktiv:** Bewegungen, die zur Unterscheidung verschiedener Typen von Keilen dienen, und damit eine semantische Funktion erfüllen. Beispielsweise unterscheidet eine Variation der horizontalen Neigung um 90° zwischen dem senkrechten und waagerechten Keil.
- 2) **Idiosynkratisch und positional:** Bewegungen, die keine semantische Bedeutung aufweisen, respektive kontinuierlich und kohärent in bestimmten Kontexten (Zeichenmustern) durchgeführt werden – u. a. könnte ein

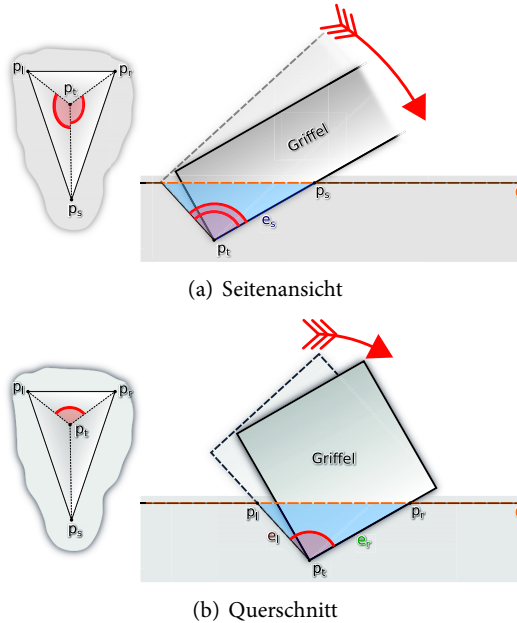


Abbildung 8: Schematische Darstellung von Bewegungen, die während des Eindrückens erfolgen: (a) Drehung des Griffels mit Abweichung der vertikalen Neigung in der Seitenansicht und (b) „Abrollbewegung“ im Querschnitt, mit Markierung der jeweils veränderten Innenwinkel.

Schreiber die Neigung des Öffnungswinkels des senkrechten Keils immer dann variieren, wenn dieser am Ende des Zeichens nach eine Waagrechtengruppe vorkommt (s. Abb. 9). Da derartige Bewegungen bei einzelnen Schreibern sowie auch bei ganzen Schreibtraditionen vorkommen können, kann von idiosynkratischen bzw. positionalen Bewegungen gesprochen werden – es ist allerdings oft unmöglich, zwischen diesen Situationen zu differenzieren.

- 3) **Zufällig:** Diskontinuierliche, unbeabsichtigte Bewegungen, welche sich nicht den Gruppen „distinktiv“ oder „idiosynkratisch und positional“ zuordnen lassen.

3.4 Schriftkontext-abhängige Einflussfaktoren

Neben den bisher aufgeführten Faktoren kann die Form eines Keileindrucks auch von der Interaktion mit anderen Keileindrücken beeinflusst werden. Infrage kommen hier nicht nur Änderungen, die durch bewusste Überlage-

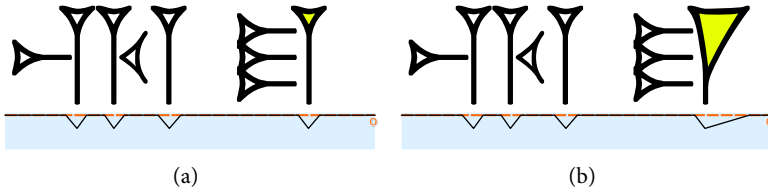


Abbildung 9: Exemplarische Beispiele einer idiosynkratischen oder positionalen Bewegung: (a) keine Variation des Öffnungswinkels und (b) Änderung der Neigung des Öffnungswinkels beim Übergang von einer Waagrechtengruppe zu einem senkrechten Keil. Es sei betont, dass eine derartige Variation des Öffnungswinkels von eventuellen „Abrollbewegungen“ unabhängig ist.

rung durch andere Keile entstehen, sondern auch solche, die durch Verdrängung von Tonmaterial bei der Aufbringung von weiteren Keileindrücken in unmittelbarer Nähe entstehen. Die detaillierte Untersuchung solcher Modifikationen kann Indizien für die Rekonstruktion der Reihenfolge, in der die Keile eines Zeichens erzeugt wurden, liefern.¹⁴

3.5 Postoperative Einflussfaktoren

Eine weitere Ausprägung von Faktoren beeinflusst die Form des Keileindrucks nach dem Schriftprozess (postoperative). Diese Einflussfaktoren lassen sich den nachfolgenden Ordnungsstrukturen zuordnen:

- 1) **Trocken- und Brennprozess:** Die Tontafel unterliegt während des Schreibens und danach einem Schrumpfprozess, welcher durch Feuchtigkeit und chemikalische Komposition des Tons sowie durch Luftfeuchtigkeit und Temperatur während des Trocknungsvorgangs bedingt ist.¹⁵ Nach einem von W. Waal am Oriental Institute in Chicago durchgeführten Experiment, zog sich eine 33,5 cm × 18 cm × 5 cm große Tontafel um rund 2 cm in Bezug auf die Höhe während der Trocknung zusammen. Dies entspricht einem Anteil von ca. sechs Prozent.¹⁶ Weitere Veränderungen können während eines primären oder sekundären „Backens“ bzw. Brennens der Tafel stattfinden.
- 2) **Beschädigungen und Anlagerung von Fremdmaterial; Restaurierungen:** Unter dieser Rubrik fallen Veränderungen, welchen die Keileindrücke aufgrund von Brüchen und Abrieb sowie durch Verkrustungen und Anlagerung von Staub respektive weiterem Fremdmaterial unterliegen. Verän-

¹⁴ Siehe exemplarisch W. Sallaberger *apud* Ismail *et al.* 1996: 33–67; vgl. auch Paragraph 5.2.4. Entsprechende Untersuchungen erfolgten bisher nur selten systematisiert.

¹⁵ Taylor 2011: 6.

¹⁶ Waal 2010: 57.

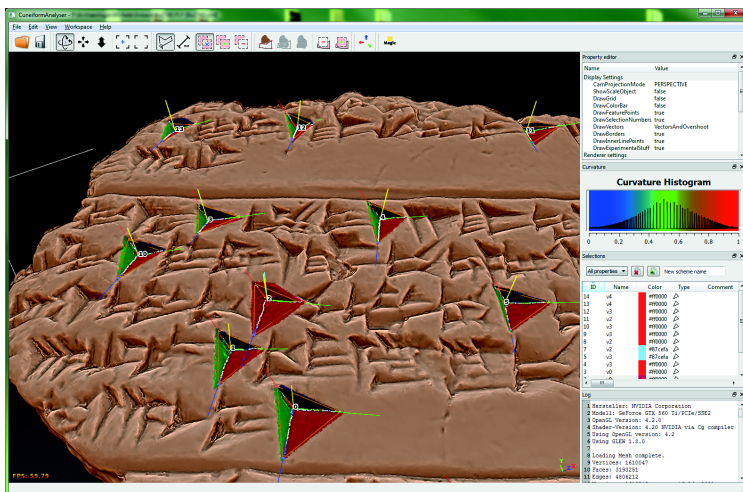


Abbildung 10: Exemplarischer Screenshot des Softwaresystems „CuneiformAnalysier“

derungen der Form der Keileindrücke können auch durch Lagerung im nassen Boden und (Regen-)Würmer entstehen.¹⁷ Auch Restaurierungsprozesse können durch Entfernung von Fremdmaterial zu Veränderungen der Eindruckform führen.

4. Datenerfassung und Messverfahren

Die in dieser Veröffentlichung verwendeten Manuskripte wurden im Zeitraum 2011–2012 mithilfe des mobilen Breuckmann optoTOP3D-Streifenlicht-scanners¹⁸ der Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz¹⁹ digitalisiert. Dabei bietet der verwendete 3D-Scanner eine Erfassungsgenauigkeit von $30\mu\text{m}$ 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 der Manuskripte ermöglichen haben, konkret dem *Anadolu Medeniyetleri Müzesi* in Ankara und den *Istanbul Arkeoloji Müzeleri* in Istanbul.

Die nach den zuvor beschriebenen Kriterien ausgewählten Keilmuster auf den Manuskripten wurden nach der Überführung in eine digitale Repräsen-

¹⁷ Chiera 1938: 20–21.

¹⁸ Breuckmann optoTOP <http://www.breuckmann.com>.

¹⁹ Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz: <http://www.adwmainz.de>.

tation mithilfe des Softwaresystems „CuneiformAnalyser“ (s. Abb. 10) analysiert. Der „CuneiformAnalyser“ ist ein Softwaredemonstrator für die im Rahmen des BMBF-Projekts „3D-Joins und Schriftmetrologie“ entwickelten Algorithmen und Methoden zur Analyse und Weiterverarbeitung digitalisierter Keilschrifttafeln, welcher am Lehrstuhl für „Graphische Systeme“ (Informatik VII) der Fakultät für Informatik an der TU Dortmund in enger Kooperation mit den Projektbeteiligten aus den Altertumswissenschaften entwickelt wird. Dabei werden durch die aktuelle Entwicklungsversion die folgenden im Rahmen dieser Analyse relevanten Funktionsmerkmale bereitgestellt:

1. Interaktive Anzeige und Bearbeitung hochaufgelöster 3D-Scans (ca. 20 Mio. Dreiecke).
2. Kontrastoptimierte Darstellung digitalisierter Artefakte mittels Radiance-Scaling.²⁰
3. Umfangreiche Geometrie-Selektionsfunktionen auf Dreiecksnetz- und Punktwolkenebene.
4. Selektionsgekoppelte Annotationswerkzeuge zur Beschreibung von Keileindrücken und Zeichen.
5. (Semi-)Automatische Segmentierung von Keileindrücken und Extraktion von Seitenflächen, Kanten und Krümmungen.
6. Berechnung und Visualisierung von philologisch relevanten, aus der Segmentierung abgeleiteten Merkmalen, wie z. B. Richtungskante, Innenwinkel und Außenwinkel (s. Paragraph 2.2).
7. Auswertungs- und Exportfunktionen für extrahierte Merkmale.
8. Manuelle Bemaßungsfunktionen.

Im Rahmen der Segmentierung kommen etablierte, an die Fragestellung adaptierte Verfahren der graphischen Datenverarbeitung und insbesondere der Clusteranalyse sowie des Model-Fitting zur Anwendung. So wird z. B. bei der Bestimmung der Teilflächen von Keileindrücken eine effiziente Variante des K-Means-Algorithmus²¹ eingesetzt und eine fehlerresistente Berechnung der Innenkanten durch die Integration des RANSAC-Algorithmus²² erreicht. Eine konsequente Berücksichtigung von möglichen Datenfehlern aufgrund eines suboptimalen Erfassungsprozesses ermöglicht durch den Einsatz fehlertoleranter Heuristiken auch eine Verarbeitung nicht 2-mannigfaltiger Geometriedaten und die Segmentierung von beschädigten Keileindrücken. Abbildung 11 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt aus dem Fragment Bo 4891 mit segmentierten Keileindrücken in einer Farbwahl gemäß der Zuordnung zu einem Cluster und gemäß der Krümmung. Dabei wird deutlich, dass auch

²⁰ Pacanowski *et al.* 2010.

²¹ Kanungo *et al.* 2002.

²² Fischler – Bolles 1981.

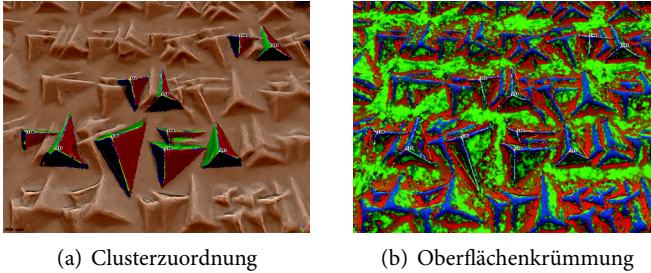


Abbildung 11: Darstellung segmentierter Keileindrücke (Rückseite der Tafeloberfläche) innerhalb des Softwaresystems „CuneiformAnalyser“. Die Differenzierung der Farben erfolgt gemäß (a) der Clusterzuordnung und (b) dem Grad der Krümmung.

die bei realen Tontafeln nicht gegebene Betrachtung des Schriftbildes von der Rückseite aus Vorteile bei der Bewertung von Schriftmerkmalen, insbesondere bei Verfüllungen und Beschädigungen, bieten kann.

5. Keilschriftmetrologie

Ausgehend von den thematisierten Konzepten zur Datenerfassung und den zur Verfügung stehenden Messverfahren (s. Paragraph 4.) erfolgt unter Beachtung der neu definierten Terminologie für die dreidimensionale Beschreibung des Keils (s. Paragraph 2) sowie der Diskussion zu den Variationen der Basisgeometrie (s. Paragraph 3) nachfolgend eine schriftmetrologische Analyse. Hierzu wurden in einem Vorverarbeitungsschritt alle als relevant identifizierten Keilmuster aus den Manuskripten extrahiert und segmentiert. Nach einer Datenkonsolidierung, Annotierung stark beschädigter und fehlerhaft segmentierter Keilmuster, wurden für alle Merkmalskomponenten, wie z. B. Winkel und Flächenverhältnisse, Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet, welche die Ausgangsbasis für die weiteren Auswertungen bilden. Im Folgenden werden die Ergebnisse einer metrologischen, dreidimensionalen Analyse der Innenwinkel von Keileindrücken einer Gruppe ausgewählter Tontafeln vorgestellt, um Forschungsmöglichkeiten aufzuzeigen, die eine Analyse von dreidimensional digitalisierten Tontafeln mit Methoden der Rechner-gestützten Datenverarbeitung und -analyse bietet. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise des Softwaresystems „CuneiformAnalyser“ (s. Paragraph 4) sowie eine methodologische Betrachtung von Problemen der Schriftanalyse sind dagegen nicht Bestandteil dieser Veröffentlichung und werden zu einem späteren Zeitpunkt separat publiziert.

Gegenstand der Analyse sind die Innenwinkel von senkrechten und waagerechten Keilen sowie des Winkelhakens. Diese stellen die drei fundamen-

talen *Keiltypen* dar und werden in ausgewählten Konstellationen betrachtet. Bestimmte Kontexte, in denen ein Keiltyp vorkommt, wurden ausgewählt und als *Keilklassen* bezeichnet. Als Abkürzungen werden h1, h1, usw. (horizontal), v1, v2, usw. (vertikal) und w1, w2, usw. (Winkelhaken) verwendet. Die ausgewählten Keilklassen stellen typische Kontexte dar, in denen der jeweilige Keiltyp vorkommt: allein stehend (h1, v1, w1), an der linken (h4) / rechten (w2, w4) bzw. am oberen (h2) / unteren (h3) Rand eines Zeichens, oder inmitten eines Zeichens (v3, w3). Für jeden Kontext wurden in den ausgewählten Tafelfragmenten ein oder mehrere repräsentative Zeichen identifiziert, die sich aufgrund einer vergleichsweise hohen Häufigkeit ihres Auftretens besonders zur Extraktion statistisch relevanter Ergebnisse eignen (für Details zum Messverfahren s. Paragraph 4.). Die verwendeten Keilklassen, Kontexte und Zeichen werden in Tabelle 2 erläutert.

Die Hauptziele der schriftmetrologischen Analyse lassen sich über die beiden nachfolgende Aspekte fixieren:

1. Evaluierung der Stabilität/Instabilität der Innenwinkel und ihrer Verhältnisse unter Beachtung von Keilklasse und Manuskript.
2. Suche nach Regelmäßigkeiten und Zusammenhängen, welche die Charakterisierung einzelner Manuskripte und ggfs. Handschriften ermöglichen können.

In den folgenden Abschnitten werden zuerst die untersuchten Manuskripte präsentiert, dann die Ergebnisse der Analyse dargestellt.

5.1 Manuskripte

Als Gegenstand der Untersuchung wurden fünf aus der hethitischen Hauptstadt Hattuša stammende Manuskripte (Fragmente) ausgewählt (s. Tabelle 3).












Diese werden im Folgenden als Manuskripte A, B, C, D und E bezeichnet.²³ In jedem Fragment wurde ein konsistenter Abschnitt analysiert (Vorderseite oder Rückseite); weitere Abschnitte sowie eventuelle Joins wurden zudem separat betrachtet, um die Kohärenz der gewonnenen Ergebnisse zu überprüfen. Für jeden Textabschnitt wurden jeweils alle Vertreter der ausgewählten Zeichen mit Ausnahme derer in Kolophonen untersucht.²⁴

Die drei ersten Fragmente gehören zur Gattung der späthethitischen Festrivaltradition:

23 Für Fotos und detaillierte Informationen s. die von S. Košak im Rahmen des Hethitologie Portal Mainz bearbeitete *Konkordanz der hethitischen Texte*, <http://www.hethport.uni-wuerzburg.de/hetkonk>.

24 In Anbetracht des größeren Moduls oder der Positionierung auf Rändern erfordert die Schrift der Kolophonen eine gesonderte Analyse, die nicht im Fokus dieses Artikels steht.

Tabelle 2: Tabellarischer Überblick zu den untersuchten Keilklassen

Keilklasse	Siglum	Kontext	Untersuchte Zeichen	
	h1	Waagerechte	allein stehend	AŠ (HZL 1)
	h2		oberer Waagerechter in einer Reihe	MA (HZL 208)
	h3		unterer Waagerechter in einer Reihe	MA
	h4		am linken Rand des Zeichens	ZI (HZL 33)
	v1	Senkrechte	allein stehend	DIŠ (HZL 356)
	v2		am rechten Rand des Zeichens	MA
	v3		inmitten des Zeichens	ZI
	w1	Winkelhaken	allein stehend	U (HZL 261)
	w2		am rechten Rand des Zeichens	TI (HZL 37)
	w3		inmitten des Zeichens	IŠ, UŠ (HZL 151, 132)
	w4		letzter Keil einer Winkelhakengruppe ¹	ZI

¹ Dass dieser Keil als Letzter erzeugt wurde, lässt sich im Fall der analysierten Manuskripte aufgrund der leichten Deformationen der Keiflächen feststellen.

1. A: Bo 4891 (KUB 12.12), dreikolumnige Tafel, Schreiber: Ḫulanabi, Inhalt: 3. Version (= 3. Tafel) des *(ḫ)išuwā*-Festes (CTH 628.II.3.A). Analysierter Textabschnitt: Rückseite.
2. B: 310/b (KUB 32.128),²⁵ dreikolumnige Tafel, Schreiber: Ḫulanabi, Inhalt: 5. Tafel des *(ḫ)išuwā*-Festes (CTH 628.5.T.A). Analysierter Textabschnitt: Vorderseite.

²⁵ Das Fragment 637/b (KUB 32.99) stellt nach Vorschlag von F. Fuscagni einen „Sandwich-Join“ des Manuskripts dar.

Tabelle 3: Tabellarischer Überblick zu den untersuchten Textabschnitten

Tafel	Inventar-Nr. (Publikation)	Schreiber	Text- abschnitt	CTH	Inhalt
A	Bo 4891 (KUB 12.12)	Ḫulanabi	Rs	628.II.3.A	(ḫ)iš ^u wa-Fest
B	310/b (KUB 32.128)	Ḫulanabi	Vs	628.5.T.A	(ḫ)iš ^u wa-Fest
C	Bo 51 (KUB 10.18)	Pikku	Vs	594.A	AN.TAḪ.ŠUM Fest
D	531/f (KUB 29.11) + 1026/u (KBo 36.48)	Pikku	Vs	533.3.B	Mond- hörner- mina
E	Bo 2062 (KUB 7.53)	Pikku	Vs	409.I.A	Ritual des Tunna- wiya

3. C: Bo 51 (KUB 10.18), dreikolumnige Tafel, Schreiber: Pikku (II), Inhalt:
2. Tag des AN.TAḪ.ŠUM Festes (CTH 594.A). Analysierter Textabschnitt:
Vorderseite.

Der homogene Textcharakter der drei Texte begründet sich durch den Sachverhalt, dass sie in derselben Epoche, d. h. der Zeit Ḫattušilis III – Tudḫalijas IV (ca. 1270–1210 v. Chr.), in der hethitischen Hauptstadt Ḫattuša geschrieben wurden und derselben Textgattung angehören. Trotzdem unterscheiden sich die Texte durch Inhalt und Schreiber. Manuskripte A und B betreffen das hurritisch-hethitische (ḫ)iš^uwa-Fest – es wurde in der Epoche der Abfassung des Manuskriptes nicht mehr gefeiert. Eine „neue Fassung“ der Festbeschreibung²⁶ setzte der Chef-Schreiber Walwaziti auf Befehl der hethitischen Königin Puduḫepa, Gemahlin von Ḫattušili III., auf Basis von älteren Quellen zusammen. Nach dieser Fassung entstanden unter Walwazitis Aufsicht durch Schreiber seines Kreises verschiedene Kopien.²⁷ Manuskript C hingegen betrifft Rituale, die sich auf den 2. Tag des großen AN.TAḪ.ŠUM-Festes beziehen.²⁸ Dieses fand im Frühling statt und stellte das größte Fest des offiziellen Kultkalenders in der hethitischen Großreichszeit dar. Manuskripte A und B schrieb der im Kreis des Chef-Schreibers Walwaziti tätige Schreiber Ḫulanabi, Manuskript C der Schreiber Pikku (II, d. h. der Sohn von

26 Solche „Festbeschreibungen“ repräsentieren Regiebücher, keine echten Beschreibungen, s. Klinger 1996: 727–738.

27 S. im Allgemeinen Haas 1994: 848–875; Salvini – Wegner 1984, über die beteiligten Schreiber s. zuletzt Gordin 2011: 185–189. Transkription des Fragments KUB 12.12: Wegner – Salvini 1991, 162–168; 143–156.

28 Schwemer 2004: 406–409. Eine Transkription der I. Kolumne und des Kolophon von KUB 10.18 findet sich in Haas – Wäfler 1977: 232–234.

Tatta) unter Aufsicht des LÚ.SAG Anuwana. Die von Walwaziti und Anuwana geleiteten „Schreibateliers“ stellen die zwei wichtigsten und bisher am besten bekannten *scriptoria* der hethitischen Hauptstadt in der Großreichszeit dar.²⁹

Neben diesen drei Tafeln wurden zudem zwei Fragmente analysiert, die auch vom Schreiber Pikku stammen, jedoch anderen Textgattungen angehören:

1. D: 531/f (KUB 29.11) + 1026/u (KBo 36.48), zweikolumnige Tafel, Schreiber: Pikku (II), Inhalt: Mondhörneromina (CTH 533.3.B). Es handelt sich hierbei um eine Bilingue: In der linken Kolumne findet sich die akkadische Version, in der rechten die hethitische Übersetzung.³⁰ Analysierter Textabschnitt: Vorderseite.
2. E: Bo 2062 (KUB 7.53),³¹ zweikolumnige Tafel, Schreiber: Pikku (II), Inhalt: Ritual des Tunnawiya (CTH 409.I.A).³² Analysierter Textabschnitt: Vorderseite.

Vergleichbar zu den drei Festriftalfragmenten sind auch diese Manuskripte „Bibliothekstafeln“, d. h. sie gehören zu der Art von Texten, die vermehrt kopiert und tradiert wurden – Oppenheims „stream of tradition“.³³

5.2 Metrologische Analyse

Die folgende metrologische Analyse erfolgt unter der Fragestellung, welche Charakteristika (des Keils) eine Differenzierung von Handschriften in ausgewählten Manuskripten auf Basis von (Un)Gleichmäßigkeiten erlauben. Im Fokus der Untersuchung steht dabei nicht die Identifikation von Handschriften einzelner Schreiber – die hiermit assoziierten ausführlicheren Vorarbeiten und methodologischen Betrachtungen sind Gegenstand zukünftiger Analysen. Spezifisch soll untersucht werden, ob ausgewählte statistische Parameter der Handschrift innerhalb eines Fragmentes ausreichend uniform sind, um als Merkmal für die Identifikation von zusammengehörigen Fragmenten desselben Manuskripts dienen zu können. In diesem Kontext ist es daher unerheblich, ob Manuskripte zum Gegenstand der Untersuchung gewählt werden, deren Schreiber auch bekannt ist. *Ceteris paribus* ist aber auch die Analyse der

29 S. zuletzt Gordin 2011 (mit Literatur). Über die Handschrift und Orthographie von Pikku II s. Weeden 2011: 53–55.

30 S. Güterbock 1988 (reprint 1997: 161–170). Beide Kolumnen wurden von demselben Schreiber geschrieben, wie u. a. die Messung der Innenwinkel der Keileindrücke bestätigt. Der Übersetzer war allerdings nicht Pikku selbst, wie ein Fall von falscher Worttrennung in der akkadischen Version deutlich macht (I 14, s. Güterbock 1997: 168).

31 Joins (nicht betrachtet): Bo 2589 (KUB 12.58), Bo 8333.

32 S. Goetze – Sturtevant 1938; Cornil 1999.

33 Über diesen Begriff s. Oppenheim 1977: 13ff.; van den Hout 2002.

Ausprägung der Handschrift ein und desselben Schreibers in verschiedenen Manuskripten interessant. Aufgrund der hierbei zusätzlich gegebenen Verifikationsmöglichkeit für Manuskripte mit identischem Schreiber wurden für die durchgeführte Untersuchung Fragmente ausgewählt, deren Schreiber bereits bekannt sind.

Im Folgenden werden zuerst die statistischen Kennzahlen (u. a. Mittelwert, Standardabweichung) der gemessenen Innenwinkel präsentiert. Die Interpretation der Daten und Schriftmerkmalsextraktionsmöglichkeiten werden in den Paragraphen 5.2.2 bis 5.2.5 betrachtet, im Paragraph 5.2.6 die Ergebnisse eines Experimentes zur Gegenprüfung der Tragfähigkeit der Messungen.

5.2.1 Messergebnisse

Im Vorfeld der Analyse sei im Hinblick auf die Bewertung der Messergebnisse angemerkt, dass selektiv stark abgeriebene oder beschädigte Keileindrücke vorlagen, die eine komplette Segmentierung aller Belege nicht ermöglichten – diese Artefakt-innervierten Objekte wurden von der Analyse zur Verhinderung von Messfehlern ausgeschlossen. Auch die Interferenz benachbarter Keile hätte eine korrekte Erkennung der Innenkanten in einigen Fällen verhindert. Zur Gewinnung von tragfähigen Messergebnissen war es daher erforderlich, die Qualität der rechnergestützten Segmentierung der Keileindrücke zu bewerten und nicht oder falsch segmentierte Keileindrücke auszusortieren.

Dabei wurde eine Segmentierung von der Analyse ausgeschlossen, falls bei deformierten, beschädigten oder unkenntlichen Keileindrücken kein korrektes Clustering der Seitenflächen oder keine Extraktion der Innenkanten möglich war.³⁴ Die Mittelwerte der drei Innenwinkel (linker Innenwinkel, rechter Innenwinkel, Stirnwinkel) und die Standardabweichungen, je nach Keilklasse und Winkel, sind in Tabelle 4 unter Angabe Stichprobengröße dargestellt – Messungen mit weniger als vier Werten wurden von der Untersuchung ausgeschlossen.

5.2.2 Konstanz der Handschrift

Der erste Aspekt zur Konstanzanalyse der Handschrift erfolgt auf Basis des Innenwinkels. Dabei zeigte sich, dass die gemessenen Innenwinkel innerhalb der einzelnen Keilklassen nur eine geringe Varianz aufweisen. Standardabweichungen, die 10 Prozent der Referenzwerte überschreiten, kommen in 12 von 120 Fällen vor; die Hälfte davon konzentriert sich allerdings in der Klasse h3 (für die Analyse dieser Klasse s. Paragraph 5.2.5). Die Abweichungen zwischen den verschiedenen Keileindrücken derselben Tafel und Klasse sind von ihrer Position innerhalb der Tafel unabhängig; d. h., es lässt sich keine Korrelation zwischen den Größen der Innenwinkel und der Zone der Tafel-

³⁴ Ein vollständiges Verzeichnis der geclusterten Keileindrücke wird auf der Website des Projektes „3D-Joins und Schriftmetrologie“ zur Verfügung gestellt: <http://www.cuneiform.de>

Tabelle 4: Statistische Auswertung der Innenwinkel (Durchschnitt und Standardabweichung) unter Beachtung von Keilklasse und Textabschnitt. Standardabweichungen sind fett markiert, sofern sie 10 Prozent des Referenzwertes überschreiten.

Manuskript und Schreiber	Keilklasse (Stichprobengröße)	Winkel [°] (Mittelwert, Standardabweichung)						
		linker Innenwinkel		Stirnwinkel		rechter Innenwinkel	Innenwinkel	
A (Hulanabi)	h1 (15)	105.7	±4.7	102.3	±2.4	90.0	±6.6	
	h2 (20)	102.9	±5.5	104.2	±4.8	89.5	±7.6	
	h3 (11)	110.8	±6.9	107.2	±10.7	96.6	± 11.6	
	h4 (28)	102.4	±9.2	102.5	±4.8	89.2	± 9.2	
	v1 (20)	104.1	±3.5	99.5	±4.4	90.2	±7.1	
	v2 (26)	105.3	±5.0	99.1	±4.3	90.8	±8.1	
	v3 (24)	101.4	±9.8	110.9	± 11.3	86.5	±7.8	
	w1 (8)	112.5	±6.0	101.9	± 10.2	92.3	±7.7	
	w2 (9)	107.4	±5.4	101.8	±7.2	92.2	±5.6	
	w3 (22)	109.6	±7.8	100.7	±5.9	88.0	±6.3	
w4 (21)	107.6	±4.7	105.0	±4.1	85.7	±7.8		
B (Hulanabi)	h1 (18)	104.8	±6.2	106.5	±5.9	87.7	±8.6	
	h2 (11)	106.7	±4.9	107.3	±5.5	89.3	±4.7	
	h3 (5)	108.6	±8.3	108.6	± 11.6	101.0	± 21.5	
	h4 (9)	103.4	±6.8	109.7	±8.0	90.8	±5.9	
	v1 (17)	105.2	±4.8	108.3	±3.8	86.0	±4.2	
	v2 (19)	106.6	±4.7	110.2	±5.3	87.1	±4.7	
	v3 (5)	101.8	±2.9	109.9	±2.0	83.7	±2.6	
	w1 (9)	106.5	±6.6	105.3	±4.8	89.3	±6.3	
	w2 (7)	108.9	±3.0	109.0	±3.5	87.8	±2.9	
	w3 (10)	102.9	± 10.4	102.1	±9.9	84.9	±6.5	
	w4 (13)	106.4	±7.0	109.1	±6.2	85.2	±3.3	
	C (Pikku)	h1 (12)	103.0	±6.7	103.5	±5.5	91.3	± 11.0
		h2 (10)	97.4	±6.1	102.9	±3.7	84.3	±6.3
h3 (5)		102.3	±8.3	131.3	±7.4	81.7	± 14.3	
h4 (24)		97.7	±6.0	104.9	±7.3	88.8	±6.1	
v2 (12)		100.3	±5.8	101.4	±7.3	84.8	±5.1	
v3 (5)		96.0	± 14.4	105.0	±10.1	83.5	±8.3	
w2 (10)		99.5	±6.5	111.5	±4.4	81.1	±4.4	
w3 (6)		103.2	±7.4	109.4	±6.8	89.6	±6.3	
w4 (6)		101.4	±5.8	117.9	±8.1	81.7	±5.2	
D (Pikku)	h1 (10)	101.4	±6.7	96.8	±5.2	86.3	±5.2	
	w2 (4)	105.5	±6.2	110.5	±4.4	83.3	±5.4	
E (Pikku)	h1 (23)	101.8	±4.3	98.3	±8.2	95.0	±5.1	
	h2 (8)	94.4	±4.0	101.9	±8.5	91.3	±8.2	
	h3 (9)	109.1	±5.5	114.0	± 16.6	90.4	± 20.0	
	v1 (11)	101.5	±5.9	94.4	±8.9	91.5	±6.2	
	v2 (5)	104.9	±2.9	95.8	±1.2	93.0	±4.1	
	w1 (4)	106.2	±6.2	114.2	±9.9	83.4	±5.9	
	w4 (14)	103.1	±4.4	116.0	±9.7	86.8	±5.2	

oberfläche beobachten (z. B. am Rand oder in flachen oder gekrümmten Oberflächen). Marginale Schwankungen der Innenwinkelgrößen sind nicht nur zwischen verschiedenen Manuskripten – auch desselben Schreibers –, sondern auch zwischen verschiedenen Keilklassen innerhalb desselben Manuskripts zu beobachten. Das bestätigt, dass es während des Schreibprozesses beim Eindringen in den Ton zu minimalen Drehungen und Bewegungen der Griffelspitze kommt. Derartige Abweichungen sind allerdings kohärent: Korrelationen zwischen Keilklassen und Gruppen von Keilklassen können sowohl innerhalb eines Manuskriptes als auch zwischen verschiedenen Manuskripten festgestellt werden. Das bestätigt die naheliegende Annahme, dass eine Handschrift prinzipiell uniform ist und die Abweichungen in den einzelnen Elementen der Schrift durch allgemeine, schreibprozessbedingte Einschränkungen sowie individuell geprägte Schriftmerkmale bedingt sind.

Bei der Interpretation der gemessenen Innenwinkel ist insbesondere zu beachten, dass die Merkmale über die sich die Handschrift eines Schreibers identifizieren lässt, im Gegensatz zur konkreten Handschriftausprägung in einem Manuskript, nicht in den absoluten Messgrößen zu suchen sind, sondern in den je nach Kontext unterschiedlichen Winkelrelationen der verschiedenen Keilklassen (s. Paragraph 5.2.4). Ursächlich liegt dies im Sachverhalt begründet, dass jeder Schreiber im Laufe seiner Tätigkeit verschiedene Griffel verwendet, welches in der Folge zur Erzeugung von Keilen mit verschiedenen Winkeln führt. Die individuelle Ausführung von Keilen in verschiedenen Kontexten führt zu positionsspezifischen Abweichungen des Keileindrucks von der Griffelform (s. Paragraph 3.3.3), welche für die Schreiber charakteristisch sind. Davon unberührt bleibt die Annahme, dass für Schreiber nicht durchgängig von einer identischen Ausprägung seiner Handschrift auszugehen ist.

5.2.3 Klassen h1 – v1: allein stehende Senk- und Waagerechte

Die Innenwinkel von allein stehenden, waagerechten und senkrechten Keilen (d. h. die Zeichen AŠ und DIŠ) zeigen innerhalb jedes Manuskripts sowohl dieselbe Struktur der Winkelrelationen als auch sehr ähnliche absolute Werte, wie anschaulich aus Abbildung 12 hervorgeht. Das lässt sich für beide Schreiber (Hulanabi, Pikku) und in allen untersuchten Fragmenten, auf denen ein Vergleich möglich ist (A, B, E), beobachten.

5.2.4 Klassen w1 – w4: der Winkelhaken

Im Fall des allein stehenden Winkelhakens (w1) sind in der Struktur der Innenwinkel zwei Schemata zu erkennen.³⁵ In den beiden von Hulanabi geschriebenen Manuskripten A und B ist die Struktur der Innenwinkel identisch zu den Klassen h1 und v1. Im von Pikku geschriebenen Manuskript E zeigen dagegen

³⁵ Als „Struktur“ werden die Verhältnisse zwischen den Werten der drei Innenwinkel zueinander bezeichnet.

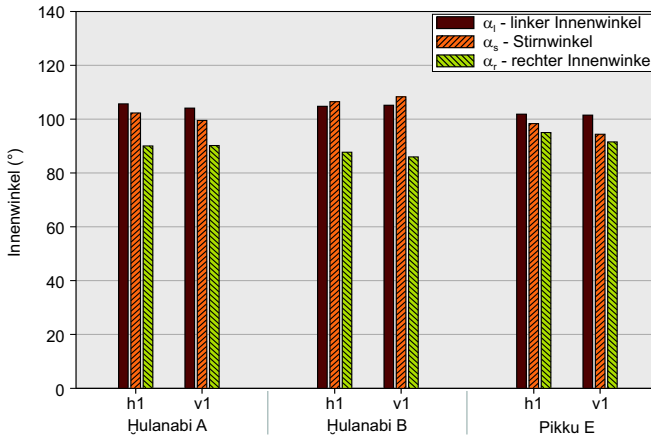
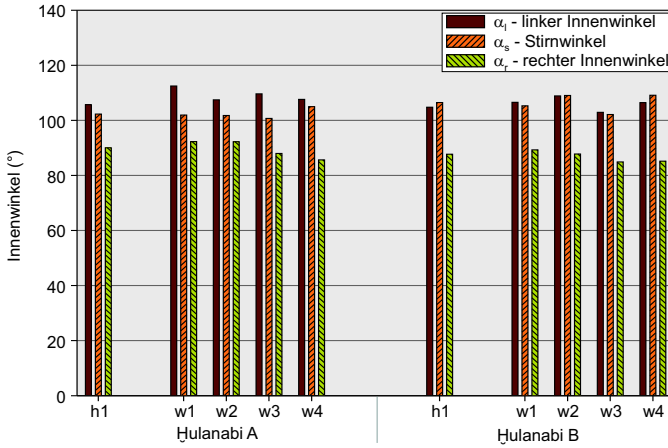


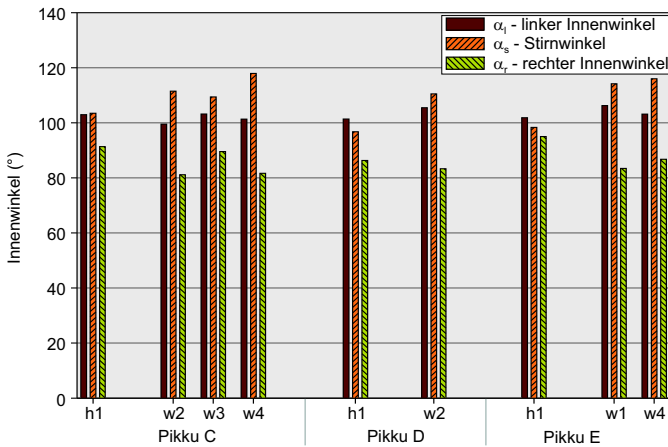
Abbildung 12: Statistische Auswertung zu den Innenwinkeln der Keilklassen h1 und v1 innerhalb der Manuskripte Hulanabi A, Hulanabi B und Pikku E

die Winkel eine vom Muster h1/v1 abweichende Struktur – deutlich größerer Stirnwinkel als bei den beiden anderen. Wird der Vergleich um die anderen Klassen von Winkelhaken (w2–w4) erweitert, zeigt sich deutlich, dass sich das Muster als kohärent für alle Klassen des Winkelhakens in beiden Gruppen von Tafeln erweist (s. Abb. 13). In beiden Manuskripten von Hulanabi weisen die Innenwinkel der Winkelhaken eine hohe Übereinstimmung mit den Werten, die im jeweiligen Manuskript für die Klassen h1 und v1 typisch sind. Auffällig ist, dass im Manuskript A wie bei den Klassen h1 und v1 auch bei den Winkelhakenklassen ein stärkerer Unterschied zwischen linkem Innenwinkel und Stirnwinkel zu beobachten ist, während diese im Manuskript B bei ähnlich hohen Werten liegen. Ebenso ist analog zu den Klassen h1 und v1 bei den Winkelhaken-Klassen der rechte Innenwinkel im Manuskript A etwas größer als im Manuskript B. Ein umgekehrtes Verhalten lässt sich bei allen von Pikku geschriebenen Manuskripten beobachten, wobei im Kontrast zur Struktur der Klassen h1 und v1, bei Winkelhaken-Klassen stets der Stirnwinkel der mit Abstand größte ist.

Das vorliegende Ergebnis weist auf einen grundlegenden Unterschied hin, der sich in der Erzeugung des als Winkelhaken bezeichneten Keiltyps manifestiert und der, zumindest in den untersuchten Keilklassen und Tafeln, eine Differenzierung zwischen den beiden Schreibern ermöglicht. Es lässt sich daraus schließen, dass Pikku bei der Erzeugung von Winkelhaken seinen Griffel in einer Abrollbewegung um dessen Hauptachse drehte, während Hulanabi den Griffel mit einer prinzipiell linearen Trajektorie eindrückte.



(a) Hulanabi



(b) Pikku

Abbildung 13: Vergleichende statistische Auswertung der Keilklasse h1 mit den Keilklassen w1 – w4 (Winkelhaken) auf Basis der Innenwinkel innerhalb der Manuskripte (a) Hulanabi A und Hulanabi B sowie (b) Pikku C, Pikku D und Pikku E

5.2.5 Klassen v2 und v3, h2 – h4

Die folgenden Beobachtungen lassen sich für die durchschnittlichen Werte der Innenwinkel in den Klassen v2 – v3 und h2 – h4 identifizieren. In der Klasse v2 (der Senkrechte im Zeichen MA) reflektieren die Werte der Innenwinkel das Grundschema des jeweiligen Musters der Klassen h1/v1 (s. Abb. 14). Damit

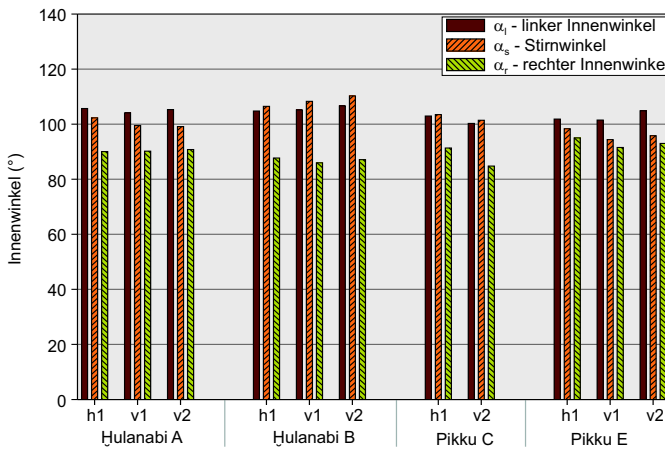


Abbildung 14: Statistische Auswertung zum Vergleich der Keilklassen h1 und v1 mit der Keilkategorie v2 auf Basis der Innenwinkel innerhalb der Manuskripte Hulanabi A, Hulanabi B, Pikku C und Pikku E

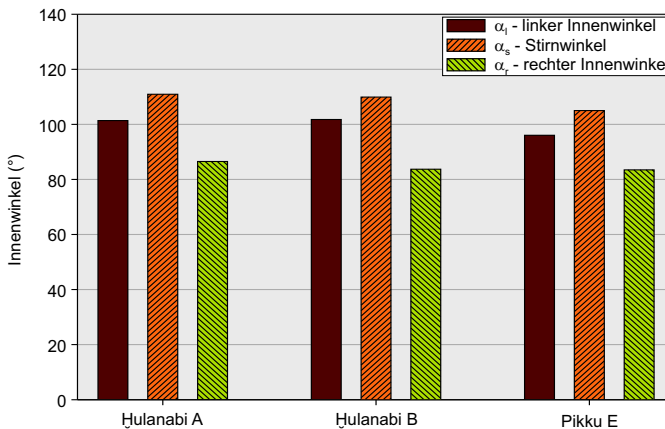


Abbildung 15: Statistische Auswertung zur Variation der Keilkategorie v3 innerhalb der Manuskripte Hulanabi A, Hulanabi B und Pikku E

erweist sich die Klasse v2 zusammen mit den Klassen h1 und v1 als besonders geeignet, eine Charakterisierung einzelner Manuskripte zu ermöglichen. Die Klasse v3 zeigt hingegen eine fast identische Struktur in allen untersuchten Manuskripten. Das Hauptmerkmal ist hierbei die erhöhte Breite des Stirnwinkels im Verhältnis zum linken Innenwinkel (s. Abb. 15). Da die Keilkategorie v3

aufgrund der Positionierung des senkrechten Keils in der Mitte des Zeichens anfällig für Segmentierungsfehler ist, konnte jedoch nur eine geringe Anzahl an Vorkommen erfolgreich segmentiert werden. Aufgrund der geringen Stichprobengröße und der Interferenz des betroffenen Keils mit den angrenzenden Keilen ist die Zuverlässigkeit dieser Klasse als signifikanter Indikator einer Charakterisierung der Schrift niedriger anzusetzen.

Auch die Klassen h2 und h4 zeigen eine vergleichbare Struktur bei allen Schreibern und in allen Manuskripten: Der linke Innenwinkel und der Stirnwinkel weisen ähnliche Werte auf, während die Größe des rechten Innenwinkels etwas niedriger ausfällt – klare Korrelationen mit anderen Klassen lassen sich nicht feststellen. Eine vergleichbare Aussage kann für die Klasse h3 getroffen werden. In dieser Klasse weist die trotz der geringen Anzahl der relevanten Belege im Manuskript C vertretene außergewöhnliche Breite des Stirnwinkels auf ein echtes Schriftmerkmal hin, das aber nur in diesem Manuskript zu beobachten ist. Dass auch diese Klasse sich als schwer segmentierbar erweist, harmoniert mit der wahrscheinlichen Erzeugungsart dieses Keiltyps. Auf Basis sorgfältiger Untersuchungen der betroffenen Belege lässt sich der Entstehungsprozess der drei Waagerechten im Zeichen MA für beide Schreiber wie folgt rekonstruieren (s. Abb. 16): Zuerst wurde der obere Keil erzeugt (der Eindruck erscheint scharf und ist tief geprägt), dann der untere und zuletzt der mittlere Keil; beide wurden in der Regel deutlich leichter und offensichtlich schnell nacheinander eingedrückt. Diese Tatsache könnte die erheblichen Schwankungen in deren Winkeln und deren Struktur, die nicht nur zwischen den verschiedenen Manuskripten, sondern auch innerhalb ein und desselben Manuskripts beobachtbar sind (vgl. Tabelle 4), erklären. Zusammenfassend ist auf Basis der aktuellen Untersuchungen nur von einer geringen Signifikanz der Keilklassen v3, h2, h3 und h4 als Indikator für Schriftmerkmale auszugehen.

5.2.6 Kohärenz der Handschrift

Um die statistische Relevanz und Zuverlässigkeit der durchschnittlichen Werte in den verschiedenen Keilklassen zu überprüfen, wurde das Fragment 637/b (KUB 32.99) separat analysiert. Dieses ist nach Vorschlag von F. Fuscagni ein *sandwich join* mit Manuskript B.³⁶ Wegen der begrenzten Größe des Fragmentes konnten nur wenige Keilproben je nach Keilkategorie korrekt segmentiert werden – in einigen Fällen geht es um einen einzigen Keileindruck – insbesondere dieser Umstand ordnet das vorliegende Experiment als besonders relevant ein. Die durchschnittlichen Werte jeder Keilkategorie wurden dann mit denen der anderen fünf Manuskripte verglichen (verglichen wurde jeweils die Summe der drei Innenwinkel). In 9 von 11 Klassen erwies sich Manuskript B als das Manuskript mit den ähnlichsten Durchschnittswerten (s. Tabelle 5). Das Ergebnis ist bemerkenswert und vielversprechend, sofern beachtet wird, dass

36 S. Košak, <http://www.hethiter.net>: hetkonk (v. 1.86).

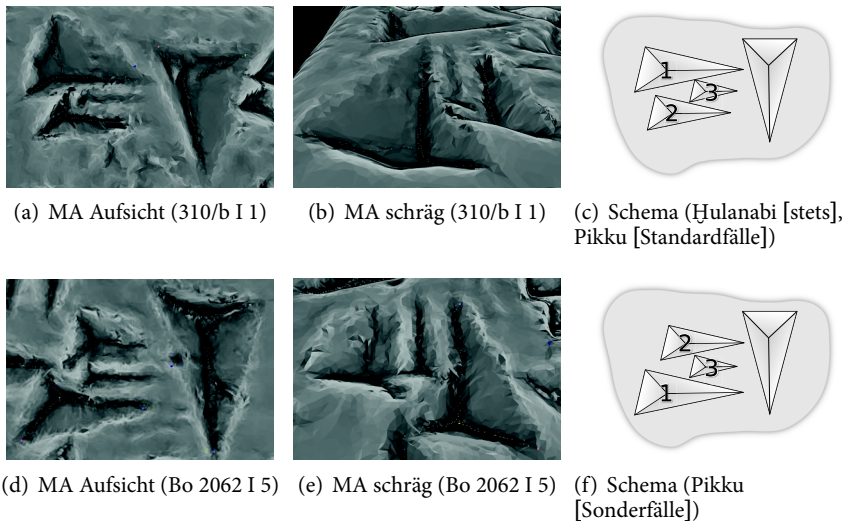


Abbildung 16: Darstellung einer Strichsequenz des Zeichens MA im Vergleich zwischen (a)–(c) einem von Hulanabi geschriebenen Manuskript B (310/b, I 1) und (d)–(f) dem Schreiber Pikku. Unterschiedliche Belege manifestieren, dass die leichten Deformationen der Keilflächen auf die Strichsequenz hinweisen (c). Die identische Strichsequenz kann in der Regel auch im Fall des Schreibers Pikku beobachtet werden. In seltenen Fällen jedoch scheint es, dass Pikku dasselbe Zeichen abweichend niederschrieb (vgl. auch Weeden 2011: 54). Im vorliegenden Fall wirkt der untere, und nicht der obere waagerechte Keileindruck tief und nach links gezogen, wie in Bo 2062 (Manuskript E) I 5 zu sehen ist (d – e; ähnlich in Zeile I 8). In derartigen Fällen zeigen die Deformationen der Keilflächen, dass die Strichsequenz umgekehrt erfolgte: zuerst wurde der untere, dann der obere und schließlich der mittlere waagerechte Keileindruck erstellt (f)

nur einige wenige Klassen von Keilen für die Untersuchung ausgewählt und lediglich die Innenwinkel des Keils analysiert und verglichen wurden – diese stellen zudem nur eines der parametrisierbaren Schriftmerkmale dar.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der Zielsetzung, neue Konzepte und Algorithmen zur Schriftanalyse über eine Identifizierung und Klassifizierung von parametrisierbaren Schriftmerkmalen zu erarbeiten, wurden innerhalb des vorliegenden Artikels erste erarbeitete Sachverhalte thematisiert. Diese bestehen in der Definition einer dreidimensionalen Terminologie zur Charakterisierung von Keileindrücken und in der Identifikation von salienten Faktoren, welche beim Erzeugen der Keileindrücke zu Variationen von der Idealform führen. Dabei

Tabelle 5: Statistische Auswertung der Innenwinkel (Durchschnitt, Standardabweichung) zum Vergleich des Manuskripts 637/b mit den Manuskripten Hulanabi A, Hulanabi B, Pikku C, Pikku D und Pikku E

Keilkategorie (Stichproben- größe)	Winkel [°] (Mittelwert, Standardabweichung)						Ähnlichstes Manuskript
	linker Innenwinkel		Stirnwinkel		rechter Innenwinkel		
h1 (1)	103,1		103,9		95,5		B
h2 (4)	107,3	±4,6	106,1	±3,4	97,8	±5,2	B
h3 (1)	118,8		97,9		111,0		B
h4 (4)	100,5	±8,3	110,0	±4,3	100,1	±6,2	B
v1 (5)	102,8	±3,5	108,6	±4,1	93,0	±4,2	B
v2 (4)	102,3	±4,0	112,3	±5,5	89,7	±7,4	B
v3 (2)	100,8	±1,2	108,4	±10,2	86,2	±0,8	B
w1 (1)	100,1		105,7		84,8		B
w2 (2)	102,3	±1,8	111,6	±2,4	90,0	±1,0	B
w3 (2)	103,9	±4,5	105,9	±5,0	91,3	±2,1	C
w4 (2)	112,8	±1,7	111,4	±0,9	85,6	±1,7	E

wurde eine Klassifikation der Abweichungsfaktoren in fünf Gruppen vorgenommen, die jeweils signifikanten Einfluss auf den Ist-Zustand eines Manuskripts haben: Schriftträger, Schreibgriffel, Schreibprozess, Schriftkontext, postoperative Umstände. Insbesondere die Analyse der Trajektorie des Griffels beim Schreibprozess ist ein explizit zu beachtender Sachverhalt. Die Trajektorie des Griffels im Bezug zur Tafeloberfläche sowie Drehungen und Bewegungen während des Eindruckprozesses beeinflussen in wesentlicher Weise die Geometrie des Keileindrucks und die Beziehung zwischen Winkeln der Schreibspitze und Innenwinkeln der einzelnen Keileindrücke. In Anbetracht der prägnanten schriftkontextbedingten Wirkung repräsentieren diese relevante Schriftmerkmale.

Ausgehend von der Darstellung der verwendeten Methoden zur Datenerfassung und Segmentierung der Keileindrücke wurde die Tragfähigkeit der Konzepte unter Verwendung von sechs hethitischen Tontafeln am Beispiel des Merkmals „Innenwinkel der Keileindrücke“ evaluiert. Eine aus der Auswertung abgeleitete Erkenntnis ist, dass sich bereits auf der untersten Merkmalsebene, den geometrischen Eigenschaften eines Keileindrucks, signifikante Daten zur Klassifizierung von Keilschrifttafel Fragmenten und Handschriften gewinnen lassen. Beispielsweise zeigten die Innenwinkel der Keileindrücke Regelmäßigkeiten und Zusammenhänge auf, welche für die Charakterisierung der Handschrift verwendet werden können. Die Analyse verdeutlichte zudem, dass metrologische Schriftmerkmale, welche eine Charakterisierung der Handschrift einzelner Manuskripte ermöglichen, durch

statistische Kennzahlen für bestimmte Keilklassen akquiriert werden können. Insbesondere die Keilklassen h1, v1 und v2 (allein stehenden Waagerechte und Senkrechte; Senkrechte im Zeichen MA) repräsentieren aufgrund der Kohärenz und Stabilität der Werte eminente Eigenschaften zur schriftmetrologischen Charakterisierung einzelner Manuskripte. Hierbei ist anzumerken, dass derartige Kenngrößen primär die Handschrift eines Manuskriptes charakterisieren, nicht aber die eines Schreibers, da die Innenwinkel der Keileindrücke auch durch Faktoren beeinflusst werden, welche unabhängig von der individuellen Handschrift sind. Beispielsweise werden durch die Verwendung verschiedener Griffel auch abweichende Innenwinkel generiert.

Ergänzend zur Charakterisierung von Manuskripten konnte aufgezeigt werden, dass die Merkmale auch zur Identifikation von Attributen genutzt werden können, die individuelle Handschriften kennzeichnen. Dabei werden aber nicht die durchschnittlichen Werte der Keilklassen *per se*, sondern die Kohärenzen und Divergenzen in der Struktur der Winkel verschiedener Keilklassen verglichen. Unter dem Begriff „Struktur“ ist die Relation zwischen den Werten der drei kohärenten Innenwinkel zu verstehen, welche für den exemplarischen Fall des Winkelhakens analysiert wurde. Wird die Struktur des Musters h1/v1 mit jener der Winkelhakenklassen in jedem Manuskript verglichen, kontrastiert die in Hulanabis Manuskripten bestehende Korrespondenz zwischen den zwei Gruppen mit der auffälligen Abweichung, die sich in den Manuskripten von Pikku zwischen „h1/v1-Mustern“ und „Winkelhakenmustern“ zeigt. Ungeachtet der statistischen Heterogenität weist die jeweils kohärente Struktur der Innenwinkel auf zwei verschiedene, schriftprozessbedingte Verfahren zur Erzeugung der Winkelhaken hin, welche die Schreiber Hulanabi und Pikku in den untersuchten Manuskripten kennzeichnen.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass bereits die Untersuchung der Innenwinkel von Keileindrücken aufgrund der dreidimensionalen Herangehensweise grundlegend neue Auswertungen erlaubt. Über die Expansion der Untersuchungen auf weitere Komponenten der Keile und deren automatisierte Analyse ist davon auszugehen, dass der Fundus an Kriterien zur Klassifizierung von Handschriften und Schriftstücken essentiell erweitert wird – ebenso von Merkmalen auf der Ebene von Keilschriftzeichen, Zeilen und globaler Ausprägung der Texte. Die integrierte Zusammenführung von Konzepten der Altertumswissenschaften und Methoden der rechnergestützten Datenverarbeitung und -analyse wird die Erkenntnisse zum Schriftprozess sowie die Suche nach und die Überprüfung von Joins nachhaltig fördern.

Farbfassungen der Abbildungen finden Sie zum Herunterladen auf der Detailseite von Jahrgang 2014 der „Welt des Orients“, Heft 44,1, unter www.v-r.de

Literatur

- Abusch, Tzvi 1981. Notes on a Pair of Matching Texts. A Sheperd's Bulla and an Owner's Receipt, in: M.A. Morrison – D.I. Owen (eds.), *Studies on the Civilization and Culture of Nuzi and the Hurrian in Honor of Ernest R. Lacheman* (SCCNH 1), Winona Lake: Eisenbrauns, 1–9.
- Chiera, Edward 1938. *They Wrote on Clay*, Chicago: The University of Chicago Press.
- Clay, Albert T. 1906. *Documents from the Temple Archives of Nippur dated in the Reigns of Cassite Rulers* (BE 14), Philadelphia: University of Pennsylvania.
- Cornil, Pierre 1999. La tradition écrite des textes magiques hittites, *Ktéma* 24, 7–16.
- Deimel, Anton 1932. Die Bedeutung der Keilschrift-Palaeographie für die Chronologie der ältesten babylonischen Geschichte, *Or NS* 1, 213–222.
- Falkenstein, Adam 1936. *Archaische Texte aus Uruk* (ADFU 2), Leipzig: Harrassowitz.
- Fischler, Martin A. – Bolles, Robert C. 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Commun. ACM* 24, 6, 381–395.
- Goetze, Albrecht – Sturtevant, Edgard H. 1938. *The Hittite Ritual of Tunnawi* (AOS 14), New Haven: American Oriental Society.
- Gordin, Shai 2011. The Tablet and its Scribe: Between Archival and Scribal Spaces in Late Empire Period Hattusa, *AoF* 38, 177–198.
- Güterbock, Hans Gustav 1997. *Perspectives on Hittite Civilization: Selected Writings of Hans Gustav Güterbock* (AS 26), Chicago: The Oriental Institute.
- Haas, Volkert – Wäfler, Markus 1977. Zur Topographie von Hattuša und Umgebung I, *OA* 16, 227–238.
- Haas, Volkert 1994. *Geschichte der hethitischen Religion*, Leiden – New York – Köln: Brill.
- Ismail, Farouk – Sallaberger, Walther – Talon, Philippe – van Lerberghe, Karel 1996. *Administrative Documents from Tell Beydar* (Seasons 1993–1995) (Subartu II), Turnhout: Brepols.
- Kanungo, Tapas – Mount, David M. – Netanyahu, Nathan S. – Piatko, Christine D. – Silverman, Ruth – Wu, Angela Y. 2002. An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24, 881–892.
- Klinger, Jörg 1996. *Untersuchungen zur Rekonstruktion des hattischen Kultschicht* (StBoT 37), Wiesbaden: Harrassowitz.
- Marzahn, Joachim 2003. Die Keilschrift, in: W. Seipel (ed.), *Der Turmbau zu Babel: Ursprung und Vielfalt von Sprache und Schrift*, Band III A, Vienna: Kunsthistorisches Museum; Milano: Skira, 81–92.
- Messerschmidt, Leopold 1906. Zur Technik des Tontafel-Schreibens, *OLZ* 9, 185–196, 304–312, 372–380.
- Oppenheim, A. Leo 1977. *Ancient Mesopotamia: Portrait of a Dead Civilization. Revised Edition*, Chicago: The University of Chicago Press.

- Pacanowski, Romain – Barla, Pascal – Granier, Xavier – Schlick, Christophe 2010. Radiance Scaling for versatile surface enhancement, Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH symposium on Interactive 3D Graphics and Games (I3D '10), New York: ACM, 143–150.
- Powell, Marvin A. 1981. Three Problems in the History of Cuneiform Writing: Origins, Direction of Script, Literacy, in: M.A. Powell (ed.), *Aspects of Cuneiform Writing* (Visible Languages 15.4), Cleveland: Visible Languages, 419–440.
- Rüster, Christel – Wilhelm, Gernot 2012. *Landschenkungsurkunden hethitischer Könige* (StBoT Beiheft 4), Wiesbaden: Harrassowitz.
- Salvini, Mirjo – Wegner, Ilse 1984. Die hethitisch-hurritischen Rituale des (ḫ)išuwa-Festes, SMEA 24, 175–185.
- Schwemer, Daniel 2004. Von Taḫurpa nach Ḫattuša. Überlegungen zu den ersten Tagen des AN.DAḪ.ŠUM-Festes, in: M. Hutter – S. Hutter-Braunsar (eds.), *Offizielle Religion, lokale Kulte und individuelle Religiosität. Akten des religionsgeschichtlichen Symposiums „Kleinasien und angrenzende Gebiete vom Beginn des 2. bis zur Mitte des 1. Jahrhunderts v. Chr.“* (Bonn, 20.–22. Februar 2003) (AOAT 318), Münster: Ugarit-Verlag, 395–412.
- Taylor, Jonathan 2011. Tablets as Artefacts, Scribes as Artisans, in: K. Radner – E. Robson (eds.), *The Oxford Handbook of Cuneiform Culture*, New York: Oxford University Press, 5–31.
- van den Hout, Theo P.J. 2002. Another View of Hittite Literature, in: S. de Martino – F. Pecchioli Daddi (eds.), *Anatolia antica. Studi in memoria di Fiorella Imparati* (Eothen 11), Firenze: Logisma Editore, 857–878.
- Waal, Willemijn 2010. *The Source as Object. Studies in Hittite Diplomats*. Ph.D. Dissertation, University of Leiden.
- Weeden, Mark 2011. *Hittite Logograms and Hittite Scholarship* (StBoT 54), Wiesbaden: Harrassowitz.
- Wegner, Ilse – Salvini, Mirjo 1991. *Die hethitisch-hurritischen Ritualtafeln des (ḫ)išuwa-Festes* (ChS 1/4), Roma: Multigrafica Editrice.