

**Entstehung und Musterbildung von Macro- und Microwear auf
menschlichem Zahnschmelz. Diachrone Untersuchung vom Mesolithikum
bis in das frühe Mittelalter im Süddeutschen Raum, sowie unter
Simulationsbedingungen**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades an der Fakultät für Biologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Erstgutachter: Prof. Dr. Gisela Grupe
Zweitgutachter: Prof. Dr. Gerhard Wanner

Tag der mündlichen Prüfung:
07. November 2005

eingereicht am 30. Juni 2005
von
Irene Luise Gügel

Inhaltsverzeichnis

I.	Einführung	1
A.	Einführung in die Evolution des Ernährungsverhaltens des <i>Homo sapiens sapiens</i>	1
A 1.	Allgemeines	1
A 2.	Der frühe <i>Homo sapiens</i>	4
A 3.	Der moderne <i>Homo sapiens</i>	5
B.	Einführung in die evolutionären Anpassungen des menschlichen kranialen Skelettes und der Zähne an den Kauvorgang und die Ernährung	11
B 1.	Überblick über den Kauapparat	11
B 2.	Dentition und deren Modifikationen bei den Primaten	12
B 3.	Molaren als Werkzeuge im Prozess der Nahrungszerkleinerung	12
B 4.	Aufbau und Kronenrelief der Molaren	13
B 5.	Spezielle Anpassungen der Zähne an die Ernährung	14
B 6.	Physikalisch-chemische Eigenschaften und Bildung von Zahnhartgeweben	15
C.	Einführung zur Analyse und Simulation von Zahnschmelzabtragung und dentaler Microwear	22
C 1.	Dentale Zahnabtragung (wear)	22
C 2.	Dentale Microwear	23
C 3.	Mechanismen der Zahnschmelzabtragung und der Entstehung dentaler Microwear	25
C 4.	Einführung in die experimentelle Simulation	30
C 5.	Simulation dentaler Abtragung und Microwear auf natürlichem Zahnschmelz	31
D.	Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit	32
II.	Experimentell erzeugte dentale Zahnschmelzabtragung und Microwear	34
A.	ACTA-Simulation	34
A 1.	Material und Methoden	34
A 2.	Ergebnisse der ACTA-Simulation	42
A 3.	Diskussion zur ACTA-Simulation	52
B.	Kausimulation am Vier-Stationen-Kaukraftsimulator MUC 3 nach Kunzelmann	57
B 1.	Material und Methoden	57
B 2.	Ergebnisse der Simulation am Kaukraftsimulator MUC 3	63
B 3.	Diskussion zur Simulation am Kaukraftsimulator MUC 3	79

III.	Real komplexe Zahnschmelzabtragung und dentale Microwear	85
A.	Material und Methoden	85
A 1.	Beschreibung der einzelnen Fundkomplexe	86
A 2.	Dentalanthropologische Untersuchung der Skelettserien	92
A 3.	Kontrolluntersuchungen zur Ermittlung individueller und systematischer Fehler bei der DMA	96
A 4.	Untersuchung der Stickstoff- und Kohlenstoffsignatur ausgewählter Individuen	100
B.	Ergebnisse	102
B 1.	Parameter zur Zahngesundheit	102
B 2.	Parameter zur Abtragscharakteristik	103
B 3.	Ergebnisse der Kontrolluntersuchungen zur Dentalen Microwear	107
B 4.	Real komplexe Microwear (Mikroläsionen) auf den Zahnschmelzoberflächen	113
4.1	<i>Morphologische Beschreibung historischer Zahn- und Zahnschmelzoberflächen</i>	113
4.2	<i>Merkmale dentaler Microwear</i>	123
4.3	<i>Dentale Microwear-Merkmale</i>	127
4.4	<i>Morphometrische Charakterisierung Dentaler Microwear auf Ober- und Unterkiefermolaren</i>	148
B 5.	Kohlenstoff- und Stickstoffsignatur	187
C.	Diskussion	189
C 1.	Methodische Diskussion	189
C 2.	Inhaltliche Diskussion	190
2.1	<i>Vergleich der Zahngesundheit und der Parameter Dentaler Makro- und Microwear</i>	190
2.2	<i>Muster dentaler Abtragung und Microwear</i>	192
2.3	<i>Interpretation der Kohlenstoff- und Stickstoffsignaturwerte</i>	203
IV.	Zusammenfassende Diskussion zum Muster-Bildungs- und Auslöschungsprozess simulierter und real komplexer Microwear	206
V.	Literatur	213
VI.	Anhang	231

Danksagung

Lebenslauf

Publikationen

I. Einführung

In dem Fachgebiet Anthropologie und Umweltgeschichte werden mit naturwissenschaftlichen Methoden Informationen als „Spuren der Vergangenheit“ des Menschen und seiner nahen Verwandten im Tierreich gesammelt. Die Erschließung und Aufarbeitung dieser Informationen erweitert das Wissen über das Verhalten des Menschen, sein Entwicklungspotential und seine Entwicklungsbereitschaft, wie auch den Einfluss auf seine Umgebung und den Interaktionen mit seiner Umwelt in der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft. Wilson (1998) fasst, in seinem Buch mit dem Titel „Die Einheit des Wissens“, zusammen: „Menschliche Kultur ist für die biologische Anthropologie letztlich ein Produkt der genetischen Menschheitsgeschichte“.

A. Einführung in die Evolution des Ernährungsverhaltens des *Homo sapiens sapiens*

A 1. Allgemeines

Eine Vielzahl von Erklärungen für zeitgenössisches menschliches Verhalten basiert auf Untersuchungen an Fossilien früher Hominiden und Prähominiden. Sie implizieren damit eine relative Reaktionsträgheit, damit gemeint ist, dass die biologische Evolution langsamer vollzogen wird als umweltbedingte Veränderungen. Hamilton (1987) bemerkt, dass Verhaltenshinterlassenschaften für die Art Mensch aufgrund der enormen Geschwindigkeit mit der sie ihre eigene Umwelt verändert hat, von grösserer Bedeutung sein können, als für jede andere Tierart. Andererseits können Änderungen im Muster von menschlichem Verhalten ebenso auch rascher vollzogen werden als die biologische Evolution, wenn kulturelle Veränderungen involviert sind. Haidle (1997, S. 31) schreibt: „die biologische Evolution der Hominiden und besonders des *Homo sapiens sapiens* wurde durch die kulturelle Evolution ergänzt und diese vollzieht sich ebenso wie die Entwicklung neuer Arten nicht in Sprüngen“.

Veränderungen im Nahrungsverhalten während der Evolution des *Homo sapiens sapiens* stehen nach Meinung der Wissenschaftler im direkten Zusammenhang mit kulturellen Veränderungen. Diese liegen in der Sicherung der Ernährung (z.B. durch die Entwicklung und im Gebrauch von Werkzeugen), in evolutiven Mechanismen (z.B. durch einen Selektionsdruck auf die Lernfähigkeit und das Erinnerungsvermögen aufgrund einer unterschiedlichen Verteilung von Nahrungsmitteln im Nahrungseinzugsgebiet), im Mobilitätsverhalten (z.B. durch eine Änderung des Nahrungseinzugsgebietes), in Lebenssituationen menschlicher Bevölkerungen und der Genese von Erkrankungen (z.B. aufgrund des Stoffwechselgeschehens der Individuen oder deren mechanische Belastungen) und in anthropogenen Veränderungen der Umwelt.

Im Unterschied zu den Opportunisten unter den Primaten nutzt der anatomisch moderne Mensch als ein Vertreter der Generalisten unter den Primaten ein viel breiteres Nahrungsspektrum als andere Tiere. Die Entwicklung einer Vielzahl von Fähigkeiten ermöglichten es seinen hominiden Vorfahren Nahrungsmittel, die zuvor ungenießbar waren, für den Verzehr zugänglich zu machen und zusätzliche Energie zu gewinnen (Conklin-Brittain et al. 2002). Ein Schlüsselereignis, welches wiederholt evolutionäre Übergänge charakterisiert, ist eine progressive Reduktion des Fasergehaltes der Ernährung. Eine

Reduktion des Fasergehaltes kann erreicht werden durch den Verzehr von Pflanzen mit niedrigerem Fasergehalt, Verzehr tierischer Nahrung wie Fleisch mit einem geringen Fasergehalt oder durch entsprechende Zubereitung und Verarbeitungstechniken wie das Kochen (Conklin-Brittain et al. 2002). Der Gebrauch von Werkzeugen führte zur Zerkleinerung von Rohstoffen, welche die Zähne nicht zerkleinern könnten. Am Ende des Paläolithikums tauchten neue Waffen auf, ein kulturelles Produkt, welches nicht nur den Verlauf der pflanzlichen Evolution in Europa beeinflusste, sondern auch den Erfolg des Jagens erhöhte (Benecke 1994). Durch das systematische Jagen und die Kontrolle des Feuers im Paläolithikum konnten Lebensräume, die ursprünglich unbewohnbar waren, erschlossen werden (Turner 1984). Die Nutzung des Feuers erweiterte die Nahrungsnischen für den Menschen deutlich (Stahl 1989). Das Trocknen und Dörren von Fleisch und von Früchten konnte Nahrungsmittel für längere Zeit haltbar machen und sorgte für eine Überbrückung von Zeiten des Nahrungsmangels. Eine Behandlung mit Hitze verbesserte die Aufnahmefähigkeit von Inhaltsstoffen durch chemische Strukturveränderung und veränderte die toxische Wirkung von Nahrungsmitteln. Damit reduzierte sich die Gefahr nahrungsmittelbedingter Krankheiten und die saisonale Abhängigkeit vom Angebot (Aaronson 1989, Ungar and Teaford 2002).

Eine effiziente Energiegewinnung durch die Prozessierung von Nahrungsmitteln dürfte im genetischen Repertoire des Menschen fest verankert sein. So wären die Kosten zur Energiegewinnung durch eine Verlängerung des Verdauungstraktes („expensive tissue hypothesis“, Aiello and Wheeler 1995) und dem „mit sich Tragen der Nahrung“, wie dies bei den großen Menschenaffen der Fall ist, im Vergleich zur mechanischen Zerkleinerung und damit zu einem verbesserten Aufschluss und gesteigerter Resorption der Nahrung wesentlich höher. Die daraus resultierende Verdichtung der nährenden Nahrungsinhaltsstoffe stellt veränderte Ansprüche an den Stoffwechsel und ermöglicht eine energetische Balance auf höherem Niveau (Lucas and Luke 1984, Milton and Demment 1988). Die genetischen Voraussetzungen für die sich verändernden Ansprüche konnten sich während langer Zeiträume (mehrere Mio. Jahre) und durch ein relativ konstantes Nahrungsangebot entwickeln.

Mit großer Sicherheit darf angenommen werden, dass die Fähigkeit, die „richtigen“ Nahrungsmittel in ausreichender Menge zu verzehren, für das Überleben und die Weiterentwicklung des frühen *Homo sapiens* mindestens bis zum Mesolithikum von entscheidender und existentieller Bedeutung war.

In der heutigen Zeit, in welcher die medizinische Forschung intensiv daran arbeitet, die Ursachen von Krankheiten zu erschließen, die mit der Nahrung, die wir verzehren, in Verbindung stehen, haben die Forschungen der Anthropologen auf dem Gebiet der (R)Evolution des Ernährungsverhaltens eine besondere Bedeutung erlangt (Cordain et al. 2002, Eaton and Eaton 2000, Eaton et al. 2002, Mann 2000, Milton 2002, Richards 2002, Widdowson 1992).

Die Analyse zeitgenössischer menschlicher Ernährungspräferenzen und –strategien unter evolutionären Gesichtspunkten erfolgt heute an unterschiedlichen Ansätzen. Diese schließen Untersuchungen der frühen Hominidenernährung einschließlich des *Homo sapiens*, der Ernährung nicht-menschlicher Primatenarten und ihnen unterliegende „mögliche“ Regulationsprinzipien, sowie Theorien, die sich mit Mustern der Ernährungsformen von Tierarten im Allgemeinen und von menschlichen Gruppen im Besonderen beschäftigen, ein.

Die Kulturgeschichte des Menschen lässt uns erwarten, dass Änderungen in den Lebensgeschichten menschlicher Gruppen eng assoziiert sind mit der Nutzung von Nahrungsquellen, welche zuvor nicht oder nur wenig genutzt wurden. Die für den Übergang - von der Lebensweise eines Jäger und Sammlers in der ausgehenden mittleren Steinzeit (Mesolithikum), also einer eher extensiven Nutzung der Ressourcen, zu einer intensiven Nutzung und damit verbundenen produzierenden Lebensweise der sich entwickelnden ackerbäuerlichen Kulturen - besonders geeigneten Nahrungsquellen für eine verstärkte Nutzung stellten die Nahrungspflanzen, im besonderen die der Gräserfamilie (*Gramineen* = *Poaceae*) zugehörigen Zerealien dar. Zerealien (nach: lat. *Ceres*, die der griechischen Göttin *Demeter* entsprechende römischen Göttin der Feldfrüchte) sind die der menschlichen und tierischen Ernährung dienenden Getreidepflanzen. Dieser Gruppe der Nahrungsressourcen wurde in dieser Arbeit besondere Aufmerksamkeit entgegengebracht.

Auf der Suche nach Indikatoren für Unterschiede im menschlichen Ernährungsverhalten nutzen Paläoethnobotaniker und Archäologen pflanzliche Fossilien (Piperno and Ciochon 1990), um Verknüpfungen zwischen Nahrung, Biologie und Kultur aufzuspüren. Sie stützen sich auf Funde von fossilen Pflanzensamen, pflanzlichen Pollen und Phytolithen. Opal-Phytolithe, die erstmals 1835 in der wissenschaftlichen Literatur erschienen, sind amorphe Silikate, welche pflanzliche Organe imprägnieren und als resistente Abgüsse nach der Dekomposition des organischen Gewebes im Boden erhalten bleiben (Rovner 1971). Sie treten im besonderen in monokodyledon Pflanzen (Embryo trägt nur ein Keimblatt) auf und zeigen in der Familie der *Gramineae* (= *Poaceae*, Süßgräser), zu welchen die Zerealien zählen, die größte Häufigkeit und eine große Variabilität und Differenzierbarkeit (Rovner 1971, Piperno 1988, Kaplan et al. 1992, Twiss 1992).

Mit der Entdeckung von Opal-Phytolithen als systematisch zugehörig zu Pflanzen die genutzt, verzehrt und von unseren Vorfahren domestiziert wurden (Rovner 1971, 1983), besaß man nun vor der Dekomposition geschützte Partikel amorpher, variabler differenzierbarer Gestalt und Größe (Piperno 1988, Kaplan et al. 1992, Twiss 1992). Pflanzliche Phytolithe wurden an zahlreichen archäologischen Fundstellen nachgewiesen, insbesondere auch an Fundstellen der späten Altsteinzeit und der Jungsteinzeit (Miller Rosen 1993). Auffindbar waren sie sowohl im Erdreich (Lentfer und Boyd 1998, 1999), in Ablagerungsschichten (Brown 1984) und Feuerstellen (Helbaek 1961, Miller Rosen 1993), in Überresten von Fäkalien und Darminhalten (Baker et al. 1959), auf Keramik (Helbaek 1961) und auf Zahnoberflächen (Ciochon et al. 1990, Lalueza Fox et al. 1994, Lalueza Fox et al. 1996b, Gügel et al. 2001) und ermöglichten eine Diagnose auf Gattungsebene. Dadurch erhielt die Forschungsrichtung der Ernährungsrekonstruktion nicht-menschlicher und menschlicher Primaten neue Impulse (Piperno und Ciochon 1990). Qualitative Studien über die Zahnabtragung (Wear) und die Zahnschmelzläsionen auf mikroskopischer Ebene (Dentale Microwear) folgten. In den vergangenen 20 Jahren wurde das Datenmaterial über Microwear nicht-menschlicher Primaten ausgeweitet (Teaford und Runestad 1992, Lucas und Teaford 1995, Teaford et al. 1996). Es wurden paläobiologische Studien gefördert, um dentale Microwear-Muster von fossilen Primaten zu dokumentieren (z.B. Ungar und Grine 1991, Walker et al. 1994, Teaford et al. 1996, Ungar et al. 1996, Ungar und Teaford 1996, Rafferty et al 2002) und um quantitative Analysen von bioarchäologischem Material durchzuführen (z.B. Bullington 1991, Teaford 1991, Lalueza et al. 1993, Molleson et al. 1993, Pastor 1994, Pérez-Pérez et al. 1994). Weiterhin wurden neue Methoden entwickelt, um die Quantifizierbarkeit von Microwear zu verbessern (Boyde und

Fortelius 1991, Ungar et al. 1991, Ungar 1995) und Anstrengungen unternommen, um den Microwear-Bildungs-Prozess besser verstehen zu können (z.B. Teaford und Glander 1991, Ungar 1994a, Strait und Overdorff 1994, Gügel et al. 2001, Gügel 2002).

In der belebten Natur wird das Verhältnis stabiler Isotope bestimmter chemischer Elemente durch bio- und geochemische Prozesse verändert (Ambrose 1993) und kann massenspektrometrisch ermittelt werden. Veränderungen der Verhältnisse eignen sich zur Rekonstruktion von Präferenzen in der Ernährung menschlicher Bevölkerungen, da ein systematischer Unterschied zwischen der Isotopenzusammensetzung der verzehrten Nahrung und dem Gewebe eines Konsumenten besteht. Von besonderem Interesse sind hierbei die Kohlenstoff- und Stickstoffisotopenverhältnisse.

Knochen und Zähne speichern chemische Elemente, die zum größten Teil mit der Nahrung, dem Trinkwasser oder durch die Luft aufgenommen wurden. Durch biochemische Prozesse kommt es im Körper zu Konzentrationsänderungen dieser Spurenelemente gegenüber dem natürlichen Angebot. Das differentielle Verteilungsmuster einer Reihe von Elementen in den Grundnahrungsmitteln lässt sich im Gewebe wiederfinden und kann zur Erschließung von Nahrungserwerbsstrategien herangezogen werden (Sillen and Smith 1984, Ambrose 1993).

Ein weiterer Impuls geht von molekularbiologischen Analysen an historischem Untersuchungsmaterial aus. Es konnten z.B. in versteinerten menschlichen Exkrementen (Koprolithen) Überreste von pflanzlichem und tierischem Erbmaterial (DNS = Desoxyribonucleinsäure) nachgewiesen werden, die Aufschluss bis zur Artenebene lieferten (z.B. Poinar et al. 2001). Die relative Seltenheit des Untersuchungsgutes und die stark variable Integrität von DNS über die Zeit schränkt die Anwendbarkeit der Methode zur Ernährungsrekonstruktion noch stark ein. Mit zunehmender Erfahrung und der Erweiterung des Datenspektrums über informative Artensequenzen wird diese Methode in naher Zukunft ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Rekonstruktion von Ernährungsverhalten und Nahrungserwerbsstrategien leisten können.

A 2. Der frühe *Homo sapiens*

Den Hauptteil seiner Ernährungsgeschichte verlebte der *Homo sapiens sapiens* als „Sammler und Jäger“. Dies reflektierte sich im Sammeln und dem Verzehr von wildwachsenden Pflanzen, der Jagd und dem Verzehr von wilden Tieren und in einem mobilen, nicht sesshaften Lebensstil (Prossinger und Willms 1998, Milton 2002). Wechselnden Umweltbedingungen passte sich der archaische *Homo sapiens* nahezu ausschließlich dadurch an, indem er seine Kultur immer wieder ab- oder veränderte, z.B. die Jagdtechnik und technische Hilfsmittel (z.B. Probst 1991, Müller-Karpe 1998), Ernährungsgewohnheiten (z.B. Gilbert und Mielke 1985, Andrews und Martin 1991, Teuteberg 1992a, b, Whiten und Widdowson 1992, Ungar und Teaford 2002), die Behausung (z.B. Probst 1991), die Art und Ausdehnung seiner Wanderungen und des Ortswechsels (z.B. Yen 1989). Praktisch gesehen basierte jede Veränderung von Verhaltensweisen, jeder technologische Fortschritt und jede Erkenntnis auf der Grundlage vorhergehender Erfahrungen, die an die nachfolgende Generation weitergegeben wurden. Die Planung und Organisation besserer und gesicherter Nahrungsmittelversorgung zeigte im Verlauf der Entwicklung des *Homo sapiens sapiens* sehr unterschiedliche Ausprägungen und stellte einen wichtigen Faktor für unterschiedliche Wachstumsraten von Bevölkerungen dar (Abb. 1) (Krengel 1994, Weltbevölkerungsbericht 2002).

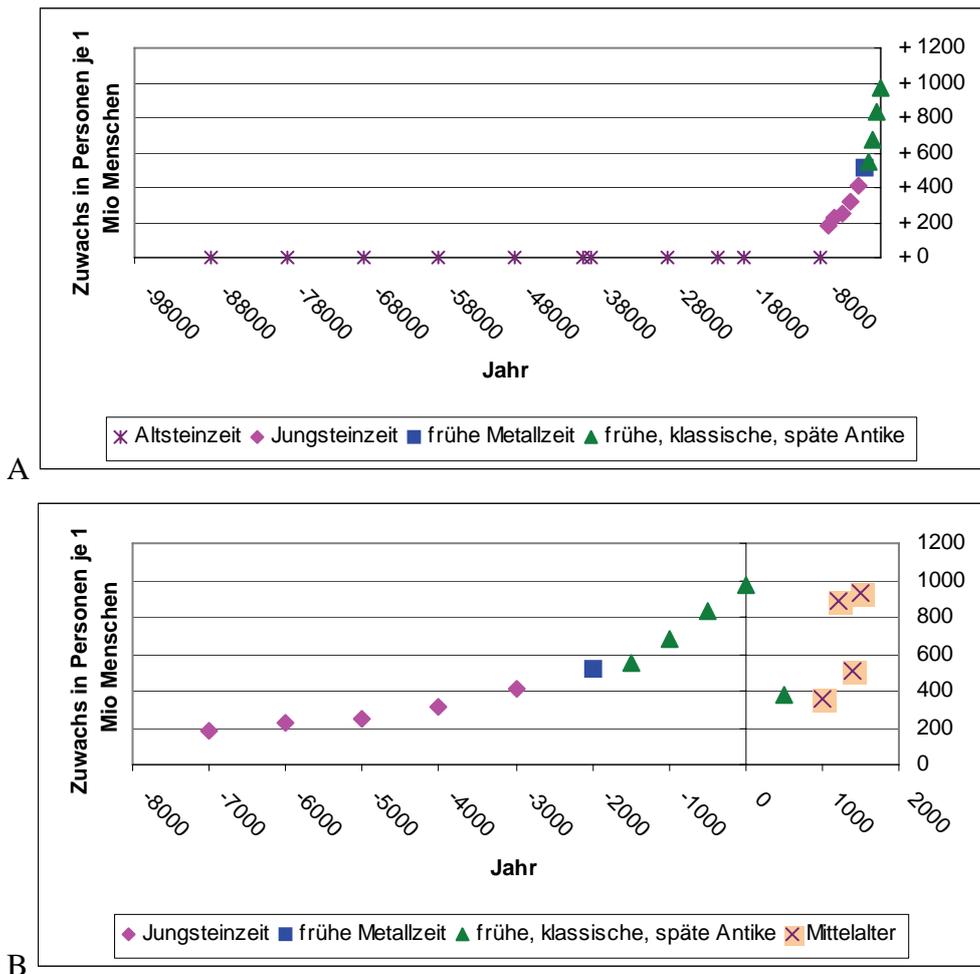


Abb. 1 A und B Jahresdurchschnittlicher Zuwachs der Weltbevölkerung von 98000 v.Chr. bis 1500 n.Chr. (Daten aus Kregel 1994)

A 3. Der moderne *Homo sapiens*

3.1 Die Phase des Überganges

Gegen Ende des Mesolithikums vor ungefähr 13 000 Jahren begann der Mensch, abhängig von den klimatischen und regionalen Bedingungen, seine Nahrung selbst zu produzieren. Diese Phase des Überganges von ausbeutender zu produzierender Nahrungsversorgung wird als „Neolithische Revolution“ bezeichnet. Der 1936 von G. Childe geprägte Begriff für den umfassenden Umbau von Sammler-Jäger-Gesellschaften zu Ackerbaugesellschaften (aus: Mellars und Stringer 1989) erscheint irreführend. Die Entwicklungsprozesse verliefen eher langsam über einen Zeitraum von mehreren Jahrtausenden, in manchen Fällen auch nur wenigen Hundert Jahren und je nach geographischer Region unterschiedlich. Das grundlegende Wissen der Jäger-Sammler-Kulturen über fruchtbare Standorte, günstige klimatische Bedingungen und die Saisonalität von nutzbaren Ressourcen war bereits vorhanden und diente als Wissenspolster, auf welchem die ersten Ackerbauern, zunächst auf lokaler Ebene, aufbauen konnten. Noch zu Beginn des Neolithikums ist von einem großen Anteil gesammelter und gejagter Nahrungsbestandteile in der Ernährung auszugehen.

Zu Zeiten verminderten Nahrungsangebotes nutzte bereits der noch jagende und sammelnde Mensch das Korn der Getreide zur Ernährung. Die primitive Technologie der Vermahlung, um das Getreide für die

Verdauung zugänglich zu machen, stand jedoch einer dauerhaften Nutzung entgegen (Beranová 1991). Eine verstärkte Nutzung von Getreide wurde erst attraktiv, als die Bevölkerungsdichte einen Stand erreicht hatte, welcher die nomadische Ausnutzung von Wild und wild gewachsenen Pflanzen und Früchten schwierig oder gar unmöglich machte und den Menschen dazu drängte, neue Nahrungsquellen zu erschließen (Harris 1989, Hillman et al. 1989, Schepartz 1989, Schoeninger und van der Merwe 1990, Ulijaszek 1991). Die Aufrechterhaltung einer Balance zwischen zunehmender Gruppengröße und adäquater Versorgungslage mit Nahrungsmitteln war somit auch gebunden an eine Steigerung der Produktivität und damit einer Innovationsbereitschaft zur Entwicklung effizienterer Agrartechnologien (i.b. Anbaumethoden, technische Hilfsmittel).

3.2 Vom Neolithikum bis in das frühe Mittelalter

Eng verknüpft mit dem Umbau von jagender und sammelnder zu produzierender Lebensweise ist der Übergang von mobiler zu sesshafter Lebensweise. Im allgemeinen konzentrieren sich ackerbaubetreibende Bevölkerungen stärker, bilden größere Gruppen und sind weniger mobil als sammelnde Bevölkerungen. Ein fortlaufende Zunahme des Bevölkerungszuwachses seit der Frühzeit des *Homo sapiens sapiens* (Abb. 1 A und B) ist zu beobachten, eine enorme Zunahme der Bevölkerungszahlen in exponentiellen Dimensionen wird erst in der Jungsteinzeit deutlich (Abb. 2). Die absoluten Bevölkerungszahlen (y-Achse) sind logarithmisch skaliert.

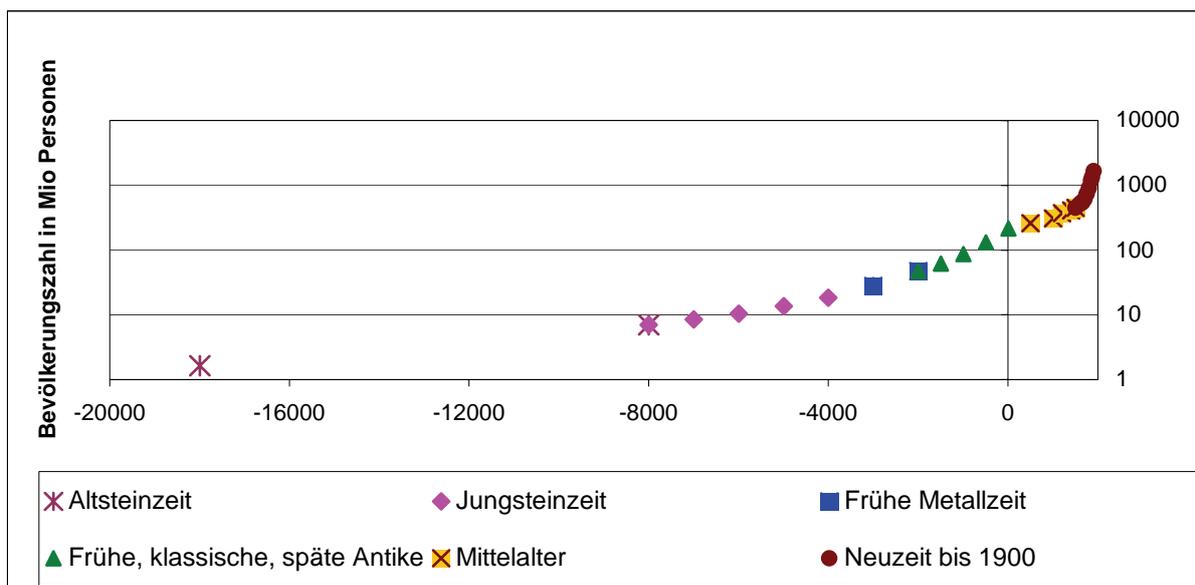


Abb. 2 Weltbevölkerungszahlen von ca. 20 000 v. Chr. bis 1900 n. Chr. (Daten aus Krenzel 1994)

Der Übergang vom „Jäger- und Sammlertum“ zum „Ackerbau“ und die Domestikation von Cerealien führte zu umfassenden Veränderungen in der Ernährung (Ammerman und Cavalli-Sforza 1973, Ammerman 1989, Hillman 1989, Zohary und Hopf 1993). Es existieren zahlreiche Hinweise dafür, dass die vielfältige „Urvölkerdiät“ einer mit dem Übergang einhergehenden Abnahme der Nahrungsvielfalt, bei welcher die Kohlenhydrate dominierten (Gordon 1987), weichen musste. Heutige Erkenntnisse belegen für den angloamerikanischen Raum eine Verbindung des Überganges mit einem höheren Stresspegel durch die Gefahr der Unterernährung, der Zunahme der Häufigkeit von Nahrungsmangel und für eine verstärkte Anfälligkeit für Infektionserkrankungen besonders im Kindesalter (Cohen 1989,

Ulijaszek 1991, Larsen 2002). Pathologische Veränderungen die an menschlichen Skeletten aus dieser Region dieser zeitlichen Periode auftraten, zeigten Zeichen von Anämien und Osteoporose, obgleich noch nicht gesichert ist, inwiefern diese Symptome mit dem Ernährungsgeschehen direkt verbunden sind (Cohen und Armelagos 1984, Cohen 1989, Larsen 2002, S. 25f). Für den europäischen Raum gibt es bislang keine vergleichbaren Hinweise.

Für neolithische Viehzüchter setzte sich vermutlich der Verzehr von tierischem Eiweiß auf dem Niveau des Paläolithikums fort, aber für die meisten neolithischen Ackerbauern war Fleisch vermutlich weniger verfügbar als für den Steinzeitmenschen. Die zunehmende Abhängigkeit von Getreide als eine Energiequelle führte auch zu einem reduziertem Verzehr von Früchten und Grünpflanzen, welche mit größter Wahrscheinlichkeit die Hauptnahrungsmittel in der Primaten- und Hominidenevolution darstellten (Conklin-Brittain et al. 2002). Während die Faserstoffe der Früchte und Grünpflanzen größtenteils löslich sind, sind die Faserstoffe aus dem Getreide im menschlichen Verdauungstrakt weitgehend unlöslich (v.a. nicht-stärkehaltige Polysaccharide, Lignin, assoziierte Substanzen). Mit der veränderten Ernährung verbunden war eine erhebliche Einschränkung der Versorgung des menschlichen Körpers mit essentiellen Inhaltsstoffen sog. Mikronährstoffen (z.B. essentielle Aminosäuren Lysin, Isoleucin und Tryptophan), eine Reduktion der Verfügbarkeit von Eisen (durch z.B. die Anwesenheit von Phytin im Mais) oder eine verzögerte Freisetzung von Vitaminen aus chemischen Bindungen. Reduktionen dieser Art führten zu einer Fehlernährung, die sich nach Cohen und Armelagos (1984), Cohen (1989), Herrman et al. (1990), Larsen (1991), und Eaton et al. (2002) auch in Veränderungen am Skelett manifestieren konnten.

Eine der augenfälligsten Veränderungen beim Übergang vom Sammler zum Ackerbauern zeigte sich in der weit verbreiteten Abnahme der oralen Gesundheit, die mit großer Wahrscheinlichkeit verbunden war mit dem zunehmenden Verzehr von pflanzlichen Kohlenhydraten. Dentale Karies war im Mesolithikum bekannt (Meiklejohn et al. 1988), aber im allgemeinen eher selten und zeigte regionale Unterschiede. Mit zunehmender Bedeutung des Ackerbaues für die Ernährung nahm die Häufigkeit dentaler Karies zu. Autoren berichten über eine starke Abhängigkeit dentaler Karies von der Art der Kohlenhydratquelle (Dommett et al. 2000). Ein weiterer Indikator für vermehrte periodontale Erkrankungen war der gesteigerte prämortale Verlust von Zähnen (Aufderheide und Rodriguez-Martin 1998, S. 401ff), insbesondere der posterior kauenden Zähne. Mit großer Sicherheit war dies regional stark unterschieden. Untersuchungen an noch lebenden und vergangenen „armen“ Bevölkerungen ergaben, dass Sammler im Vergleich zu Ackerbauern im Allgemeinen eine geringere Frequenz an Defekten am Zahnschmelz aufwiesen. Es handelte sich um Defekte welche in Perioden von Wachstumsunterbrechungen, d.h. durch individuellen physiologischen Stress entstanden waren. Einer der häufigsten beobachtbaren Defekte war die lineare Zahnschmelzhypoplasie (Goodman and Rose 1991, Larsen 2002), eine entwicklungsbedingte Mangelmineralisation des Zahnschmelzes, welche als eine oder mehrere horizontale Linien oder Gruben an der Oberfläche der Zahnkronen in Erscheinung trat (Schumacher et al. 1990). Nach Studien an heute lebenden Bevölkerungen wird als Hauptursache eine schwere Unterernährung im Kindesalter verantwortlich gemacht (Skinner und Goodman 1992).

Als eine Konsequenz der Verschiebung des Kauens von harter, zäher Nahrung hin zum Kauen weicher, zubereiteter Nahrung wird die zunehmende Grazilisierung des Gesichtsschädels und eine Verkürzung des Kiefers sowohl bei Menschen der Neuen Welt (Mexiko, SO der USA) als auch der Alten Welt (Nubien,

West Europa, Japan, Naher Osten) (Larsen 1995 und 1997) gesehen. Die weiche Konsistenz der Nahrung hängt direkt mit ausgedehnten Perioden des Kochens und Erweichens von Lebensmittelrohstoffen in Keramiköpfen zusammen. Aus zahlreichen Ernährungsstudien wurde bekannt, dass z.B. sowohl die Struktur getreidehaltiger Nahrungsmittel als auch ihre physikalische Form die Verfügbarkeit und den physiologischen Nutzen stark beeinflussen (z.B. Yiu 1989).

In Zentraleuropa dauerte das Neolithikum mehr als 3000 Jahre an. Offensichtlich waren die Bedingungen lokal jeodoch sehr unterschiedlich. So reflektierten sowohl die Viehhaltung, als auch die Kultivierung von Pflanzen jeweils die spezifischen regionalen Gegebenheiten, eingeschlossen den Einfluss menschlicher Interventionen (Teuteberg 1992a). Während die Bandkeramik als älteste dauerhafte kulturelle Hinterlassenschaft Zentraleuropas in allen Braunerdegegenden (gelblich bis bräunlich gefärbte Lehm- und Tonböden mit mäßigem Humusgehalt) dominierte, konnten zahlreiche lokale Variationen im Getreideanbau festgestellt werden. Die Hauptlieferanten für Kohlenhydrate waren Emmer (*Triticum dicocum*) und Einkorn (*Triticum monococum*), einfach umhüllter Weizen (*Triticum aestivum*), und teilweise Gerste (*Hordeum vulgare*) (Willerding 1988, Küster 1989, Körber-Grohne 1990, Küster 1995).

3.3 Die Ernährung im frühen Mittelalter

Das heutige Wissen über die Ernährung und die Nahrungszubereitung im frühen Mittelalter entstammt selten aus schriftlichen Quellen, der beschreibenden Literatur und aus direkten Quellen. Diese wurden in den vergangenen 25 Jahren zunehmend durch paläoethnobotanische Untersuchungen an fossilem, verkohltem und unverkohltem pflanzlichem Material, welches bei Ausgrabungen im archäologischen Fundrepertoir mittelalterlicher Siedlungen auftritt, erweitert. Auch Reste von Speisebeigaben, die dem oder der Toten ins Jenseits mitgegeben wurden, eine Praxis, die sich in seltenen Fällen bis in das frühe 7. Jahrhundert aufrechterhalten hat, gibt Aufschluss über die Vielfalt und Bedeutung von Tieren im alltäglichen Leben und in der Ernährung, sowie über den sozialen und wirtschaftlichen Status des oder der Bestatteten.

3.3.1 Fleischkonsum im frühen Mittelalter; Verteilungsstrukturen

Die Bevölkerungszahlen von der Völkerwanderungszeit zum Mittelalter erfuhren einen stetigen Zuwachs (Abb. 1), wenn auch eine kurzzeitige Bevölkerungsabnahme im 6. Jahrhundert nachgewiesen wurde (Abb. 1). In Krisenzeiten sind zuerst die „Schwachen“ der Gemeinschaft, also Greise und Kinder betroffen, die noch nicht in der reproduktiven Phase standen. Eine kurzzeitige Steigerung der Geburtenrate durch die Reduzierung des Intergeburtenabstandes konnte deshalb relativ rasch wieder die Bevölkerungszahlen anheben und damit für einen Ausgleich sorgen. So konnten Ernährungskrisen, die mit Regelmäßigkeit auftraten, aber nicht zu einem Schwund der reproduktiven Kräfte einer Bevölkerung führten, nach Meinung von Grupe (1986) recht gut überwunden werden. Zur Verbesserung der Energiebilanz der Flächen wurde der Ackerbau auch auf vom Vieh genutzte Flächen ausgedehnt, welche Nahrungskonkurrenten für den Menschen darstellten. Durch die wachsenden Bevölkerungszahlen ging der individuelle Anteil an tierischem Eiweiß in der menschlichen Nahrung zurück. Aufgrund unterschiedlicher naturräumlicher Gegebenheiten existierten große regionale Unterschiede in der Versorgungslage der mittelalterlichen Bevölkerungen. Die Notwendigkeit zu agrartechnologischen

Neuerungen ist auch vor diesem Hintergrund zu verstehen, sowie regionale Unterschiede in ihrer Entwicklung und Anwendung.

3.3.2 *Bedeutung der Jagd, des Sammelns von Früchten und des Fischfanges*

Holz und fließendes Wasser spielte im frühen Mittelalter als Energieträger eine große Bedeutung. Das expansive Wachstum der mittelalterlichen Bevölkerung führte zu einer kleinräumigen Erschöpfung von Waldbeständen. Mit zunehmendem gebietsweise unterschiedlichem Rückgang der Wälder nahm die Bedeutung des Sammelns von Früchten und Beeren, als auch der Erlegung und des Verzehres von Jagdwild für die alltägliche Ernährung unterschiedlich stark ab. Aus Untersuchungen der frühmittelalterlichen (wikingerzeitlichen, 800 –1000 n.Chr.) Stadt Haithabu ist ein niedriger Anteil an Wildtierknochen von ca. 0,6 % und damit eine geringe Bedeutung von Jagdwild für die Ernährung belegt, wobei eine erfolgreiche Jagd in der stark bewaldeten Umgebung möglich gewesen wäre. Der Fleischanteil der Nahrung wurde fast ausschließlich durch die Haustierhaltung gedeckt. Für Haithabu wurde anhand einer umfangreichen Auswahl und Menge an Sammelfrüchten belegt, dass die Sammeltätigkeit noch eine wichtige Bedeutung hatte. In Abhängigkeit von den regionalen naturräumlichen Gegebenheiten konnte der Fischfang in der frühmittelalterlichen Ernährung ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Rolle gespielt haben (Behre 1993). Dies darf für die zur See fahrenden Wikinger der Stadt Haithabu mit Sicherheit angenommen werden.

3.3.3 *Bedeutung des Gartenbaues für die frühmittelalterliche Bevölkerung*

Bis zum Beginn des 6. Jahrhunderts existieren über den Gartenbau keine Aufzeichnungen. Die ersten schriftlichen Quellen stammen aus der Zeit gegen Ende des 8. Jahrhunderts. Aus dem *Capitulare de villis* Karls des Großen, König der Franken (768 – 814) vom ausgehenden 8. Jahrhundert, in welchem die Richtlinien, nach denen die überall im Frankenreich verstreut angelegten königlichen Güter einheitlich bewirtschaftet werden sollten, geht hervor, dass eine hohe Vielfalt (73 Kräuter und Stauden, 16 Obst- und Nußbäume) gezielt im Garten angebaut wurde (Hohenberger 1988, S. 18). Aus dem ersten Drittel des 9. Jahrhunderts stammt der St. Galler Klosterplan (Bedal 1990). Der sehr detaillierte Plan enthält unter vielen anderen eine Vielzahl an südlichen Gewächsen, die nördlich der Alpen heute nur im Gewächshaus gedeihen können, im 2°C wärmeren Klima des frühen Mittelalters aber im Freien erfolgreich angebaut werden konnten. Man kann davon ausgehen, dass die schriftlichen Details erheblich zeitverzögert niedergeschrieben wurden. Diese Richtlinien und Pläne hatten nicht nur Vorbildcharakter, sie könnten auch das Ergebnis der möglicherweise schon viel früher entstandenen gartenbäuerlichen Kultur der Siedlungsbewohner darstellen. Auch heute noch ist es in ländlichen Gegenden üblich, dass im Kleingarten um das Haus der tägliche Bedarf und ein kleiner Wintervorrat an Kräutern, Obst und Gemüse angebaut wird.

3.3.4 *Landwirtschaftliche Produktion im frühen Mittelalter*

Im Frühmittelalter betrieben die Bauern hauptsächlich Feldgraswirtschaft (= Egartwirtschaft). Es wurde relativ regelmäßig Weideland für begrenzte Zeit zum Getreideanbau genutzt. Nach ungefähr zwei bis drei Jahren war der Boden ausgelaugt, da man keinen Dünger verwendete. Die genutzte Fläche wurde dann wieder der Verwilderung überlassen und neues Weideland in der Nachbarschaft zur Ackernutzung umbrochen (Willerding 1987). Nach Behre (1993) war dieses regional orientierte Wirtschaftssystem für einen geringen Austausch von Grundnahrungsmitteln, die Verhinderung der Ausbreitung anderer

Kulturpflanzen und damit für eine „einseitig getreidebetonte Ernährung in großen Teilen des Landes“ verantwortlich. In den Getreideinventaren des frühen Mittelalters war (Spelz-) Gerste wie in früheren Epochen eine der wichtigsten Körnerfrüchte. Dinkel (*Triticum spelta*) und Emmer (*Triticum dicoccum*) wurden nur sporadisch kultiviert. Rispenhirse (*Panicum miliaceum*) konnte zahlreich nachgewiesen werden. Erheblich stärker verbreitet war der Roggen (*Secale cereale*) und Saatweizen (*Triticum aestivum*). Einkorn (*Triticum monococcum*) spielte kaum noch eine Rolle und Hafer (*Avena sativa*) findet man sehr selten (Küster 1995). Während im frühen Mittelalter im bayrischen Raum der Anbau von unterschiedlichen Getreidearten sehr homogen erscheint, könnte die regional unterschiedliche Aufbereitung und Verarbeitung des Getreides zu Mehl und zu neuen Zubereitungsformen von Speisen eine veränderte Rolle in der Ätiologie der Zahnabtragung und der Mikroläsionen der Zahnschmelzoberflächen (Dentale Microwear DM) spielen. Nach traditionellen Methoden gereinigtes und zerkleinertes Getreide kann sowohl einen verschiedenartigen Grad an Verunreinigungen an Sand und Spelzen, als auch einen unterschiedlichen Grad an Grobheit aufweisen. Die Zubereitung der Speisen aus Getreide und somit ihre physikalischen Eigenschaften können sich von einem leicht zu schluckenden Brei mit geringer abrasiver Wirkung bis hin zum Brot unterscheiden, welches zur längeren Aufbewahrung mit dicker Kruste und hohem Trocknungsgrad mit erheblicher abrasiver Wirkung gebacken wurde (Leek 1972).

3.3.5 Aufbereitung von Getreide zur Ernährung

Archäologische Untersuchungen belegen, dass vom Neolithikum bis in die Eisenzeit sattelförmige Getreidemahlsteine (Bedal 1992, Hennig 1966) benutzt wurden, um das Getreide zu grobem Schrot zu zermahlen (Abb. 3A).

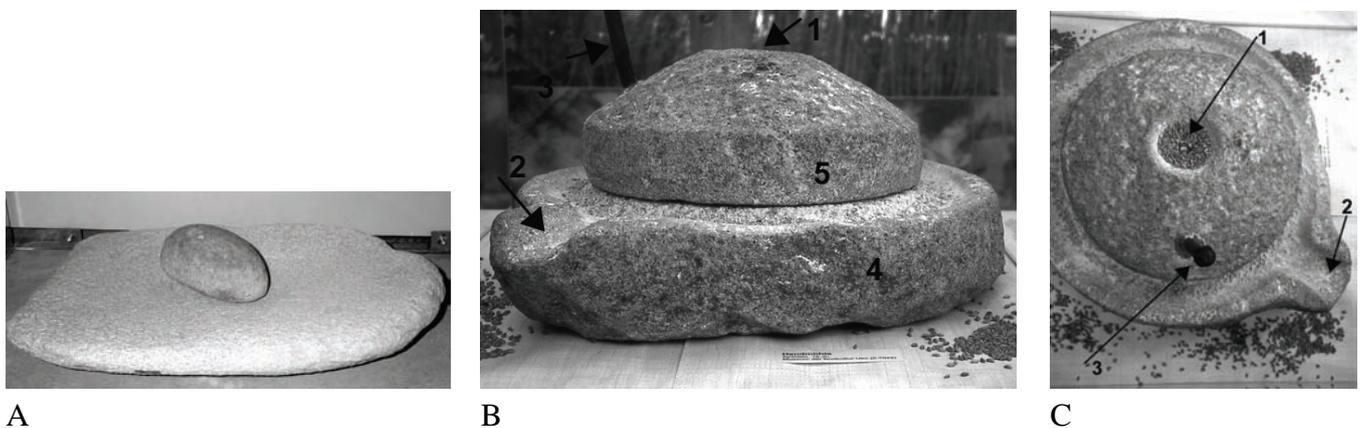


Abb. 3 A Getreidemahlsteine (jungsteinzeitlich); B Prinzip einer Getreidemühle mit Boden- (4)- und Läuferstein (5). 1 Schütte, 2 Auslauf, 3 Kurbel; C Aufsicht von oben; Gesamtdurchmesser ca. 50 cm

Die weitere Entwicklung der Handmühle, um feines Mehl, grobes Schrot und Graupe herzustellen, wurde durch die Römer verbessert. Sie entwickelten das Mahlen mit einem Boden- und einem rotierenden Läuferstein (Bedal 1992). Zwischen der römischen Mühle und der Mühlentechnologie, die bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts genutzt wurde, lag kein großer Unterschied mehr. Das Mahlen fand zwischen zwei flach positionierten Mühlsteinen statt (Abb. 3 B, C). Der Typ der Mühlsteine und seine Härte wurde durch die Herkunft des verwendeten Sandsteines bestimmt. Die Abtragung der Mühlsteine und die damit verbundene Verunreinigung des Getreides war abhängig von seiner Herkunft und Härte und wurde

verursacht durch den Kontakt und dem Gegeneinanderschleifen der Oberflächen sowie durch die sog. Schärfung des Steines (Technik zur Schärfung und Nutzbarmachung des Sandsteines als Mühlstein).

Zur Reinigung des Getreides mussten Reste der Spelzen (besonders der Spelzweizenarten Emmer, Einkorn und Urweizen), Reste der Grannen und des Bartes sowie Schmutz entfernt werden. Um die teilweise fest mit dem Korn verwachsenen Spelzen zu beseitigen wurde bis in die Eisenzeit das Getreide vermutlich geröstet und zwischen den Händen gerieben oder eingeweicht und dann unter Wärme (z.B. an der Sonne) getrocknet, sodass die Spelzen absprangen (Beranová 1991). Dann wurde das Korn in einem Sieb geschüttelt, sodass die leichteren Anteile durch den Wind weggeblasen wurden. Nach der Eisenzeit wurden die Spelzen in einem speziellen Verfahren, dem sog. "Gerbgang", abgebrochen und konnten weggeblasen werden. Es war jedoch kaum vermeidbar, dass Reste von Spelzen, Sand und Schmutz das zum Verzehr zubereitete Mehl oder den Schrot in unterschiedlicher Weise noch verunreinigten.

Die heutige Aufbereitung von Getreide, welche durch Zucht meist nicht mehr mit den Spelzen verwachsen sind, erfolgt durch Trennung des Kornes von den Spelzen durch ihr spezifisches Gewicht und mehrfache Rücksortierung auf Netzen. Eine Politur entfernt den Bart des Kornes, wobei die Keimfähigkeit bis zu 75 – 80 % erhalten bleibt (pers. Anmerkung, Priemayer, Antersdorfer Mühle). Moderne Getreidemühlen nutzen Mühlsteine aus Korund-Keramik, die einen verunreinigenden Abrieb weitestgehend ausschließen (Korund wird auch als „Tonerde“ bezeichnet; chemische Formel Al_2O_3 ; Mohs` Härte 9, Hollemann und Wiberg 1985, S. 760). Es ist mit Sicherheit davon auszugehen, dass die Reinheitsstandards modern produzierten Mehles höher liegen als vor und zur Zeit des Mittelalters.

3.3.6 Die Zubereitung des frühmittelalterliches Mahles

Die Zubereitung der Nahrung war noch stark von der römischen Küche, im besonderen bei der Entstehung des Geschmacks durch die verschiedensten Kräuter (Zusammensetzung des „Liquamen und Asa foetida“) beeinflusst. Gewürze hatten sowohl die Funktion als Geschmacksverbesserer und als Heilkräuter, aber auch als Verdauungshilfen zum Aufschluß der sehr schweren Speisen des Mittelalters (Janssen 1993, S. 238). *Hyoscyamus niger* (Bilsenkraut) war bereits seit dem frühen Mittelalter bekannt, dessen Inhaltsstoff l-Hyoscyamin auch heute noch zur Behandlung von Spasmen der glatten Muskulatur im Magen-Darm-Kanal, sowie der Gallen- und Harnwege eingesetzt wird (Mutschler 1986). Zucker war als Süßungsmittel unbekannt. Zur Süßung der Speisen wurden Honig, Wein, Rosinen, mit der Ausbreitung des Christentumes auch Datteln und Feigen verwandt. Wie sich die ländliche Bevölkerung ihre Nahrungsmittel zubereitete, lässt sich letztlich nicht aus den wenigen Kochbüchern dieser Epoche erschließen, insbesondere deshalb, da nur Geistliche, Adelige oder reiche Bürger lesen konnten.

B. Einführung in die evolutionären Anpassungen des menschlichen kranialen Skelettes und der Zähne an den Kauvorgang und die Ernährung

B 1. Überblick über den Kauapparat

Die mit der Ernährung des Menschen verknüpften anatomischen Aspekte am Schädel sind der Ober- und Unterkiefer, die Kaumuskeln, die den Unterkiefer bewegen, und die Zähne.

Während die ursprünglichsten Hominoidea im mittleren Miozän noch menschenaffenähnliche Kiefer aufwiesen, kam es in der Hominidenentwicklung zu einer deutlichen Umkonstruktion des Schädels mit einer Reduktion der Schnauzenlänge, einer Zunahme der postcaninen Zahnoberfläche und einer Vergrößerung der Gesichtshöhe. Die Änderungen der Hebelverhältnisse durch die damit verbundene Umkonstruktion des Kauapparates, welcher die Kaukräfte erzeugt und deren Reaktionskräfte aufnimmt (Conroy 1990, Henke und Rothe 1994) lassen auf biomechanische Anpassungen an unterschiedliche Ernährungsweisen schließen.

Bei einem Kauvorgang besteht die Arbeit zunächst im Wesentlichen im Zubeißen, d.h. in der Bewegung des Unterkiefers nach cranial. Diese Tätigkeit übernehmen im besonderen die kräftig entwickelten Kaumuskeln, *M. masseter* und *M. temporalis*. Sogenannte akzessorische Kaumuskeln einschließlich der Lippen- und Wangenmuskeln, einige Halsmuskeln und im besonderen die beiden Zungenbeinmuskeln *M. digastricus* und *M. mylohyoideus* haben unterstützende Wirkung auf den Kauvorgang (Henke und Rothe 1994). Eine quantitative Erfassung der Ursprungsflächen der am Kauvorgang beteiligten Muskeln *M. masseter* und *M. temporalis* in Relation zu der vorhandenen Kauoberfläche von Prämolaren und Molaren bei verschiedenen morphologischen Gruppen fossiler Hominiden ergab, dass die Beisskräfte proportional zu den Kauflächen gestiegen sind (Demes und Creel 1988). Lucas et al. (1985) vermuteten dies als ein Indiz für einen effektiven Kauapparat.

Bei niederen Chordatieren sowie rezenten und fossilen kieferlosen Wirbeltieren sind Zähne unbekannt. Mit der Ausbildung von Kiefern entwickelten sich gleichzeitig Zähne als spezielle Werkzeuge zum Beißen und Kauen (Romer und Parsons 1991). Sie sind aufgrund ihrer extremen Härte und ihrer kompakten Form im Allgemeinen die am besten erhaltenen Überreste fossiler Funde. Während des Individuallebens ist es ihre Hauptaufgabe, die Zerkleinerung der Nahrung zu unterstützen. Dies führte zu einer Vielfalt von dentalen Anpassungen, die im besonderen den Paläontologen und Anthropologen Einsichten in die Evolution des Ernährungsverhaltens gewähren. Sobald die Zähne gebraucht wurden, waren sie fortwährend Abtragungsprozessen ausgesetzt, deren Beschreibung und Quantifizierung weitere Erkenntnisse über den Zahngebrauch und die Ernährung liefern.

B 2. Dentition und deren Modifikationen bei den Primaten

Primaten verfügen wie alle Säugetiere über ein heterodontes Säugegebiss. Sie evolvierten von einem ursprünglichen Säuger mit der Zahnformel des Dauergebisses $3.1.4.3./3.1.4.3.$: drei Schneidezähne (Incisivi), ein Eckzahn (Caninus), vier Vorbackenzähne (Prämolaren) und drei Backenzähne (Molaren) auf jeder Seite des Ober- und Unterkiefers. Die vier Zahntypen sind bilateral symmetrisch aufgebaut und in einer Randzahnreihe jeder Kieferhälfte von vorn nach hinten in einer charakteristischen Zahnbogenform angeordnet.

Modifikationen in den verschiedenen Primatenlinien führten zu unterschiedlichen Reduktionen. Die Anzahl und Gestalt der Zähne in Ober- und Unterkiefer wird mit spezifischen Ernährungs- und Verhaltensweise einzelner Familien unter den Primaten eng korreliert und stellt ein verlässliches taxonomisches Merkmal dar (Conroy 1990). So findet man im bleibenden menschlichen Gebiss wie bei allen Altweltaffen (Catarrhini) die Zahnformel $2.1.2.3./2.1.2.3.$, wobei jeweils der dritte Schneidezahn und der erste und zweite Vorbackenzahn reduziert wurden. Die Form des menschlichen Eckzahnes trägt

schneidezahnähnliche Gestalt, die Grösse der Backenzähne ist von anterior nach posterior reduziert. Zusätzlich zur bleibenden Bezahnung entwickeln Primaten die sog. Milch- oder Dezidualzähne, welche im Kiefer die gleichen Positionen der späteren Schneide-, Eck- und Vorbackenzähne besetzt halten.

B 3. Molaren als Werkzeuge im Prozess der Nahrungszerkleinerung

Der mechanische Prozess der Nahrungszerkleinerung findet grundsätzlich durch zwei Formen statt, entweder durch Paare von opponierenden scharfen Kanten oder durch gepaarte, stumpfe, konkave und konvexe Oberflächen. Je nach der Fähigkeit einer gegebenen Morphologie induzieren einfache Kräfte wie Zug und Druck oder komplexere wie die Scherkräfte das Zerschneiden der Nahrung (Spears and Crompton 1996). Die Muster der Zerkleinerung werden bestimmt durch die physikalischen Eigenschaften der Nahrungspartikel. Eine schiefe Neigung in Relation zur Beißkraft ergibt eine größere oberflächenparallele Belastungskomponente auf die Nahrungspartikel (Gordon 1982). Das primäre Stresselement ist die Scherkraft; während horizontal geneigte Oberflächen vor allem zerknackende Kräfte induzieren. Eine Hauptrolle spielt die okklusale Morphologie der Zähne und ihre altersbedingten Veränderungen (Abtragung - wear, seitliche Auslenkung - lateral movement etc.). Die Abtragung verursacht eine Reskulpturierung in mehr oder weniger scharfe Schneidekanten, die unterschiedlich in Richtung der okklusalen Oberfläche (funktionale Teil des Zahnes) gewinkelt sind (Ankel-Simons 2000). Hinweise lassen vermuten, dass die okklusale Abtragung tendenziell dazu führt, dass die Kaeffizienz durch die Vergrößerung der okklusalen Kontaktflächen verbessert wird (Lambrecht 1965, Osborn und Lumsden 1978, Wilding 1993).

Eine stabile Molareinheit aus isolierten Zähnen wird auch durch die Fähigkeit zur mesialen Wanderung der Molaren gewährleistet, die eine Grundvoraussetzung für den Erhalt einer schneidenden Bezahnung bei Säugetieren ist. Eine fixierte Position des Zahnes würde im Verlauf der Abtragung der Zahnoberflächen durch den Gebrauch zu einem Verlust des Kontaktes mit dem gegenüberliegenden Zahn führen. Durch eine flexible Verankerung des Zahnes im Kieferknochen mit Hilfe eines periodontalen Ligamentes und das Vorhandensein von Zahnwurzeln mit intakter Pulpa, die der Resorption des Knochens dient, wird die mesiale Wanderung der Zähne ermöglicht (Lumsden und Osborn 1977).

B 4. Aufbau und Kronenrelief der Molaren

Die Hauptmasse des Zahnes besteht aus Dentin (Zahnbein). Dentin wird im Bereich der Zahnkrone von Zahnschmelz bedeckt. Im Bereich der Wurzel ist der Zahn mit Zahnzement überzogen. Zum Erhalt der Zähne als auch zur Gewährleistung härterer Schneidekanten als solche aus Dentin sind die Zähne der Primaten von einer unterschiedlich dicken Schicht Schmelz (Enamelum, Substantia adamantina) bedeckt. Die Schmelzkappe ist am Zahnhals am dünnsten und hat die größte Dicke an den Schneidekanten, Höckerspitzen und den Randleisten (ca. 2 mm). Die unterschiedliche Dicke des Zahnschmelzes wird als eine Anpassung an die Ernährungsgewohnheiten bzw. an die Nahrung der betreffenden Art gesehen (Pilbeam 1972, Kay 1981, Martin 1985, Beynon und Wood 1986).

Die Molaren der Primaten sind mit vier Höckern im Oberkiefer und vier oder fünf Höckern im Unterkiefer ausgestattet. Beim Menschen findet man als Kronenoberfläche das als „Dryopithecus- oder Y-Muster“ bezeichnete Höckerrelief vor (Abb. 4). Dieses Muster ermöglicht eine klare Unterscheidung der Hominoidea (Hylobatidae, Pongidae, Hominidae) von den Cercopithecoidea (Cercopithecidae mit

Cercopithecinen und Colobinen), die ein bilophodontes Höckerrelief tragen (Abb. 4). Das „Dryopithecus-Muster“ entwickelte sich durch die Änderung der Lage der Haupt- und Nebenhöcker, des Furchen- und Leistenverlaufes und durch die Reduktion des Paraconids im Unterkiefer.

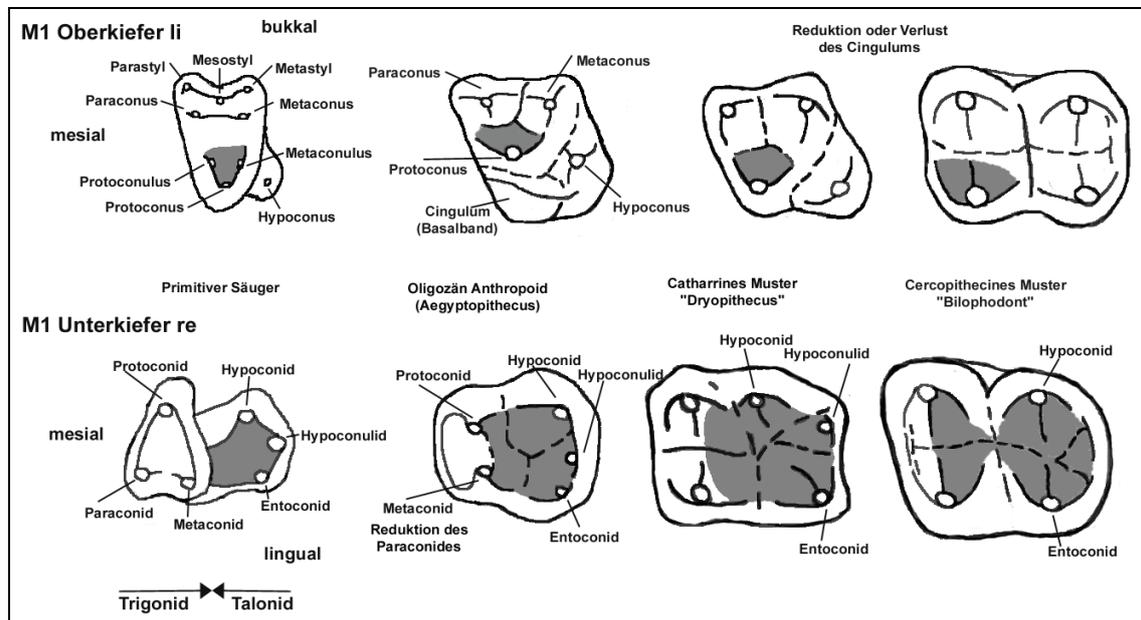


Abb. 4 Evolution der Musterbildung der Primatenmolaren (modifiziert aus Conroy 1990). Dargestellt sind jeweils der obere linke (oben) und der untere rechte Molar für jede Gruppe, wobei der mesiale (anteriore) Anteil nach links und der bukkale (laterale) Anteil nach oben weist. Die Schattierung zeigt den Ort, an dem der Protoconus mit dem Becken des Talonides okkludiert.

Die Oberkiefermolaren entstammen einem trituberkulärem und dreiwurzeligem Zahn. Zwei Haupthöcker liegen mesial (Paraconus) und distal (Metaconus) an der Bukkalseite, der dritte Höcker (Protoconus) ist flacher und liegt an der lingualen Seite des Zahnes und bildet mit den beiden v.g. Höckern ein Dreieck (Trigon). Die als Zwischenhöcker (Protoconulus – mesial, Metaconulus – distal) angelegten Höckerchen sind mit ihren Haupthöckern durch Leisten verbunden (Crista anterior und Crista posterior).

Das innere Basalband (Cingulum internum), aus dem sich der vierte Haupthöcker (Hypoconus distal) der oberen Molaren entwickelt hat, ist meist noch in der Protoconus-Region erhalten. Von der hinteren Protoconus Randleiste entspringt meist die Crista obliqua, eine Leistenverbindung zwischen Protoconus und Metaconulus (Conroy 1990).

Die Unterkiefermolaren sind phylogenetisch aus zwei Teilen jeweils trituberkulärer Zähne, dem älteren mesialen Trigonid und dem jüngeren distalen Talonid, aufgebaut. Das Trigonid trägt drei Haupthöcker, dem Protoconid (bukkal), Paraconid (lingual, mesial) und Metaconid (lingual, distal). Der Talonid, der sich aus einem Basalband unmittelbar hinter dem Metaconid des Trigonides entwickelt hat, trug ursprünglich ebenfalls drei Höcker, Hypoconid (bukkal), Hypoconulid (distal) und Entoconid (lingual). Das durch Verlagerung des Hypoconulides nach bukkal entstandene besondere Furchen-(Y5-)Muster findet man meist noch auf den ersten Molaren des rezenten Menschen. In der Evolution der Hominiden führte jedoch die zunehmende Reduktion des Hypoconulides zum sog. „invertierten Dryopithecus-Muster oder +-Muster“, welches man hauptsächlich auf den zweiten und dritten menschlichen Molaren vorfindet (Henke und Rothe 1994, S.138).

B 5. Spezielle Anpassungen der Zähne an die Ernährung

Die Höcker der Molaren der konservativen Gruppe afrikanischer Primaten sind im Vergleich zu denen, die Menschenaffen evolvierten, stark gerundet. Diese Höckerform ist nicht speziell an eine bestimmte Ernährung angepasst. Der Vorteil hierbei liegt darin, dass diese Form mit jeder Art von Nahrungsmittel, wenn auch wenig ausgefeilt, zurechtkommt.

Untersuchungen an Zahnfossilien des bislang ältesten menschlichen Vorfahren *Ardipithecus ramidus* (vor ca. 4,4 Mio Jahren) zeigen ebenfalls Hinweise auf eine generalisierte Ernährung (Teaford und Ungar 2000). Wenige Hunderttausend Jahre später trugen die Fossilien größere Zähne mit dickerem Zahnschmelzbelag und eine Million Jahre später wiesen die Fossilien noch größere Zähne und stärkere Kiefer auf, als mögliche Anpassung an das Kauen von harten, spröden Nahrungsmitteln. An das Kauen von zäher, gummiartiger Nahrung wie Rinde, weiche Schoten mit Samen und Fleisch waren diese Zähne jedoch noch nicht gut angepasst. Mikroskopische Spuren belegen, dass die Hominiden die Fähigkeit, weiche, widerstandsfähige Nahrung wie Früchte zu essen, jedoch nicht verloren hatten (Teaford und Ungar 2000). Die Fähigkeit sich sowohl von harter oder weicher, als auch abrasiver oder nichtabrasiver Nahrung zu ernähren, ermöglichte bereits unseren Vorfahren die Nutzung eines breiten Spektrums an Lebensräumen und vielfältige Möglichkeiten, diese auszuschöpfen. Vor ca. 2,5 Mio Jahren verzweigten sich die Spezialisten und Generalisten, sie entstammten aber beide einem Trend, der bereits vor 5 Mio Jahren begann (Ungar und Teaford 2002).

Das Molarenmuster des Höckerreliefs innerhalb der menschlichen rezenten und historischen Bevölkerungen zeigt eine Vielfalt an Variationen, ebenso wie die drei Molaren innerhalb einer Zahnreihe. Eine kladistische Analyse der Morphologie der Kauflächen der Molaren durch Hartmann (1988) ergab, dass sie weniger für eine Rekonstruktion phylogenetischer Beziehungen geeignet zu sein scheinen, als vielmehr für eine den funktionalen Zwängen durch die zu kauende Nahrung unterliegende Einteilung der Hominoidea (Kay 1975, Hartmann 1988).

B 6. Physikalisch-chemische Eigenschaften und Bildung von Zahnhartgeweben

6.1 Aufbau, Befestigung und Konstruktion des Zahnhartgewebes - Zahnhalteapparat

Zähne besitzen eine Zahnkrone (*Corona dentis*) und eine Wurzel (*Radix dentis*). Beide Teile sind durch den Zahnhals (*Cervix dentis*), welcher in etwa dem Verlauf der Schmelz-Dentin-Grenze (*enamel-dentin-junction* EDJ) entspricht, miteinander verbunden. Die Zahnwurzel, welche den Zahn im Kiefer verankert beginnt unterhalb des Zahnhalses und endet in einer Spitze, dem *Apex radialis dentis*. Die Wurzel zwei- und mehrwurzeliger Zähne verzweigt sich an der sog. Furkationsstelle (*Bi-* bzw. *Trifurcatio radialis dentis*).

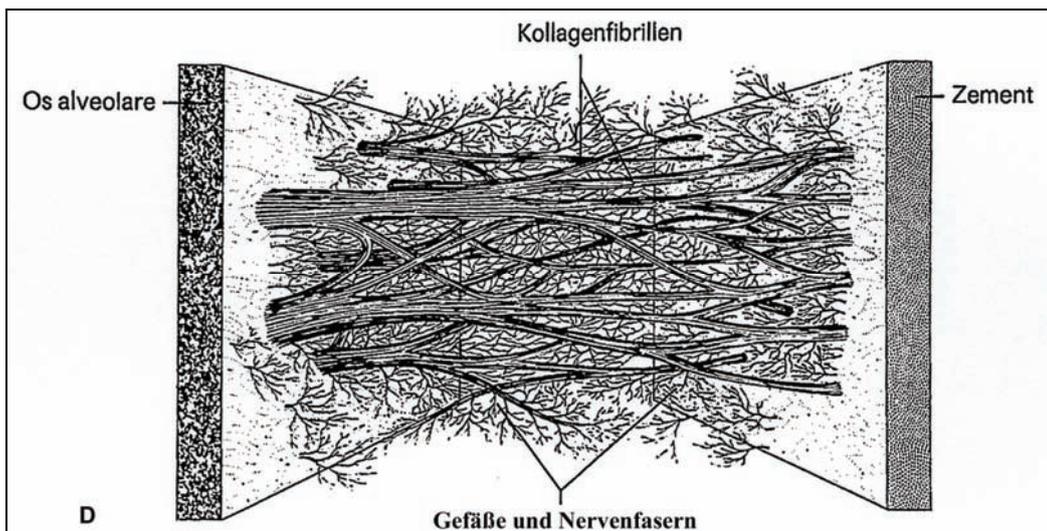
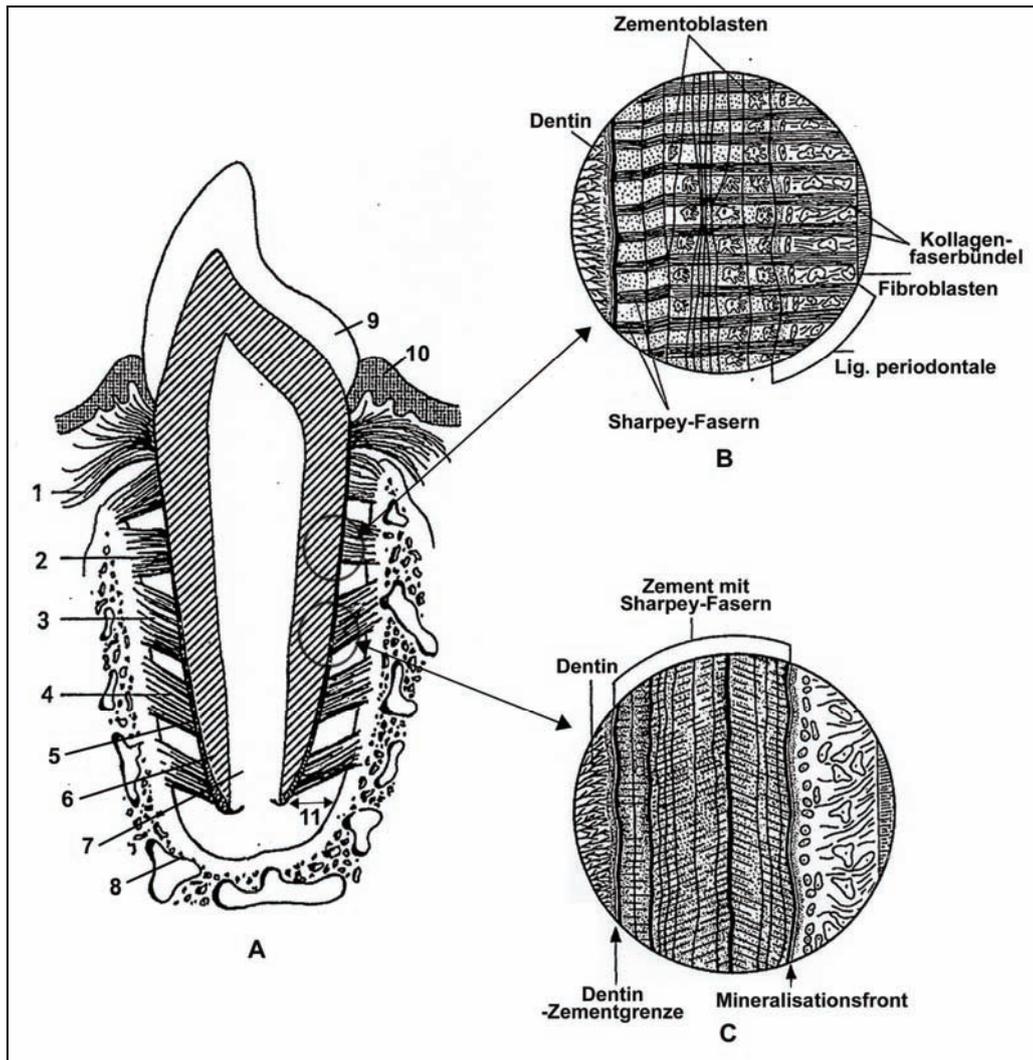


Abb. 5 Schemazeichung Zahnhalteapparat; A Zahnaufbau und Verlaufsrichtung der in den Periodontalspalt einstrahlenden Fasern (1 dentogingivale Fasern 2 Fasern zum Alveolarkamm 3 horizontal 4 schräg verlaufende Fasern 5 Zement 6 Dentin 7 Pulpaöhle, 8 Alveolarknochen - *Os alveolare* 9 Zahnschmelzkrone 10 Gingiva 11 Periodontalspalt); B zelluläres Zement mit horizontal verlaufenden Sharpey-Fasern; C azelluläres Zement mit abgewinkelt verlaufenden Sharpey-Fasern; D Periodontalspalt (modifiziert aus Schumacher et al. 1990)

Die an der morphologischen und funktionellen Verbindung von Zahn und Kiefer beteiligten Strukturen fasst man als sog. Wurzelhaut oder als Zahnhalteapparat (*Periodontium*) (Abb. 5 A) zusammen. Anatomisch handelt es sich um eine Einzapfung (*Gomphosis*), die als *Articulatio dentoalveolaris* bezeichnet wird. Zum *Periodontium* gehören das Zahnwurzelzement (Cementum), das Periodontalligament (*Ligamentum periodontale*, Desmodont ein schließlich der versorgenden Gefäße und Nerven), der Alveolarknochen (*Os alveolare*) und das Zahnfleisch (*Gingiva*) (Schuhmacher et al., 1990). Anatomisch gesehen überzieht das Wurzelzement die gesamte Wurzelzementoberfläche. Funktionell sind die interagierenden Hartgewebe, das Zement mit dem Alveolarknochen über die desmodontalen Fasern (Sharpey`sche Fasern, kollagene Bindegewebsfasern) verankert, sodass dem Zahn kleinere Bewegungen gestattet sind. Die Größe der Verankerungsfläche ist abhängig von der Länge, dem Umfang, der Form und der Zahl der Wurzeln. Je nach Lokalisation der Zahnwurzel sind die desmodontalen Fasern nach dem Alveolarkamm, nach horizontal, schräg, interradikulär (bei mehrwurzeligen Zähnen) und apikal ausgerichtet (Abb. 5 A, B, C). Der Hauptteil der Fasern (schräge Ausrichtung zur Zahnachse, Abb. 5 C) fängt die okklusalen Druckkräfte ab, wobei der Kaudruck in eine auf die Alveolarwand wirkende Zugkraft umgewandelt wird. Die übrigen Fasern wirken den Zugkräften entgegen. Zusätzlich wirken alle Fasern gegen kippende und rotierende Kräfte. Die starke Vaskularisierung des faser- und zellreichen Desmodontes hat neben der versorgenden eine die Fasern ergänzende funktionelle Aufgabe (Abb. 5 D). Es wird um die Zahnwurzel ein Flüssigkeitspolster geschaffen, welches der Wirkung einer hydraulischen Bremse in Form einer druckausgleichenden Verschiebungsvorrichtung entspricht. Die Kompression und damit das Abklemmen der Gefäße wird durch die elastische druckumwandelnde Art der Aufhängung des Zahnes verhindert (Schumacher et al. 1990, Schroeder 1992).

Durch knöcherne Trennwände werden die Zahnfächer mehrwurzeliger Zähne (*Septa interradicularia*), sowie die Alveolen des zahntragenden Teiles des Ober- (*Processus alveolaris*) und Unterkiefers (*Pars alveolaris*) (*Septa interalveolaria*) getrennt. Die dadurch erzielte flächige Ausdehnung der Verankerungsfläche verstärkt die Effektivität der elastischen Aufhängung jedes Zahnes entsprechend seiner Kaubelastung (Schumacher et al. 1990). Die ersten bleibenden Molaren besitzen die größte Wurzeloberfläche.

Bei der physiologischen Wanderung der Zähne nach mesial wird bei desmodontalen Druckzonen der Knochen resorbiert, während im Bereich von Zugzonen eine Knochenapposition (Knochenauflagerung und -anbau) und damit der Aufbau einer Verstärkungszone erfolgt. Übergroße unphysiologische Kräfte im Bereich von Druckzonen verursachen desmodontale Nekrosen.

6.2 Chemische und Physikalische Eigenschaften des Zahnschmelzes

Zahnhartgewebe sind wie Knochen aus unterschiedlichen Anteilen an Mineral, Wasser und organischer Matrix aufgebaut (Abb. 6), wobei Zahnschmelz den höchsten Anteil an anorganischer Substanz beinhaltet.

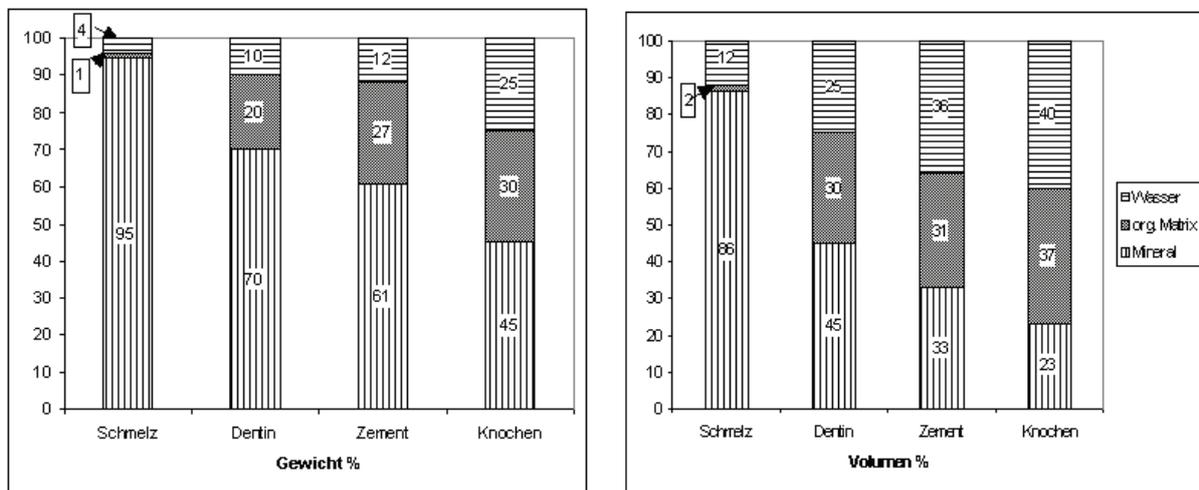


Abb. 6 Zusammensetzung von Zahn- und Knochengewebe (Datenquelle: Schröder 1987, Tab. 61)

Wie der Knochen sind die Mikrokristalle des Zahnhartgewebes aus carbonathaltigem Hydroxylapatit aufgebaut. Die Apatitstruktur ist ionisch und wird durch elektrostatische Kräfte zusammengehalten. Eine Bildung von reinem stöchiometrischem Hydroxylapatit $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}]$ mit einem molaren Ca/P-Verhältnis von 1,67 ist unter biologischen Bedingungen nicht möglich. Es bilden sich nichtstöchiometrische, substituierte Apatite, in welche Fremdionen eingebaut sein können. Diese kristallisieren meist mit einem molaren Ca/P-Verhältnis von etwa 1,64 bis 1,55 aus, besitzen weniger Hydroxyl(OH)-Gruppen, aber 2 – 3 % Carbonat(CO_3)- und 2 – 5 % Hydrogenphosphat(HPO_4)-Ionen im Kristallgitter. Die Abänderung der lokal chemischen Zusammensetzung wird mit der Häufung von Kristallfehlern in Beziehung gebracht. Die Gegenwart von z.B. Fluor, welches anstelle von OH-Ionen eingebaut wird, fördert die Bildung und das Wachstum größerer Kristalle, erhöht die thermische Stabilität und senkt die Löslichkeit in Säuren (Schumacher et al. 1990, S. 327).

In Abhängigkeit vom Ort, der lokalen Chemie und der Orientierung der Schmelzprismen (Abb. 7, Anhang 1) zeigt der Zahnschmelz Variationen in den physikalischen Eigenschaften, um unterschiedlichen Typen einwirkender Kräfte im besonderen Druck- und Zugbelastung, oder Belastungen im Hinblick auf die Prismenorientierung kompensatorische Mechanismen entgegensetzen zu können. Man spricht von anisotropem Verhalten bezüglich der Härte, der Elastizität und der Bruchfestigkeit.

Die Härte wird definiert als der Widerstand eines Stoffes gegen das Eindringen eines anderen Körpers (Bargel und Schultze 1978). Sie wurde von den zitierten Autoren nach verschiedenen Methoden an verschiedenen Regionen auf Zahnschmelzoberflächen, abhängig von der Form des belastenden Mikrowerkzeuges (Knoop – Knoop et al. 1939, Vickers – Ryge et al. 1961, sphärisch – Renson und Braden 1971) ermittelt. Die Härtewerte sind einschließlich der Elastizitäts(E)-modul-Werte im Anhang 1 angegeben.

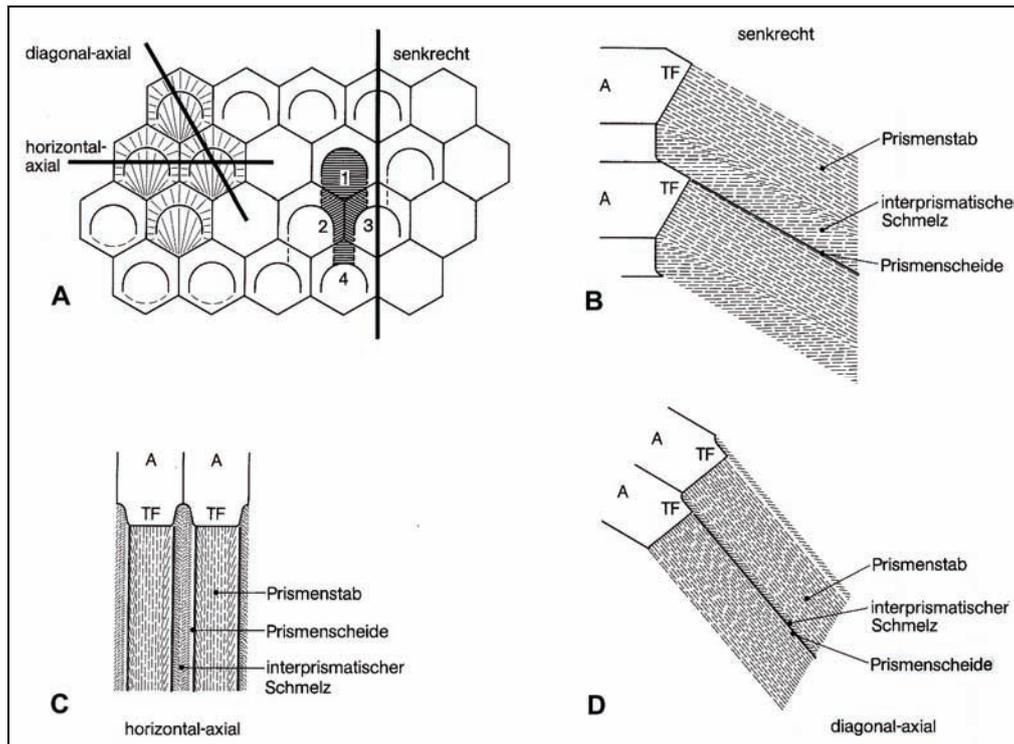


Abb. 7 Schemazeichnung Mikrostruktureller Aufbau des Zahnschmelzes; A hexagonales Muster querschnittener Ameloblasten; Tomessche Fortsätze (TF) mit halbkreisförmig begrenzten Kanten; TF in Beziehung zur Front des prismatischen und interprismatischen Schmelzes und seiner Kristallite (A, B-D); Schnittführung durch die Grenzfläche zwischen Ameloblasten und mineralisiertem Schmelz und seiner Kristallite (A); B senkrecht C horizontal-axial D diagonal-axial (modifiziert nach Schroeder 1992)

Das E-modul ist eine Materialkonstante für die Berechnung der Längenänderung, Biegeeigenschaft, Formänderung und Knicksicherheit von Materialien. Je größer das E-modul, desto geringer ist die Dehnung, die das Material bei einer gegebenen Spannung erfährt (Anhang 1).

Die prismatische Struktur wird als Ursache für das anisotrope Materialverhalten von Zahnschmelz gesehen (Rasmussen et al. 1976, Spears et al. 1993, Pfretschner 1994). Seine physikalischen Eigenschaften entlang der Prismen sind günstiger als im Winkel von 90° zu diesen, wodurch okklusale Belastungen sehr effektiv verteilt werden. Die Zug- und Druckbelastung wird reduziert und es verringert sich das Bruchrisiko von Zahnschmelz. Werden Schmelzprismen entlang ihrer Längsachse geschnitten, erscheinen sie hell (Parazonien), während sie im Querschnitt dunkler erscheinen (Diazonien). Das Wechseln solcher Zonen führt zur Hunter-Schreger-Bänderung (HSB) (Abb. 7, s.a. Schumacher et al. 1990). Sie verstärkt den Schmelz in seiner horizontalen Ebene strukturell im Hinblick auf eine Zugspannung und durch das Stoppen von Rissbildung. Bei höheren Belastungen findet man eine Abnahme der Dicke der HSB, d.h. die Dicke der prismenüberkreuzenden Fasern nimmt innerhalb der Lagen ab, um die Stützfunktion zu verbessern (Pfretschner 1988). Ein effektiver Bruchstopp-Mechanismus durch die Überkreuzung der Prismen und Kristallite wird auch durch die Arbeiten von Maas (1991, 1994), Strait (1997), Rensberger (1997, 2000) und Dumont (1999) belegt.

6.3 Zahnschmelzbildung und Reifung

Zahnschmelz, der die Krone der Zähne bildet, besteht aus dicht gepackten Fasern, den aus Hydroxylapatit aufgebauten Prismen (Abb. 7, Abb. 8A, zum Vergleich Dentin Abb. 8B) die durch eine interprismatische Matrix zusammengehalten werden. Diese Matrix ist von der Zusammensetzung gleich, unterscheidet sich

aber durch eine geringere Packungsdichte der Kristallite. Abbildung 7 A zeigt den mikrostrukturellen Aufbau des Zahnschmelzes an der Grenzfläche zwischen Ameloblasten und mineralisiertem Schmelz und dessen Kristallite. Die Tomesschen Fortsätze sind in ihrer Frontalaufsicht schematisch dargestellt. Die Abbildungen 7 B – C zeigen den prismatischen Schmelz im Schnitt in den drei Raumrichtungen senkrecht (B), horizontal-axial (C) und diagonal-axial (D) zu dieser Grenzfläche.

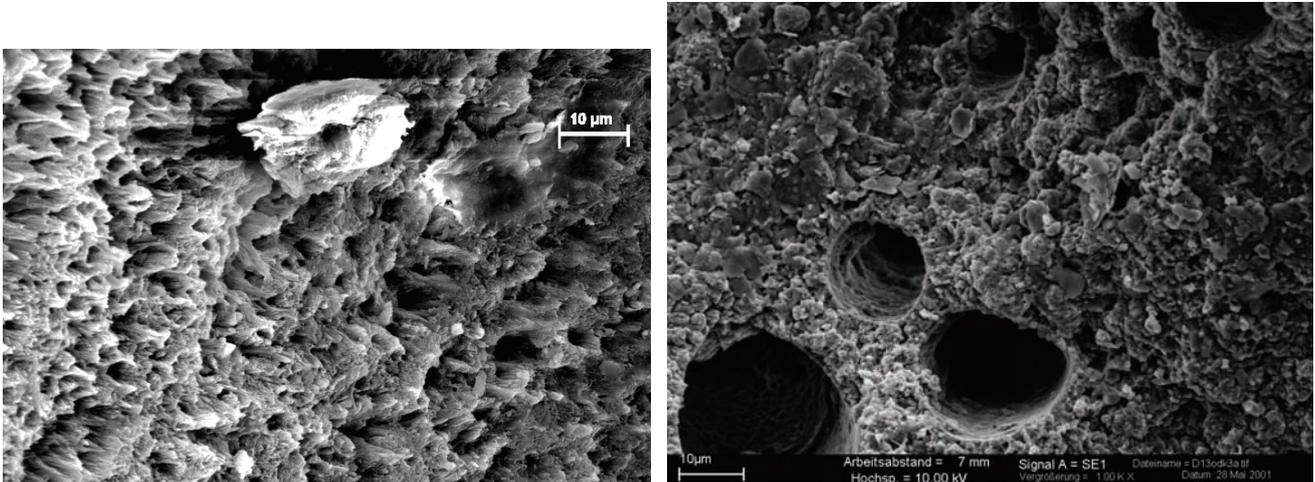


Abb. 8 REM-Aufnahmen A Zahnschmelzprismen B Dentin mit vermutlich mikrobiell verursachten Bohrkanälen

Die Bildung des Zahnschmelzes folgt mit zeitlicher Verzögerung dem Beginn der Dentinbildung und erfolgt in drei Schritten, der Bildung der organischen Schmelzmatrix, der Mineralisation der Schmelzmatrix und der Schmelzreifung durch die Ameloblasten. Aufgrund der gerichteten (polarisierten) Anordnung der Ameloblasten werden Sekretgranula am apikalen Zellpol abgelagert (Tomessche Fortsatz TF; Abb. 7 A-D), die sich zu netzartigen Strukturen, der organischen Schmelzmatrix aggregieren. Unmittelbar danach beginnt die Mineralisation. Es bilden sich Apatitkeime entlang der Mikrofibrillen, die zu Apatitkristallen heranwachsen und sich zu Schmelzprismen anordnen. Bestimmend für die Richtung der Schmelzprismen ist die Lage der Ameloblasten, ihres apikalen Fortsatzes (TF) und die Richtung ihrer Retraktionsbewegungen während der Sekretion (Schumacher et. al. 1990) von der Schmelz-Dentin-Grenze weg zentrifugal in Richtung der Schmelzmanteloberfläche ohne Unterbrechung.

Der Verlauf der Schmelzprismen ist in manchen Regionen gerade, während er in anderen Regionen wellig und gruppenweise geschwungen ist und ein undulierendes Muster mit Vor- und Rückbewegung aufzeigt (Radlanski 1998). Die Oberfläche des Schmelzmantels ist größer als die Fläche des vom ihm bedeckten Dentinkernes. Während der Durchmesser der Schmelzprismen zwischen 5 – 7 µm konstant bleibt, können diese bis zum 660fachen lang sein (mittlere Schmelzdicke ca. 4 mm). Diese zusätzlichen Windungen führen zum sog. Stauchungseffekt und ermöglichen die Volumenzunahme der Schmelzkappe (Radlanski 1998).

Die Mineralisation der Schmelzprismen erfolgt in mehreren Phasen. Der initialen Phase der Apatitkeimbildung folgen Phasen des Kristallwachstums, die zur Vergrößerung der einzelnen Kristallite beiträgt und die Mineraleichte erhöht. Nach Erreichen der bestimmten Schmelzdicke verschwinden die Tomesschen Fortsätze, die letzte Phase der Schmelzreifung, die zur maximalen Mineralisierung führt, beginnt. Das Muster der mikrostrukturellen Anordnung der Zahnschmelzprismen und interprismatischen Substanz (angedeutetes Schlüssellochmuster) ist an einem Beispiel in Abb. 9 auf natürlich bekautem Zahnschmelzoberfläche gezeigt. Im ausgereiften Schmelz sind die Kristallite in ca. 1-2% organischer

Restmatrix eingebettet. In der Endphase der Amelogenese enden die Prismen abrupt durch die Rückbildung des Tomesschen Fortsatzes und es wird an der Zahnschmelzoberfläche eine prismenfreie Schmelzschicht aus dicht aneinanderliegenden Kristalliten abgelagert (Schroeder 1992). Diese Schicht bildet ein kontinuierliches, unstrukturiertes oder parallel der Schmelzoberfläche liegendes Band. Sie tritt bei allen Milchzähnen und bei 70% der permanenten Zähne auf und beträgt im Mittel ca. 30 μm (6 bis 220 μm) (Schumacher et. al. 1990). Der Mineralgehalt ist an der Oberfläche und im Bereich der größten Schmelzdicke am höchsten (Theuns et al. 1983).

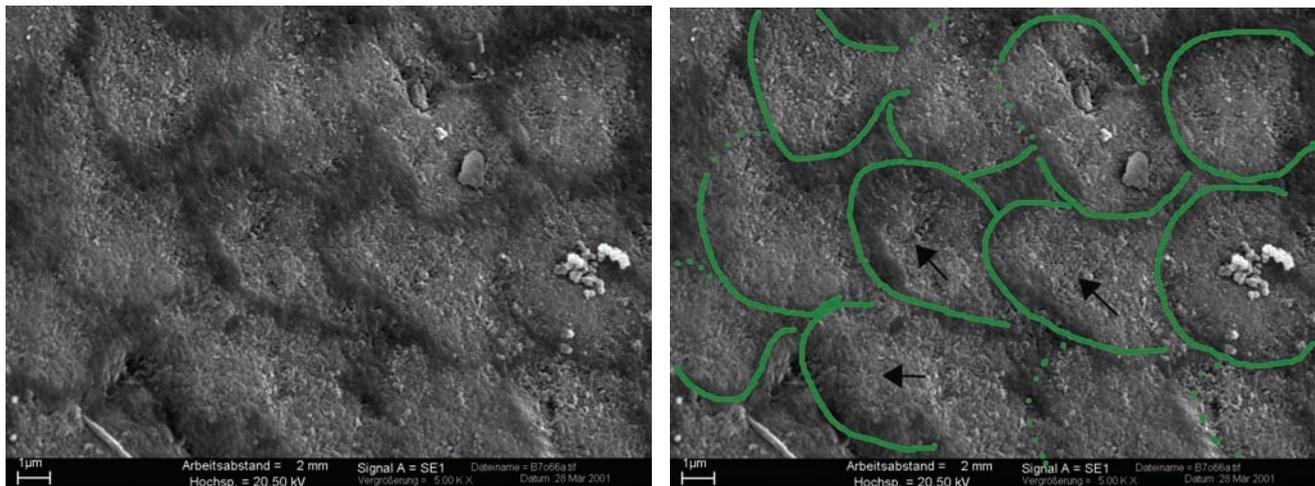


Abb. 9 Mikrostruktureller Aufbau von menschlichem Zahnschmelz (angedeutetes Schlüssellochmuster) am Beispiel einer natürlich bekauten Schmelzoberfläche (Kaufläche quer zur Längsachse der Schmelzprismen); interprismatische Substanz (grün markiert), Schmelzprismen (schwarze Pfeile); s. Abb. 7 A).

Die in rhythmischen Schüben verlaufende Sekretion der Schmelzmatrix und der extrazellulären Mineralisation während der Amelogenese führt an der Oberfläche der sich bildenden Schmelzkrone zu wellenartigen Ablagerungen, den Perikymatien (Wachstums- oder Imbrikationslinien), die dachziegelartig in Wülsten und Furchen wechseln (Abb. 10). Jede Furche entspricht dem Schnittpunkt einer Retzius-Linie, d.h. einem konzentrischem Ring im Horizontalschliff, an der Schmelzoberfläche. Diese Wachstumswülste und -furchen sind am gesunden und nicht abradierem Zahn als Linien- oder Bänderungsmuster bereits mit der Lupe deutlich zu erkennen. Das Perikymatienmuster ist durch den Gebrauch der Zähne bei 30- bis 40jährigen nur noch in etwa 50% zu finden (Schröder 1987), mit zunehmendem Alter kaum noch nachweisbar.

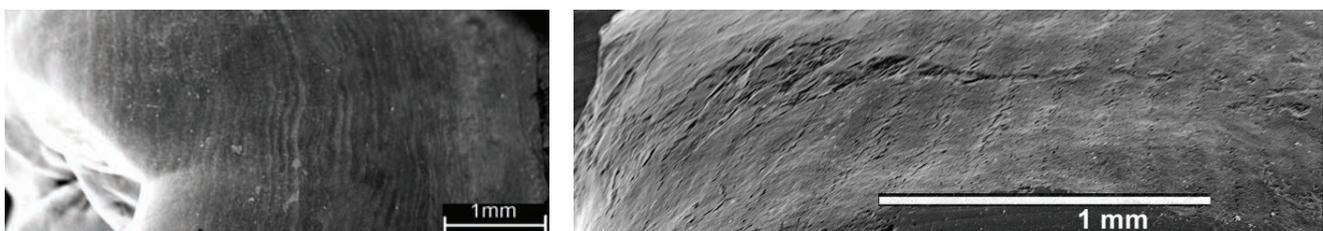


Abb. 10 REM-Aufnahmen: Beispiele für Zahnschmelzoberflächen mit noch deutlich sichtbarem wellenförmigem Streifenmuster, den Perikymatien, welche die gesamte Zahnkrone umlaufen.; links historischer Zahn; rechts Ausschnitt einer Oberfläche einer rezenten Zahnkrone; Maßstab jeweils im Bild.

Über die Entstehung und Eigenschaften des mehrschichtigen Schmelzoberhäutchen (Nasmyth- Membran) gibt es verschiedene Auffassungen. Während seiner Anwesenheit kann ihm eine gewisse Schutzfunktion

aufgrund seiner Resistenz gegenüber Säuren, Alkalien und Enzymen zugewiesen werden. Seine Dicke liegt zwischen 5 – 30 µm.

C. Einführung zur Analyse und Simulation von Zahnschmelzabtragung und dentaler Microwear

Zähne sind aufgrund ihrer engen Verknüpfung mit den verzehrten Nahrungsmitteln eine ausgezeichnete Quelle, um Daten zur Ernährungsrekonstruktion zu erschließen. Der deutlichste Effekt von Nahrung auf Zahnschmelzsubstanz ist das Abkauen der Oberflächen und damit der graduelle Verlust von Zahnschmelz. Shkurkin et al. sahen bereits 1975 in rasterelektronenmikroskopischen Analysen der Zahnoberflächen eine verfeinerte Methode, Informationen, die mit dem Zahngebrauch in enger Verbindung standen, zu sammeln. Seit dieser Anregung evolvierte das wissenschaftliche Feld der Ernährungsrekonstruktion in einer Reihe von Strategien, die Ursachen für den Zahnschmelzverlust, und die physikalischen Eigenschaften der Ernährung und in einigen Fällen von bestimmten Nahrungsmitteln und Zubereitungstechniken, die zur Entstehung von Microwear-Mustern beitragen, zu charakterisieren und einen *modus operandi* für die praktische Durchführung von Microwear-Studien zu entwickeln (Rose und Ungar 1998). Für die moderne zahnmedizinische Forschung im besonderen im Hinblick auf die Zahnerhaltung als auch für die moderne Nahrungsmittel-Industrie hat der diagnostische Zugang zu einer direkten Wirkung von Nahrungsmitteln und deren Aufbereitung für den Verzehr auf natürliche Zahnschmelzsubstanz eine große Bedeutung.

Die wissenschaftliche Verknüpfung der Musterbildung von Zahnschmelzabtragung mit der Dentalen Microwear (DM) kann anhand vergleichender Untersuchungen an Zähnen und mit am Kauvorgang beteiligten Strukturen fossiler und noch lebender Primaten durchgeführt werden. Kausimulationsstudien können die Lücke füllen und Aufschluss über die tatsächlichen Ursachen für Unterschiede im Microwear-Muster und dem Ausmaß der Zahnschmelzabtragung wie auch über den Entstehungsprozess geben. Absolute Abtragungsraten können die gesamte Kauleistung und die Beladung mit harten Partikeln charakterisieren, während die Microwear die feineren Details der Wirkung von Nahrungsinhaltsstoffen auf Zahnoberflächen darstellen.

C 1. Dentale Zahnabtragung (wear)

Während das Ausmaß der Zahnabtragung bereits 1939 (von Hrdlička; aus Rose und Ungar 1998) für eine Altersbestimmung des Individuums als einer von 5 Markern am Skelett herangezogen wurde, versuchten Wissenschaftler bereits seit den 20er Jahren (Buxton 1920, Campbell 1925, Leigh 1925, Moodie 1929, Waugh 1933) eine Verbindung zwischen der Abtragung und der konsumierten Nahrung zu finden. Molnar (1972), Powell (1985) und Rose und Ungar (1998) stellten in Übersichtsartikeln dar, in welcher Weise die Zahnabtragung und dentale Mikroläsionen (Dentale Microwear) für eine Rekonstruktion der Ernährung geeignet sind. Zur Rekonstruktion der Ernährung der frühesten fossilen Hominiden wurde von Beginn an die Zahnabtragung, neben Eigenschaften wie der Zahngröße und –morphologie genutzt (Robinson 1956, Grine 1981 etc.). Murphy (1959) erkannte, dass die Abtragungsrate eine Differenzierung von Ernährungsweisen zulässt. In einer frühen Arbeit verknüpfte Smith (1972) die Archäologie mit der Zahnabtragungsanalyse, und konnte zeigen, dass die physikalische Konsistenz der Nahrung von frühen Gartenbauern aus der Zeitstufe der Natufier (mesolithische Kultur von Jägern, Fischern und Sammlern mit Anzeichen für den Übergang zum Pflanzenbau in Vorderasien, 10. – 8. Jahrtausend v. Chr., Palästina,

Israel) mit der Zahnabtragung korreliert. Weitere Arbeiten zeigten, dass vor allem das Muster der Abtragung, nicht so sehr dessen Ausmaß, zu einem Verstehen des Kauvorganges und der Ernährung führt (Smith 1976). Murphy (1959a), Brace (1962) und Taylor (1963) erkannten, dass verschiedene Faktoren einschließlich der Ernährung und der Technologie der Nahrungszubereitung nicht nur unterschiedliche Abtragungsraten sondern auch Unterschiede in der Gestalt der okklusalen Oberflächen verursachen. Molnar (1971) erfasste als erster den Grad der Abtragung, den Winkel der Abtragung und die Form der entstehenden okklusalen Oberfläche mit Hilfe eines Bewertungsschemas für alle funktionalen Zahnklassen. Die Komplexität und Aufwendigkeit verhinderte, dass diese Methode in die Routine-Analyse für Skelettdiagnosen aufgenommen wurde. Smith (1984) diskutierte das Konzept einer flachen Molarenabtragung durch „zäh-faserige“ Nahrung. Aufgrund von Untersuchungen an Individuen einer Jäger-Sammler- und einer nahrungsproduzierenden Gruppe kam sie zum Schluss, dass der Abtragungswinkel Subsistenzstrategien differenzieren und zur Identifikation früher Stadien des Überganges zur Nahrungsproduktion genutzt werden kann. Eine weitere Innovation erfolgte durch Scott (1979a, b). Er verfeinerte das Bewertungsschema für Zahnabtragung durch die unabhängige Quadrantenanalyse (Untersuchung der vier Höcker der Molaren getrennt) und damit eine Erweiterung der Anzahl der möglichen Bewertungen (Scores) für die Abtragung der Molaren von bisher 8 auf 36 (s. Anhang 2) unter Verwendung eines Zehn-Punkte-Systems. Dieses System wurde von Cross et al. (1986) getestet und als objektiv und wiederholbar bewertet. Die verfeinerte Bewertungsskala näherte sich einer Normalverteilung und ermöglichte die Anwendbarkeit hiervon abhängiger statistischer Methoden. Scott (1979b), Benfer und Edwards (1991) wandten an den nach Scott (1979a) ermittelten Daten die Hauptachsengleichung (Sokal und Rohlf 1969) an, eine mathematische Methode, um voneinander unabhängige Variablen gleichbewertend als Paare zu analysieren. Sowohl die Steigung der Achse als auch der Achsenabstand gaben Auskunft über das Ausmaß der Abtragung in Abhängigkeit von der Zeit und ermöglichten Aussagen ohne eine Vielzahl von Gebissen zur Verfügung zu haben, ein Umstand, der bei der Bearbeitung nur bruchstückhaft vorhandener Skelette und geringer Individuenzahl von Vorteil war und ist. Zahlreiche Studien belegen, dass sich die Methoden der Zahnabtragungsanalyse erfolgreich an der Rekonstruktion von Ernährungsweisen beteiligen können und konnten. Und dennoch entstehen noch ausgeklügeltere Methoden, zu welchen auch die Dentale Microwear Analyse (DMA) zählt, mit dem Ziel noch größere Differenzierungsmöglichkeiten zu finden und Indikatoren für subtilere Nahrungsänderungen aufzuspüren.

C 2. Dentale Microwear

Die Untersuchung mikroskopisch sichtbarer Spuren der dentalen Abtragung als logische Konsequenz der absoluten Abtragung führte zu einem neuen Zweig der dentalen Anthropologie, zur Dentalen Microwear Forschung. Rose und Ungar (1998) teilten die Geschichte der Microwear Forschung in fünf Phasen ein, das „embryonale“ Stadium zwischen 1950 und 1960, ihre „Kindheit“ in den 70er Jahren, der „Paradigmen-Wechsel“ Anfang bis Mitte der 80er Jahre, die „Wiedergeburt“ Mitte der 80er und die „heutige“ Microwear Forschung. Die Zusammenfassung von Rose und Ungar (1998) wird im folgenden kurz dargestellt.

Erste Studien an Dentaler Microwear ließen erkennen, dass bestimmte Oberflächenläsionsmuster auf Zähnen etwas über das Ernährungsverhalten und die Nahrung, die verzehrt wurde, erzählen können. Bereits sehr früh erkannten Baker, Jones und Wardrop (1959), dass Opal-Phytolithe in Grashalmen und Quarz im Sand individuelle Merkmale als Kauergebnis auf Molaren von Neuseeländischen Schafen

verursachten. Dahlberg und Kinzey (1962) untersuchten daraufhin mehrere menschliche Zähne mit dem Lichtmikroskop. Sie nahmen an, dass die Ausprägung der mikroskopischen Kratzspuren auf Zahnschmelz mit Eigenschaften von Nahrungsinhaltsstoffen verknüpft sein dürften. Sie vermuteten bereits, dass Untersuchungen von der Variation der Microwear innerhalb und zwischen den Arten Unterschiede in der Nahrung aufzeigen können.

Im Jahr 1976 publizierte Walker eine Arbeit über Microwear an den Schneidezähnen nicht-menschlicher Primaten. Er kam zu dem Schluss, dass am Boden lebende Affen stärker zerkratzte Zahnoberflächen trugen als auf den Bäumen lebende Arten und nahm an, dass das Substrat vom Boden, silikathaltiges Material in verzehrter Nahrung und die mechanischen Anforderungen an die Nahrungszerkleinerung dafür verantwortlich seien. Über Unterschiede in der Kratzspur-Orientierung vermutete er, dass blätterfressende Primaten bevorzugt die Blätter seitlich über die Schneidezähne ziehen würden. 1978 fand erstmals die Rasterelektronenmikroskopie, jedoch noch nicht an Primaten, Einzug in die Dentale Microwear Forschung. Während Rensberger (1978) molare Unterschiede von dentaler Microwear an sechs verschiedenen Nagetierarten dokumentierte und mehrere diskrete Mustertypen verschiedenen Faktoren, einschließlich Schmelzstruktur und Ernährung zuordnete, beschrieben Alan Walker und Kollegen (1978) molare Microwear Muster an verschiedenen Schlieferarten. Sie konnten zeigen, dass ein eher strauchfressendes Verhalten bevorzugt Zahnoberflächen mit Gruben hinterlässt, während vermehrt grassfressendes Verhalten zu einem Vorwiegen von parallel angeordneten Kratzspuren führt. Die Autoren wiesen auch darauf hin, dass solche Unterschiede auch auf ein saisonales Fressverhalten hindeuten.

Nahezu zeitgleich wurden die ersten weitgehend qualitativen Untersuchungen an fossilen Hominiden zur Ernährungsrekonstruktion durchgeführt (Grine 1977 in 1984, Puech 1979, Ryan 1979a, b, Puech et al. 1980, Grine 1981, Puech et al. 1981, Walker 1981). Beim Vergleich der Muster zwischen südafrikanischen frühen Hominidenarten bemerkte Grine (1981), dass es Unterschiede in deren Mikroläsionsmuster gab. In Abhängigkeit vom Verzehr von feinkörnigem und hartem Futter traten stärker zerkratzte Facetten, und von weicherer Nahrung wie Früchte und unreife Blätter traten molare Oberflächen mit vermehrten Gruben auf.

Nachdem einige vergleichende Studien folgten, entstanden die ersten experimentellen Ansätze zur Analyse der Microwear-Bildung an Zahnoberflächen verschiedener Arten, am Opossum (Covert, Kay 1981) und an menschlichen Zähnen (Peters 1982). Peters (1982) kam zu dem Schluss, dass das Aufbeißen und Zerknacken von Knochen sowie das Kauen auf harten Hülsenfrüchten verschiedenartige Microwear-Muster verursachten, während Kratzspuren, die durch verunreinigenden Schmutz auf den Nahrungsmitteln entstanden, sehr ähnlich solchen waren, die durch Grassphytolithe in der Nahrung auftraten. Er stellte auch fest, dass manche Primatennahrung keine Microwear hinterließ. Das anfangs vernichtende Urteil von Covert und Kay (1981), die Microwear-Analyse ließe keine Unterscheidung von Herbivorie und Insektivorie an fossilen Primaten zu, wurde von beiden Autoren (Kay, Covert 1983) revidiert. Dies führte im Folgenden dazu, das Potential der Methode auszuloten und die Grenzen der Microwear-Forschung auszudehnen.

Zu welchem Zeitpunkt und unter welchen Bedingungen Dentale Microwear entstand, konnte von Teaford und Walker (1983) durch Untersuchungen an neugeborenen Meerschweinchen, welchen die typisch für erwachsene Molaren von Meerschweinchen auftretende Microwear fehlte, beantwortet werden. Abrasiv

wirkende Nahrungsinhaltsstoffe produzierten eher Dentale Microwear als durch Zahn-Zahn-Kontakt auftretende Attrition.

Mit dem Beginn der Quantifizierung und der Kontrolle von beeinflussenden Variablen erhielt die Microwear-Forschung weitere Impulse. Grine (1986), Grine und Kay (1988) und King et al. (1999a) bevorzugten ein Verhältnis der Längen der Haupt- zur Nebenachse von 4:1 (Pit axis length ratio < 4:1) zur Trennung von Gruben und Kratzspuren (Ungar et al. 1991, Ungar 1995). Dieses Verhältnis wurde für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen dentaler Microwear übernommen. Gruben wurden nur als solche erfasst, wenn deren Längen/Breitenverhältnis den Faktor 4 nicht überschritten. Analytierte Merkmale, welche diesen Grenzwert übertrafen, waren nach der Definition als „Kratzer“ anzusprechen. Gordon`s Arbeiten (1982, 1984, 1988) legten besonderen Wert auf die Kontrolle der Lokalisierung von Microwear-Merkmalen (z.B. homologe Facetten, molare Position), gewählte Vergrößerung und standardisierte SEM-Einstellungen und die Auflösung beeinflussender Parameter, die Standardisierung sowohl innerhalb als auch zwischen Projekten und die Erfassung des individuellen Fehlers bei der Erfassung der Merkmale.

Die ersten Versuche zur Automatisierung der Quantifizierung dentaler Microwear wurden von Kay (1987) und Walker et al. (1987) unternommen. Begrenzungen in der Technologie der Mustererkennung führten zu weiteren Entwicklungen von Standards zur Quantifizierung der Microwear-Merkmale.

Eine Reihe von quantitativen Studien an heute noch lebenden Primaten (Teaford und Walker 1984, Teaford 1985, 1986, 1988b) gab weitere Aufschlüsse darüber, ob und wodurch sich nahe verwandte oder auch Gruppen innerhalb von Arten (Teaford und Robinson 1989) im Muster unterschieden. Sie untersuchten homologe Facetten, nutzten gleichbleibende Vergrößerungen und quantifizierten die Merkmalsdimensionen und deren Dichte. Sie fanden, dass fruchtessende Primaten z.B. *Cercocebus* (Mangaben), *Cebus* (Kapuzineraffe), *Pongo* (Orang Utan) und *Pan* (Schimpanse) ein größeres Gruben- zu Kratzspurverhältnis aufwiesen als blätteressende Primaten z.B. *Colobus* (Schlankaffe), *Alouatta* (Brüllaffe) und *Gorilla* (Gorilla). Unter den Fruchtessern trugen die Spezialisten für harte Objekte die höchste relative Häufigkeit an Gruben (*Cercocebus* und *Cebus apella*). Obgleich der intraspezifische Vergleich nicht diese deutliche Trennung zeigte, reflektierten die molaren Microwear-Muster bei einer Gruppe von Kapuzineraffen (*Cebus olivaceus*) deutliche saisonale und ökologische Zonenunterschiede.

C 3. Mechanismen der Zahnschmelzabtragung und der Entstehung dentaler Microwear

Lucas und Luke (1983a) identifizierten zwei Prozesse beim Kauen: Selektion und Zerkleinerung. Die Selektion bewirkt die Bewegung eines Nahrungspartikels auf den okklusalen „Tisch“ und seine Exposition zu sich gegenüberliegenden Zahnoberflächen. Die Chance eines Nahrungspartikels, ausgewählt zu werden, verringert sich mit Abnahme seiner Größe, aber die Wahrscheinlichkeit innerhalb eines Individuums bleibt konstant. Zwischen den Individuen gibt es jedoch beachtenswerte Unterschiede, im besonderen abhängig von zwei Faktoren – die Bewegung von Partikeln und die okklusale Fläche. Die Bewegung innerhalb eines Individuums ist konstant, der Seiteneffekt führt jedoch zu Unterschieden. Zudem existieren zwischen Individuen enorme Unterschiede in der Beißkraft und der Kieferbewegung (z.B. Bates et al. 1975, Ahlgren 1976, Lucas und Corlett 1991, Koolstra et al. 1995, Spencer 1998).

Der eigentliche Kauvorgang wird in drei Phasen unterteilt, die Phase des Zubeißens und Festhaltens der Nahrung (Schließungsphase), die Phase des Zerkleinerns, Zerquetschens und Zermahlens (Kraftphase) und die Phase der Öffnung und Repositionierung des Unterkiefers.

In der Schließungsphase wird die Mandibula positioniert, wobei sich die gegenüberstehenden Höckerspitzen zueinander bewegen. Die oberen und unteren Molaren werden so in Richtung der zentrischen Okklusion gebracht, dass die lingualen Höcker der maxillaren Molaren (vorwiegend Protoconus) sich mit dem okklusalen Teil der mandibularen Molaren (Zentralfurche – Fovea centralis des Talonides) verzahnen, während die bukkalen Höcker der mandibularen Molaren mit dem okklusalen Teil der maxillaren Molaren verzahnen, ähnlich eines Pistilles in einem Mörser. Die beteiligten Höcker werden als unterstützend (supporting cusps) oder führend (guiding cusps) bezeichnet (Abb. 11). Der Grad der Neigung kann ermittelt werden, indem der Winkel zwischen der Ebene des Zahnhalstrand und der Neigungslinie L des beteiligten führenden (L_F) bzw. unterstützenden (L_U) Höckers ermittelt wird (Spears und Crompton 1996) oder dieser in Relation zur Längsachse gemessen und berechnet wird (Khera et al. 1990).

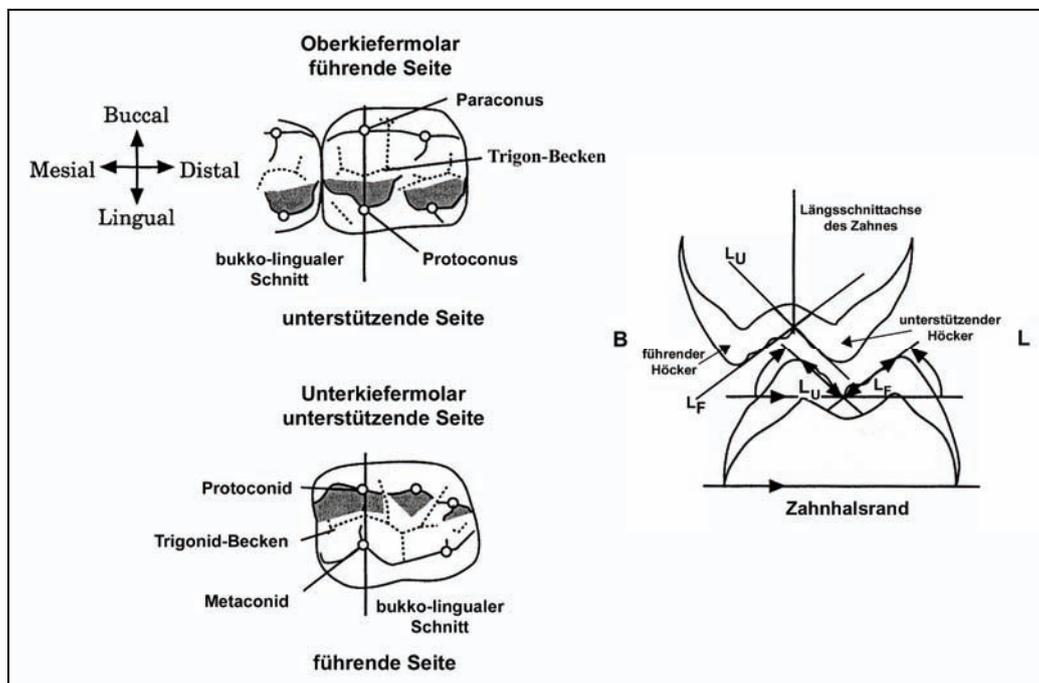


Abb. 11 Führende und unterstützende Molarenhöcker der Schließungsphase (oben) und ihre Neigung im Querschnitt (unten); L_F Phase II; L_U = Neigungslinie der Oberfläche des führenden Höckers - L_U Phase I; L_U = Neigungslinie der Oberfläche des unterstützenden Höckers bei der Verzahnung (Interkuspatation); Phase II schattiert; Phase I unshattiert.

Die Kraftphase ist für das Abtragungsgeschehen von besonderer Bedeutung. Sie wird in drei biomechanisch unterscheidbare Phasen unterteilt. In der einleitenden Phase wird die Nahrung zwischen den antagonistischen Zahnoberflächen bewegt und zerkleinert. In der bukkalen Phase (Phase I, horizontale Beißkräfte), die zu einer maximalen Interkuspatation d.h. zur zentrischen Okklusion führt, greifen die Höcker und Vertiefungen der Zähne der Ober- und Unterkiefer kongruent ineinander (Maier und Schneck 1981), in der lingualen Phase (Phase II, Mahl- und Scherkräfte) wird die zentrische Okklusion beendet.

Als führende oder nicht-funktionale Höcker fungieren die lingualen mandibularen und die bukkalen maxillaren Höcker (Spears und Macho 1998), die sich vorwiegend an der die zentrische Okklusion beendenden Öffnungsphase des Kauzyklus beteiligen (Kay und Hiimae 1974). Die unterstützenden Höcker sind sowohl an der bukkalen als auch an der lingualen Phase beteiligt. Sie sind proportional größer mit einer breiteren bukko-lingualen Basis als die führenden Höcker, tragen eine geringere Neigung der okklusalen Oberfläche und eine dickere Schmelzschicht (Abb. 11) (Khera et al. 1990).

Aufgrund einzelner Abänderungen in der Morphologie menschlicher Molaren der Maxilla von anterior nach posterior werden funktionale Unterschiede zwischen den Molaren angenommen. Systematische Unterschiede insbesondere im geometrischen Querschnitt implizieren Unterschiede in der Verteilung der Kaubelastungen zwischen den ersten, zweiten und dritten Molaren (Spears und Macho 1998). Die Abnahme des Bewegungsbereiches der Mandibula und des Winkels, mit welchem die Zähne in Okklusion gelangen, nach posterior in Richtung des temporo-mandibularen Gelenkes (TMJ – temporal-mandibular-joint), welches als Verankerung der Mandibula dient, lässt ebenfalls auf funktionale Unterschiede der Molaren schließen.

Die komplementären Zahnkronen sind so konstruiert, dass eine mechanische Überbeanspruchung der artspezifischen Nahrung erfolgen kann. Die Zahnkronen selbst bleiben bei dem Vorgang jedoch weitestgehend intakt. Für die Charakteristik des sich verändernden Zahnkronenreliefs sind im besonderen die physikalischen Festigkeitsparameter der Nahrung von Bedeutung. Das genotypisch vorgebildete Kronenrelief bildet die Basisstruktur, welcher durch die vielfachen Kaukontakte mit der Nahrung allmählich ihre definierte Funktionsform aufgeprägt wird, mit einer ganzen Serie von Kanten- und Facettenpaaren (Abb. 12, aus: Maier und Schneck 1981). Die Ausbildung eines zusätzlichen Facettenpaares 13 auf den Molaren der Hominoidea konnte von Maier und Schneck (1981) als ausschließlich kennzeichnend für Vertreter der Überfamilie der Hominoidea gefunden werden.

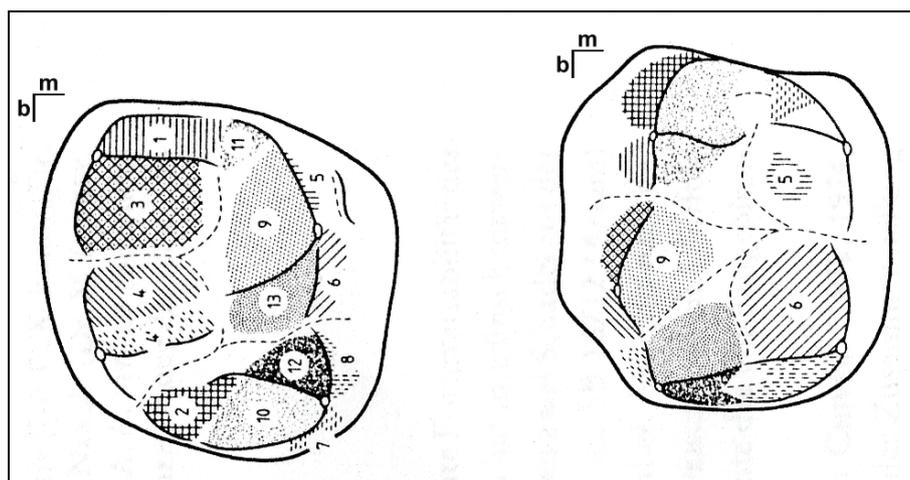


Abb. 12 Konstruktionsmorphologische Nomenklatur an einer Zeichnung eines menschliches Molarenpaares (rechter Oberkiefer-, linker Unterkiefermolar). Die komplementären Facettenpaare der oberen und unteren Antagonisten sind durch gleichbleibende Markierung dargestellt. Die Konstruktionselemente sind numerisch gekennzeichnet (aus Maier und Schneck 1981, nach Crompton 1971, Kay 1977 und Maier 1977a, b). Gestrichelte Linien kennzeichnen die Furchen, durchgehende Linien die wichtigsten Scher- und Führungskanten, die kleinen Ovale markieren Höckerspitzen oder höchste Erhebungen des Reliefs (umgearbeitet aus Maier und Schneck 1981), Orientierung b: bukkal; m: mesial.

In Abb. 13 sind exemplarisch zwei reale Molarenpaare okklusal mit dem für den Menschen charakteristischen konstruktionsmorphologischen Kronenrelief dargestellt.

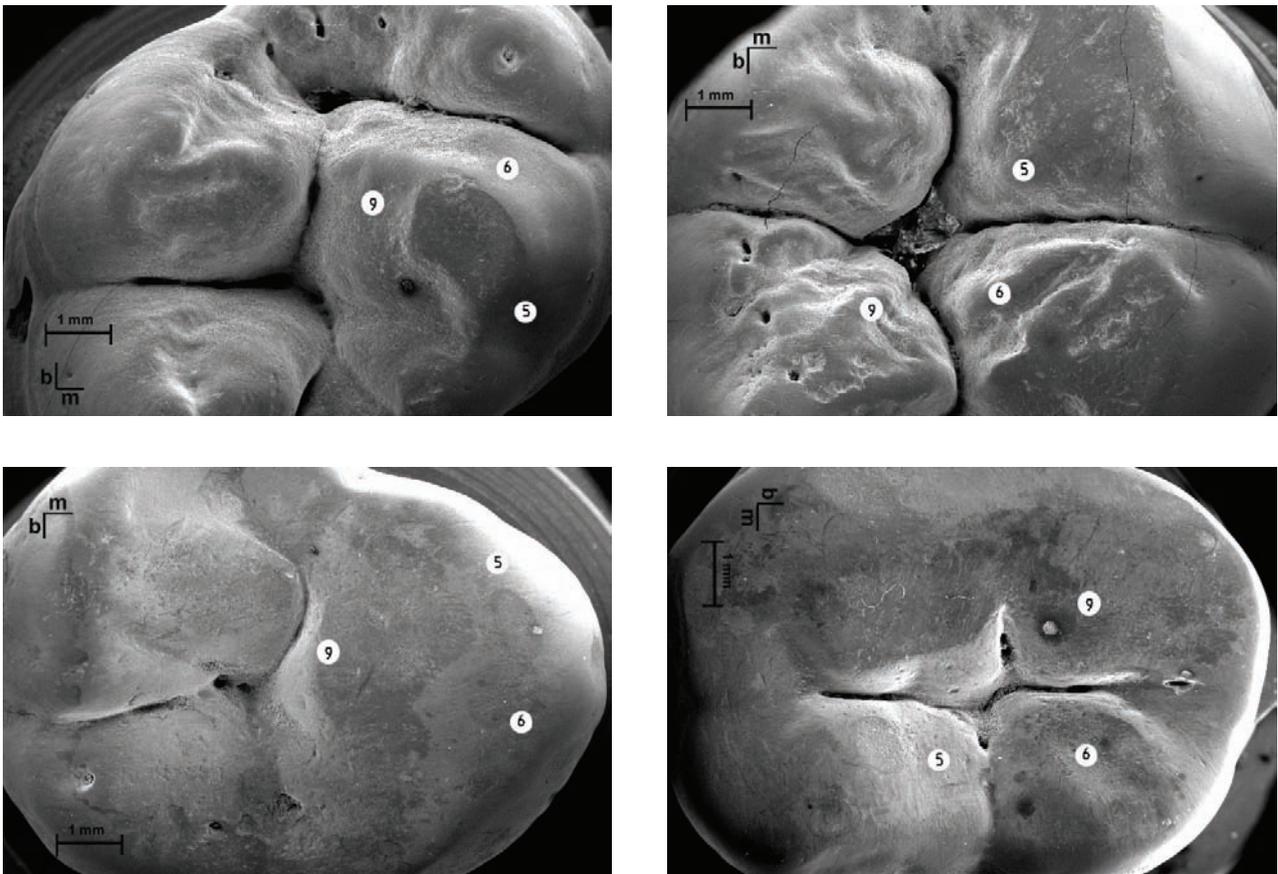


Abb. 13 Konstruktionsmorphologie dargestellt an realen menschlichen Molarenpaaren, Waging am See, Individuum 141 frühjuvenil, W, oben, Individuum 104 spätjuvenil, W, unten (Oberkiefermolar li, Unterkiefermolar re), Vergrößerung 10x, SEM, Orientierung und Maßstab im Bild; (Facettennomenklatur Abb. 12), Markierung der Facettenregionen für die DMA.

Werden Nahrungsmittel zwischen okklusalen Oberflächen der Zähne zerkleinert, erhalten sie Eigenschaften von Flüssigkeiten. Durch die Widerstandskraft des entstandenen Nahrungsbreies kommt es zum Druckanstieg, der den Brei aus dem okklusalen Bereich herausquetscht (hydrodynamische Schmierung). Hierbei entstehen Scherkräfte an den okklusalen Oberflächen. Die Drücke und Scherkräfte, die während der Zerkleinerung auftreten, sind abhängig vom Fließverhalten der Nahrungsmittel und von der Form und dem Volumen des interokklusalen Raumes, der durch Höcker und Gruben definiert ist. Je größer das Volumen dieses Raumes und je enger die Ausweichmöglichkeiten des Nahrungsbreies sind, desto größer sind der Druck und die Scherkräfte, welche sowohl auf die Nahrung als auch auf die Zähne und deren Oberflächen wirken (DeGee und Pallav 1994).

In der Tribologie (griech.: tribein = reiben) – der Wissenschaft von den interagierenden Oberflächen in Abhängigkeit von der Bewegung – wird ein tribologisches System auf ganz vereinfachte Weise in folgender Form beschrieben (Abb. 14).

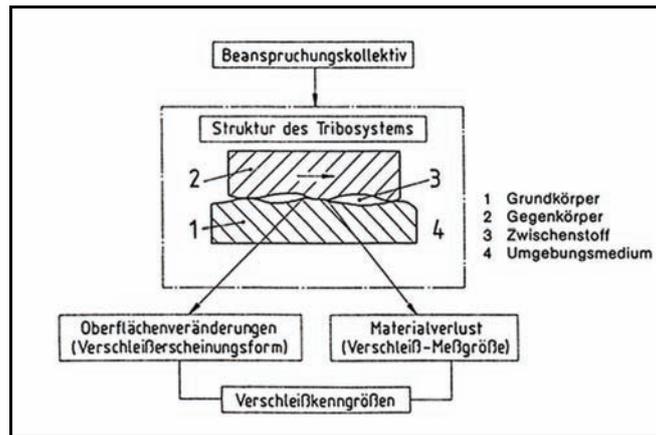


Abb. 14 Darstellung eines tribologischen Systems (aus DIN 50 320)

Die physikalischen und chemischen Interaktionen eines Tribosystems resultieren aus dem Herauslösen von Material aus den sich gegenüberliegenden Oberflächen. Dieser Substanzverlust wird verursacht durch die tribologischen Abtragungsmechanismen, bei welchen abrasive Partikel freigesetzt werden können (Friedrich 1986, Zum Gahr 1987). Sowohl die Oberflächenermüdung, Abrasion, tribochemische Reaktionen wie Korrosion und Adhäsion durch Verhaken zweier sich gegenüberliegender Flächen sind als solche Mechanismen beschrieben (Abb. 15). Diese Vorgänge haben sowohl Übereinstimmungen, sie unterscheiden sich aber zum Teil von den Vorgängen auf der Ebene der Zahnoberflächen.

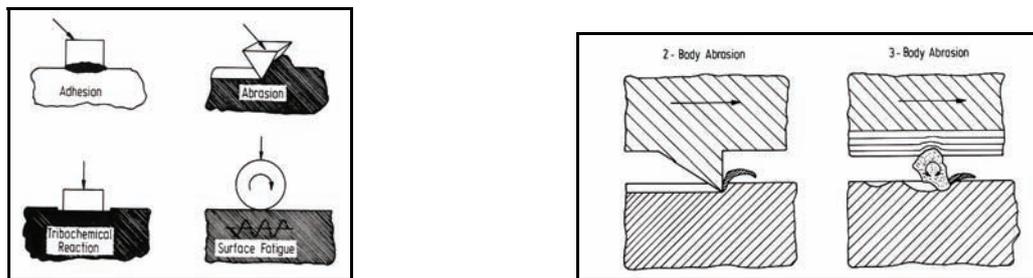


Abb. 15 Links: Typische Verschleißmechanismen ; Rechts: Zwei-Körper- und Drei-Körper-Abrasion (aus: Zum Gahr 1987)

In Übereinstimmung mit dem tribologischen Modell treten an den Zahnoberflächen „Zwei-Körper“- und „Drei-Körper-Abrasion“ auf, wobei die mikroskopischen Abtragungsmechanismen als Mikropflügen, Mikroermüdung, Mikroschnitte und Mikrobrüche zu unterscheiden sind (Abb. 15; aus: Zum Gahr 1992).

Attrition beschreibt den Substanzverlust durch Zahn-Zahn-Kontakte, entsprechend dem Modell der Zwei-Körper-Abrasion. Der Verlust entsteht physiologisch durch das Kauen, Schlucken und Sprechen und nicht-physiologisch durch das Zähneknirschen (Bruxismus) oder durch sog. Parafunktionen (z.B. durch psychischen Stress, schwere körperliche Arbeit). Der Zahngewebeverlust, der durch Partikel entsteht, wird als „Abrasion“ klassifiziert, und entspricht dem tribologischen Modell der „Drei-Körper-Abrasion“. Die Abrasion tritt während des Kauens von Speisen als sog. „Demastikation“ durch den Gehalt von Partikeln in der Nahrung (Baker et al. 1959, Puech 1981, Walker 1981, Rose und Harmon 1986, Teaford und Little 1996) oder durch Kontaminationen der Nahrung oder des Speichels mit exogen zugeführten Schleifpartikeln (Hickel 1987, Ungar 1995, Djemal et al. 1998) auf, die härter als die Zahnoberfläche sind. Durch die orale Aufnahme säurehaltiger Früchte, Speisen und Getränke tritt eine verschieden lang andauernde Verminderung der Zahnschmelzhärte oberflächlich und in den tieferen Schichten der

Zahnschmelzoberfläche auf, die zu verstärkter Abrasion und zu Erosionen des Zahnschmelzes führen kann, wenn eine Remineralisation durch den Speichel unzureichend oder nicht erfolgt (Smith 1975, Davis und Winter 1980).

Zahnschmelzabtragung wird darüber hinaus noch von weiteren Faktoren beeinflusst. Die Bewegung des Kiefers, individuelle Kaugewohnheiten, die sich in einer einseitig lateralen Nutzung zeigen kann oder Unterschiede innerhalb der Zahnreihen und der Zahneruptionsfolge, d.h. der individuelle Reifegrad des Zahnes, spielen eine Rolle im individuellen Abtragungsgeschehen (Newesely 1993), sowie eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Zahnschmelzsubstanzen.

C 4. Einführung in die experimentelle Simulation

In den vergangenen 30 Jahren wurden spezielle Techniken zur vergleichenden Darstellung von Änderungen der Zahnoberflächen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Ernährungsmustern bei fossilen Primaten und deren heute noch lebenden Deszendenten entwickelt (z.B. Kay und Hiiemae 1974, Lucas und Luke 1984, Kay 1987, Teaford und Ungar 2000). Zahlreiche Untersuchungen beschäftigten sich auch mit der chemischen und strukturellen Zusammensetzung von Nahrung und mit Strukturen, die mit der Verdauung von Nahrung verknüpft sind (Milton und Demment 1988, Wisker et al. 1988, Andrews und Martin 1991, Southgate 1992, Strait 1997, Conklin-Brittain et al. 2002).

Sowohl in der zahnmedizinischen Forschung als auch in der historischen Anthropologie besteht der Bedarf, Prozesse der dentalen Abtragung im besonderen beim Auftreten hoher Abtragungsraten und hoher okklusaler Kräfte zu analysieren (Mair et al. 1996, Mays 2002) und unterschiedlich grob zubereitete Nahrungsmittel mit einzubeziehen. Es sind in den vergangenen Jahren eine Vielfalt von Maschinen, sog. „artifizielle Mundräume“, entwickelt worden (Kunzelmann 1997, Mair et al. 1996). Sie dienen hauptsächlich dem Zweck Abtragungseigenschaften von Füllungswerkstoffen und Kronenmaterial (z.B. DeLong, Douglas 1983, Coffey et al. 1985, De Gee und Pallav 1994, Krejci et al. 1990a, b, Kunzelmann 1997, Condon und Ferracane 1997) aber auch von menschlichem Zahnschmelz (Gügel 1998, Kaidonis et al. 1998, Friedel 2000, Gügel et al. 2001, Gügel 2002) zu ermitteln.

Um aufwändige und langandauernde klinische Tests zur Prüfung der Beständigkeit und Kompatibilität von Zahnersatzmaterialien in der modernen Zahnmedizin zu beschleunigen und deren Aussagekraft zu verbessern, werden in der Praxis zwei Wege verfolgt, mechanische Tests und Simulationstests zum Abrieb.

Mit den mechanischen Tests werden solche Eigenschaften wie Bruchfestigkeit, Härte, Druck- und Zugfestigkeit, Ermüdung und die Art der Beständigkeit analysiert. Dabei spielen Faktoren wie die Struktur der Oberfläche (Rauigkeit, Einschlüsse, etc.), chemische Resistenz, hydrolytischer Abbau und orale Temperaturschwankungen eine Rolle. Der weite Bereich physikalischer und chemischer Einflussfaktoren, deren Wirkung in komplexer Weise voneinander abhängig ist, hat zusätzlich seine Beteiligung am Abriebgeschehen, so dass es beinahe unmöglich erscheint, einen wohl-abgewogenen und zuverlässigen Weg zu finden, den Abrieb in Abhängigkeit von physikalischen Eigenschaften vorherzubestimmen.

In vitro Simulationsteste des Abriebes haben den Vorteil, dass sie Abtragungsdaten liefern, die direkt mit Ergebnissen aus der klinischen Forschung vergleichbar sind. Die Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Testmethode mit den klinischen Bedingungen weitgehend übereinstimmt. Dies beinhaltet im besonderen die Kräfte, sowie die Mahl- und Gleitbewegungen, die mit dem Kauen verknüpft sind und als dritte Komponente ein Medium, welches der Nahrungszusammensetzung mit all seinen Bestandteilen der natürlichen Ernährung ähnelt.

Bei der Zerkleinerung von Nahrungsmitteln zwischen Flächen verursachen harte Partikel während des Gleitens über die Oberfläche einen Abrieb. Dieser Mechanismus wird als für den okklusalen Materialverlust verantwortlich angesehen. Er spielt vermutlich auch während der reibenden Bewegung der Zahnoberflächen ineinander (Phase I des Kauzyklus) eine Rolle, wo abrasive und adhäsive Abtragung, Oberflächenermüdung und Korrosion der Oberfläche den Prozess komplizieren. Unter klinischen Bedingungen treten die verschiedenen Abtragungstypen simultan (gleichzeitig) oder sequentiell (in zeitlicher Abfolge) auf und beeinflussen sich häufig gegenseitig auf komplexe Weise, die vermutlich von Patient zu Patient variiert.

Eine den physiologischen Bedingungen vollständig gleichende Simulation ist kaum zu erzielen. Für eine Annäherung an klinische Bedingungen wurden verschiedene Ansätze verfolgt, die unter den Teilbereich „Simulation okklusaler Belastungen“ in der Entwicklung von Verschleißprüfungen eingeordnet werden. Hierzu zählen Verfahren auf der Grundlage von Artikulatoren und frei drehbaren Reibrädern, Simulationsumgebungen mit mehreren Verschleißmechanismen (z.B. Leinfelder Simulator, ACTA-Maschine), Maschinen zur Wiedergabe von Belastungsmuster eines Kauzyklus, Scratch-Teste und Verschleißsimulatoren mit Grund- und Gegenkörper (Kunzelmann 1997). Die Verfahren dienen vorwiegend dazu, Abtragungs- bzw. Verschleißdaten von Restaurationswerkstoffen zu erhalten (Neuere Arbeiten: Bauer et al. 1995, Schnabel 1995, Condon und Ferracane 1996, 1997, Ferracane et al. 1997, Pelka et al. 1998, Reich et al. 1998, Krejci et al. 1999). Den zahlreichen Untersuchungen über das Abtragungsverhalten von Füllungswerkstoffen stehen noch immer nur vereinzelte Untersuchungen über das Abtragungsverhalten von natürlichem Zahnschmelz gegenüber (Coffey et al. 1985, Krejci et al. 1990a, Suzuki und Leinfelder 1993, Gügel 1998, Kaidonis et al. 1998, Pelka et al. 1998, Friedel 2000, Gügel et al. 2001, Gügel und Kunzelmann 2002).

C 5. Simulation dentaler Abtragung und Microwear auf natürlichem Zahnschmelz

Die Idee zur Durchführung von Simulationsexperimenten zur Analyse von Abtragung und Dentaler Microwear auf natürlichem Zahnschmelz basieren auf Untersuchungen von simulierten Kratzspuren auf Primaten- einschließlich Menschenzähnen (Ryan 1979a, b), von simulierten Merkmalen durch abrasives Material auf menschlichem Zahnschmelz (Puech et al. 1981) und zur Strukturaufklärung und Belastbarkeit von Zahnschmelz (Boyde und Fortelius 1991, Maas 1991, 1994). Ryan (1979a, b) untersuchte die Auswirkung von Siliciumcarbidpartikeln unterschiedlicher Größe (Mohs-Härte 9-10) auf einer Glasfläche verteilt auf natürlichen Zahnschmelz, indem nicht getragene Zähne manuell oder in einer Richtung mit einer mechanischen Abtragungsmaschine über diese Partikel bewegt wurden. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen individueller Kratzspuren auf den Zahnschmelzoberflächen zeigten, dass diese mit breiten Gruben beginnen, sich in verjüngenden Rinnen ausdehnten, um dann schmal auszulaufen. Puech et al. (1981) beschrieben einzelne Merkmale auf

manuell simulierten Zahnoberflächen und verglichen diese mit realen Merkmalen. Sie gingen davon aus, dass diese durch Nahrungsinhaltstoffe, die geringfügig weicher waren als Zahnschmelz, durch die einwirkende Kraft auf den Zähnen hinterlassen wurden. Maas (1991, 1994) fand bei Experimenten mit Zahnschmelz und Siliciumcarbidpartikeln unterschiedlicher Körnung, dass nur unter Druckbelastung oder bei nichtprismatischem Schmelz, nicht aber bei der Belastung durch Scherkräfte die Größe der abrasiven Partikel die primäre Determinante für die Größe der Microwear-Merkmale sein kann. Sie konnte auch zeigen, dass im allgemeinen bei prismatischem Schmelz nicht davon ausgegangen werden kann, dass Ähnlichkeiten in der Breite der Kratzspuren ein Beweis für eine Ähnlichkeit der abrasiven Partikel wäre. Ihre Resultate verdeutlichen, dass Parameter zur Diskriminierung von Ernährungsverhalten zuerst auf eine mögliche Interferenz durch nicht-ernährungsbedingte Faktoren untersucht werden müssen. Aspekte intraspezifischer Variation schließen Unterschiede in der Orientierung von Prismen und Kristalliten relativ zur Abtragungsfacette, entweder als Ergebnis einer Prismenüberkreuzung oder aufgrund von Unterschieden zwischen Proben, und in der Orientierung der Abtragungsfacetten relativ zur Längsachse der Prismen ein. Dass bezüglich der Belastungsrichtung verschiedene Abtragungsmechanismen zugrunde liegen, wird durch die fehlende Übereinstimmung der Prismengrenzen mit den Microwear-Gruben-Grenzen belegt (Maas 1994). Maas (1994), im Unterschied zu Teaford und Runestad (1992), welche zumindest für kleine Gruben eine Übereinstimmung annehmen, geht davon aus, dass sowohl große als auch kleine Gruben von Prismengrenzen unabhängig sind und Größenunterschiede der Gruben ausschließlich durch Variationen der Größe der abrasiven Partikel entstehen und nicht durch Unterschiede im abrasiven Mechanismus. Erste standardisierte Drei-Körper-Abtragungs-Tests mit Hilfe von Kausimulationen durch weichen, aber phytolithenhaltigen Nahrungsbrei zeigten, dass der absolute Abrieb mit zunehmender Partikelgröße stieg (Schnabel et al. 1995). Über die mikroskopischen Veränderungen der Schmelzoberflächen wurden allerdings keine Aussagen getroffen. Erste Untersuchungen zur Quantifizierung und rasterelektronenmikroskopischen Darstellung von standardisiert simulierter dentaler Abtragung und Microwear erfolgten im Rahmen der Diplomarbeit der Verfasserin an der ACTA-Maschine der Klinik und Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie (Gügel 1998, Gügel et al. 2001). Das Design der ACTA-Maschine ermöglichte es, mit unterschiedlichen Nahrungsmitteln, physiologischen Belastungsparametern (Druck, Scherkräfte und Dicke des Nahrungsfilmes) und direktem Gleitkontakt während der Anwesenheit des Nahrungsbreies zu arbeiten (Pallav 1996). Ziel dieser Arbeit war es zu klären, ob eine differenzielle Entstehung von Microwear-Mustern und Merkmalen in Abhängigkeit von verschiedenen Nahrungsmitteln durch eine Simulation möglich war. In einem weiteren Pilotprojekt unserer Arbeitsgruppe konnten erste Experimente an einem Kausimulator (MUC III; Kunzelmann) durch Friedel (2000) im Rahmen ihrer Diplomarbeit durchgeführt werden, die das Ziel hatten, das Konzept der realitätsnahen Simulation des Nahrungsabriebes weiterzuentwickeln.

D. Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit

Thema der vorliegenden Arbeit ist die Entstehung, das Fortschreiten und die Musterbildung dentaler Zahnschmelzabtragung und Mikroläsionen, die als Dentale Microwear beschrieben sind.

Es werden experimentelle Methoden der Zahnmedizin und Dentalanthropologie modifiziert und angewandt, um den Abtragungs- und Microwear-Bildungs-Prozess durch ausgewählte Lebensmittel zu simulieren. Beobachtungsschwerpunkte liegen einerseits in der Simulation von dentaler Abtragung und Microwear und andererseits in der Untersuchung real komplexer Microwear auf natürlich bekauten

Zahnschmelzoberflächen von Individuen aus dem Süddeutschen Raum, die in den Epochen des Spätmesolithikums, des Endneolithikums und des frühen Mittelalters gelebt hatten.

Die Vorgehensweise stellt eine Innovation im Bezug auf eine Synthese der Dynamik der Zahnschmelzabtragung mit dem Entstehungsprozess und den Ursachen Dentaler Microwear und ihrer Muster dar. Unter möglichst der Physiologie angenäherten Bedingungen wurden die erstmals in unserer Arbeitsgruppe begonnenen Arbeiten (Gügel 1998, Friedel 2000, Gügel et al. 2001, Gügel und Kunzelmann 2002) zur Kausimulation, die spezifische Zahnschmelzabtragung an natürlichen Zahnoberflächen und der Entstehungsprozess Dentaler Microwear in Abhängigkeit von homogener Kost untersucht. Die Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Aufklärung der Microwear-Formations-Prozesse und geben Einblick in das Potential der Methode für kleinräumige Gebiete und ihre Interpretationsmöglichkeiten.

Es werden Daten über die Zahnabtragungsrate und den Zahnabtragungswinkel erstmals mit ermittelten Parametern der Dentalen Microwear Analyse historischer menschlicher dia- und synchron lebender Stichproben kombiniert und verglichen. Zur Erfassung der konsumierten Nahrungskategorie dienen die Isotopenverhältnisse von Kohlenstoff und Stickstoff im Kollagen der für die Dentale Microwear Analyse ausgewählten Skelettproben.

Im Besonderen wurden folgende Fragestellungen bearbeitet:

- 1) Verursachen Nahrungsinhaltstoffe (z.B. Opal-Phytolithe aus Cerealien) charakteristische Abtragungsraten und Dentale Microwear?
- 2) Sind Dentale Wear und Microwear-Muster Indikatoren für unterschiedliche Ernährungsverhalten menschlicher Bevölkerungen?
- 3) Welche Ernährungsverhalten, Nahrungsmittelinhaltsstoffe oder Verunreinigungen von Nahrungsmitteln können für die Zahnabtragungs- und Dentalen Microwear-Muster ausgewählter historischer menschlicher Stichproben aus dem geschichtlichen und vorgeschichtlichen bayrischen Raum verantwortlich sein?
- 4) Ein Zahnabrieb bis zur Eröffnung der Pulpahöhle wird sehr selten beobachtet, wenn, dann zu Zeiten größerer Nahrungsumstellungen. Führt Veränderungen in der Nahrungsmittelbeschaffung und -produktion zu Nahrungsmitteln, die einen veränderten bzw. geringeren Abrieb von Zahnschmelz verursachen? Auf welche Weise reagierte der prähistorische und historische Mensch auf Konsequenzen einer veränderten Ernährung im Bezug auf die Funktionalität seines Gebisses und der Zähne?

Archäologische Untersuchungen können aufgrund der Fundsituation und der –umstände potentielle Möglichkeiten für Nahrungsverhalten aufzeigen und sie ermöglichen es, Konsequenzen von tatsächlich gezeigten Verhaltensweisen, die sich am Individuen manifestieren, zu entschlüsseln. Die junge Forschungsrichtung der Experimentalarchäologie und –anthropologie, zu welcher vom Grundsatz her die Simulation dentaler Microwear zu zählen ist, erweitert das methodische Feld und erschließt direkte Beobachtungsmöglichkeiten für kausale Zusammenhänge.

Durch die Analyse von Abrasion, Dentaler Microwear und Zahngesundheit werden fehlende Daten geliefert, die nur retrospektiv (historischer Nahrungswandel) oder durch eine an die Physiologie angenäherte Kausimulation gewonnen werden können. Für die moderne zahnmedizinische Forschung,

insbesondere auf dem Gebiet der Zahnerhaltung, als auch für den innovativen Forschungszweig moderner Nahrungsmittel-Herstellung und -Zubereitung hat der diagnostische Zugang zu einer direkten Wirkung von Nahrungsmitteln und deren Aufbereitung für den Verzehr auf natürliche Zahnschmelzsubstanzen eine große Bedeutung.

Im Folgenden gliedert sich die Arbeit in zwei Teile. Der experimentelle Teil zur Dentalen Abtragung und Microwear beschreibt die Simulationsexperimente am ACTA-Simulator (A) und am Kaukraftsimulator (B) in Kapitel II. A und II. B. Der Teil über die Untersuchungen zur real komplexen Microwear ist in Kapitel III dargestellt.

II. Experimentell erzeugte dentale Zahnschmelzabtragung und Microwear

A. ACTA-Simulation

A 1. Material und Methoden

Um sowohl den Zahnschmelzverlust als auch das spezifische Dentale Microwear Muster in Abhängigkeit vom gekauten Nahrungsmittel in der ACTA-Maschine (Academic Center of Dentistry Amsterdam, De Gee 1986) *in vitro* zu studieren, wurden präparierte Zahnschmelzproben rezent extrahierter, nicht getragener Molaren in einer sog. „Höckerstellung“ in das Probenrad fixiert (Gügel 1998, Gügel et al. 2001). Die ungetragenen Zahnproben entstammten aus der Klinik und Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, München, welche im Verlauf der Behandlung indikationsbedingt von Patienten entnommen werden mussten und für spätere Untersuchungen in NaN_3 -haltiger Ringer-Lösung aufbewahrt wurden.

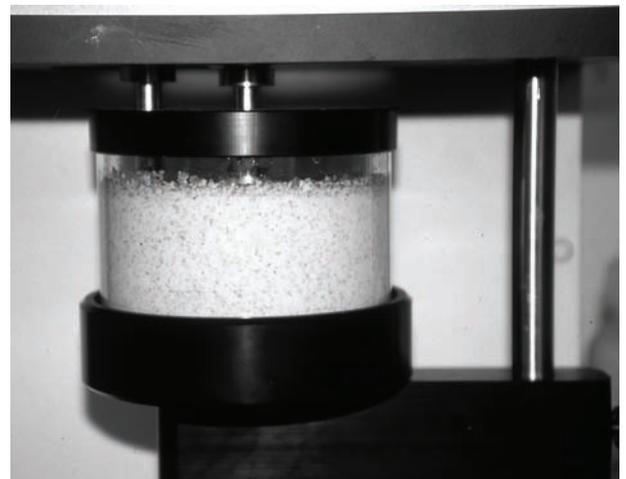
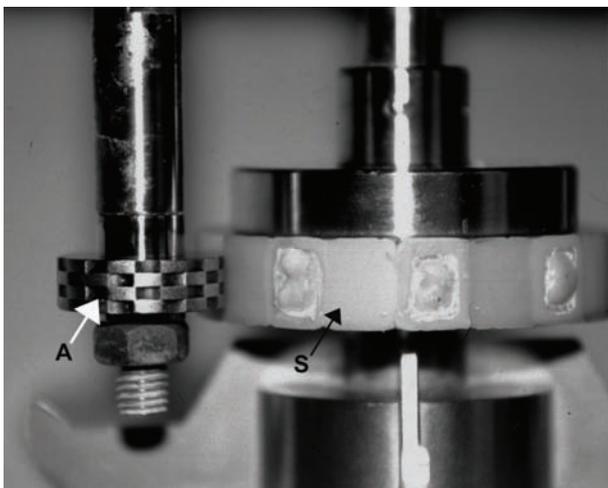


Abb. 16 Anordnung von Proben(S)- und Antagonistenrad(A) während des Experimentes in der ACTA-Maschine (links). Die gesamte Anordnung ist während der Simulation mit Nahrungsbrei bedeckt (rechts).

1.1 Präparation des Probenrades

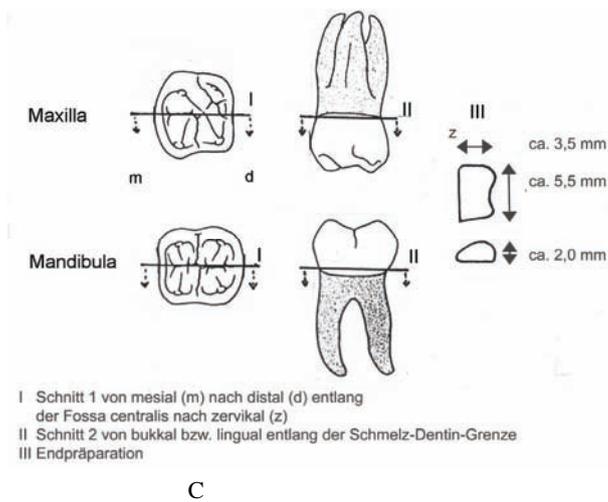
Der ACTA-Kausimulator besteht aus einem Probenrad und einem Antagonistenrad mit unterschiedlichem Durchmesser (Abb. 16, Gügel et al. 2001). Die 20 Kammern des Probenrades wurden mit einem Füllungswerkstoff aus der Zahnmedizin (Heliomolar Ro, Vivadent, Ellwangen, Deutschland), ein mikrogefülltes Komposit, gefüllt (Abb. 17A).



A



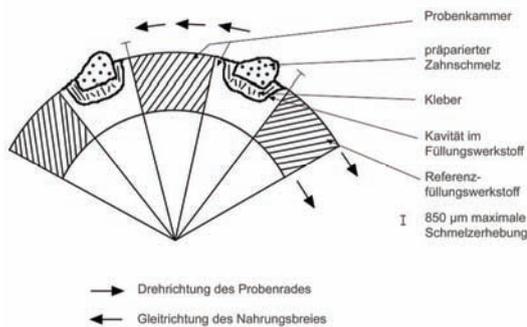
B



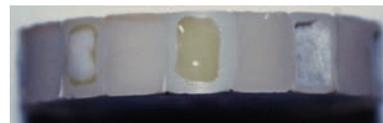
C



D



E



F

Abb. 17 Präparation eines ACTA-Probenrades; A: Einbringen der Zahnfüllungsmaterialien in zwei Schichten in die Kammern (Lichthärtung); B: Kavitätenpräparation in das eingeschlifene Probenrad; C: Schnittführung bei der Zahnschmelzpräparation aus Ober- und Unterkiefermolaren; D: Endpräparation mit dem Zahnarztbohrer (Winkelkopf INTRAmatic Lux 2); E: Schema zur Kammerbestückung des Probenrades; F: Aufsicht auf die Schmelzintarsien im Probenrad;

Nach der vollständigen Polymerisation (48h in Ringer-Lösung, pH 6,7), und dem Einschleifen und Polieren der Oberfläche (Diamantschleifscheiben D 64 grob, D 25 fein) wurde in jeweils 6 Kammern eine Kavität präpariert (Abb. 17B), in welche zugetrimmte Schmelzintarsien (Abb. 17C, D) nichtgetragener (retinierter) Molaren mit einem lichthärtenden Befestigungskomposit (Twinlock cement, Heraeus Kulzer, Wehrheim, Deutschland) eingeklebt wurden (Abb. 17E, F). Um den Effekt der natürlichen Wölbung des Schmelzes zu verstärken und sowohl vertikale (zerknackende - crushing) als auch horizontale (scherende und mahlende – shearing und grinding) Wirkkräfte zu provozieren, wurden die Schmelzproben am okklusalen Beginn um max. 850 µm über die polierte Ebene erhoben, wogegen der zur Schmelz-Dentin-

Grenze gerichtete, zervikale Anteil möglichst plan zur Oberfläche gesetzt wurde (Gügel 1998). Es entstand dabei eine simulierte „Höckerstellung“, die in Abb. 17E mit den Abmessungen und der Orientierung im Probenrad dargestellt wird. Abb. 16 (rechts) zeigt die Anordnung des Proben- und Antagonistenrades zueinander in der ACTA-Verschleißmaschine während des Experimentes. Der Nahrungsbrei bedeckt die gesamte Anordnung vollständig. Die Kammern ohne Schmelzintarsien dienen als interne Abtragungskontrollen.

1.2 Herstellung und Zusammensetzung des Nahrungsbreies (Kartoffel- und Getreideproben)

Zur Herstellung eines Grundmediums für die ACTA-Untersuchungen wurde versuchsweise die Kartoffel aus folgenden Gründen ausgewählt: der geringe Säuregrad der Kartoffel ermöglicht eine pH-neutrale Grundlage für Experimente mit natürlichem Zahnschmelz, die Bindeeigenschaften der Kartoffel sind ähnlich dem Getreide, sodass eine entsprechende Viskosität des Nahrungsbreies gewährleistet ist, und sie enthält keine Phytolithe. Phytolithenspezifische Microwear-Merkmale auf den Zahnoberflächen, die in den Getreideversuchen (Gügel 1998) gefunden wurden, konnten durch das Grundmedium nicht entstehen. Außerdem spielte die Kartoffel seit dem 17. Jahrhundert als Kohlenhydratquelle besonders zu Zeiten des Hungers eine wichtige Rolle in der Ernährung des Menschen in Europa von heute (Heidrich und Kohlberger 1998).

Für die Experimente wurden frische Kartoffeln mit der Schale gewaschen, geschält, nochmals gewaschen und in kleine Würfel von ca. 7 mm Kantenlänge geschnitten. Die anschließende Trocknung erfolgte bis zur Gewichtskonstanz bei einem Flüssigkeitsverlust von 80,8 +/- 0,2 %. Die resultierenden sehr harten und scharfkantigen getreidekorngroßen Würfel wurden standardisiert in einer Drehmessermühle 1x5 s lang grob geschrotet (standardisierte Methode zur Schrotung von Hirse als Referenzgetreide für Abtragungsuntersuchungen an der Klinik und Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, München). Zur Einstellung einer mit den untersuchten Getreiden (Gügel 1998) vergleichbaren Viskosität des Nahrungsbreies wurden Probenrad-Leerläufe bis 50 000 Zyklen ohne Schmelzintarsien durchgeführt, bei welchen die nötige Menge von geschroteter Kartoffel unter Zugabe unterschiedlicher Anteile an im Handel erhältlichem Kartoffelmehl als Kleber zum Volumen der Flüssigkeit (Phosphatpuffer pH 7,45) ermittelt wurde.

Die Abtragungverluste (s. Tabelle 5, S. 49) durch das „Bekauen“ im Kartoffelmedium erwiesen sich als sehr hoch, entgegen den Erwartungen. Die Kartoffel schien als Grundmedium für weitere Experimente ungeeignet. In den nachfolgenden Experimenten wurde deshalb der Dinkel-A (*T. spelta*, Antersdorfer Mühle, Simbach a. Inn) wie bereits in der Pilotstudie als Grundmedium eingesetzt (Gügel 1998, Gügel et al. 2001). Der Dinkel-A (b) verursachte in Voruntersuchungen eine geringe absolute Abtragung von Zahnschmelz. Bei dem Reinigungsvorgang nach heute üblichen Methoden zur Herstellung von Vollkorn wird der Phytolithengehalt des Getreides quantitativ entfernt. Die Getreidekörner wurden in einer Getreidemühle mit Mahlsteinen aus Tonkeramik mit gebundenem Korund im Schrotgang grob geschrotet (b => gängige Methode in den Naturkostläden).

In einem Experiment sollte der Einfluss der Grobheit gereinigten Getreides auf die Abtragung und Microwear von menschlichem Zahnschmelz ermittelt werden. Die Körner des Referenzgetreides wurden nur sehr grob geschrotet, so dass ein Großteil der Körner lediglich gequetscht (nicht standardisiert) und nicht zermahlen vorlagen. Diese Methode wird in heutigen Haushalten dazu verwendet, den Getreideanteil eines vollwertigen Müslis herzustellen.

Für jedes Experiment wurden 4 Portionen à 150 g Kartoffel- bzw. Referenzgetreideprobe sowie die entsprechende Menge Steinmehl mit 220 ml Phosphatpuffer (pH 7,45) unter Zugabe von 1g NaN₃ (Merck, zur Verhinderung des bakteriellen Wachstums) frisch hergestellt und gut gemischt. Der Säuregrad des Nahrungsbreies wurde mit 1N NaOH-Lösung abgepuffert und der pH-Wert konnte bei pH > 6,2 während des gesamten Versuches aufrechterhalten werden (Messung des pH-Wertes des Nahrungsbreies jeweils vor und nach dem Probenwechsel, Mikroprozessor pH-mV-Meter pH 526, Mettler Toledo, Steinbach, Deutschland). Der Grad der Viskosität des Nahrungsbreies wurde vor und nach dem Versuch dokumentiert.

Um den Einfluss von Mühlsteinabrieb, der während der Schrotung von Getreidekörnern auf historischen Mühlsteinen als Verunreinigung im Getreideprodukt enthalten sein kann, auf die Abtragung des menschlichen Zahnschmelzes zu untersuchen, wurde vom Bodenstein, ein Natursandstein („Wendelsteiner“), Steinmehl aus dem Schrotgang von 1861 der Mühle aus Unterschlaubach, Lkr. Fürth (jetzt im Fränkischen Freilandmuseum Bad Windsheim in Funktion aufgebaut) entnommen. Eingewogene Mengen wurden als Verunreinigung dem Referenzgetreide/Grundmedium in den Konzentrationen 10 mg / 100 g (entsprechend der Nachweisgrenze für Silikatgehalt 0,01 %), 1 mg / 100 g (entsprechend der Abrasivität der Phytolithen 0,01 %) und 0,1 mg /100 g (entsprechend 1/10 der Abrasivität der Phytolithen 0,01 %) zugesetzt.

Die Simulationsexperimente zum Abtragungsgeschehen wurden mit drei Dinkelbreizubereitungen durchgeführt. Ein Experiment erfolgte mit Referenzgetreide Dinkel-A, welches sehr grob geschrotet (nicht standardisiert) wurde und jeweils ein Versuch mit grob geschrotetem Dinkel-A (standardisiert), welcher mit definierten Mengen an Mühlsteinabrieb verunreinigt wurde.

1.3 Versuchsdurchführung

Das Probenrad wurde mit einem Quirl an der Drehachse ohne Last festgeschraubt, sodass eine kontinuierliche Durchmischung des Nahrungsbreies gewährleistet war. Das Antagonistenrad wurde an der Lastachse so positioniert, dass es zentral auf das Probenrad auftraf und an beiden Rändern eine Referenzebene von ca. 1,5 mm unberührt ließ. Die Achsen drehten gegenläufig und mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, um das laterale Abgleiten der Kiefer (slip) hin zur zentrischen Okklusion im Kauzyklus zu simulieren. Dabei betrug die Drehfrequenz für das Probenrad 60/min, für das Antagonistenrad 127/min (15% slip). Das Antagonistenrad arbeitete mit einer konstanten Last von 15 N um weitgehend physiologische Beißkräfte zu simulieren (Eichner 1963, DeLong, Douglas 1983). Ein Testzyklus war nach 50 000 Umdrehungen (ca. 16 h), der gesamte Versuch nach insgesamt 200 000 Umdrehungen - entsprechend einem Jahr „Kauen“ (Bates et al. 1975) - beendet.

1.4 Vorbereitungen zur SEM-Analyse simulierter Microwear an hochauflösenden Replikaten der Zahnschmelzintarsien im Verlauf

Zur Analyse der Dentalen Microwear wurden die Schmelzproben mit hochauflösendem Silikon (President Plus Jet light body, Zeichnungsschärfe von 1 µm, Coltène Whaledent, Langenau, Deutschland) nach der Methode von Beynon (1987) zu Beginn, nach 5 000, 50 000, 100 000, 150 000 und 200 000 Kauzyklen abgeformt. Die Negativ-Replikate wurden nach Einhaltung der kurzen Abbindezeit mit Kunstharz (Araldite XW 396 und Araldite XW 397, 10 Teile : 3 Teile, Ciba Geigy, Basel, Schweiz) abgegossen. Nach 48 h Aushärungszeit wurden die Positiv-Replikate der simulierten Zahnschmelzintarsien auf Aluminiumträger mit Leitsilber aufgeklebt und 6,5 min bei 0,1 mbar und 20 mA mittels einer Sputteranlage (EMITECH K 550, LVC-76, Science Services, München, Deutschland) mit einer weichen

Goldschicht für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung beschichtet. Die SEM-Untersuchungen wurden an einem Rasterelektronenmikroskop LEO1430VP (LEO Elektronenmikroskopie, Oberkochen, Deutschland) (Abteilung Biodiversitätsforschung / Anthropologie der Fakultät für Biologie, Ludwig-Maximilians-Universität München) durchgeführt, an welchem eine digitale Speicherung der Videosignale variabler Auflösung möglich ist.

Die abradierten Schmelzoberflächen wurden bei 30-, 100- und 200-facher Vergrößerung aufgenommen. Die Spannungen der Kathode betragen 5 bis 15 Kilovolt, der Arbeitsabstand wurde auf 3 bis 7 mm eingestellt. Die Speicherung der Videosignale erfolgte im Tif-Format. Die REM-Bilder wurden mit Hilfe des semiautomatischen Computervermessungsprogrammes „Microware 3.0 und 4.2“ (Ungar et al. 1991, Ungar 1995) auf einem PC ausgewertet.

1.5 Profilometrie und 3D-Laserscanning zur 3dimensionalen Ermittlung der absoluten Abtragung von Zahnschmelz

Die Zahnschmelzoberfläche wurde sowohl zu Beginn (baseline) als auch nach 200 000 Kauzyklen (follow up) am Perthometer (PRK/S3P, Feinprüf Perthen, Hannover, Deutschland) abgetastet (Abb. 18).

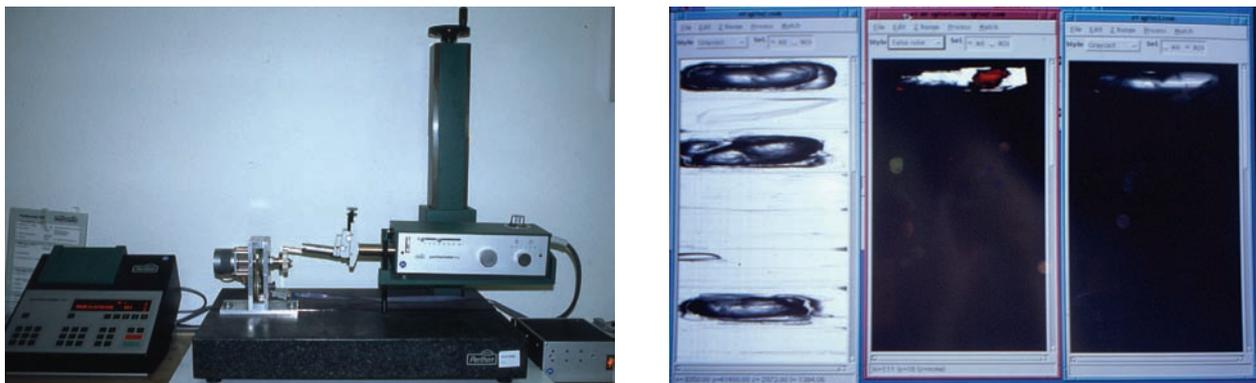


Abb. 18 Links: Probenrad zur 3dimensionalen profilometrischen Abtastung am Perthometer Rechts: Beispiel einer 3D-Match Prozedur der profilometrischen Abtastung eines Probenrades; linke Spalte: zu Beginn (baseline), mittig: Differenzbild nach Überlagerung, rechts: nach 200 000 Kauzyklen (follow-up)

Der günstige Umstand, dass sich die Arbeitsgruppe um Prof. Kunzelmann der Klinik und Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, München mit den methodischen Aspekten der Verschleißanalyse von Füllungswerkstoffen beschäftigt, ermöglichte den Zugang zu der 3D-Laserscanning-Technologie, die von Mehl et al. (1993) ausgearbeitet und zur Anwendung in der zahnmedizinischen Forschung weiterentwickelt (Mehl et al. 1997) wurde.

In der vorliegenden Untersuchung wurde die 3D-Laserscanning-Technologie genutzt, um einerseits einen direkten Vergleich zur profilometrischen Abtastung zu erhalten und um andererseits den Verlauf der Abtragung im Rahmen der Aufklärung des Microwear-Bildungs-Prozesses zu dokumentieren. Eine profilometrische Dokumentation des Abtragsverlaufes wurde bislang nicht durchgeführt. Der Grund hierfür lag in der langen Dauer der Abtastung (jeweils 16 h für die einmalige Abtastung eines Probenrades) und der damit auch verbundenen Austrocknungsgefahr für den in der Simulation zu bekauenden Zahnschmelz. Zudem hatte die Quantifizierung der Abtragungsraten und die Ursachenforschung über den Dentalen Microwear-Bildungs-Prozess für die zahnmedizinische Forschung bislang nur eine geringe Bedeutung, ein Umstand, der sich jedoch in den vergangenen Jahren gewandelt

hat (Crothers 1992, Condon und Ferracane 1996, Mair et al. 1996, Mehl et al. 1997, Kaidonis et al. 1998, Pelka et al. 1998, Kelleher und Bishop 1999, Sengupta 1999). Eine Abformung der Oberflächen nach geringeren Anzahlen von Kauzyklen wäre jedoch möglich gewesen, der Aufwand hierzu und das Fehlen von Auswertungsroutinen hätten diese Vorgehensweise nicht gerechtfertigt.

Die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise diente der Ermittlung der absoluten Höhenverluste in μm nach 200 000 Zyklen, die vergleichbare Ergebnisse wie die profilometrischen Abtastungen erbringen und eine Analyse des Verlaufes des Abtragungsgeschehens ermöglichen sollte.

Aufgrund der Transluzenz (Lichtdurchlässigkeit und diffuse Reflektion von Licht) natürlicher Zähne eignen diese sich nicht direkt für das Laserscanning (Spiegelung, Reflexion). Deshalb wurden die zu Beginn des Experimentes und nach 200 000 Zyklen hergestellten hochauflösenden Silikonreplikat, die ohnehin für die simultane Dentale Microwear Analyse (Negativ-Replikat) benötigt wurden, für das 3D-Laser-Scanning präpariert. Nach Einhaltung der kurzen Abbindezeit wurden die Abgüsse mit Gips (GC FUJIROCK® EP; GC Europe N.V.; 100g Pulver mit 20 ml Aqua dest., im Vakuum gemischt) ausgegossen. Nach vollständiger Aushärtung (ca. 16 h) konnten die Positivreplikat aus der Silikonform gelöst und nach der unten beschriebenen Methode gescannt werden.

Zur Untersuchung des quantitativen Abtragungsverlaufes wurde das Probenrad jeweils zu Beginn, nach 50 000, 100 000, 150 000 und 200 000 Zyklen der Simulation im Abstand von ca. 20 cm mit einem Reflexionsspray (Met-L-Check, Developer D70, NDT Italiana, Concorrezzo, Italien) dünn beschichtet.

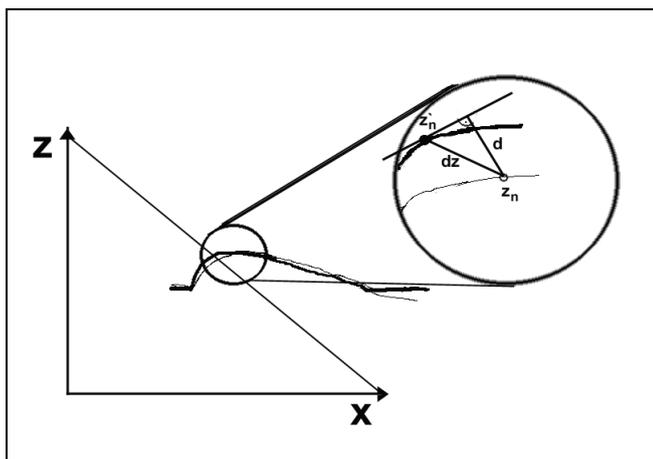
Nach einer Trocknungszeit von 5 min konnte das Probenrad (bzw. nach der Aushärtungszeit des Gipses) direkt im 3D-Laser-Sensor (LASERSCAN 3D PRO, Willytec, München, Deutschland) (Mehl et al. 1997) mit einer Schrittweite von 109 μm und einer Schrittzahl von 1500 vermessen (Mehl et al. 1996a, Mehl et al. 1997) und die Daten automatisch gespeichert werden. Hierbei ermöglichte die Lichtlinie einer Laserdiode das Abtasten von ca. 512 Oberflächenpunkten innerhalb von 40 msec, d.h. 500x schneller im Vergleich zur profilometrischen Methode. Diese Oberflächenpunkte wurden unter einem bestimmten Triangulationswinkel auf einen CCD-Chip projiziert. Die Höheninformation für jeden Oberflächenpunkt war durch die seitliche Auslenkung des Laserstrahles gegeben. Durch das Verschieben der Schmelzprobe auf einem Schrittmotor entlang der y-Achse, kann die gesamte 3D-Oberfläche Linie für Linie abgetastet werden.

1.6 Mathematisches Überlagerungsverfahren der 3dimensionalen Datensätze von nicht abradiertem (baseline) und abradiertem Zahnschmelz (follow-up)

Durch die Überlagerung der 3D-Daten der nichtabradierten (baseline) mit denjenigen der abgetragenen Probe (follow-up) war eine Verschleißberechnung nach dem Prinzip der Superpositionierung möglich (Kunzelmann 1997, Mehl et al. 1997). Die Datensätze der dreidimensional vermessenen Zahnoberflächen (Profilometrie und 3D-Laserscanning) dienten als Eingabewerte für den Matching-Prozess. Die übereinstimmenden Bereiche zwischen baseline und follow-up waren, da keine exakte Positionseinstellung möglich ist, gegeneinander verschoben. Mit Hilfe eines nicht-linearen Gleichungssystems wurden die Lageparameter der Drehung und Verschiebung berechnet. Dieses Gleichungssystem ist nicht exakt lösbar, da durch das Sensorrauschen, Abdruck- oder Besprühvariationen und Schmelzabtrag die Bilder nicht genau übereinstimmen. Gelöst wurde dieses Problem durch eine

wiederholt durchgeführte Näherungsberechnung. Als Qualitätsparameter diente der quadratische Restfehler (Kunzelmann 1997, Mehl et al. 1997).

Der quadratische Fehler ist nicht die Differenz der Z-Werte dz zwischen den Punkten z_n und z'_n , sondern wird über den Abstand d des Punktes z_n auf der Oberfläche der nicht abgetragenen Probe zur Tangentenebene des entsprechenden Punktes z'_n auf der abgetragenen Probe bestimmt (Abb. 19, nach Kunzelmann 1997). Für flache oder abgeflachte Proben wird zwischen diesen beiden Möglichkeiten jedoch kein Unterschied erwartet, Unterschiede ergeben sich im besonderen bei steilen Bereichen z.B. bei der Untersuchung intakter Zähne mit vollständigem Relief.



Der quadratische Fehler zwischen den zu überlagernden Zahnschmelzoberflächen wird durch den Abstand d des Punktes z_n auf der nicht abgetragenen Oberfläche zur Tangentenebene des entsprechenden Punktes z'_n der abgetragenen Oberfläche bestimmt; dünne Linie = baseline, kräftige Linie = follow up (Hewlett et al. 1992, modifiziert aus Kunzelmann 1996).

Abb. 19 Überlagerung von baseline und follow-up

Die hohe Datendichte erlaubte eine mechanische Vorjustierung durch eine interaktive Vorjustierung zu ersetzen. Durch die Markierung von drei sich ungefähr entsprechenden Punktepaaren (z.B. sich entsprechende Höcker oder Fissuren) sollte eine möglichst rasche und zuverlässige Überlagerung möglich sein. Folgende Match-Parameter wurden manuell gesetzt:

Bei Proben, die keine entsprechenden Markierungen zuließen, wurde die Match-Routine nach folgenden Abbruchkriterien abgebrochen:

- es erfolgte keine deutliche Lösungsverbesserung innerhalb einer bestimmten Anzahl von Wiederholungen;
- die Maximalzahl der erlaubten Wiederholungen wurde überschritten;
- eine vorgegebene Mindestanzahl an definierten Pixel wurde unterschritten.

minimale Matchpunktzahl	800
Ausreißerquantil	3,50
Iterationen	20 000
Standardabweichung	<20
minimal valid difference (mvd)	-30 μm

Erst nach erfolgreicher Zuordnung (Standardabweichung < 20 μm) konnte von jedem Koordinatenpunkt anhand der ermittelten Drehungs- und Verschiebungsparameter das follow-up-Bild (Abb. 20b) auf dem baseline-Bild (Abb. 20a) abgebildet werden. Die abradierte Fläche wurde mit dem Cursor markiert und statistisch ausgewertet. Unterschiede die z.B. durch den Schmelzabtrag während des Kauvorganges verursacht wurden, konnten nun als Differenzbild (Abb. 20c) dargestellt werden.

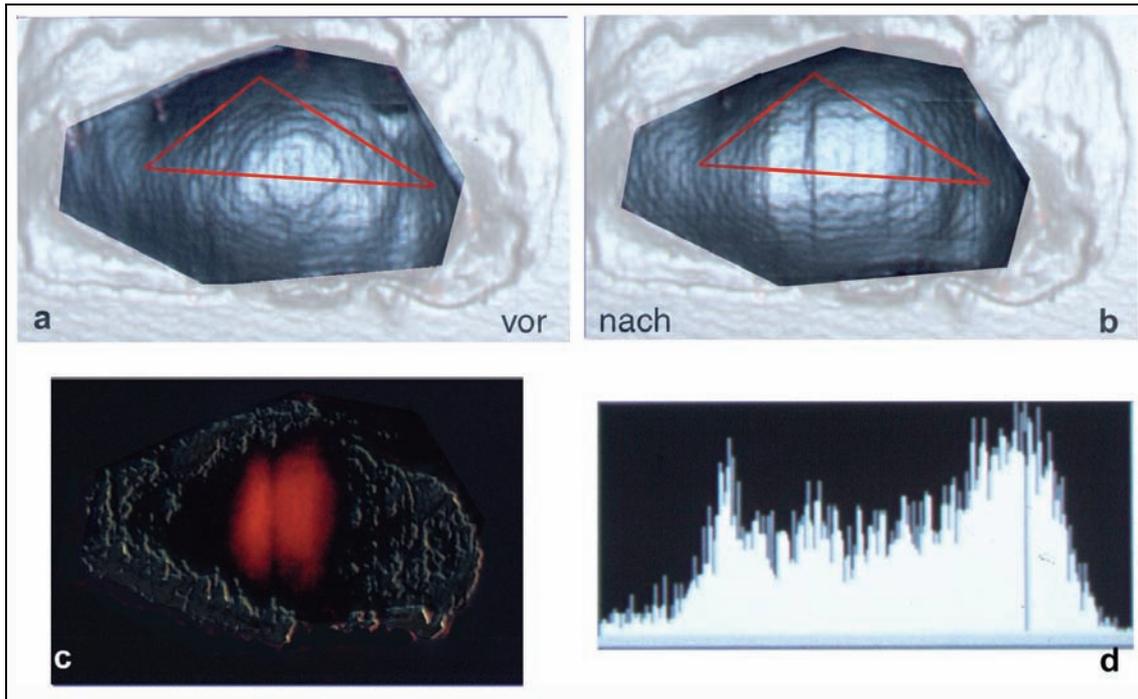


Abb. 20 3D-Laserscanning und mathematische Überlagerung von experimentell abgetragenen Zahnschmelzoberflächen; a) vor der Simulation b) nach der Simulation (am Beispiel Hirse, standardisiert, 200 000 Zyklen) c) Differenzbild d) Beispiel einer Höhenlinie x entlang der y-Achse mit den Werten z.

Nach erfolgreicher Überlagerung wurden die Messergebnisse, im Besonderen der vertikale Zahnschmelzverlust (mean und median berechnet in μm), der maximale Schmelzverlust als Einzelwert (entspricht dem minimalsten Wert – min berechnet in μm) und der flächenbezogene Substanzverlust (volumen total, berechnet in μm^3) in einem Datenfile gespeichert und in eine Excel-Datei überführt.

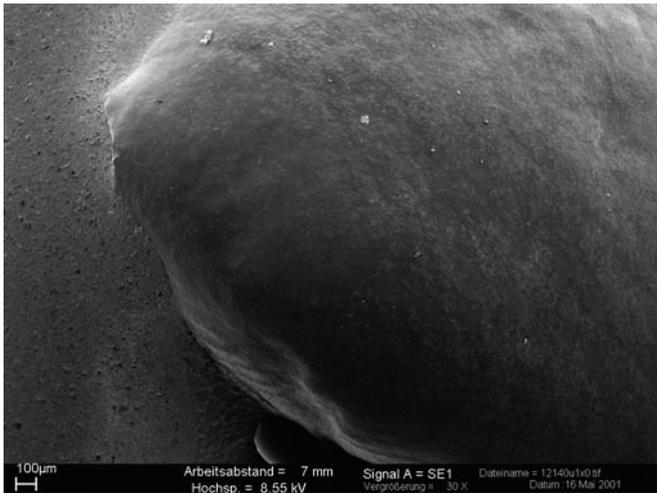
Die Auswertung der Abtragungsdaten erfolgte nach Aufbereitung der Messparameter mit dem Statistikprogramm SPSS 11.0.

A 2. Ergebnisse der ACTA-Simulation

Die folgenden Untersuchungsergebnisse sind als Fortführung der Pilotstudie (Gügel 1998, Gügel et al. 2001) über die Zahnschmelzabtragung und die Bildung unspezifischer und spezifischer Microwear in Abhängigkeit von der zu kauenden Getreidezubereitung zu sehen. Insbesondere war zu klären, welchen Einfluss ein unterschiedlicher Verunreinigungs- oder Grobheitsgrad auf die absolute Abtragung und die Abtragsrate hat. Es wurden standardisierte Mengen an Mühltrieb mit dem Referenzgetreide vermengt und in der Simulation als Getreidebrei eingesetzt.

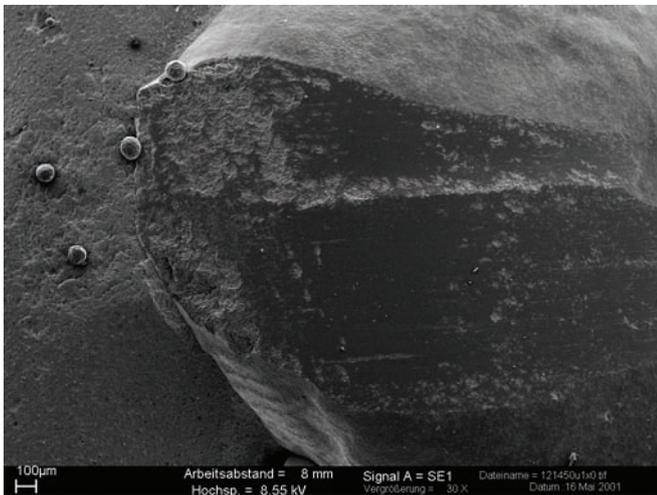
2.1 Morphologische und morphometrische Charakteristik entstandener Schliiffacetten

An ungetragenem Zahnschmelz (Abb. 21, 0 Zyklen, Perikymatien sind noch deutlich zu erkennen) war bereits nach 50 000 Zyklen ein deutlicher Abrieb zu sehen. Bei geringer Vergrößerung (30x) war eine asymmetrische Veränderung der Zahnschmelzdicke und der neu entstandenen Oberflächen von okklusal nach zervikal erkennbar (Abb. 21). Der okklusale Rand flachte mit zunehmender Zykluszahl ab. Er näherte sich zunehmend dem Niveau der Polier- und Präparationsebene (Zement) an. Die Höckerstellung wurde sukzessive abgetragen. In zervikaler Richtung vergrößerte sich die entstandene Abriebfläche nach 50 000 Zyklen nur noch geringfügig. Der Höhenverlust an Zahnschmelz konzentrierte sich okklusal auf die Erstkontaktbereiche mit dem Nahrungsbrei, welcher nach zervikal abgleiten konnte. Es bildete sich bereits während der ersten 50 000 Zyklen okklusal ein komplexes Muster an Zahnschmelzveränderungen (Abb. 21, 22, 23). In zervikale Richtung bildete sich eine von Kratzspuren dominierte Schliiffebene (Abb. 21; 0 – 200 000 Zyklen). Das okklusal komplexe Merkmalsmuster (Bruchoberflächen der Schmelzprismen in ihrem Verlauf) wurde während der Kausimulation fortlaufend abgeändert und überschliiffen (Abb. 21, 22, 23).

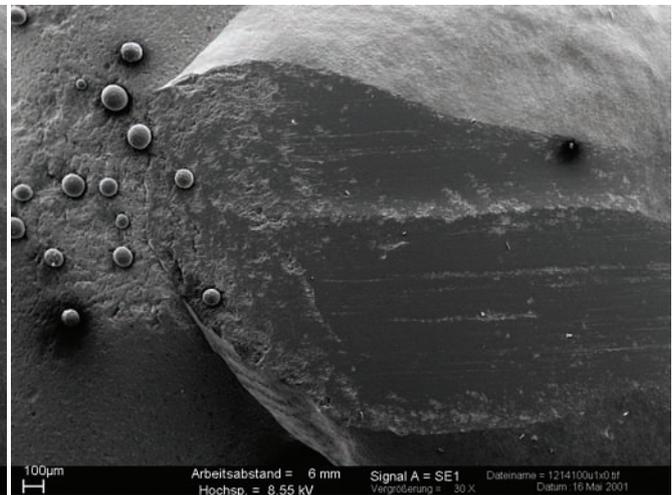


0 Zyklen

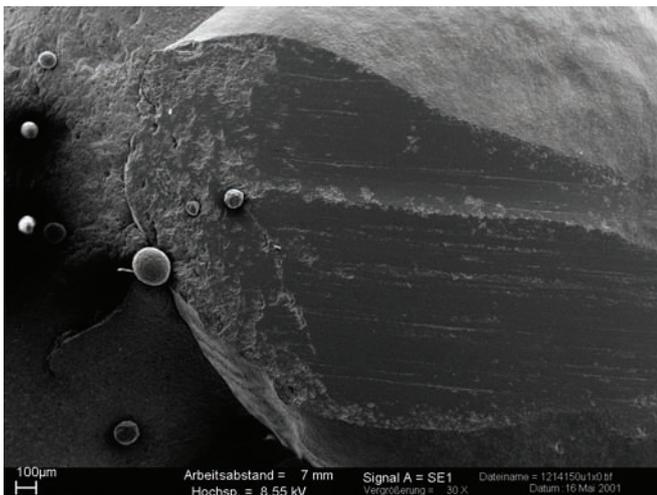
→ Kau- bzw. Gleitbewegungsrichtung (okklusal → zervikal)



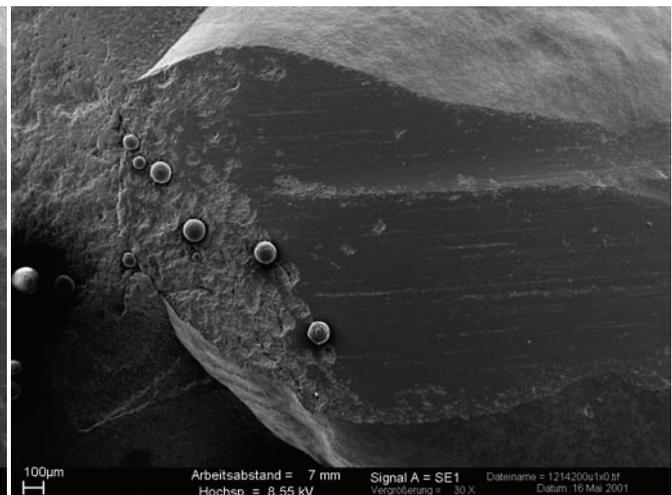
50 000 Zyklen



100 000 Zyklen

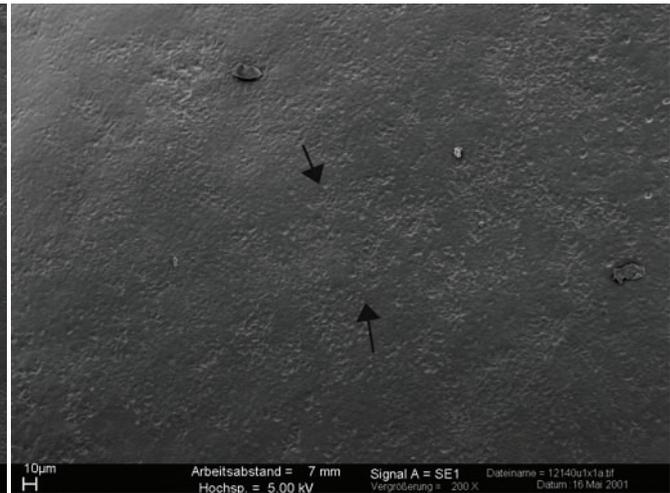
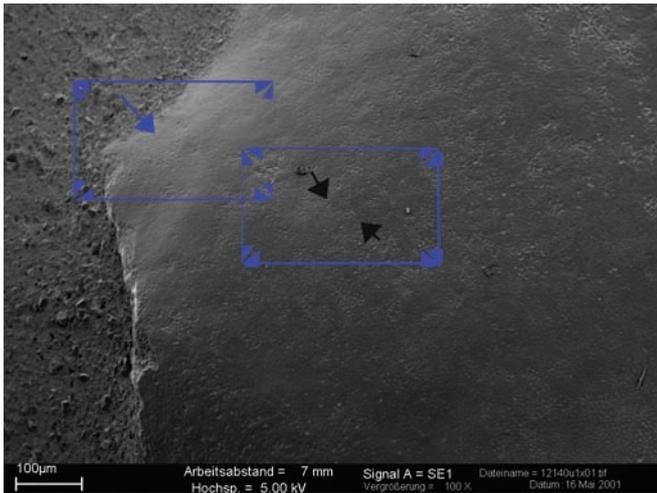


150 000 Zyklen



200 000 Zyklen

Abb. 21 REM-Aufnahmen 30x einer entstehenden Schlifffacette im Verlauf einer ACTA-Kausimulation auf menschlichem Zahnschmelz; Nahrungsbrei: Dinkelbrot mit Verunreinigung durch Steinmehl 10 mg/100 g (Replikate), die kugelförmigen Auflagerungen sind Abgussartefakte.

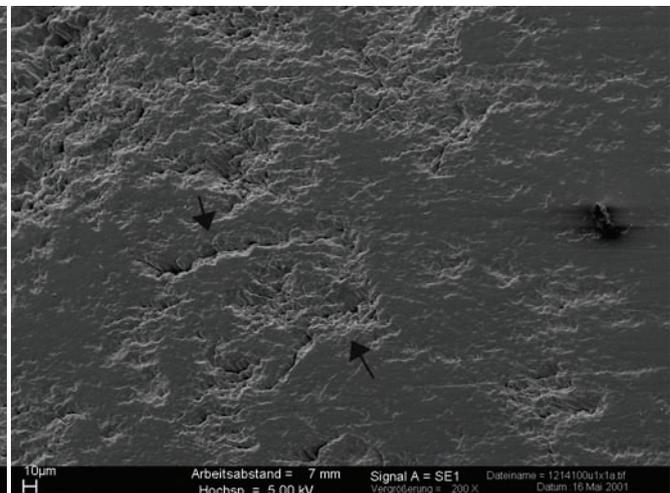


Übersicht 100x (Bildausschnitt schwarze Pfeile)
 → Kau- bzw. Gleitbewegungsrichtung (okklusal → zervikal)

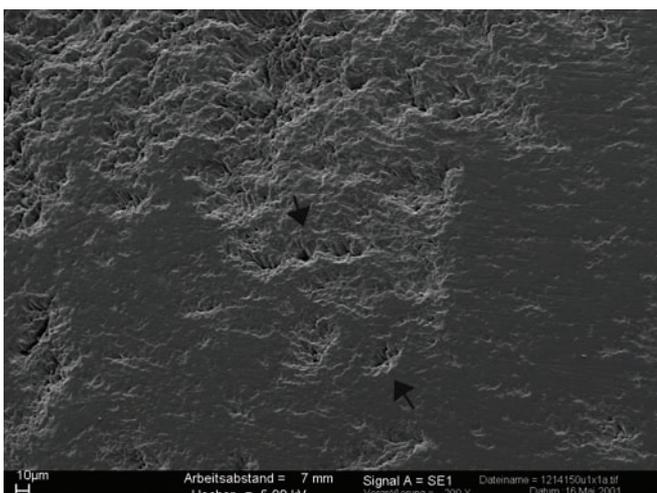
0 Zyklen



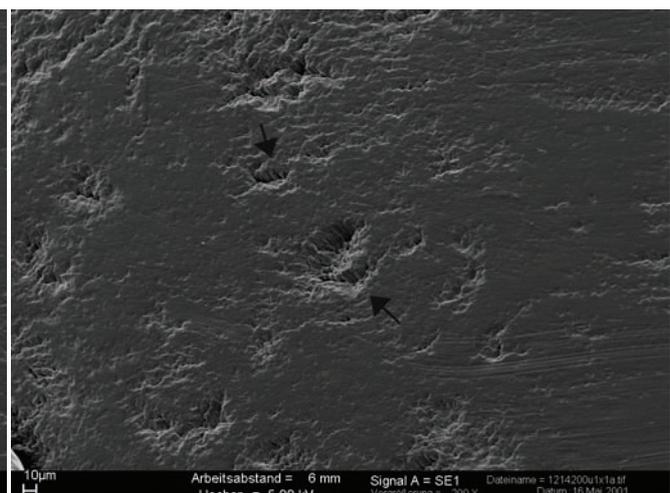
50 000 Zyklen



100 000 Zyklen

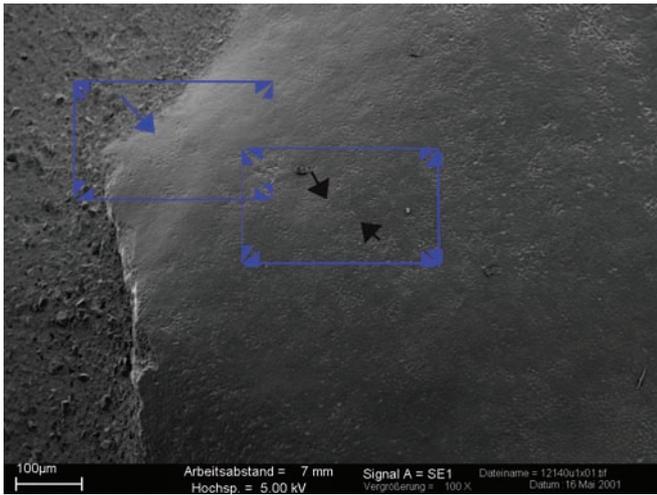


150 000 Zyklen

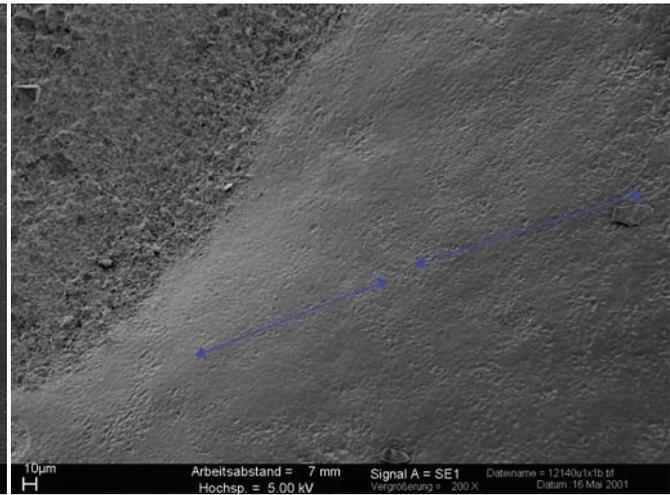


200 000 Zyklen

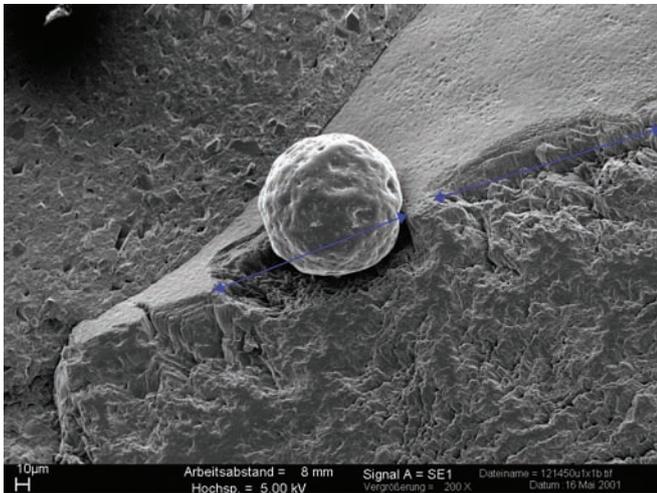
Abb. 22 REM-Aufnahmen 200x Bildung und turn-over von Mikroläsionen (schwarze Markierungen) auf einer entstehenden Schliiffacette im Verlauf einer ACTA-Kausimulation auf menschlichem Zahnschmelz; Nahrungsbrei: Dinkelbrot mit Verunreinigung durch Mühlsteinabrieb 10 mg/100 g (Replikate)



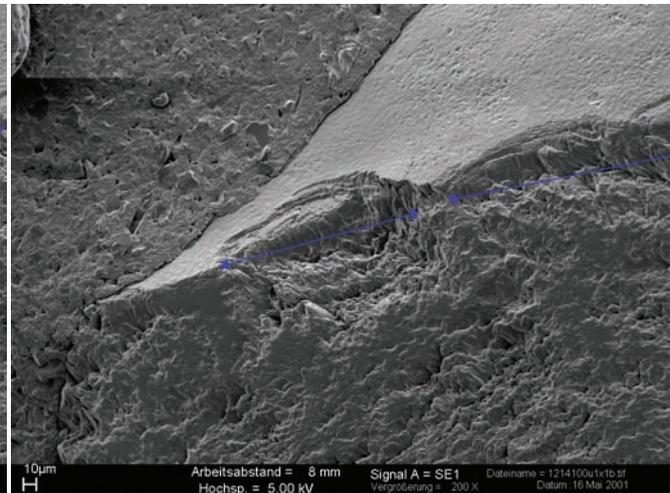
Übersicht 100x (Bildausschnitt blauer Pfeil)
 → Kau- bzw. Gleitbewegungsrichtung (okklusal → zervikal)



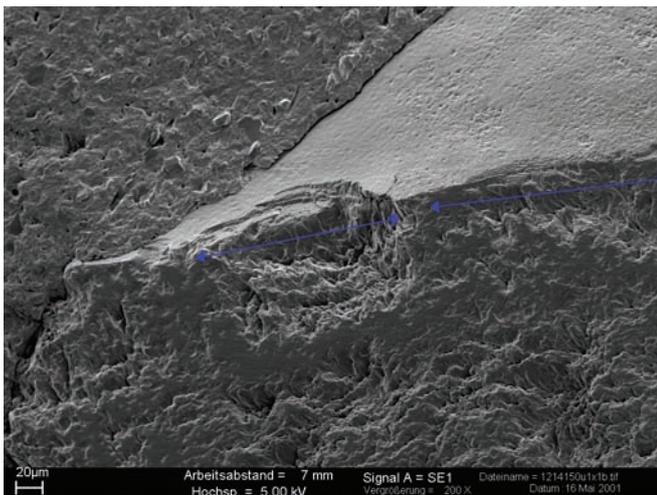
0 Zyklen



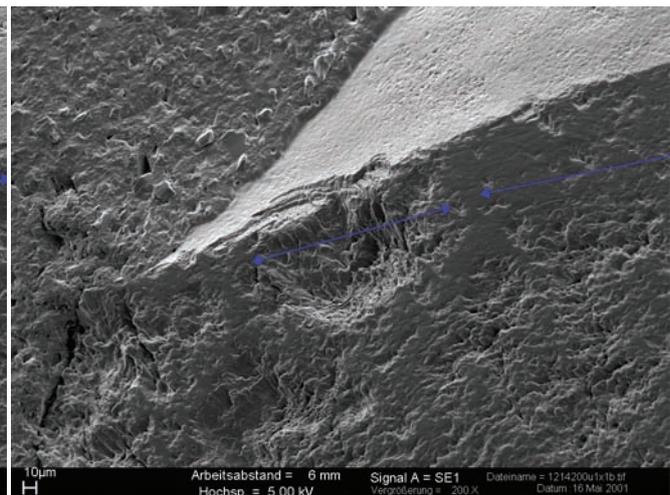
50 000 Zyklen



100 000 Zyklen



150 000 Zyklen



200 000 Zyklen

Abb. 23 REM-Aufnahmen 200x Bildung und turn-over von zwei Mikroläsionen (Pfeilmarkierungen) am Rand einer entstehenden Schliffacetten im Verlauf einer ACTA-Kausimulation auf menschlichem Zahnschmelz; Nahrungsbrei: Dinkelbrot mit Verunreinigung durch Mühlsteinabrieb 10 mg/100 g (Replikate); bei der kugelförmigen Auflagerung (50 000 Zyklen) handelt es sich um ein Abgussartefakt;

Charakteristisch für den Abtragungsverlauf in der ACTA-Simulation, unabhängig von dem zu kauenden Nahrungsbrei, war auch mikrometrisch (Abb. 24) eine nicht lineare Zunahme der abradierten Fläche. Die Flächenzunahme war zu Beginn der Simulation sehr rasch, wie auch in der morphologischen Darstellung deutlich sichtbar ist (Abb. 21), nahm bereits nach 5 000 Zyklen stark, nach 50 000 Zyklen etwas geringer ab, nach 100 000 Zyklen veränderte sich diese nur noch geringfügig (Abb. 21, 22, 24).

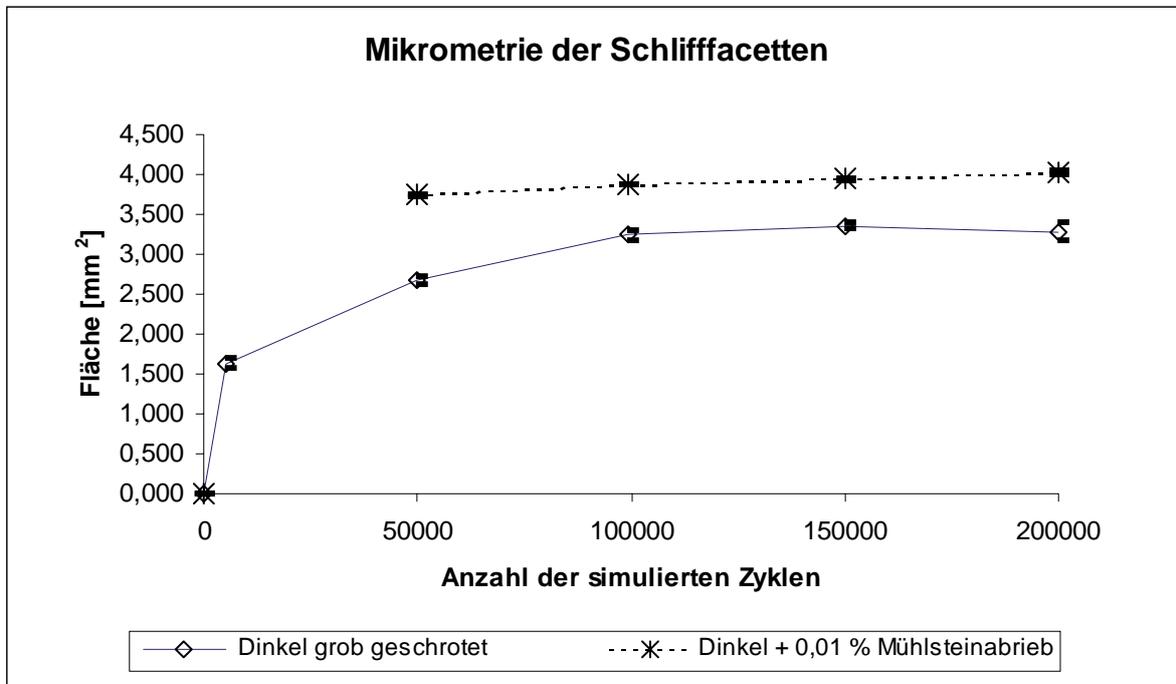


Abb. 24 Beispiel für die Entstehung und Flächenzunahme von Schliffacetten auf simulierten Zahnschmelzproben durch das „Kauen“ von Nahrungsbrei. Die Flächen wurden jeweils 3x vermessen (Microware 4.2, Peter Ungar) Die Graphik zeigt die Mittelwerte und den 1s-Bereich.

2.2 Bildung und Auslöschung von dentaler Microwear im Verlauf der Simulation

Exemplarisch wurden Schmelzproben ausgewählt, die ein besonders rasches Abtragungsgeschehen im Verlauf zeigten. In den Abbildungen rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen definierter Bereiche der simulierten Zahnschmelzoberflächen (Übersicht 100x; Detailaufnahmen 200x; Abb. 22 und 23 Dinkel-A modern verarbeitet mit Mühlsteinabrieb 0,01%) sind einzelne Beispiele für sukzessive Abtragung von Zahnschmelz markiert. In Abb. 22 sind nach 50 000 Zyklen zwei tiefe, leicht gebogene Rinnen markiert, die auf dem ungetragenen Zahnschmelz nicht vorhanden waren. Sie sind von einer Vielzahl von Schmelzaussprengungen und nicht deutlich als Einzelmerkmale abgrenzbaren Läsionen umgeben. Mit zunehmendem Überkauen flachten die markierten Rinnen ab (100 000 Zyklen) und nahmen die Gestalt einer gezackten Rinne mit jeweils einem zentralen Loch an, während der nahe umgebende Schmelz zunehmend einer polierten Oberfläche ähnelte. Nach 150 000 Zyklen erschien die obere Rinne als drei eng aufeinanderfolgende Gruben, die untere nur noch als eine kleine Grube. Nach 200 000 Zyklen war eine eindeutige Zuordnung der Merkmale nicht mehr möglich. Fast alle Merkmale, die zwischen 0 und 50 000 Zyklen aufgetreten waren, waren überschliffen, es existierten nur noch die tiefsten Bereiche der ursprünglichen Schmelzläsionen. Im Verlauf der Kausimulation entstanden immer wieder neue Läsionen, die fortlaufend überschliffen wurden. Mit fortschreitender Abtragung wurde die zu bekauende Oberfläche in Richtung der einwirkenden Kräfte so eingeschliffen, dass die Kaubelastung auf den Zahnschmelz minimiert und die anfänglichen Schmelzaussprengungen reduziert oder verhindert

wurden. In Abb. 23 konnte eine randständige Grube der entstehenden Facette und daneben eine Ablätterung von Schmelz im Verlauf des Kauvorganges verfolgt werden. Die Bildung der Merkmale fand zwischen 0 und 50 000 Zyklen statt. Beide Merkmale nahmen sukzessive an Ausdehnung und Tiefe ab. Nach 200 000 Zyklen war die Grube noch deutlich erkennbar, aber wesentlich kleiner und abgerundet, die Ablätterung war vollends überschliffen. Eine Bildung spezifischer Merkmale war nicht zu erwarten, da außer Sandsteinpartikeln und grob geschrotetem Dinkel-A keine definierten Abrasivstoffe (z.B. Phytolithe) im Medium vorhanden waren.

2.3 Absoluter Zahnschmelzverlust

Zur Überprüfung der Aussagekraft des Matching-Verfahrens wurden vor der mathematischen Überlagerung der baseline und follow-up- Daten identische Datensätze überlagert. Im günstigsten Fall führte das Überlagerungsverfahren zweier identischer Bild- bzw. 3D-Datensätze zu keinem Differenzbild, d.h. die Parameter ergaben den Betrag 0. In Tabelle 1 sind drei Beispiele aufgeführt, die Abweichungen vom Erwartungswert 0 belegen. Während die Mittelwertparameter (mean und median) relativ robust annähernd einen Betrag 0 ergaben, zeigte der maximale Wert des Schmelzverlustes als Einzelwert eine deutliche Abweichung von variabler Größe. Das Differenzvolumen des Schmelzes wurde immer mit negativem Vorzeichen ermittelt und befand sich in der Größenordnung bis zu einem Wert von kleiner $-10E+07$. Zur Verdeutlichung hier ein kleiner Exkurs: Läge eine Fläche der Kantenlängen 5,5 mm x 3,5 mm vor (ungefähre Fläche einer zugetrimmten Schmelzprobe), entspräche dies bei planer Oberfläche einer Höhendifferenz von kleiner 5 μm . Um diese Differenz möglichst gering im besonderen für die Auswertung der unterschiedlich geformten Schmelzoberflächen zu halten, wurde ein Überlagerungsverfahren von ausgewählten Referenzpunkten außerhalb der abradierten Flächen nur akzeptiert, wenn sie ein Limit (mvd = minimal valid difference) kleiner als 30 μm nicht überschritten (Mehl et al. 1997).

Tabelle 1. Beispiele für Matching-Ergebnisse identischer Bild- bzw. 3D-Datensätze

	Schmelzverlust mean (μm)	s +/-	Schmelzverlust median (μm)	Maximaler Schmelzverlust (μm)	Schmelzverlust Volumen (μm^3)
0-0 Kontrolle	-0,1	n.b.	0,0	-138,4	-6,47E+07
0-0 Kontrolle	-1,15	n.b.	-0,8	-32,0	-9,78E+07
200 - 200 Kontrolle	0,3	n.b.	0,3	-39,2	-4,56E+07

Die maximalen Schmelzverlustwerte wurden weiterhin dokumentiert, sie sind für die Abtragungsdiagnostik, da sie nur Einzelwerte darstellen, kein geeigneter Parameter.

2.3.1 Abhängigkeit von der Abtastmethode

Bei der Ermittlung der absoluten Abtragung in Abhängigkeit von der Abtastmethode konnten gut übereinstimmende Werte erzielt werden (Tab. 2 und 5). Anhand der Abtragungsergebnisse von vier Getreidezubereitungen konnte mit einem nichtparametrischen Test (Kruskal-Wallis-Test, SPSS 11.0, niedrige Stichprobenzahl) gezeigt werden, dass die Getreide auf einem Signifikanzniveau von 0,1% in einer Rangfolge, die für Dinkel-B und Weizen vertauscht ist, abrasiv wirken (Tab. 3). Mit einem weiteren Nichtparametrischen Test (Mann-Whitney-U-Test, SPSS 11.0) wurde ein Signifikanzvergleich der Abrasivität durchgeführt. Auf einem Signifikanzniveau von 5% wurde der Dinkel-A (b) als niedrig, Dinkel-B (m) und Weizen (m) als mittel-abrasiv und Hirse als hoch-abrasiv eingeordnet (Tab. 4). Das

Ergebnis war für das 3D-Laser-Scanning deutlich, eine signifikante Trennung der Abrasivität von mittel- zu stark-abrasiv war mit der profilometrischen Methode nicht gegeben (Tab. 4).

Tabelle 2. Zahnschmelzabtragung (median) nach 200 000 Kauzyklen in der ACTA-Maschine in Abhängigkeit von der Abtastmethode

		Dinkel-A (b) ²	Dinkel-B (m) ²	Weizen (m) ²	Hirse (h) ²
% Ascherest im Trockengewicht ¹		< 0.01	0.20	n.b. ³	1.46
3D-Laserscanning	Zahnschmelzverlust median (μm) \pm 1sd ⁴	-7.6 (1,5)	-21.8 (4.1)	-22.1 (6.7)	-33.2 (6.2)
Profilometrie	Zahnschmelzverlust median (μm) \pm 1sd ⁴	-8.3 (3.1)	-24.6 (4.2)	-17.8 (2.3)	-27.1 (5.4)
	N (Proben)	4	4	4	4

¹ Nach feuchter und trockener Veraschung, besteht vorwiegend aus Silikaten (cf. Gügel et al. 2001)

² b, Naturkostladen, Mahlgang in einer Mühle mit Korund-Keramik; m, Mahlgang in einer historischen Mühle auf Sandstein; h, Mahlgang in einer modernen Haushaltsmühle, standardisiert

³ Nicht bestimmt, aber gewöhnlich ähnlich wie Roggen und Hafer 0.01 – 0.03; Runge pers. Mitteilung.

⁴ Standardabweichung in Klammern

Tabelle 3. Nichtparametrischer Test (Kruskal-Wallis-Test, SPSS 11.0); Rangfolge der Abrasivität der Getreide in Abhängigkeit von der Abtastmethode (median)

Mittlere Rangfolge	Dinkel-A (b)	Dinkel-B (m)	Weizen (m)	Hirse (h)
3D-Laserscanning	28,50	15,25	13,75	4,50
Profilometrie	28,50	12,00	19,75	9,75
Signifikanzniveau 0,1 %.				

(b), (m), (h) s. Tabelle 2

Tabelle 4. Nichtparametrischer Test (Mann-Whitney-U-Test, SPSS 11.0) Signifikanzvergleich der Abrasivität in Abhängigkeit vom Getreide (median)

	3D-Laserscanning			Profilometrie		
	Dinkel-B (m)	Weizen (m)	Hirse (h)	Dinkel-B (m)	Weizen (m)	Hirse (h)
Dinkel-A (b)	0,029*	0,029*	0,029*	0,029*	0,029*	0,029*
Dinkel-B (m)		0,886	0,029*		0,200	0,686
Weizen (m)			0,029*			0,114
Signifikanzniveau* 5 %.						

(b), (m), (h) s. Tabelle 2

2.3.2 Abhängigkeit von der Komposition des Nahrungsbreies

Die absoluten Abtragungsverluste von Zahnschmelz durch unterschiedliche Getreide- und Nahrungszubereitungen mit und ohne Mühlsteinabrieb sind in Tabelle 5 dokumentiert. Im Rahmen der Weiterentwicklung des 3D-Laserscanning wurde die Matching-Algorithmus-Software stark modifiziert. Daher wurde für den direkten Vergleich eine erneute Auswertung aller Datensätze (einschließlich der Datensätze aus Gügel 1998, Diplomarbeit) durchgeführt und in die Tabelle mit aufgenommen. Die ursprünglich publizierten profilometrisch ermittelten median-Werte (Gügel et al. 2001) sind in Klammern angegeben.

Tabelle 5. Abtragung der ACTA-Schmelzproben nach 200 000 Zyklen

Getreide	Profilometrie Zahnschmelzverlust				3D-Laser-Scanning Zahnschmelzverlust			Bewertung der Abrasivität
	Silikatgehalt (Gügel 1998) ⁶	mean (µm) (+/- s)	median (µm)	Volumen (µm ³)	mean (µm) (+/- s)	median (µm)	Volumen (µm ³)	
Dinkel-A ¹	<0,01	-9,6 (2,3)	-8,3	-6,62E+07	n.b.	-7,6	n.b.	-
Dinkel-A ¹ +0,0001% MST	def. 0,0001	n.b.	n.b.	n.b.	-19,4 (10,9)	-16,2	-1,33E+08	+
Dinkel-A ¹ + 0,001% MST	def. 0,001	-31,5 (10,9)	-25,7	-2,14E+08	-27,2 (12,5)	-23,6	-1,56E+08	++
Dinkel-A ¹ + 0,01% MST	def. 0,01	-51,1 (22,9)	-30,2	-7,18E+08	-38,0 (23,1)	-24,5	-4,23E+08	++ - +++*
Dinkel-A ¹ (grob)	<0,01	-38,6 (14,9)	-26,8	-3,88E+08	-43,3 (23,9)	-33,4	-2,34E+08	++ - +++*
Dinkel-B ^{2,4}	0,20	-27,5 (5,4)	-24,6 (-30,2)	-1,90E+08	-24,1 (4,3)	-21,8	-1,17E+08	+++*
Hirse ³	1,46	-35,2 (12,7)	-27,1 (-39,9)	-2,32E+08	-41,3 (7,4)	-33,2	-1,90E+08	++ - +++*
Hafer ⁴	0,03	-29,7 (10,8)	-21,2 (-27,9)	-2,11E+08	n.b.	n.b.	n.b.	+++*
Roggen ⁴	0,01	-13,3 (4,5)	-9,2 (-17,3)	-6,99E+07	n.b.	n.b.	n.b.	-
Weizen ⁴	n.b.	-20,3 (2,9)	-17,8 (-22,2)	-7,79E+07	-22,6 (6,1)	-22,1	-8,30E+07	+*
Gerste ⁴ (mit Spelzen)	0,18	-22,2 (13,5)	-19,2 (-28,0)	-1,10E+08	n.b.	n.b.	n.b.	+*
Kartoffeln ⁵ 1Teil + 4Teile Kartoffelmehl	0	-32,9 (16,8)	-27,9	-2,72E+08	-29,4 (14,0)	-21,5	-2,27E+08	+++*
Kartoffeln ⁵	0	-53,1 (22,3)	-40,5	-5,60E+08	-54,4 (21,8)	-39,8	-2,25E+08	+++

Anmerkungen:

¹ Dinkel-A (Antersdorfer Mühle) modernen Reinigungsverfahren unterzogen

² Dinkel-B (nach historischem Gerbgang entspelzt) und historisch geschrotet

³ Hirse, Referenzgetreide der Zahnklinik München, standardisiert in der Handmühle gemahlen

⁴ historische Vermahlung von Getreide in der Mühle von Unterschlaersbach, Freilandmuseum Bad Windsheim

⁵ Kartoffeln getrocknet, standardisiert vermahlen 1x5s, sehr grob

⁶ Angabe in % des Trockengewichtes

MST = Mühlsteinabrieb

ursprünglich publizierte median-Werte in Klammern (Gügel et al. 2001)

Standardabweichung der mean-Werte in Klammern

Die Bewertung der Abrasivität basierte auf dem statistisch paarweisen Vergleich der mittleren Abtragung (mean in µm, Welch-Test, SPSS 11.0, Tabelle 6). Zur Verdeutlichung sind die Mittelwerte der Zahnschmelzabtragung in Abb. 25 dargestellt. Es wurden vier Kategorien identifiziert („-, „wenig bis keine, „+“ geringe, „++“ mittlere, „+++“ hohe Abrasivität, Tabelle 5). Überlappende Ergebnisse mit fehlender Signifikanz wurden mit „*“ gekennzeichnet. Paarweise signifikante Unterschiede mit der Angabe der Höhe des Signifikanzniveaus sind in Tabelle 6 dunkel schattiert.

Tabelle 6. Welch-Test der mittleren Abtragungswerte der profilometrischen Abtastung nach 200 000 Zyklen

	Dinkel-A ¹⁺ 0,001% MST	Dinkel-A ¹⁺ 0,01% MST	Dinkel-A ¹ (grob)	Dinkel-B ^{2,4}	Hirse ³	Hafer ⁴	Roggen ⁴	Weizen ⁴	Gerste ⁴	Kartoffel ⁵ (grob)1Teil +4T	Kartoffel ⁵ (grob)
Dinkel-A ¹	0,005**	0,012*	0,008**	0,002**	0,014*	0,020*	0,254	0,002**	0,163	0,033*	0,008**
Dinkel-A ¹⁺ 0,001% MST		0,073	0,359	0,541	0,641	0,807	0,015*	0,093	0,264	0,873	0,048*
Dinkel-A ¹⁺ 0,01% MST			0,331	0,108	0,292	0,158	0,019*	0,043*	0,076	0,242	0,900
Dinkel-A ¹ (grob)				0,237	0,747	0,383	0,018*	0,061	0,150	0,603	0,266
Dinkel-B ^{2,4}					0,369	0,765	0,013*	0,087	0,546	0,572	0,069
Hirse ³						0,585	0,030*	0,093	0,267	0,838	0,229
Hafer ⁴							0,051	0,193	0,478	0,772	0,117
Roggen ⁴								0,063	0,320	0,067	0,013*
Weizen									0,820	0,190	0,027*
Gerste ⁴										0,385	0,063
Kartoffel ⁵ (grob)1Teil +4T											0,197

Anmerkungen: s. Tab. 5

Signifikanzniveau ** = 1%, * = 5 %

Die Getreidezubereitungen mit keiner bis geringfügiger Abrasivität (Dinkel modern verarbeitet und Roggen) zeigten signifikante Unterschiede zu den übrigen. Zwischen den anderen Zubereitungen war eine Trennung nicht so klar erkennbar, dennoch gab es einen deutlichen Trend im Abtragungsverhalten. Die quantitative Steigerung des Gehaltes von Mühlsteinabrieb im Kaumedium führte zu einer Zunahme des Zahnschmelzverlustes. Eine Zunahme des Grobheitsgrades (Dinkel, Kartoffel) und des Silikatgehaltes in den Getreidezubereitungen führte ebenfalls zu einer Zunahme des Zahnschmelzverlustes. Bei der Bewertung der Abrasivität des Grobheitsgrades der Nahrungsmittel spielte der Trocknungsgrad bzw. der Feuchtigkeitsgehalt eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Der grob geschrotete Dinkel, der nach heutigen Maßstäben für ein Vollwertmüsli zubereitet worden war, verursachte zwar eine hohe, aber dennoch geringere Abtragung als die bis zur Gewichtskonstanz getrocknete Kartoffel. Dieses Abtragungsverhalten kann mit der Abrasivität von getrocknetem, gedarrtem Fleisch oder geröstetem Korn und Nüssen gleichgesetzt werden.

2.3.3 Verlauf des Abtragungsgeschehens während der Simulation

Von den jeweils sechs in das ACTA-Probenrad eingesetzten Schmelzintarsien konnten fünf (sehr grob geschrotet), drei (0,001 % Mühlsteinabrieb) bzw. sechs (0,01 % Mühlsteinabrieb) bekaute Simulationsproben im Verlauf ausgewertet werden (Tab. 7). Die fehlenden Schmelzproben waren aufgrund unterschiedlicher Ursachen nicht auswertbar. Ursachen waren Besprühungsartefakte, ein fehlgeschlagenes Matchingprozedere oder eine zu starke Komplexität der Wölbung der Schmelzoberflächen. Teilweise traten aufgrund dieser Komplexität zwei oder mehrere Abrasionsinseln auf. Diese Schmelzproben wurden ebenfalls aus der Analyse herausgenommen.

Tabelle 7. Quantitativer Zahnschmelzverlust im Verlauf des Abtragungsprozesses (3D-Laser-Scanning)

Dinkel-A (Körner grob geschrotet)				Dinkel-A mit 0,001 % Mühlsteinabrieb		Dinkel-A mit 0,01 % Mühlsteinabrieb	
Zahnschmelzverlust							
Probe	Zyklen	Median (μm)	Volumen (μm^3)	Median (μm)	Volumen (μm^3)	Median (μm)	Volumen (μm^3)
1	50000	-17,1	-5,07E+07	n.b.	n.b.	-32,115	-2,34E+08
	100000	-22,9	-7,64E+07	n.b.	n.b.	-37,117	-2,27E+08
	150000	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	-31,647	-2,54E+08
	200000	-34,7	-1,40E+08	n.b.	n.b.	-25,613	-4,88E+08
		$r_{\text{lin}} = 0,919$ $r_{\text{quad}} = 0,986$					$r_{\text{lin}} = 0,297$ $r_{\text{quad}} = 0,923$
2	50000	n.b.	n.b.	-11,595	-4,12E+07	-28,489	-5,55E+08
	100000	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	-30,736	-6,39E+08
	150000	n.b.	n.b.	-21,459	-6,12E+07	-24,405	-7,61E+08
	200000	n.b.	n.b.	-16,591	-5,56E+07	-47,483	-8,01E+08
				$r_{\text{lin}} = 0,729$ $r_{\text{quad}} = 0,998$			$r_{\text{lin}} = 0,707$ $r_{\text{quad}} = 0,726$
3	50000	-20,3	-1,53E+08	n.b.	n.b.	-12,991	-1,21E+08
	100000	-28,3	-2,57E+08	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	150000	n.b.		n.b.	n.b.	-21,535	-1,33E+08
	200000	-27,1	-3,75E+08	n.b.	n.b.	-19,939	-2,37E+08
		$r_{\text{lin}} = 0,618$ $r_{\text{quad}} = 0,995$					$r_{\text{lin}} = 0,813$ $r_{\text{quad}} = 1,000$
4	50000	-13,2	-6,72E+07	-27,815	-1,37E+08	n.b.	n.b.
	100000	-14,9	-1,02E+08	-45,734	-2,11E+08	-8,11	-8,41E+07
	150000	n.b.		-33,372	-1,88E+08	-10,701	-1,02E+08
	200000	-21,1	-1,13E+08	-26,949	-2,10E+08	-14,527	-2,27E+08
		$r_{\text{lin}} = 0,824$ $r_{\text{quad}} = 0,956$			$r_{\text{lin}} = 0,190$ $r_{\text{quad}} = 0,928$		$r_{\text{lin}} = 0,994$ $r_{\text{quad}} = 0,999$
5	50000	-25,1	-3,02E+08	n.b.	n.b.	-13,315	-1,49E+08
	100000	-35,3	-3,83E+08	n.b.	n.b.	-15,262	-1,86E+08
	150000	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	-25,324	-3,60E+08
	200000	-72,7	-4,86E+08	n.b.	n.b.	-24,601	-4,78E+08
		$r_{\text{lin}} = 0,986$ $r_{\text{quad}} = \text{n.b.}$					$r_{\text{lin}} = 0,883$ $r_{\text{quad}} = 0,953$
6	50000	-5,1	-2,04E+07	-27,715	-1,02E+08	-13,535	-1,09E+08
	100000	-11,3	-5,07E+07	-35,306	-1,47E+08	-15,262	-1,86E+08
	150000	n.b.	n.b.	-30,822	-1,26E+08	n.b.	n.b.
	200000	-14,6	-7,64E+07	-26,485	-2,10E+08	-14,896	-3,04E+08
		$r_{\text{lin}} = 0,918$ $r_{\text{quad}} = 0,985$			$r_{\text{lin}} = 0,408$ $r_{\text{quad}} = 0,950$		$r_{\text{lin}} = 0,525$ $r_{\text{quad}} = 0,925$
Lineare Regression $y = bx + c$							
r (Korrelation)		0,598	0,401	0,292	0,424	0,379	0,367
Signifikanz		0,000**	0,008*	0,001**	0,000**	0,001**	0,001**
Quadratische Regression $y = ax^2 + bx + c$							
r (Korrelation)		0,723	0,454	0,782	0,554	0,490	0,383
Signifikanz		0,000**	0,015	0,000**	0,012	0,000**	0,003*

Signifikanzniveau * 1%; ** 0,1%

Die Variabilität der verbleibenden Schmelzoberflächen war deutlich in den Abtragungsergebnissen der Einzelproben zu erkennen (Tab. 7, s. a. Abb. 25). Sie zeigten in allen Versuchsläufen große individuelle Unterschiede sowohl im absoluten medianen Höhenverlust als auch im Volumen. Eine Zusammenfassung der Verlaufswerte der individuellen Schmelzproben war ungeeignet. Die Korrelation für die Gesamtgleichungen (linear $< 0,600$, quadratisch $< 0,790$) lagen sehr niedrig und die Regressionsanalyse zeigte signifikante bis hochsignifikante Unterschiede zu diesen Gleichungsroutinen. In die Berechnungen der Einzelproben gingen der Nullwert als Ausgangswert mit ein. In den meisten Fällen korrelierte die

quadratische Regressionsgleichung besser (r_{quad}) mit dem Abtragungsverlauf der Einzelprobe als eine lineare Regression (r_{lin}), eine Tatsache, welche im Kontext eines mindestens dreidimensionalen Vorganges verständlich wird.

A 3. Diskussion zur ACTA-Simulation

3.1 Methodische Diskussion

Eine Kausimulation an der ACTA-Maschine bietet einige Aspekte, die für eine Standardisierung des Abtragungsgeschehens am natürlichen Zahnschmelz von großem Vorteil sind. Es ist möglich sowohl die Kräfte, die auf den Zahnschmelz wirken, als auch die Richtung der wirkenden Kräfte durch die Versuchsanordnung zu definieren. Vernachlässigt man den Aufwand der Schmelzpräparation um eine kritische Stichprobenzahl zu gewährleisten, ist eine gewisse Standardisierbarkeit der Prismenorientierung und der Präparation in der sog. „Höckerstellung“ möglich. Die Individualität der Zahnproben im Bezug auf den Mineralisationsgrad, die Härte und die Schmelzwölbung bleibt dennoch bestehen und stellt einen beeinflussenden Faktor jeder Simulation auf natürlichem Zahnschmelz dar. Unter Berücksichtigung dieser Voraussetzungen ist dennoch die Ermittlung der Abrasivität definierter Nahrungsmittel möglich.

3.1.1 Methodenvergleich zur Ermittlung des absoluten Zahnschmelzverlustes

Die Ergebnisse aus der Gegenüberstellung der beiden Abtastmethoden, Profilometrie und 3D-Laserscanning zeigten gute Übereinstimmung in den Absolutwerten, einzelne Werte waren geringfügig abweichend (Abb. 25).

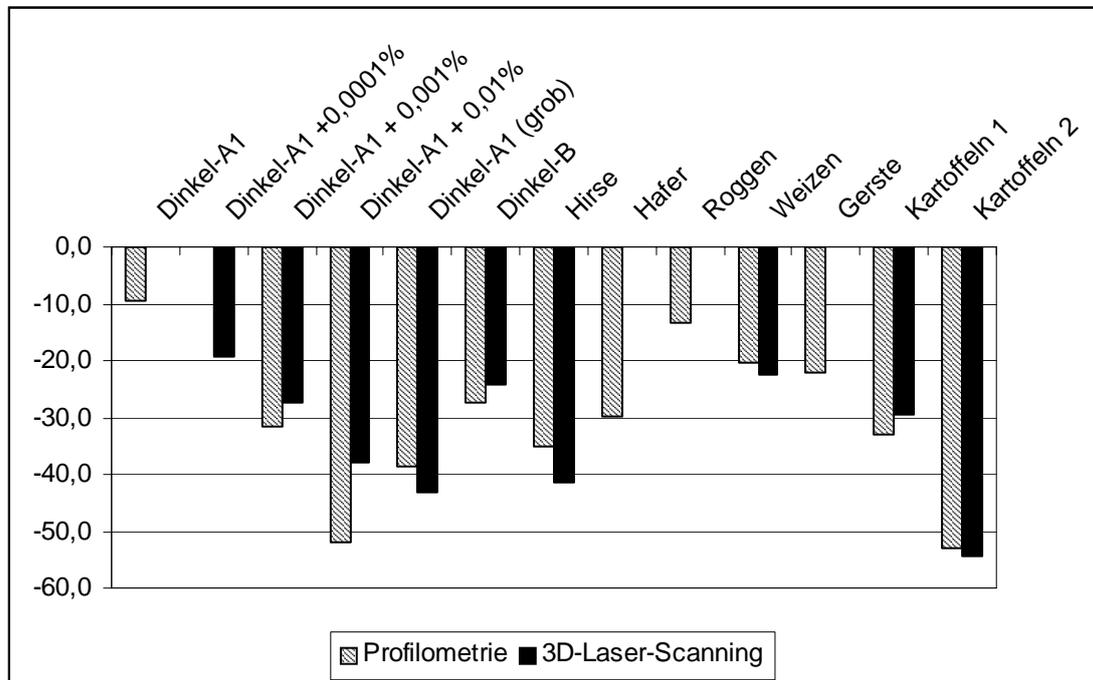


Abb. 25 Bewertung der Abrasivität anhand der Mittelwerte (mean in µm) der Zahnschmelzabtragung nach 200 000 Zyklen, schraffiert – Profilometrie, schwarz – 3D-Laser-Scanning.

Diese Unterschiede führten zu keinen widersprüchlichen Aussagen. Mit Hilfe der Methode des 3D-Laserscanning konnte eine eindeutige Trennung der Abrasivität der untersuchten Getreidezubereitungen erzielt werden. Im paarweisen statistischen Vergleich konnte der gering abrasiv wirkende Dinkel-A

signifikant von den mittel abrasiv wirkenden Getreidearten Weizen und Dinkel-B und diese wiederum von der stark abrasiv wirkenden Hirsezubereitung signifikant getrennt werden. Weitere Experimente z.B. mit der Kartoffel zeigten vergleichbare Ergebnisse.

3.1.2 3D-Laser-Scanning zur Ermittlung des progressiven Zahnschmelzverlustes

Das Abtragungsgeschehen verlief sehr unterschiedlich (Abb. 26, Tab. 7). Von den drei mal sechs (n = 18) Schmelzproben konnten fünf vollständig, neun unter Verlust von Daten einer Kauzyklussequenz und vier nicht ausgewertet werden. Häufigste Ursachen für den Ausfall waren Schwierigkeiten bei der Oberflächenpräparation und -aufnahme der dreidimensionalen Daten. Eine Beschichtung ist notwendig, um die Transluzenz von natürlichem Zahnschmelz zu umgehen. Ein standardisiertes Verfahren könnte den dabei entstehenden Fehler minimieren, da die manuelle Besprühung der Oberflächen eine uneinheitliche Beschichtung hinterlässt. Durch die Standardisierung würde die Anwendbarkeit der Methode erheblich verbessert werden. Auch ein Fehlen charakteristischer Merkmale auf den Schmelzproben zur Überlagerung des baseline und follow-up Datensatzes führte häufig zum Abbruch des Matching-Prozesses. Eine geeignete Auswahl der Simulationsproben kann hier Abhilfe schaffen.

Der relativ hohe Fehler, welcher den gesamten Simulations- und Analyseprozess begleitete, reduziert im Besonderen bei gering abrasiv wirkenden Nahrungszubereitungen die Aussagekraft der Methode, da der Fehler mögliche geringfügige Veränderungen in der Abtragsrate überlagert und maskiert. Bei stark abrasiv wirkenden Nahrungszubereitungen kann sich dieser systematische Fehler zum sog. Hintergrundrauschen relativieren.

Ein weiterer Grund für die Verschiedenheit der Simulationsverläufe lag in den individuellen physikalischen Eigenschaften der Zahnschmelzproben, sowie auch an der Orientierung und individuellen Erhebung der Intarsien im Probenrad. Diese als positives Potential der Methode zu wertenden Möglichkeiten könnten in der Zukunft genutzt werden, um das Abtragsverhalten und die Widerstandsfähigkeit unterschiedlich orientierter prismatischer Präparationen zu studieren.

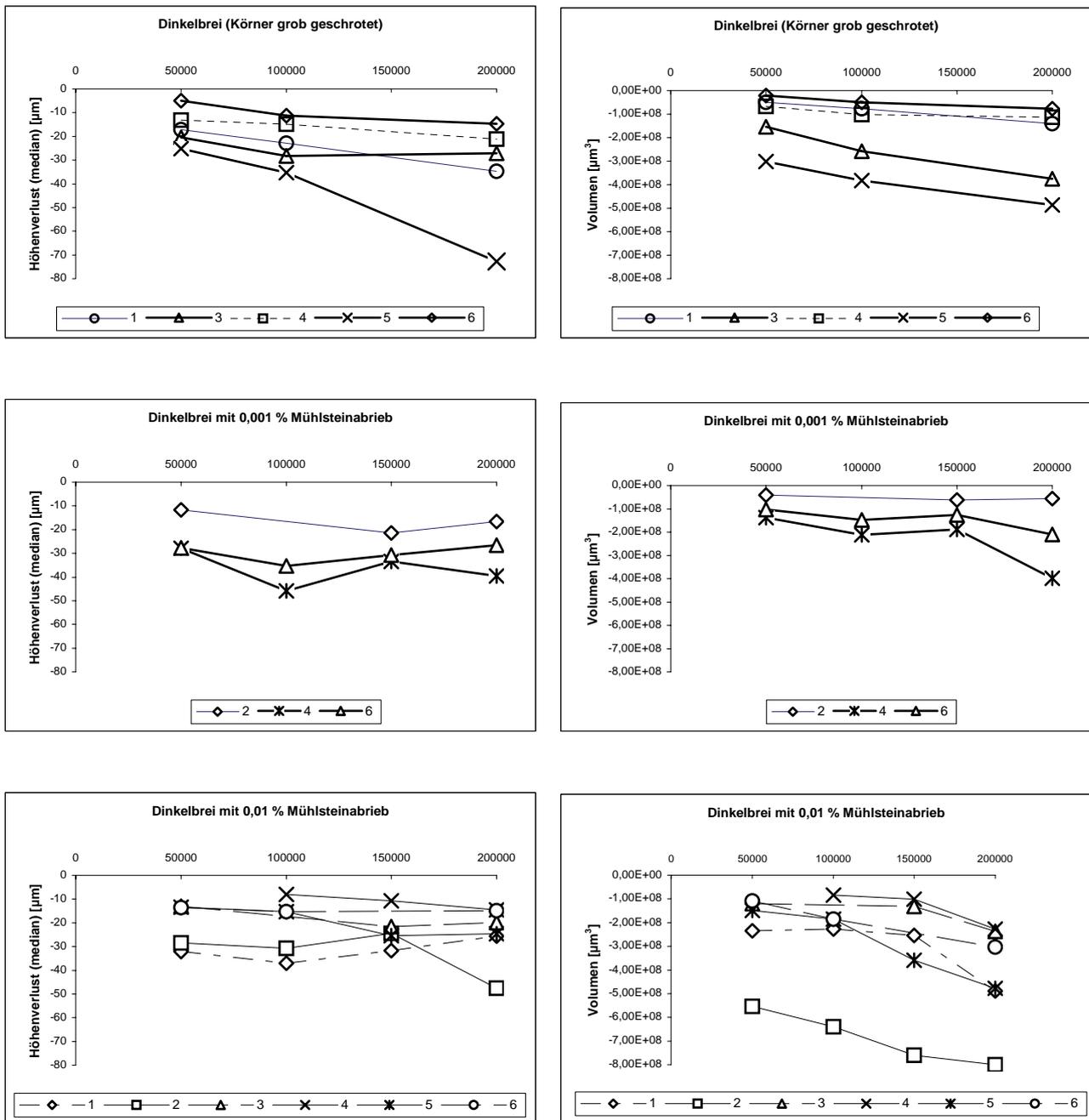


Abb. 26 Graphische Darstellung des Abtragsverlaufes an individuellen Zahnschmelzproben in Abhängigkeit vom Kaumedium; linke Seite: Höhenverlust (median in μm), rechte Seite: Volumenabtrag (μm^3)

3.2 Inhaltliche Diskussion

3.2.1 Dentale Zahnschmelzabtragung in Abhängigkeit von definierten Nahrungskomponenten

Der Zahnschmelzverlust lässt sich auf zwei dominierende Verschleißmechanismen zurückführen. Zum einen handelt es sich um einen Matrixverschleiß durch sog. weiche Abrasiva, den Nahrungsinhaltsstoffen und zum anderen um eine Ermüdung des Zahnschmelzes durch die zyklische Belastung (Kunzelmann 1997).

Ein Höhenverlust des Zahnschmelzes ist eng korreliert mit der Größe der Fläche, auf welche die Kräfte einwirken. Am natürlichen Zahn kann dies gut beobachtet werden. Die exponierten Höcker der Zähne werden bevorzugt abgetragen. Da es sich bei der ACTA-Simulation um Kräfte handelt, die vorwiegend in

eine Richtung wirken und eine aufbeißende (vertikale) und eine scherende (horizontale) Komponente besitzen, kann das Simulationsgeschehen mit dem Abrieb an natürlichen Höckern verglichen werden. Mit zunehmendem Abrieb vergrößert sich die kauende Oberfläche. Die einwirkenden Kräfte einschließlich der Abrasivität der Nahrungsinhaltsstoffe werden auf eine größere Fläche verteilt. Der absolute Schmelzverlust in definierten Zeiträumen verringert sich. Der nicht lineare Verlauf des Abtragungsgeschehens (Tab. 7 und Abb. 26) gibt einen deutlichen Hinweis, dass es sich bei dem Prozess um einen mehrdimensionalen Vorgang handelt. Die abriebbedingten Veränderungen der Oberflächen beeinflussen die Verteilung der weiterhin wirkenden Kräfte, die Stabilität der betroffenen Schmelzprismen (z.B. durch Ermüdungseffekte, Änderung der Orientierung der Prismen durch asymmetrischen Schmelzverlust) und die aktuelle Zusammensetzung des Nahrungsbreies.

Der Volumenverlust des Zahnschmelzes ist ebenfalls eng korreliert mit der zur Abtragung zur Verfügung stehenden Oberfläche, dem Gehalt und der Größe abrasiv wirkender Nahrungsinhaltsstoffe, der Härte der Nahrungsbeschaffenheit aber auch der physikalischen Eigenschaften des abradierten Zahnschmelzes. Die Darstellung des Abtragsverlaufes in Form einer Trendlinie (Abb. 27) lässt vermuten, dass die drei unterschiedlichen Nahrungszubereitungen (unterschiedliche Konzentration an abrasiv wirkenden Partikeln, unterschiedlicher Grobheitsgrad) nur geringe Unterschiede im Höhenverlust an Zahnschmelz bewirkten. Der Volumenverlust war aber tendenziell beim Kauen mit Nahrungsbrei mit einem Gehalt von 0,01 % Mühlsteinabrieb (höchste Konzentration an definierter Verunreinigung) am stärksten.

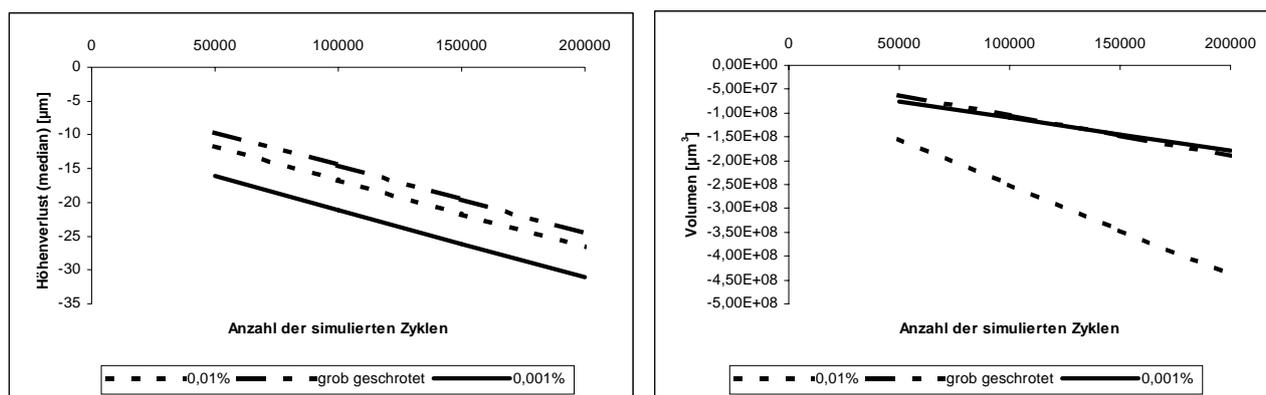


Abb. 27 Trendlinien zum Abtragsverlauf; links: Höhenverlust (median in µm); rechts: Volumenverlust (µm³);

Die höchsten Abtragungsverluste konnten Teaford und Lytle (1996) in der bislang immer noch einzigen *in vivo* Fallstudie über dentale Abtragung und Microwear an menschlichen Molaren durch den Verzehr von Maismehl, auf einer Sandsteinmühle vermahlen, nachweisen. Nach ihren Untersuchungen schätzten die Autoren, dass eine jährliche Abtragsrate von 20 bis 90 µm je nach Vermahlungsmethode auftreten kann. In einer Simulationsstudie an der ACTA-Maschine konnte Schnabel et al. (1995) ebenfalls Hinweise finden, dass mit Zunahme der Grobheit von Hirsekörnern der Abrasionsverlust - allerdings von Füllungsmaterialien - zunahm.

Die in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Werte zum absoluten Abtragungsverlust von im Mittel 25 – 55 µm nach „einem Jahr Kauen“ (200 000 Zyklen) liegen mit großer Wahrscheinlichkeit im Rahmen des historischen Abtragungsgeschehens. Eine Abtragung von im Mittel ca. 50 µm in einem Jahr verursacht den Verlust der Zahnkrone bei einer durchschnittlichen Schmelzdicke von ca. 1 bis 2 mm innerhalb von ca. 20 bis 40 Lebensjahren. Zu bedenken gilt auch, dass beim physiologischen Kauen

fortwährend frisch zu zerkauende Nahrungsmittel hinzukommen, während es in der Simulation zu einer seltenen Erneuerung des Nahrungsbreies kommt.

Eine unterstützende, vermeidende und elastische Ausweichfunktion, welche der Kiefer beim physiologischen Kauen ermöglicht, z.B. beim Aufbeißen auf extrem harte und als störend empfundene Nahrungsmittel, konnte mit dieser Methode nicht simuliert werden (vgl. Abb. 5, S. 16).

3.2.2 *Diskussion zum Bildungs- und Auslöschungsprozess simulierter dentaler Microwear*

Bei der morphologischen und mikrometrischen Untersuchung der Abtragungsflächen wurde deutlich, dass zu Beginn der Belastung der gewölbten Zahnoberflächen vor allem die Unebenheiten und Aufwerfungen z.B. Perikymatien, allgemeine Oberflächenwölbung, Höckerstellung abgetragen wurden. Sobald eine Balance zwischen Krafteinwirkung und kraftaufnehmender Fläche eingetreten war, wurde der Abtragungsprozess auf einen vorwiegend schleifenden Mechanismus reduziert. Belege hierfür sind die zunehmend plan geschliffenen Oberflächen, die mit zunehmender Abtragung nur noch geringfügig an Fläche zunahm (Abb. 21, 24) und das sukzessive Abschleifen (turnover) bereits entstandener und neu gebildeter dreidimensionaler Gruben und Kratzspuren (Abb. 22, 23). Der Verlauf der ACTA-Simulation lässt annehmen, dass die Rate fortlaufend neu gebildeter Mikroläsionen in Form von Gruben mit zunehmender Kauzykluszahl abnahm, während die Zahl der neu entstandenen Kratzspuren zunahm.

Eine systematisch quantitative Untersuchung des Verlaufes der Dichte der Microwear-Merkmale und zur Charakterisierung der Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit wird in Zukunft weiteren Aufschluss über den Einfluss der Abrasiva auf Zahnschmelzoberflächen geben.

Die Entwicklung weiterer Technologien, um Untersuchungen zum Bildungs- und Auslöschungsprozess dentaler Microwear durchzuführen, sind in den vergangenen Jahren vorangeschritten. Eine Methode beschreibt die confokale Weißlichtmikroskopie (Boyde und Fortelius 1991). Sie ermöglicht eine topographische Karte von Oberflächen mit einer Auflösung bis zu 0,1 µm. In Verbindung mit Fraktalanalytischen Auswertungsalgorithmen können hintereinandergeschaltete Aufnahmen aus der confokalen Weißlichtmikroskopie in Zukunft eine objektive, wiederholbare und quantitative Charakterisierung von Oberflächen unter realistischem Aufwand ermöglichen (Boyde und Fortelius 1991, Ungar et al. 2003).

B. Kausimulation am Vier-Stationen-Kaukraftsimulator MUC3 nach Kunzelmann

Die Etablierung dieses Verfahrens erfolgte in einer Pilotstudie im Rahmen des Dissertationsvorhabens unter Einbindung in einem von der DFG geförderten Projekt (GR 959/7-1) zur Simulation getreidespezifischer Microwear auf menschlichem Zahnschmelz mit Merkmalsvergleich an historischen Zähnen (Friedel 2000).

B 1. Material und Methoden

Zur Simulation des Nahrungsabriebes an natürlichen Zähnen unter annähernd physiologischen Bedingungen wurde der Vier-Stationen-Kaukraftsimulator MUC3 nach Kunzelmann (Abb. 28) (Klinik und Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, München) verwendet (Konstruktionsausführung Fa. Willytec, München, Deutschland). Insgesamt wurden 60 ungetragene Zähne (15 Läufe, pro Lauf 4 Zähne) bei unterschiedlich definierten Bedingungen getestet. Die extrahierten, noch ungetragenen Zähne stammten dankenswerterweise aus mehreren Zahnarztpraxen in München und waren nach entsprechender Indikation aus dem Kiefer der Patienten entfernt und in NaN_3 -haltiger Ringer-Lösung aufbewahrt worden.



Abb. 28 Vier-Stationen-Kaukraftsimulator MUC3 nach Kunzelmann

1.1 Einführung in den Vier-Stationen-Kaukraftsimulator MUC3

Der Kausimulator besteht aus vier Kammerstationen (siehe Abb. 28) in denen jeweils ein Steatit-Antagonist mit definierter Kraft auf die okklusal gestellten Probenzähne auftrifft (Abb. 29). Ein Kauzyklus umfasst dabei sowohl die vertikale Annäherung des Antagonisten zur Zahnoberfläche als auch die nachfolgende horizontale Gleitbewegung des Antagonisten auf der Zahnoberfläche von 500 μm .

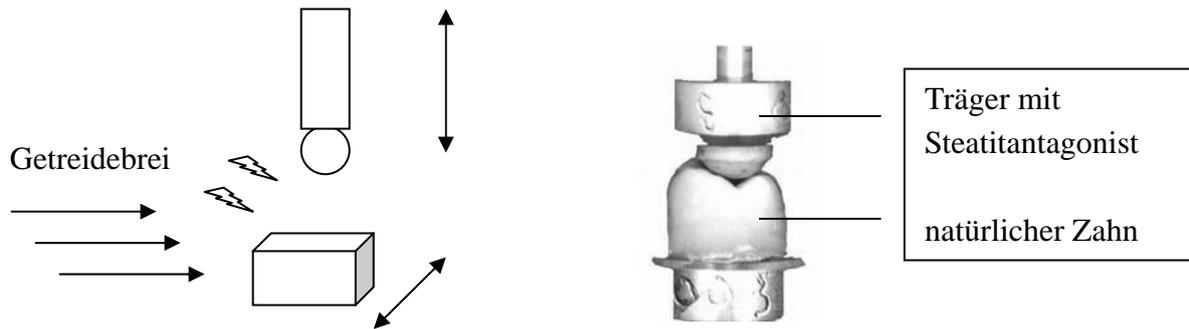


Abb. 29 Kontakt des Antagonisten mit der Kaufläche eines Zahnes in den gefüllten Kammern des Kaukraftsimulators

Als Gewichtskraft wurde bei allen Läufen ein 2 kg - Metallaufsatz (ca. 20 N, entsprechend dem natürlichem Kaudruck) verwendet (Abb. 28). Für die Abtragungs- und Microwarexperimente wurden von jedem Testmedium (Getreidelösungen und phytolithenarmer Leeransatz) jeweils zwei Läufe bei 5000 und 50000 Zyklen durchgeführt. Die Kaufrequenz lag bei 56/min. Ein weiterer Lauf mit reduziertem Impuls wurde mit einer verminderten Kaufrequenz von 29/min durchgeführt.

Die Kammern wurden jeweils mit der zu testenden Nahrungssuspensionen (300 ml) gefüllt (Abb. 30). Ein am Gerät integrierter Rührer (Abb. 30) diente zur Durchmischung der Getreidesuspensionen. Das Sedimentieren der Lösungen wurde zusätzlich vermindert durch den Einsatz eines „Wirtpool - Luftschlauches“ (Abb. 30) in jeder Kammer (Mair 2000).

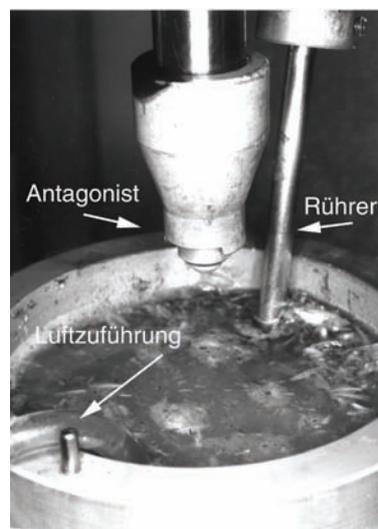


Abb. 30 Beispiel einer gefüllten Kammerstation mit integriertem Rührwerk und Luftschlauch (links unten), um das Sedimentieren zu verhindern.

1.2 Präparation der Proben und Versuchsaufbau für die Kausimulation

Eine ausführliche Beschreibung des nachfolgenden Methodenteiles liegt mit der Diplomarbeit von Friedel (2000) als technischer Anteil der Kausimulation an der Ludwig-Maximilians-Universität München, Fakultät für Biologie Department, Biodiversitätsforschung / Anthropologie vor.

1.2.1 Vorbereitung der Zahnproben und Antagonisten

Für die Simulationsversuche am Kaukraftsimulator wurden retinierte (ungetragene) Zähne verwendet. Die Kauflächen der Zähne wurden am Lupenmikroskop (Wild/Leitz, Anatomische Anstalt, München) mit einem s/w Papierfilm (Agfa Pan 25 ISO) fotografiert. Die angefertigten Abzüge dienten zur Markierung der Orientierung im Kausimulator und zur Dokumentation der Lokalisation der entstandenen Abrasionsfacetten nach der Kausimulation. Die auf eine Höhe (ab der Kaufläche) von ca. 1cm zugesägten Zähne wurden angeätzt (Phosphorsäuregel, Applicator Tips, Fa. Dentsply GmbH) und luftgetrocknet. Dann wurde der Zahn nach Anwendung eines Haftvermittlers (Heliobond, Fa. Vivadent) mit Hilfe eines Befestigungskomposites auf einem präpariertem Aluminiumträger fixiert.

Zur Herstellung eines Antagonisten wurde eine 6 mm große Steatitkugel (Fa. CeramTec) mit Hilfe eines lichthärtenden Befestigungskomposites (zahnärztliche Füllungskunststoffe) ebenfalls auf einem präpariertem Aluminiumträger fixiert, welches im Lichtofen (Dentacolor XS, Fa. Kulzer) auspolymerisiert (Abb. 29). Die Vorbehandlung der eloxierten Aluminiumträger nach einem standardisierten Verfahren diente der Herstellung eines kraftschlüssigen Verbundes.

1.2.2 Testgetreide

Für die Simulation von dentalem Microwear wurden acht verschiedene Getreidearten verwendet (Übersicht Tabelle 8). Die Getreideproben Dinkel-B (m), Gerste (m), Hafer (m) und Roggen (m), die einem historischen Schrotgang (m) auf Mühlsteinen aus Sandstein aus Unterschlausersbach (Fränkisches Freilandmuseum Bad Windsheim, Mittelfranken, Deutschland) unterzogen worden waren, wurden bereits für die ACTA-Versuche (Gügel 1998) verwendet. Die historische Vermahlung von Getreide war gekennzeichnet durch einen höheren Mahlabrieb und gröberes Mehl im Unterschied zu einer modernen Aufbereitung von Getreidekörnern. Als Referenzgetreide für die zahnmedizinische Werkstoffforschung wurde die Kolbenhirse (Gelbe Hirse, *Setaria italica*) ebenfalls berücksichtigt. Als historische Getreide wurden zusätzlich die heute nur noch selten angebaute Körnerfrüchte Emmer (*Triticum diccocon*) und Einkorn (*Triticum monococum*) herangezogen und wie die Kolbenhirse in einer Handdrehmessermühle zu jeweils 50 Gramm Portionen für 5 Sekunden standardisiert vermahlen.

Tabelle 8. Übersicht der verwendeten Getreidearten

Getreideart	Lateinischer Name	Bezugsquelle	Mühle	Lieferungsform
Dinkel-A* (b) (entspelzt, poliert)	<i>Triticum spelta</i>	Bioladen	Antersdorfer Mühle (Simbach am Inn)	Grob geschrotet
Dinkel-B * (m) (trad. Gerbgang!, entspelzt)	<i>Triticum spelta</i>	Ökologischer Landbau llg., Zusamaltheim	Unterschlausersbacher Mühle (Bad Windsheim, Fränkisches Freilandmuseum/Museumsanbau)	Schrotgang
Gerste* (Spelzgerste)	<i>Hordeum vulgare</i> („Hanna“)	Kunstmühle Sailer, Donauaualtheim	Unterschlausersbacher Mühle (s.o.)	Schrotgang
Saat/Nackthafer*	<i>Avena sativa</i>	Ökologischer Landbau llg., Zusamaltheim	Unterschlausersbacher Mühle (s.o.)	Schrotgang
Kolbenhirse* (Gelbe Futterhirse)(bespelzt)	<i>Setaria italica</i>	Baywa Fürth	Handdrehmessermühle	Körner
Emmer (bespelzt)	<i>Triticum dicoccon</i>	Bad Windsheim, (s.o.)	Handdrehmessermühle	Körner
Einkorn (bespelzt)	<i>Triticum monococcon</i>	Bad Windsheim, (s.o.)	Handdrehmessermühle	Körner
Roggen* (Nachtgetreide)	<i>Secale cereale</i> („Marder“)	Kunstmühle Sailer, Donauaualtheim	Unterschlausersbacher Mühle (s.o.)	Schrotgang

* Material identisch mit Gügel (1998)

Als Referenzgetreide für eine heute übliche Getreideaufbereitung wurde der Dinkel-A (b) (*Triticum spelta*, Antersdorfer-Mühle) in einer Getreidemühle mit Mahlsteinen aus Tonkeramik mit gebundenem Korund im Schrotgang grob geschrotet (b), verwendet (s. auch Kap. II A 1.2).

1.2.3 Kammerfüllungen am Kaukraftsimulator MUC3

Die vier Stationen des Kaukraftsimulators wurden jeweils mit einer der acht Getreidelösungen bzw. dem phytolithenarmen Leeransatz (Phosphat-Puffer [PBS] und/oder Kartoffelstärke) beschickt. Jeweils 100 g geschrotetes Getreide wurde mit 150 ml PBS-Puffer mit NaN_3 (pH - Wert von 7,45) gemischt und in die Metallkammern eingebracht. Als Leerwertkontrollen dienten die Kammerfüllungen mit reinem PBS (Phosphatpuffer) und ein Kartoffelstärkegemisch (40 g kommerzielle Kartoffelstärke + 10 g getrocknete und geschälte Kartoffelstücke / 150 ml PBS).

1.3 Vergleichsmaterialien für die DMA der Kausimulation

Zum Vergleich der bei der Kausimulation entstandenen Microwear dienten die Daten einer historischen Referenzpopulation. Es handelte sich um das frühmittelalterliche (5. – 8. Jahrhundert) Reihengräberfeld einer bäuerlichen Dorfgemeinschaft mit Ackerbau und Viehzucht in Wenigumstadt (Landkreis Aschaffenburg) (Gügel 1998). Die im weiteren Verlauf dieses Projektes durchgeführten Dentalen Microwear Analysen an Zähnen historischer Populationen wurden zusammen mit der Referenzpopulation in der Tabelle 16 aufgeführt. Eine vergleichende Diskussion über simulierte und real komplexe Microwear erfolgt am Ende der Darstellung dental komplexer Microwear auf historischen Zahnoberflächen (Kap. IV, S. 206ff).

1.4 Analyse des absoluten Zahnschmelzverlustes

Die Ermittlung des absoluten Zahnschmelzabriebs erfolgte ebenfalls mittels des in Kap. II A 1.6 erläuterten mathematischen Überlagerungsverfahrens. Es wurden von insgesamt 18 Zähnen nach 50 000 Kauzyklen (jeweils zwei Zähne pro Kammerfüllung) der Schmelzverlust bestimmt. Der absolute Verschleiß der dazugehörigen Steatit-Antagonisten wurde nicht untersucht. Die Messung erfolgte an Gipsreplika (s. Kap. II A 1.5) als baseline (Zahnoberfläche vor der Kausimulation, ohne Abrasion) und follow-up Datensatz (Zahnoberfläche nach der Kausimulation, mit Abrasion). Mit Hilfe des 3D-Laser-Scannings (LASERSCAN 3D PRO, Zahnklinik München) wurden die Gipsreplika (wie in Kap. II A 1.5 beschrieben) mit einer lateralen Auflösung von 30 μm dreidimensional eingelesen. Da aufgrund der unebenen Oberflächen (okklusale Schmelzoberflächen) Schatten entstanden, musste jedes einzelne Gipsmodell in verschiedenen Orientierungen eingescannt werden. Nach der Erstellung eines Gesamtbildes konnte die Auswertung mit der Matching-Software Match-3D erfolgen. Die 3D-Daten der baseline-Aufnahme und des follow-up-Bildes der jeweiligen Probe (Abb. 31) wurden überlagert und drei korrespondierende Bereiche, die keinem Verschleiß unterlagen, wurden markiert. Als Matchparameter wurden folgende Einstellungen gewählt:

minimale Matchpunktzahl	2000
Ausreißerquantil	3.0
Iterationen	20 000
Standardabweichung	< 20
Clip gradient	1
minimal valid difference (mvd)	-30

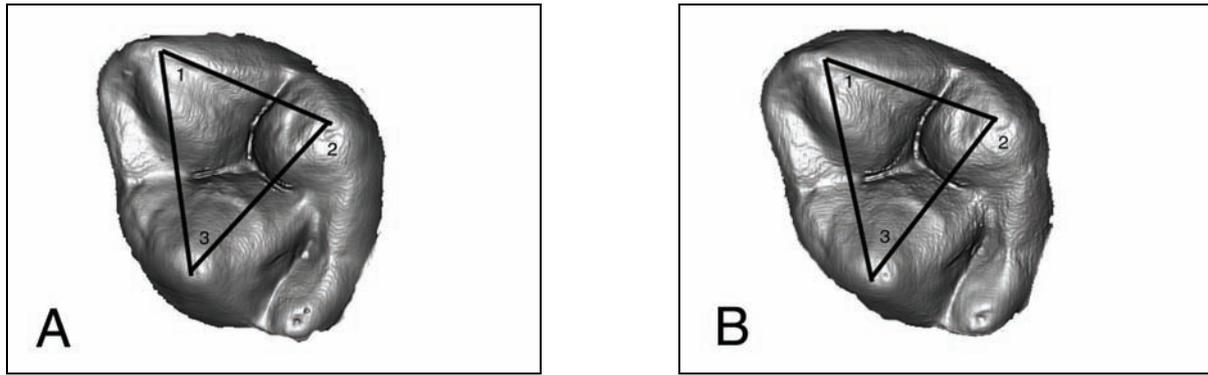


Abb. 31 3D-Datenvorlage als Einzelbilder vor dem Matchvorgang mit Einblendung der verbundenen korrespondierenden Punkte, die keinem Verschleiß unterlagen; A vor der Kausimulation B nach der Kausimulation

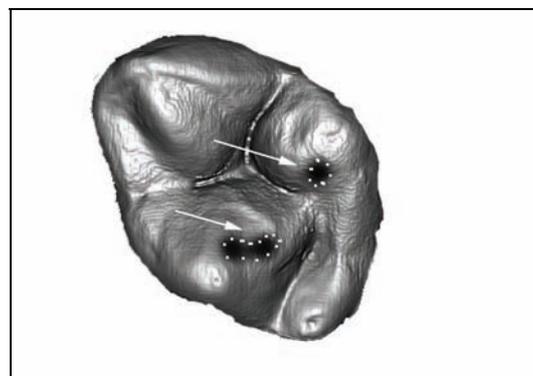


Abb. 32 Differenzbild erstellt nach erfolgreicher Überlagerung der Oberfläche vor und nach der Kausimulation; Pfeile weisen auf die simulierten Abrasionsfacetten, deren Schmelzverlust farblich dargestellt wird.

Nach erfolgreicher Überlagerung entstand ein sog. Differenzbild (Abb. 32). Die Differenzwerte wurden in eine Excel-Datei überführt, um die Daten mit der Software MS Excel 2000 und dem Statistikprogramm SPSS 11.0 auszuwerten. Zur besseren Darstellung wurden die negativen Werte in Positivwerte umgewandelt.

1.5 Aufbereitung der Proben für die Rasterelektronenmikroskopische Analyse der Dentalen Microwear

Mit dem Lupenmikroskop erfolgte auf den gereinigten und mit Azeton gespülten Schmelzproben die Lokalisierung und Markierung der Abrasionsfacetten. Nach der Trocknung (Gewichtskonstanz) der auf Stubs aufgeklebten Proben wurden sie mit reinem Gold bei 2kV, 20mA und 180 Sekunden (Sputtergerät Fa. POLARON /England) beschichtet.

Die Rasteruntersuchungen erfolgten am Scanning Electronic Microscope JSM-35CF (Fa. Jeol LTD, Belgien) (Anatomische Anstalt, München) und am Rasterelektronenmikroskop Philips XI 20 Series (Institut für Zoologie, LMU München).

1.6 Dentale Microwear Analyse (DMA)

Für die Dentale Microwear Analyse wurden 200-fache Vergrößerungen aufgenommen. Detailaufnahmen erfolgten je nach Motiv bei höheren Stufen. Die Spannungen der Kathode betragen 12 bis 20 Kilovolt. Die Speicherung der Videosignale erfolgte im Tif-Format. Die systematische Analyse der Oberflächenveränderungen nach der Kausimulation wurden mit Hilfe des semiautomatischen Computervermessungsprogrammes „Microware 3.0“ (Ungar et al. 1991, Ungar 1995, download <http://Comp.uark.edu/~pungar>) auf einem PC ausgewertet. Dentale Microwear Merkmale wie Gruben („pits“)

und Kratzspuren („scratches“) wurden markiert (Abb. 33) und automatisch gemessen. Die Rohdaten der Vermessung beinhalteten neben den Längenmessungen der Haupt- und Nebenachsen auch deren Neigung (Winkel). Gleichzeitig konnte jedes einzelne Bild (tif-File) statistisch aufbereitet werden, wobei die Merkmalsdichte, das Verhältnis von Kratzspuren zu Gruben, ihre Ausdehnung und Orientierung, Mittelwerte und die dazugehörige Standardabweichung berechnet wurden. Aus Gründen der Programmierung bereitete die Neigungsbestimmung der Achsen der Gruben jedoch Probleme (die längste Achse wurde automatisch als Hauptachse angesprochen), Kratzspuren basierten auf dieser Definition.

Die zu untersuchenden Facettenbereiche konnten an den REM-Geräten relativ senkrecht zum Elektronenstrahl eingestellt werden, sodass auf eine Rasterstauchungskorrektur verzichtet werden konnte.

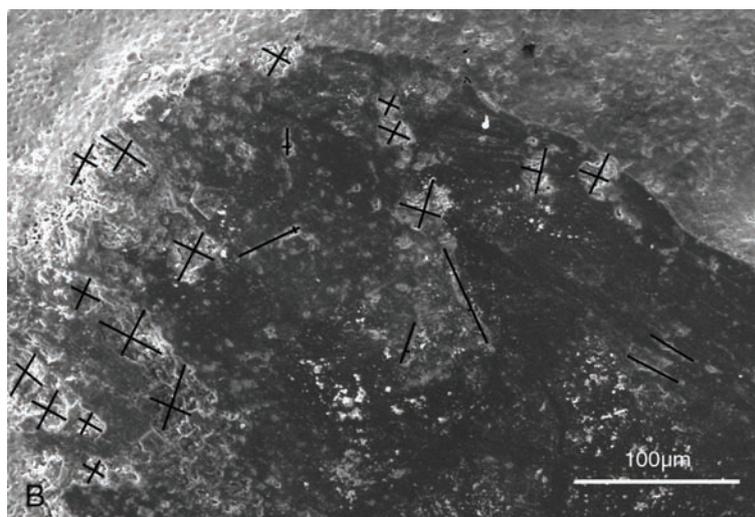


Abb. 33 REM-Aufnahme (20kV, 200x) Beispiel einer DMA-Analyse; schwarze Kreuze markieren die Haupt- und Nebenachse der Gruben und Kratzspuren auf einer simulierten abgetragenen Zahnschmelzoberfläche.

Zur DMA wurden von allen Proben 200-fache REM-Vergrößerungen herangezogen. Die Auswahl der zu vermessenden Areale wurde, nach Durchmusterung der gesamten Abrasionsfläche, nach folgenden Kriterien getroffen: Erfassung des Merkmalspektrums, Vermeidung von Arealen großflächiger Macrowear und weitgehend quantitative Erfassung der Facettenflächen. Die experimentell produzierten Facetten schwankten bezüglich ihrer Gesamtausdehnung, eine Fläche von 1mm^2 ($100\,000\ \mu\text{m}^2$) wurde jedoch in der Regel nicht überschritten. Die Möglichkeit, gleich große Vermessungsgebiete bei den verschiedenen Proben zu erfassen, war wegen der Variabilität der Zahnoberflächen relativ gering. Um Aussagen zur Merkmalsdichte treffen zu können, musste die absolute Anzahl der Merkmale auf gleich große Flächen normiert werden. Bei der Verwendung einer 200-fachen Vergrößerung zur Bildanalyse entsprach das vermessene Areal einer realen Fläche von $0,16685\text{mm}^2$ bzw. $166859\mu\text{m}^2$ (Skalierungsbalken als Grundlage für die gemessene Fläche von $470\ \mu\text{m} \times 355\ \mu\text{m}$). Wurde die tatsächliche Bildpunktgröße von $717\ \text{nm}$ bei einer Auflösung von $177\ \text{dpi}$ zu Grunde gelegt, dann errechnete sich aus dem Bildspeicher von $712 \times 484\ \text{pixel}$ eine tatsächliche Fläche von $0,177159\ \text{mm}^2$ ($510,504\ \mu\text{m} \times 347,028\ \mu\text{m}$). Diese Flächenberechnung wurde für die weiteren Untersuchungen herangezogen.

Für die Bildanalyse wurden folgende Einstellungen gewählt:

Auflösung (Scan resolution - DPI) = 177 (fixierte Auflösung der Bildspeicherkarte am Rasterelektronenmikroskop (Philips XI 20 Series).

Verhältnis von Haupt- zu Nebenachse d.h. Länge/Breite der Merkmale (Pit axis length ratio) = 4:1

Die Messwerte der Merkmale (Grubenanzahl, Längen- und Breitenachsen der Gruben) wurden für die statistische Auswertung unter Excel 2000 und SPSS 11.0 für Windows weiter verarbeitet.

Die systematische Vermessung wurde an insgesamt 32 Zähnen durchgeführt. Pro Testmedium konnten jeweils zwei Zähne der 5 000 und 50 000-fachen Kauzyklenreihen (50 000 Kauzyklen entsprechen ungefähr ¼ Jahr Kauen, Bates et al. 1975) begutachtet werden.

B 2. Ergebnisse der Simulation am Kaukraftsimulator MUC3

Die Hauptversuche wurden bis 5 000 Kauzyklen (N = 16) und bis 50 000 Kauzyklen (N = 21) mit den Testgetreidezubereitungen durchgeführt. Dabei wurden, sofern Abrasionsfacetten aufzufinden waren, nach 50 000 Kauzyklen die absoluten Schmelzverluste bestimmt. Gleichzeitig wurden diese Zähne und die der 5000-fachen Kauzyklenreihe einer Dentalen Microwear Analyse (DMA) unterzogen.

Testsimulationen mit reduziertem Impuls wurden durchgeführt, um eine Reduktion des Kraftstoßes zu ermöglichen und damit eine geringere Belastung auf den Zahnschmelz zu übertragen. Die Kaufrequenz verkürzte sich dabei auf etwa 0,5 Herz (29 Impulse/min). Hierbei wurde die qualitative Verfassung der Verschleißfacetten bewertet, eine quantitative Microwear Analyse wurde nicht durchgeführt.

2.1 pH-Werte während der Kausimulation

Der Abfall des pH-Wertes des Nahrungsbreies während der Versuche wurde mit 1 molarer Natriumhydroxydlösung neutralisiert und lag bei 6 bis 7. In ganz seltenen Fällen sank er zum Ende des Versuches bis auf 5,7 ab, doch konnte kein Erosionsdefekt des Zahnschmelzes bei der REM-Untersuchung beobachtet werden.

2.2 Facettenmorphologie nach der Kausimulation

Während der Kausimulation entstanden asymmetrisch scharf und stumpf begrenzte Facetten als makroskopisch sichtbare Abtragungsflächen (Abb. 34 - 38). Solche Facettenbildungen sind während des natürlichen Kauens entstandenen Facetten sehr ähnlich (Abb. 40). Die Anzahl solcher Abrasionsbereiche variierte beim simulierten Zahn zwischen ein bis drei Facetten. Waren keine Facetten entstanden, wurde das Experiment wiederholt. Zur Auswertung standen pro Kammerfüllung bzw. Getreideart jeweils zwei Proben zur Verfügung. Die individuelle Gestalt der Molarenoberflächen ließ Facetten von variabler Form und Größe entstehen. Ihr Flächenausmaß überschritt jedoch meist nicht 1mm². Die folgenden rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen einige Charakteristika simulierter Facetten. In die Abbildungen sind Übersichtsaufnahmen der jeweils bekauten Molaren eingeblendet. Die Lokalisation der gebildeten Facette bzw. Facetten wurde markiert. Die abgetragenen Areale waren meist zusammenhängend. Zum Teil waren sie durch natürliche Mulden, Rinnen und Fissuren im Schmelz unterbrochen (Abb. 34 a, b).

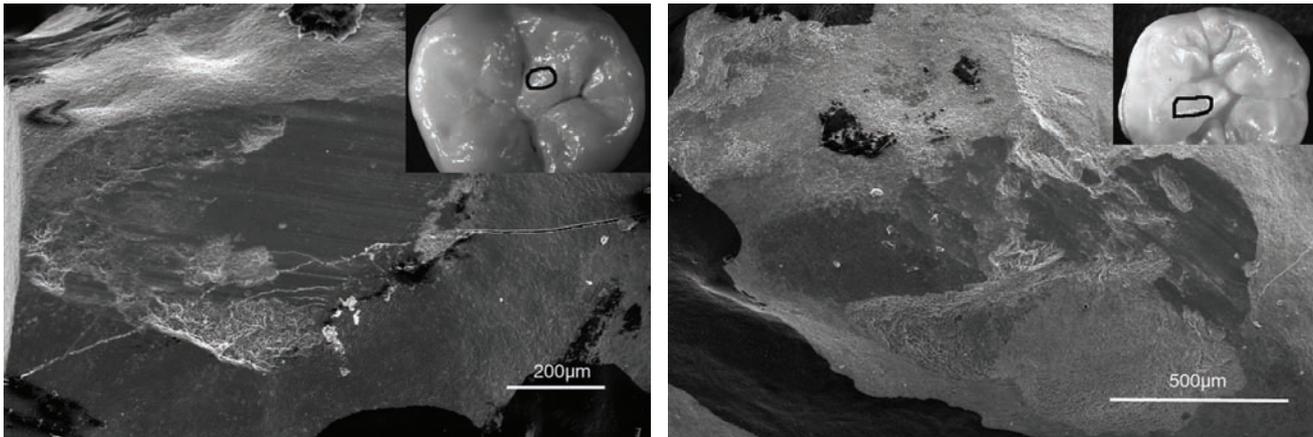


Abb. 34 REM- Aufnahmen: a (links): zusammenhängende abgeschlossene Facette (20kV, 67x), b (rechts): zerklüftete und zerteilte Facette (20kV, 50x)

Auf mehreren Proben waren großflächig herausgebrochene Schmelzstücke aufzufinden. Auf einer Zahnprobe konnten mehrere Abrasionsbereiche nebeneinander auftreten (Abb. 35). Manche Facetten wiesen zum Teil starke Oberflächenabsprengungen (Macrowear) auf (Abb. 34 a, 35 a).

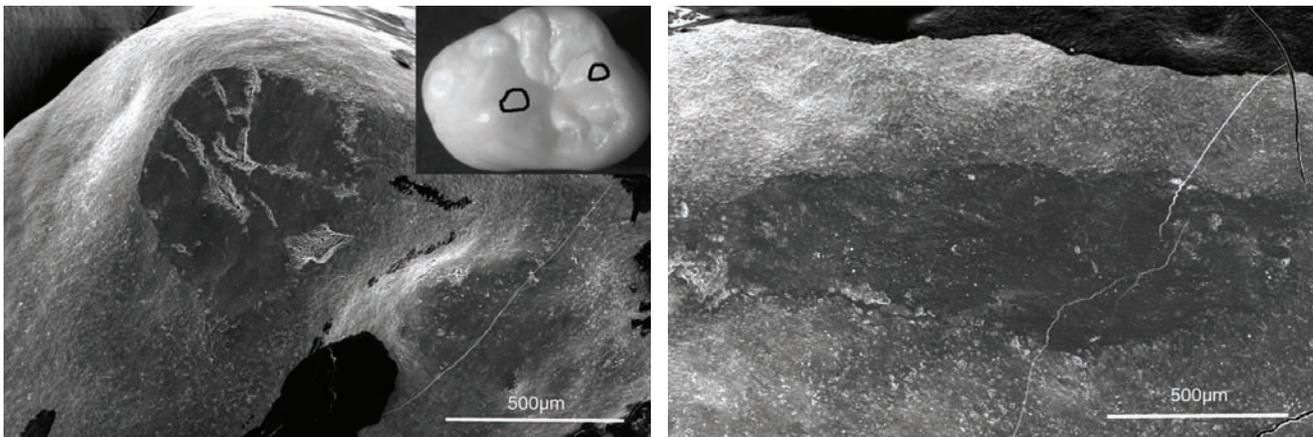


Abb. 35 REM-Aufnahmen: (20kV, 50x, Hafer nach 50 000 KZ); a: die Facette zeigt deutliche Ermüdungserscheinungen auf der gesamten Fläche, b: auf der Facette treten keine großflächigen Absprengungen (Macrowear) auf.

Verschleißfacetten ohne starke Oberflächenschädigungen traten auch unabhängig von der Dauer der Belastung (Kauzyklenzahl) auf (Abb. 36 a, b).

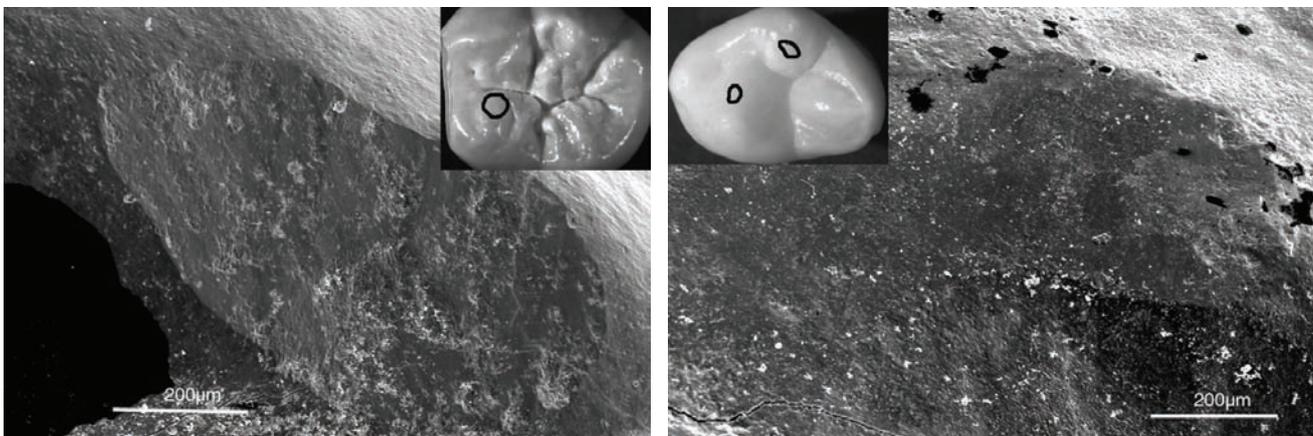


Abb. 36 REM-Aufnahmen (Gerste) bei unterschiedlicher Kauzyklenzahl; a: 5000 KZ (20kV, 100x); b: 50 000 KZ (20kV, 89x)

Wenn Macrowearereignisse auftraten, konnten sie auf der Facette unterschiedlich lokalisiert sein. Großflächige Schmelzausbrüche fanden sich sowohl über die gesamte Facette verteilt (Abb. 35 a), am Anfang der Facette (Aufsetzpunkt des Antagonisten) (Abb. 34 a), am Ende der Facette, seitlich davon (Abb. 37 a), aber auch am Anfang und am Ende (Abb. 37 b).

Am häufigsten wurden Schmelzabsprengungen am Facettenrand nachgewiesen.

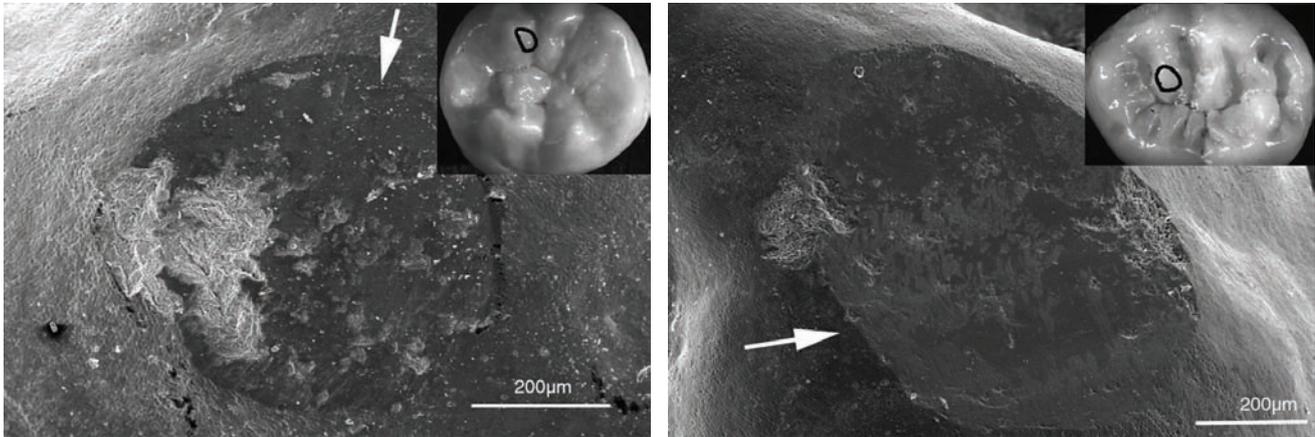


Abb. 37 REM-Aufnahmen verschiedener Präparate mit großen Schmelzabsprünge, Pfeile deuten die Bewegungsrichtung des Antagonisten an; a: seitlicher Absprung (20kV 100x), b: Macrowear am Anfang und am Ende der Facette (20kV, 80x)

Simulationen mit reduziertem Impuls verursachten keine Verminderung der Ermüdungserscheinungen (Macrowear) im Bereich der Verschleißfacetten (Abb. 38 a, b).

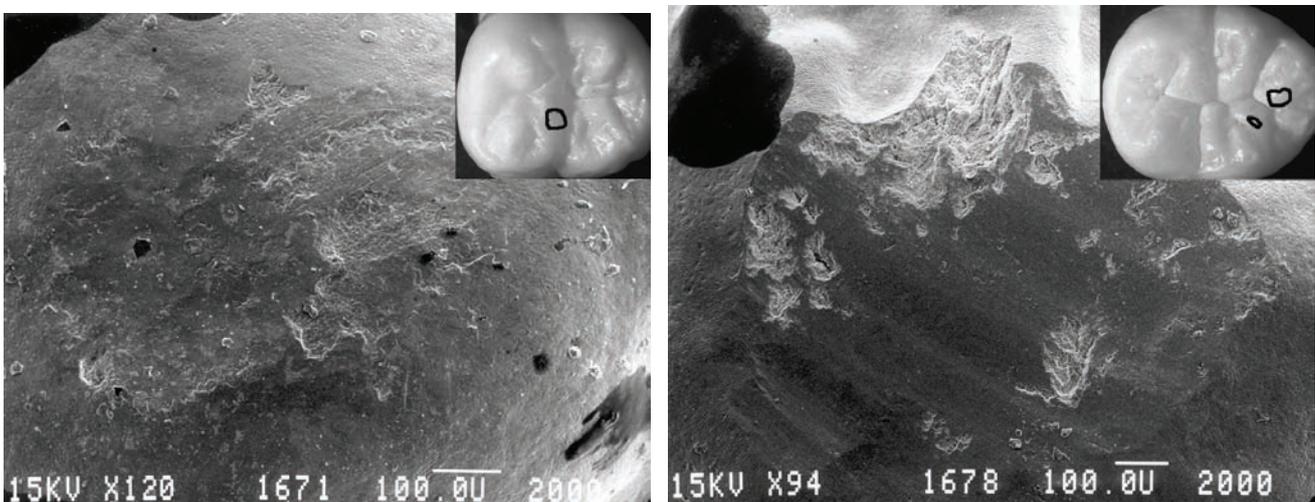


Abb. 38 REM-Aufnahmen: reduzierter Kraftstoß, Roggen (Maßstabsbalken entspricht 100 µm); a : 5000 KZ (15kV, 120x), b: 50000 KZ (15kV, 94x)

2.3 Verschleiß der Antagonisten

An exemplarisch ausgewählten Gegenkörpern konnte aufgrund einer rein qualitativen Begutachtung der Oberflächen der Steatitantagonisten gezeigt werden, dass der Steatit-Antagonist im „Leerversuch“ einen wesentlich schärfer ausgeprägten abradierten Bereich (Abb. 39 a) aufwies, als die Antagonisten in den Getreideversuchen (Abb. 39 b). Klar abgrenzbare Facettenbereiche wie bei den natürlichen Schmelzoberflächen waren in der Regel nicht entstanden (Abb. 40).

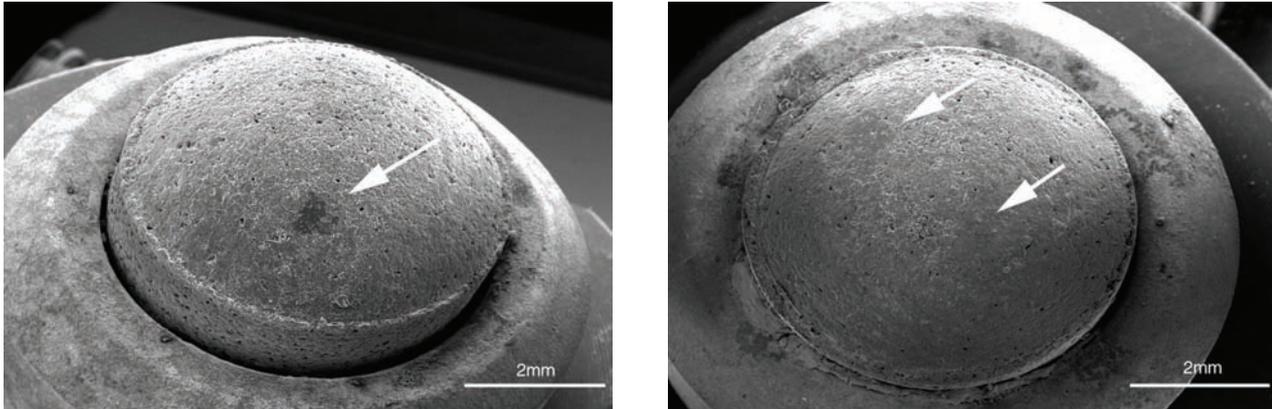


Abb. 29 REM-Bilder der Antagonisten, Pfeile zeigen auf abradierte Bezirke; a: Antagonist mit scharf abgegrenzter Facette beim PBS-Versuch (20kV, 10x), b: Antagonist mit verschiedenen großen und nur leicht abradierten Bereichen im Getreideversuch (20kV, 10x)

1.1 Facettenmorphologie auf natürlich bekautem Zahnschmelz

Schliffacetten, die auf natürliche Weise im Laufe der Zahnfunktion entstanden waren (Abb. 40, 41), ergaben bei der rasterelektronenmikroskopischen Begutachtung ein ähnliches Erscheinungsbild, wie es auf den simulierten Verschleißbereichen aufzufinden war. Die Facetten auf den Höckern waren begrenzt durch asymmetrische Schleifränder. Die bukkal gelegenen Erstkontaktstellen zeigten eine vorwiegend scharf begrenzte Umrandung mit zahlreichen Gruben und Schmelzaussprengungen und teilweisen Reißbildungen. Die eher lingual gelegenen Ränder waren abgerundet. Die umgebenden Flächen waren vorwiegend charakterisiert durch Kratzspuren und erschienen poliert. Das Abgleiten des Nahrungsbreies und die dabei auftretende hydrodynamische Schmierung verteilte die Kaukräfte auf eine größere Oberfläche. Die im Nahrungsbrei enthaltenen harten Partikel wirkten wie Schmirgelpapier komplexer Körnung während der gleitenden Bewegung der Zahnoberflächen gegeneinander.

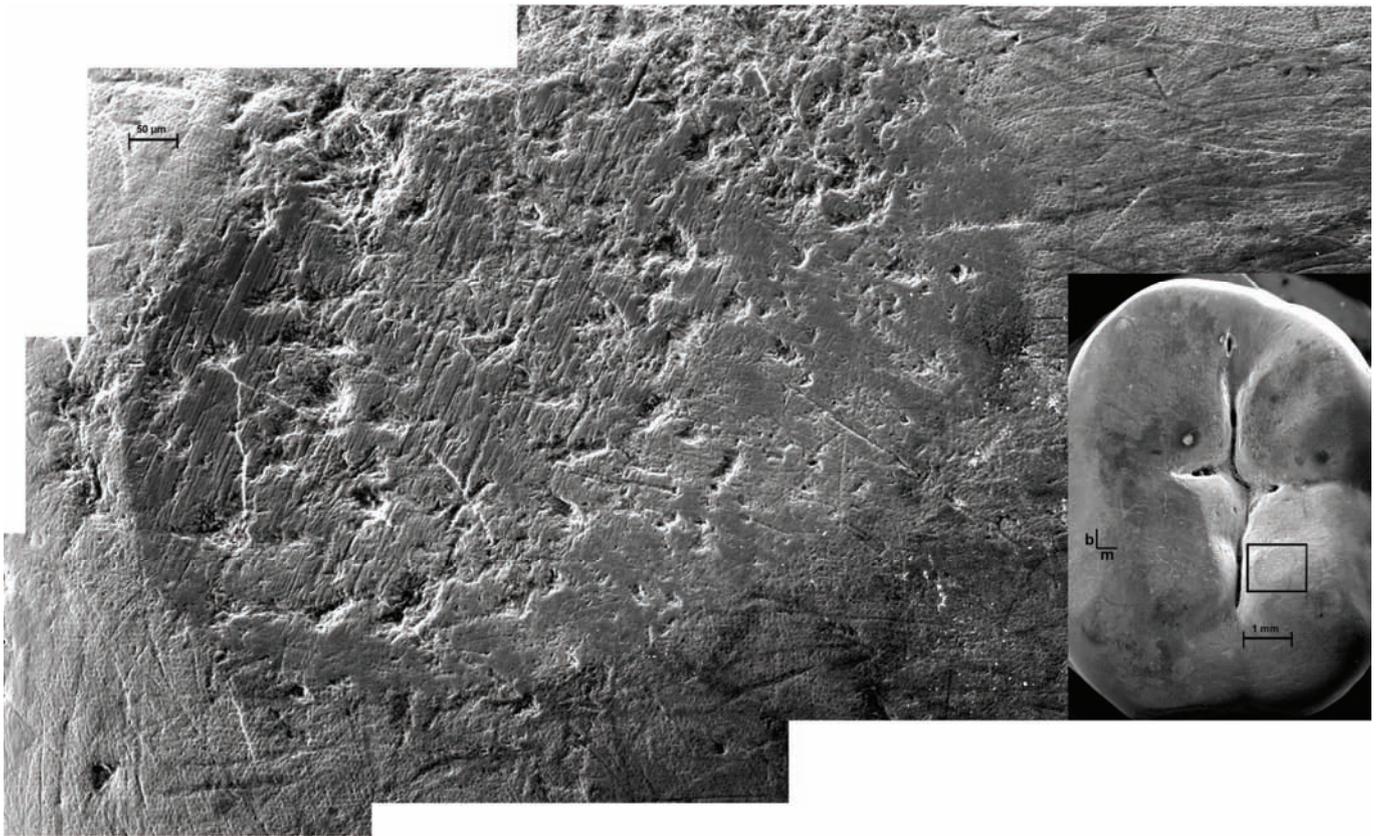


Abb. 30 REM-Panoramaaufnahme eines frühmittelalterlichen Zahnes mit natürlicher Schliiffacetete, 25kV, 200x, Übersicht 20kV, 10x des Unterkiefermolaren; die Facette ist markiert.

Frisch durchgebrochene Zähne, deren Oberflächen weniger Gebrauchsspuren aufweisen als jene von Zähnen, die bereits schon längere Zeiträume in Okklusion standen, zeigten ebenfalls eine asymmetrische Ausprägung der Randbereiche (Abb. 41). Die bukkalen Bereiche waren eher scharf, die lingualen eher stumpf auslaufend begrenzt. Großflächig randständige Macrowear konnte ebenfalls auf natürlich bekauten Zähnen (Oberkiefermolar, Abb. 41) gefunden werden.

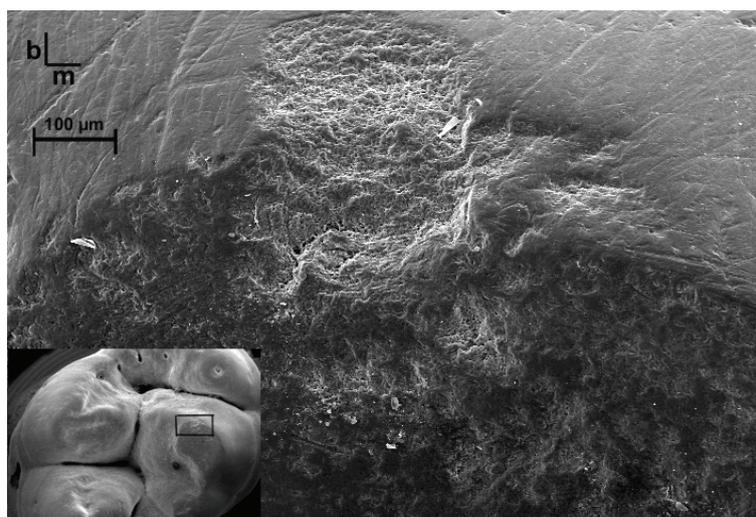


Abb. 31 REM-Detailaufnahme eines frühmittelalterlichen Zahnes mit natürlicher Schliiffacetete (20kV, 100x, Übersicht 20kV, 10x) des Oberkiefermolaren. Der entsprechende Facettenbereich ist in der Übersicht markiert.

1.2 Absoluter Zahnschmelzverlust

An den Zahnproben, die im Kausimulator 50 000-fachen Kauzyklus durchlaufen hatten, wurde der absolute Substanzverlust der abradierten Facetten bestimmt. Zusammengefasst ergaben sich pro Testmedium folgende gemittelte Abrasionswerte (mean und median Verlust, Volumenverlust) (Tab. 9)

Tabelle 9. Absoluter Schmelzverlust pro Testmedium nach 50 000 Zyklen

Testmedium	Facettenanzahl	Schmelzverlust mean (µm)	s +/- (mean)	Schmelzverlust median (µm)	Schmelzverlust Volumen (µm ³)
Dinkel-A (b)	4	-32,1	13,8	-27,0	2,19E+07
Dinkel-B (m)	2	-47,8	19,4	-38,8	5,10E+07
Einkorn (h)	2	-39,2	3,7	-32,3	4,35E+07
Emmer (h)	3	-40,6	15,6	-26,7	5,38E+07
Gerste (m)	4	-31,2	17,9	-23,2	3,33E+07
Hafer (m)	3	-71,4	41,7	-50,5	6,94E+07
Hirse (h)	3	-83,4	90,3	-37,1	7,45E+07
Roggen (m)	2	-86,0	62,2	-62,0	1,69E+08
Leerwert*	3	-31,3	3,8	-23,8	1,96E+07

b, Naturkostladen, Mahlgang in einer Mühle mit Korund-Keramik; m, Mahlgang in einer historischen Mühle auf Sandstein; h, Mahlgang in einer modernen Haushaltsmühle, standardisiert; Leerwert*: aus PBS-Puffer und Kartoffelstärke

Die Werte der absoluten Verschleißanalyse zeigten, dass es in Abhängigkeit von der Getreideart zu einem unterschiedlich starkem Schmelzverlust kam. Geringfügige Änderungen der Rangfolge der Abtragung ergab sich je nach Wahl der Mittelwertsangabe (Mean/Median) (Tabelle 9, Abb. 42). Die höchsten Verschleißwerte bei Heranziehung der mean-Werte traten beim Roggen auf. Mit abnehmenden Substanzverlusten folgten Hirse, Hafer, Dinkel-B, Emmer, Einkorn, Dinkel-A, Gerste und der Leerwert (Getreide s. Tabelle 8). Bezüglich der Abrasivität des Kaumediums konnte anhand des absoluten Höhenverlustes eine klare Einteilung in zwei Gruppen erfolgen (Abb. 42 a). Roggen, Hirse und Hafer waren im Vergleich zu Dinkel-B, Einkorn, Emmer, Dinkel-A und Gerste als abrasivere Getreidearten zu werten. Unter den wenig abrasiven Testmedien zeigte der Dinkel-B die stärkste Verschleißwirkung.

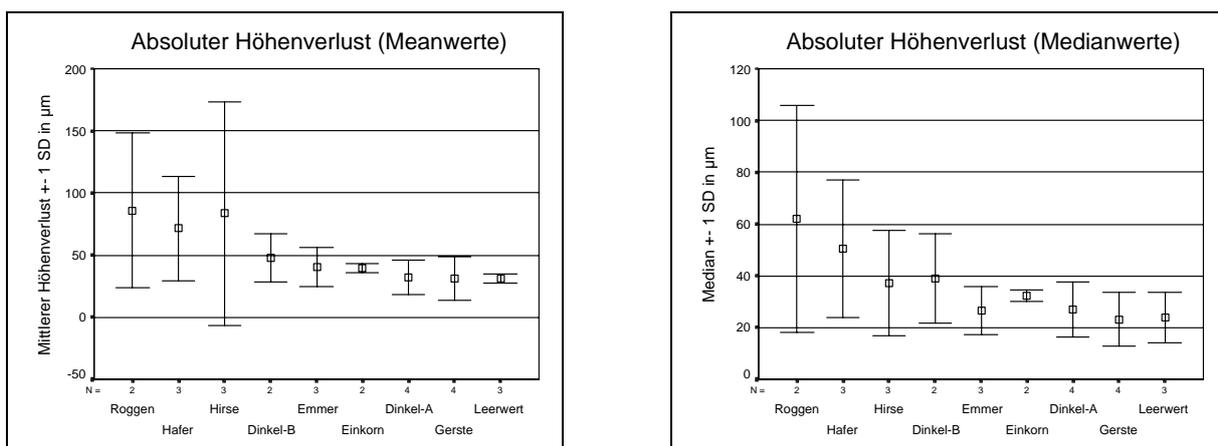


Abb. 32 a Vertikaler Höhenverlust (mean in µm) nach der Kausimulation; b Vertikaler Höhenverlust (median in µm) nach der Kausimulation

1.3 Bildung von dentaler Microwear im Verlauf der Kaukraftsimulation

Das von Grine (1986), Grine and Kay (1988) und King et al. (1999a) bevorzugte Verhältnis der Längen der Haupt- zur Nebenachse von 4:1 (Pit axis length ratio < 4:1) zur Trennung von Gruben und Kratzspuren (Ungar et al. 1991, Ungar 1995) wurde für die durchgeführten Untersuchungen dentaler Microwear übernommen. Gruben wurden nur als solche erfasst, wenn deren Längen/Breitenverhältnis den Faktor 4 nicht überschritten. Analytierte Merkmale, welche diesen Grenzwert übertrafen und nach der Definition als „Kratzer“ anzusprechen waren, wurden aus den nachfolgenden Gründen nicht in die Bewertung der DMA der Kausimulation aufgenommen.

Eine systematische Analyse der Kratzspuren auf den simulierten Facetten konnte nicht erfolgen. Wenn Kratzspuren entstanden waren, verliefen sie meist über den gesamten Verschleißbereich und waren nahezu ausschließlich parallel zur Simulationsrichtung (Abb. 43 a) ausgerichtet. Ihre Ausprägung war sehr schwach und daher nur sehr undeutlich zu erkennen. Bei höheren Vergrößerungen konnten ganz fein an der Schmelzoberfläche verlaufende Spuren gefunden werden (Abb. 43 b), die mit großer Wahrscheinlichkeit von einem Schmierfilm überlagert wurden. Eine zweifelsfreie Identifizierung und Vermessung der Kratzer auf den 200-fachen Vergrößerungen war wie bei der Simulation in der ACTA-Maschine auch an den simulierten Oberflächen im Kaukraftsimulator nicht möglich.

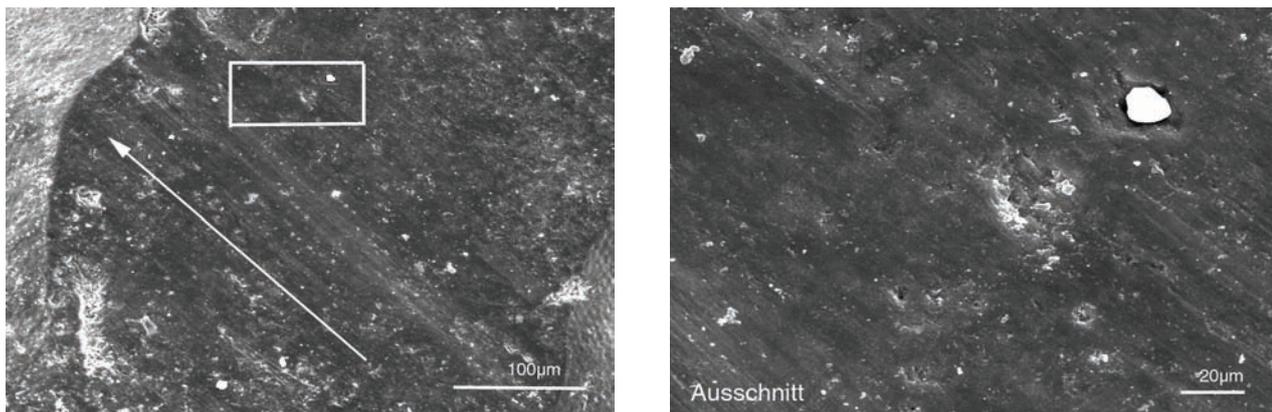


Abb. 33 REM-Beispiel a: über die gesamte Facette laufende parallele Kratzspuren, das weiße Rechteck lokalisiert die 1000x Vergrößerung (b), Kausimulationsrichtung in Pfeilrichtung (20kV, 200x), b: Kratzspuren sind sehr fein und erscheinen maskiert (20kV, 1000x)

Auf den simulierten Facetten wurden insgesamt 1490 Merkmale als Gruben erfasst und ausgemessen. Dabei lag die minimale Ausdehnung der Hauptachse (Major axis length) bei 4,5 µm und der Maximalwert bei 163,6 µm. Die Längen der Nebenachsen (Minor axis length) erstreckten sich von 2,4 µm bis 90,4 µm (Tabelle 10).

Tabelle 10. Dimensionen der Gruben aus der Kaukraftsimulation

Zahnproben	Untersuchte Gruben (N)	Längen-dimension (µm)	Grubenlänge (+/- s) (µm)	Breiten-dimension (µm)	Grubenbreite (+/- s) (µm)	RATIO (Länge/Breite) (+/- s)
Simulation am Kaukraftsimulator	1490	4,5 - 163,5	14,2 (8,3)	2,4 - 90,4	8,8 (4,9)	1,5 (0,5)
MUC3			-		-	-
			29,9 (23,2)		18,6 (13,3)	1,8 (0,7)

1.3.1 Unabhängigkeit vom Kauzyklus

Die Dichte der Gruben wurde auf eine konstant abradierte Fläche von 0,167 mm² (am Balken gemessen) normiert und war innerhalb der Getreidesimulationen direkt vergleichbar. Die statistische Untersuchung der Grundgesamtheit aller Daten ergab, dass teilweise stark signifikante Unterschiede bezüglich der Grubenlänge, deren logarithmisch transformierten Werte, der Grubenbreite und dem Längen/Breitenverhältnis der Gruben abhängig von der Zykluszahl auftraten. Daher dienten die zusammenfassenden Werte der Getreidesimulationen nur dazu, den metrischen Rahmen der Parameter zu erfassen (Tabelle 11). Die Längenparameter wurden direkt für die statistische Untersuchung herangezogen, wobei sie durch die Anzahl der Werte gewichtet wurden. Die Dichtewerte bewegten sich zwischen 11,5±7,8 (Hirse) und 23,7±9,4 (Einkorn) und lagen damit in der Größenordnung der Grubendichte auf natürlich bekauten menschlichen Zahnoberflächen (Gügel 2003).

Tabelle 11. Dichte und Dimensionen der Gruben (normiert) in Abhängigkeit vom Kaumedium

Getreideart	Dichte der Gruben (+/- s)	Grubenlänge (+/- s) (µm)	Grubenbreite (+/- s) (µm)	RATIO (Länge/Breite) (+/- s)
Dinkel-A (b)	19,2 (16,4)	22,7 (12,0)	14,1 (8,1)	1,7 (0,6)
Dinkel-B (m)	11,6 (12,6)	29,9 (23,2)	18,6 (13,3)	1,6 (0,5)
Einkorn	23,7 (9,4)	23,2 (14,0)	14,9 (7,2)	1,6 (0,5)
Emmer	22,3 (16,2)	18,8 (9,9)	12,3 (5,3)	1,6 (0,5)
Gerste	15,3 (12,2)	22,3 (13,0)	13,1 (6,9)	1,7 (0,6)
Hafer	19,0 (8,7)	16,5 (14,0)	10,8 (7,5)	1,5 (0,5)
Hirse	11,5 (7,8)	14,2 (8,3)	8,8 (4,9)	1,6 (0,6)
Roggen	17,9 (9,7)	18,7 (16,3)	10,5 (6,9)	1,8 (0,6)
Leerwert	15,8 (5,9)	23,7 (18,3)	14,0 (11,3)	1,8 (0,7)

DMA unabhängig vom Kauzyklus,

Gruben (normiert) = bezogen auf eine normierte Facettenfläche bei 200x REM-Vergrößerung

1.3.2 Abhängigkeit vom Kauzyklus

Die Ergebnisse getrennt nach der Anzahl der simulierten Kauzyklen sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Die Dichte der Gruben lag nach 5 000 Kauzyklen mit 15,1 (Hirse) und 15,4 (Leerwert) am niedrigsten, die höchsten Werte mit 30,7 (Dinkel-A) und 31,3 (Emmer) betragen damit die doppelte Anzahl an Läsionen bezogen auf die standardisierte Fläche. Die Werte nach 50 000 Zyklen lagen mit 4,3 (Emmer) und 6,4 (Hirse) am niedrigsten, der Maximalwert mit 18,0 (Einkorn) war dreimal so hoch. Im Vergleich zu 5 000 Zyklen lag die Dichte jedoch nur im Durchschnitt drei Merkmale höher als die niedrigsten Ergebnisse nach 5 000 Zyklen.

Tabelle 12. Dimensionen simulierter Gruben (normiert) abhängig von der Kauzykluszahl (5000/50 000)

Getreideart pro Kauzyklus	5000 Kauzyklen				50 000 Kauzyklen			
	Dichte der Gruben (+/- s)	Grubenlänge (+/- s) (µm)	Grubenbreite (+/- s) (µm)	RATIO (Länge/Breite) (+/- s)	Dichte der Gruben (+/- s)	Grubenlänge (+/- s) (µm)	Grubenbreite (+/- s) (µm)	RATIO (Länge/Breite) (+/- s)
Dinkel-A	30,7 (12,6)	22,5 (11,8)	14,4 (8,0)	1,6 (0,5)	10,6 (13,7)	23,2 (12,5)	13,4 (8,5)	1,9 (0,6)
Dinkel-B	18,5 (19,1)	26,6 (20,1)	18,0 (12,1)	1,5 (0,4)	7,7 (5,6)	33,1 (25,7)	19,2 (14,4)	1,8 (0,5)
Einkorn	29,3 (8,8)	20,8 (9,9)	14,0 (6,3)	1,5 (0,4)	18,0 (6,2)	27,1 (18,4)	16,3 (8,3)	1,7 (0,6)
Emmer	31,3 (11,1)	17,8 (7,8)	12,0 (4,6)	1,5 (0,5)	4,3 (2,5)	30,8 (19,9)	16,5 (10,0)	1,9 (0,6)
Gerste	25,7 (5,6)	20,0 (11,6)	12,4 (6,8)	1,7 (0,5)	9,6 (11,1)	27,4 (14,4)	14,7 (6,9)	1,9 (0,7)
Hafer	23,0 (9,1)	15,1 (10,9)	10,2 (6,8)	1,5 (0,5)	16,8 (8,1)	17,6 (16,0)	11,2 (8,0)	1,6 (0,5)
Hirse	15,1 (8,0)	13,5 (6,7)	8,6 (3,6)	1,6 (0,5)	6,4 (3,8)	16,6 (11,9)	9,5 (7,7)	1,8 (0,7)
Roggen	22,2 (11,2)	17,3 (8,2)	10,0 (4,3)	1,8 (0,6)	13,6 (6,2)	20,7 (23,2)	11,2 (9,4)	1,8 (0,6)
Leerwert	15,3 (3,1)	25,0 (16,2)	16,5 (9,2)	1,6 (0,4)	16,0 (7,0)	23,2 (19,2)	13,0 (11,9)	1,9 (0,7)

Gruben (normiert) = bezogen auf eine normierte Facettenfläche bei 200x REM-Vergrößerung

Die Dichte der Gruben nahm von 5 000 bis 50 000 Kauzyklen für alle getesteten Getreidemedien deutlich ab, mit den größten Differenzen beim Emmer (Abb. 44). Die Grubenlänge nahm für die Getreidemedien Dinkel-B, Einkorn, Gerste und besonders für den Emmer deutlich zu und für Dinkel-A, Hafer, Hirse und Roggen nur geringfügig (Abb. 45). Der Leerwert zeigte keine Abnahme der Grubendichte und im Unterschied zu den Getreidetestmedien eher eine geringfügige Abnahme der mittleren Grubenlänge.

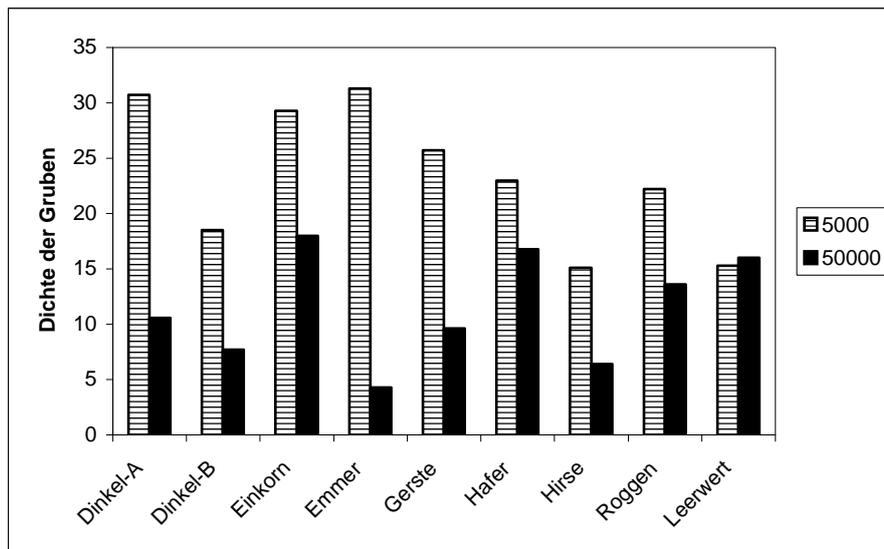


Abb. 34 Dichte der Gruben (normiert) = bezogen auf eine normierte Facettenfläche bei 200x REM-Vergrößerung in Abhängigkeit von der Anzahl der Kauzyklen (schattiert → 5 000, schwarz → 50 000 Kauzyklen)

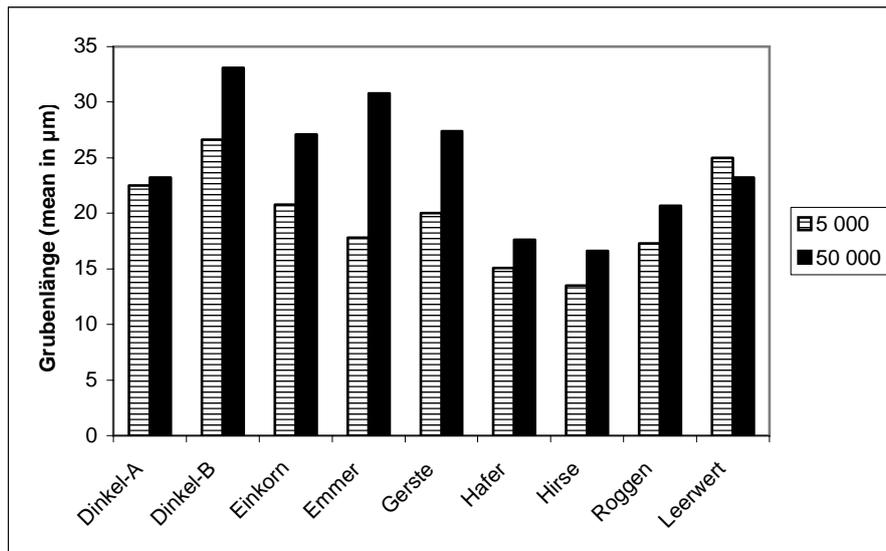


Abb. 35 Länge der Gruben (mean-Werte in μm) an Facettenflächen bei 200x REM-Vergrößerung in Abhängigkeit von der Anzahl der Kauzyklen (schattiert \rightarrow 5 000, schwarz \rightarrow 50 000 Kauzyklen)

Die Untersuchung der Paarungen auf Varianzgleichheit ergab, dass diese vor allem für die Grubenlänge nicht vorlag (Einkorn, Emmer, Hirse und Roggen). Deshalb wurde ein robuster T-Test für den paarweisen Mittelwertsvergleich der Parameter durchgeführt (Tabelle 13). Die absoluten Werte als auch die statistische Analyse ergab, dass es simultan zu einer Änderung der Grubendichten und zu einer metrischen Veränderung der Grubendimensionen kam. Mit zunehmender Zyklenzahl vergrößerte sich für fast alle Testmedien die mittlere Grubenlänge und das Längen- zu Breitenverhältnis, in 6 von den 9 Paarungen statistisch hoch signifikant. Für die Grubenlängen ergab sich eine statistische Signifikanz unterschiedlicher Höhe für drei Testmedien (Einkorn, Emmer und Gerste). Die Unterschiede blieben auch bei einer Transformation der Einzelwerte in die logarithmierte Form (Herstellung einer Normalverteilung als Voraussetzung für weniger robuste Tests).

Tabelle 13. Paarweiser Mittelwertsvergleich der Testmedien in Abhängigkeit vom Kauzyklus

Paarung Kauzyklus 5000 / 50 000	Para- meter	Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit		
		F	Signifikanz	T	df	Signifikanz
Dinkel-A	GL	0,022	0,882	-0,344	76,990	0,731
	GB	0,398	0,529	0,702	77,015	0,485
	R	2,871	0,092	-2,545	69,546	0,013*
	LN	0,009	0,925	-0,288	78,280	0,774
Dinkel-B	GL	1,106	0,295	-1,423	94,728	0,158
	GB	0,813	0,369	-0,494	97,535	0,623
	R	5,230	0,024	-3,091	93,342	0,003**
	LN	0,000	0,987	-1,746	100,393	0,084
Einkorn	GL	11,740	0,001***	-3,115	132,477	0,002**
	GB	10,706	0,001***	-2,375	165,510	0,019*
	R	10,575	0,001***	-2,728	149,416	0,007**
	LN	5,461	0,020*	-3,519	175,271	0,001***
Emmer	GL	16,649	0,000***	-2,249	11,290	0,045*
	GB	10,845	0,001***	-1,568	11,400	0,144
	R	0,694	0,406	-2,227	12,196	0,045
	LN	1,010	0,316	-3,001	11,921	0,011
Gerste	GL	1,967	0,163	-3,333	84,762	0,001
	GB	1,134	0,288	-2,070	100,402	0,041
	R	1,545	0,216	-2,937	85,063	0,004
	LN	0,608	0,437	-4,388	107,515	0,000
Hafer	GL	0,517	0,473	-1,419	238,315	0,157
	GB	0,284	0,594	-1,025	241,911	0,306
	R	0,065	0,798	-1,079	225,729	0,282
	LN	0,136	0,712	-1,893	228,130	0,060
Hirse	GL	5,458	0,021*	-1,255	30,178	0,219
	GB	1,650	0,202	-0,607	28,464	0,549
	R	2,699	0,103	-1,350	33,279	0,186
	LN	0,505	0,479	-1,201	37,224	0,237
Roggen	GL	7,703	0,006**	-1,171	79,057	0,245
	GB	5,251	0,023	-1,019	87,412	0,311
	R	0,000	0,987	0,189	144,818	0,851
	LN	3,012	0,085	-0,268	109,842	0,789
Leerwert	GL	2,070	0,153	0,516	68,298	0,608
	GB	0,296	0,588	1,680	74,985	0,097
	R	8,725	0,004**	-2,929	97,784	0,004**
	LN	5,740	0,018	1,611	76,765	0,111

Signifikanzniveau „*“, = 5 %, „**“, = 1 %, „***“ = 0,1 %

F- und T-Wert: Prüfgröße, df: Freiheitsgrade

GL = Grubenlänge (µm); GB = Grubenbreite (µm), R = Längen/Breiten der Gruben (Ratio), LN = ln (Grubenlänge)

1.3.3 Paarweiser Vergleich der Gruben aus der Simulation mit verschiedenen Getreidetestmedium

Um die Wirkung der unterschiedlichen Getreide auf die Ausdehnung dentaler Microwear-Gruben zu untersuchen, wurden die log-normalverteilten Einzelwerte als Grundgesamtheit nach Kauzyklen getrennt statistisch überprüft (Software SPSS 11.0).

Da Varianzhomogenität sowohl für die Originalwerte als auch für die log-normalverteilten Werte hochsignifikant abgelehnt werden konnte (Tabelle 14 A), wurde ein robustes Testverfahren zur Prüfung der „Gleichheit aller Mittelwerte“ (Welch-Test) angewandt. Bei der Anwendung des Welch-Testes waren keine Voraussetzungen bezüglich der Varianzen erforderlich (Precht und Kraft 1993). Die Annahme, dass

alle Mittelwerte gleich wären, konnte hochsignifikant ausgeschlossen werden (Tabelle 14 B). Der konservative Vergleichstest nach Tamhane T2, der auf der Grundlage des T-Tests basiert, ist geeignet für Mehrfachvergleiche mit ungleichen Varianzen (Tabelle 14 C).

Tabelle 14. Statistik

A Test der Homogenität der Varianzen

	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
Grubenlänge in μm	6,050	17	1472	,000
Inmajor	4,503	17	1472	,000
Längen/Breitenverhältnis der Grubendimensionen (Ratio)	3,916	17	1472	,000

B Robuste Testverfahren zur Prüfung auf Gleichheit der Mittelwerte

		Statistik (a)	df1	df2	Sig.
Grubenlänge in μm	Welch-Test	9,889	17	326,210	,000
Inmajor	Welch-Test	14,270	17	328,130	,000
Längen/Breitenverhältnis der Grubendimensionen (Ratio)	Welch-Test	5,020	17	328,601	,000

a Asymptotisch F-verteilt

C Mehrfachvergleich der logarithmierten Grubenlängen (Tamhane T2)

Kauzyklen 5000 / 50000	Dinkel-B (m)	Einkorn	Emmer	Gerste	Hafer	Hirse	Roggen	Leerwert
Dinkel-A (b)	n.s / n.s	n.s / n.s	n.s / n.s	n.s / n.s	+++ / +	+++ / n.s.	+ / n.s.	n.s / n.s
Dinkel-B (m)		n.s / n.s	++ / n.s.	n.s / n.s	+++ / ++	+++ / +++	++ / +++	n.s. / ++
Einkorn			n.s / n.s	n.s / n.s	+++ / +++	+++ / ++	n.s. / ++	n.s / n.s
Emmer				n.s / n.s	+++ / +	+++ / +	n.s / n.s	n.s / n.s
Gerste					+++ / +++	+++ / ++	n.s. / ++	n.s / n.s
Hafer						n.s / n.s	+ / n.s.	+++ / n.s.
Hirse							++ / n.s.	+++ / n.s.
Roggen								+ / n.s.
Leerwert								n.s / n.s.

Anmerkung: Signifikanzniveau „+“ = 5 %, „++“ = 1 %, „+++“ = 0,01 %

In der Tabelle 14 C der Mehrfachvergleiche sind die Ergebnisse nach Anzahl der Kauzyklen nebeneinander getrennt aufgeführt. Die Ergebnisse aus den paarweisen Vergleichen der zwei mal 36 Testmediumpaare zeigten einen allgemeinen Trend. Die weniger abrasiven Getreideproben (Dinkel-A, Dinkel-B, Einkorn, Emmer, Gerste) unterschieden sich signifikant von den abrasiveren Getreideproben (Hafer, Hirse, Roggen). Dieser Trend war bei 5 000 Zyklen stärker ausgeprägt als bei 50 000 Zyklen. Während sich die geringer abrasiven Körnertestmedien (Dinkel-A, Dinkel-B, Einkorn, Emmer, Gerste) nicht bzw. nur schwach signifikant im Vergleich zum Leerwert unterschieden (Tabelle 14 C), waren die Unterschiede von Hafer, Hirse und Roggen zum Leerwert bei niedriger Zyklenzahl stärker signifikant.

Bei der Simulation von 50 000 Kauzyklen bestand noch immer Signifikanz (außer beim Roggen). Diese war aber nicht mehr so deutlich ausgeprägt. Die Tests für Hafer und Hirse unterschieden sich nicht und Roggen war nur bei 5 000 Zyklen gering, bzw. stark signifikant unterscheidbar zu Hafer bzw. Hirse.

Insgesamt konnte mit dieser Kausimulation gezeigt werden, dass sich zwar nicht alle Testmedien in der Generierung von Gruben-Microwear voneinander unterschieden, aber dass der überwiegende Anteil in Abhängigkeit von der Abrasivität des Getreides und der Kauzyklenzahl entstand und signifikante Unterschiede unterschiedlicher Niveauhöhen bewirkte.

1.3.4 Morphologische Beschreibung der simulierten Microwear

Zur morphologischen Beschreibung lieferte die Bestimmung des Längen/Breitenverhältnisses (Ratio) nur ungenügende Aussagen (Tabelle 12). Aus der Vielzahl der Grubenformen wurde versucht, eine für die Getreideart typische Ausprägung zu finden. Die untersuchten Verschleißflächen zeichneten sich jedoch, unabhängig vom gekauten Testmedium, durch eine sehr hohe Variabilität der Grubengestalt aus. Diese machte es kaum möglich, die Formenvielfalt nach beschreibbaren Kriterien zu ordnen. Dies betraf sowohl die Größe der Gruben, als auch deren Form und Tiefe. Der überwiegende Anteil der Gruben konnte nur als polymorph beschrieben werden. Auf jedem untersuchten Areal waren in Kombination Gruben zu finden die als klein, groß, kreisförmig oder oval, und flach oder tief beschrieben werden konnten. Bezüglich der Grubenform konnte pro Getreide keine eindeutige Trennung getroffen werden. Auffällig beim Bewerten war jedoch, dass Einkorn und Emmer deutlich flachere Gruben verursachten als im Vergleich zum Hafer, Hirse und Roggen. Die hier dokumentierten Bildbeispiele (Abb. 46 – 51) stellen nur einen kleinen Ausschnitt aus der tatsächlich vorhandenen Grubenvielfalt pro Probe dar. Den Bildbeispielen aus der Kaukraftsimulation (Abb. 46 – 51 links) sind Grubenbeispiele aus der ACTA-Simulation (Abb. 46 – 51 rechts) mit dem entsprechenden Testgetreide danebengestellt (200x, 15 – 25 kV). Die visuelle Beurteilung sogenannter „charakteristischer Gruben“ der Getreidemedien war sehr subjektiv, im Besonderen da sie sehr stark vom persönlichen Eindruck des jeweiligen Betrachters abhing. Die morphologische Beschreibung von Gruben aus den Kausimulations- und den ACTA-Experimenten wurde in Tabelle 15 nochmals in einer Übersicht zusammengestellt.

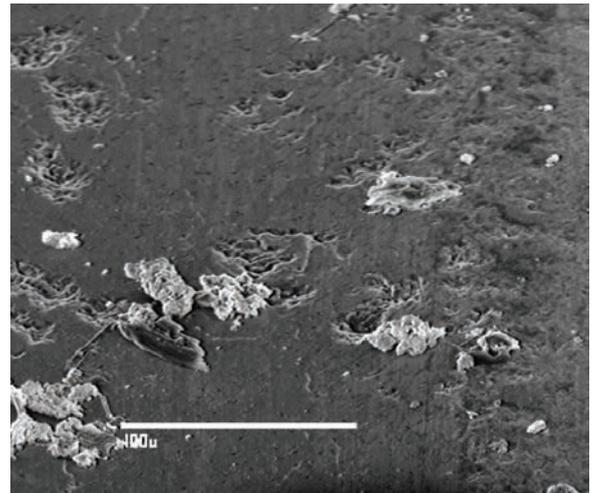
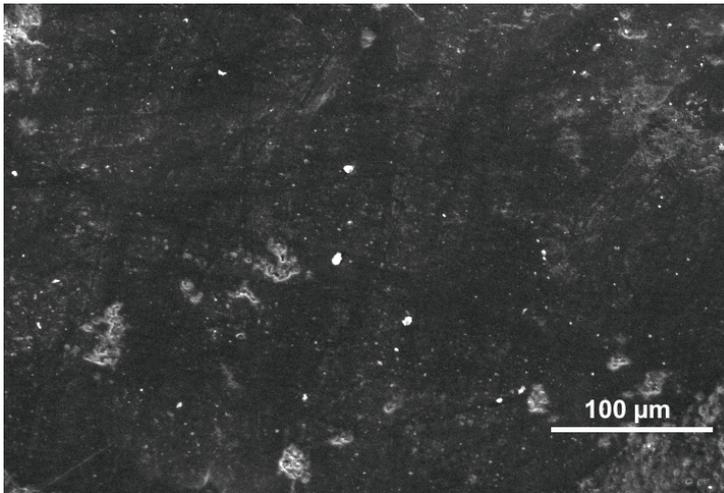


Abb. 36 Dinkel-A (links – Kausimulator; 5 000 KZ, 20kV, 200x) zeigt kleine und mittelgroße Gruben; (rechts – ACTA; 200 000 KZ; 20 kV, 500x) flache runde Gruben, teilweise mit Auflagerungen von Getreidepartikeln, leichte zentrale Vertiefung;

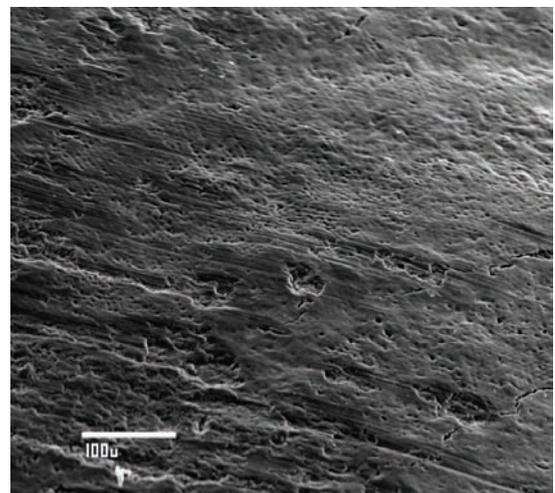
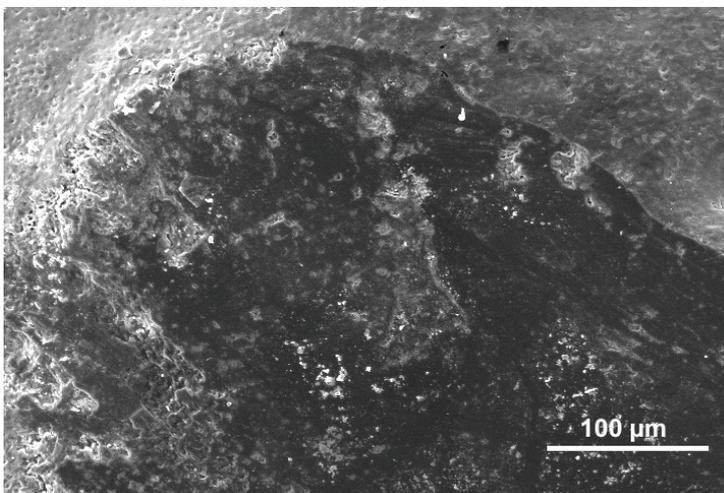


Abb. 37 Dinkel-B (links – Kausimulator; 50 000 KZ, 20kV, 200x) mit kleinen und mittelgroßen Pits unförmiger Ausdehnung und unterschiedlicher Tiefe; (rechts – ACTA; 200 000 KZ, 20 kV, 200x) flächige ovale flache Gruben, manche spitz auslaufend, kleine runde Gruben;

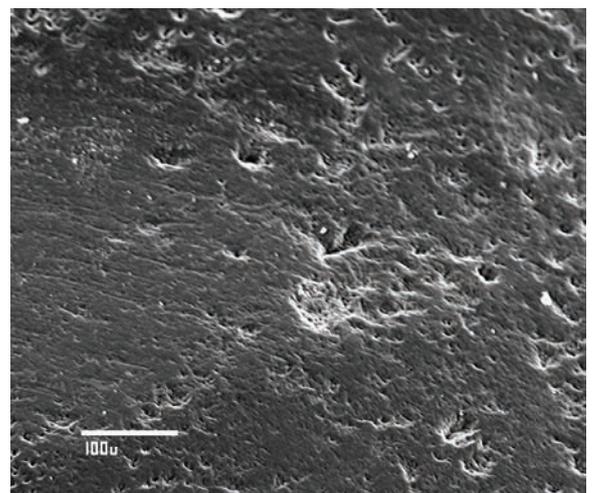
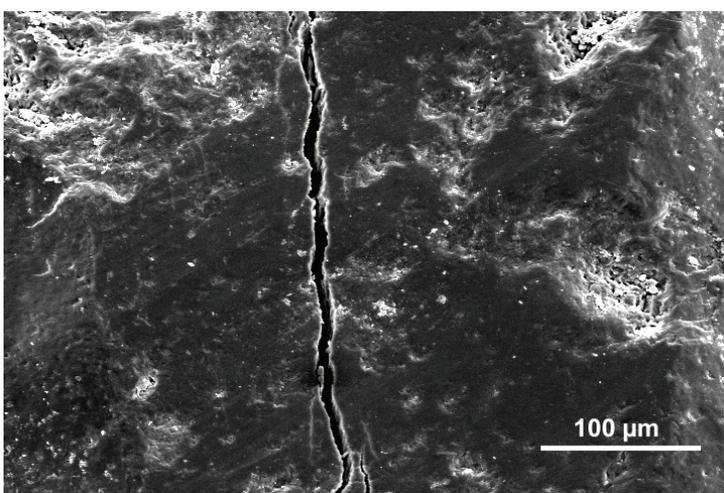


Abb. 38 Gerste (links – Kausimulator; 5000 KZ, 20kV, 200x) zeigt mittlere und größere Gruben mittlerer Tiefe; (rechts – ACTA; 200 000 KZ, 20 kV, 200x) kleine, runde vertiefte Gruben, größere ovale flache Gruben mit zentraler Vertiefung, tiefe Gruben teilweise mit mehreren Vertiefungen;

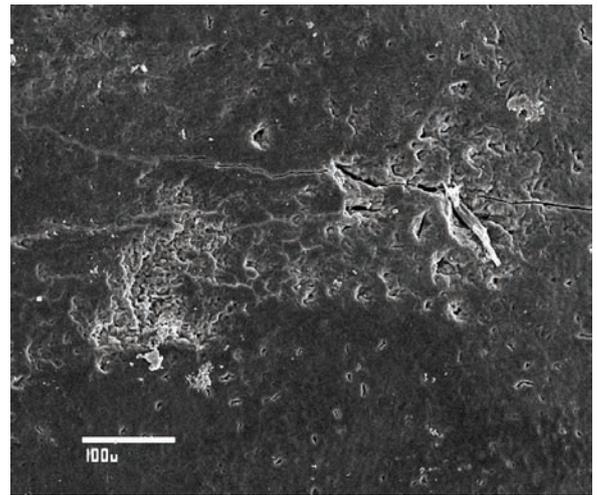
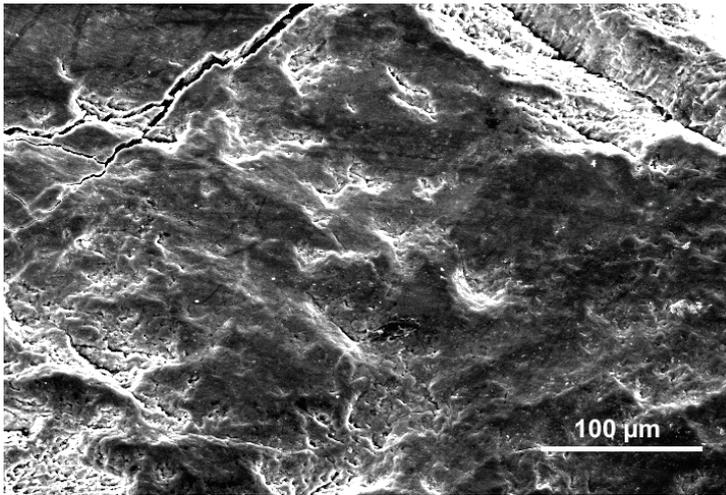


Abb. 39 Hafer (links – Kausimulator; 50 000 KZ, 20kV, 200x) halbmondförmige mittelgroße Gruben z.T. mit zentralem tief gebogenem Spalt (rechts – ACTA; 200 000 KZ, 20 kV, 200x) vertiefte ovale Gruben mit unterschiedlicher Orientierung, deutliche Untergliederung, Gruben meist mit zentralem länglichen Spalt, manchmal auch runde zentrale Eintiefung;

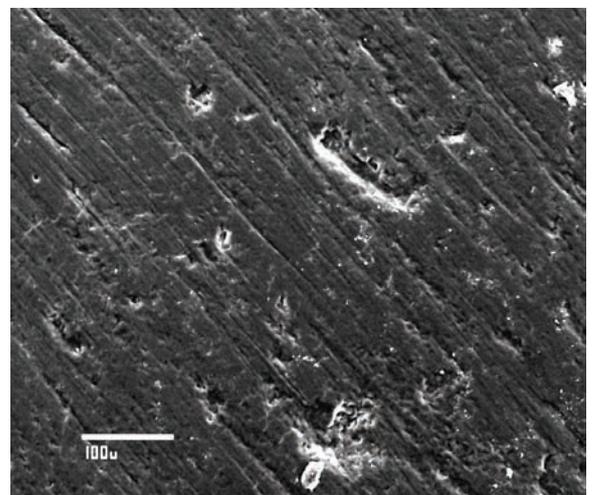
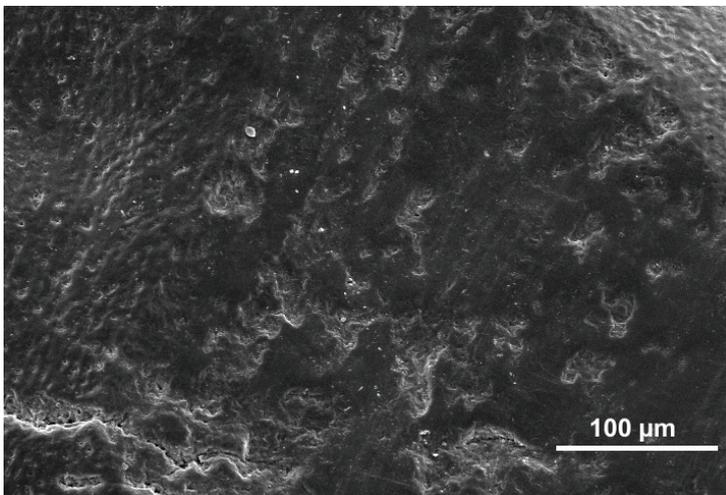


Abb. 40 Hirse (links – Kausimulator; 1 000 KZ, 20kV, 200x) mitteltiefe runde bis ovale Gruben des kleineren Formats; (rechts – ACTA; 200 000 KZ, 20 kV, 200x) runde, leicht vertiefte Gruben, teilweise mit deutlichen Kratzspuren, flache ovale Gruben mit einer oder mehreren Vertiefungen;

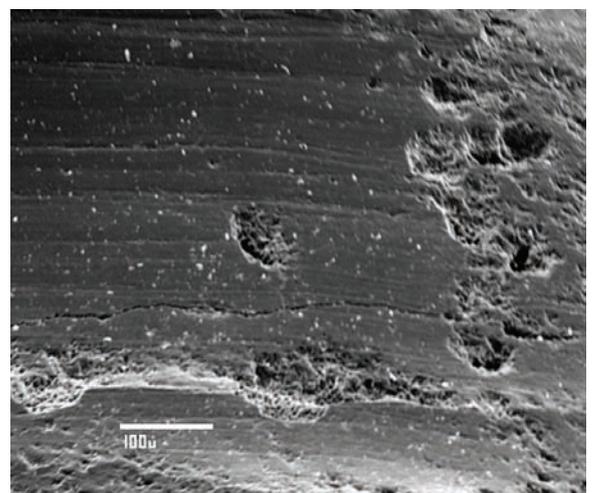
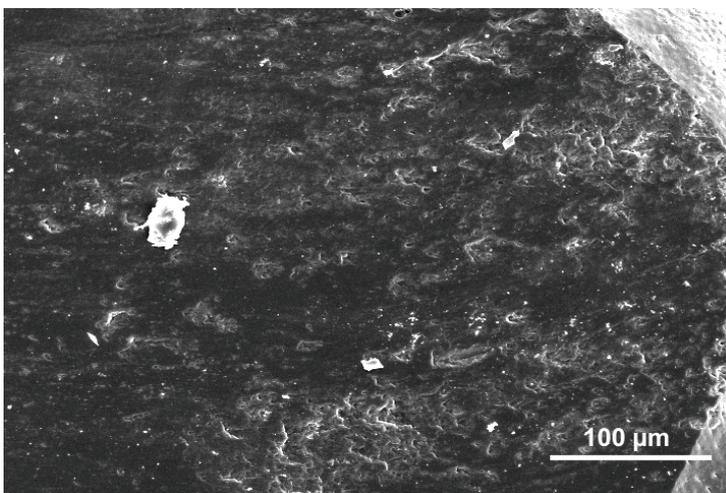


Abb. 41 Roggen (links – Kausimulator; 50000 KZ, 20kV, 200x) tiefere v-förmig ausgeprägte Gruben mittlerer Größe, mit spaltenförmiger Vertiefung, oft in Gruppen zusammenliegend; (rechts – ACTA; 200 000 KZ, 20 kV, 200x) ovale Gruben mit tiefem zentralem Spalt, flache runde und ovale Gruben ohne Spalt;

Tabelle 15. Morphologische Beschreibung von simulierten Microwear-Gruben

Testmedium	Kaukraftsimulator	ACTA-Simulation
Dinkel-A (Abb. 46)	Kleine, flache, runde Gruben mit zentralem Loch Mittelgroße Gruben polymorpher Gestalt mit mittlerer Tiefe	Breite oberflächliche Kratzspuren mit lokaler Häufung von kleinen Eindellungen. wenige Gruben, flach, rund manche Gruben mit Auflagerung von Getreidepartikeln leichte zentrale Vertiefung (Säureätzung?)
Dinkel-B (Abb. 47)	Kleine z.T. mitteltiefe runde Gruben Mittelgroße, mitteltiefe Gruben unregelmäßiger Gestalt	Allgemein: auffallend breite flache Kratzspuren, teilweise einheitlich, teils bauchig und an den Enden verjüngend manche dieser Spuren besitzen zu Beginn eine Grube a) flächige ovale flache Gruben, manche spitz auslaufend (umgekehrte Tropfenform) häufig Verlängerung der Grube durch weiterführende Kratzspur b) runde kleine Gruben
Weizen	n.t.	a) flache Gruben von unregelmäßiger Form, meist sehr flächig b) leicht vertiefte kleine ovale Gruben, ohne zentrale Ausprägung
Einkorn	Vorwiegend viele kleine, sehr flache Gruben ovaler bis runder Gestalt, deren Rand einen aufgerauten Saum aufweist Gruben in Form terrassenförmiger Einbrüche in den Schmelz Vereinzelte mittelgroße ovale Gruben z.T. mit mittlerer Tiefenausprägung	n.t.
Emmer	Vorwiegend kleine sehr flache ovale Gruben Gruben auch z. T. mit zentralen länglichen Schlitz	n.t.
Gerste (Abb. 48)	Mittelgroße oval erstreckende Grubengestalt vorwiegend mittlerer Tiefe Größere kerbenartige Gruben	a) kleine runde Gruben, vertieft b) größere, ovale, flache Gruben mit zentraler Vertiefung Grube erscheint häufig am zervikalen Aspekt tiefer als am okklusalen c) tiefe Gruben, teilweise mit mehreren zentralen Vertiefungen
Hafer (Abb. 49)	Tiefe kleine runde Gruben Tiefere rundlich ausgeprägte größere Gruben Halbmondförmige mittelgroße Gruben z.T. mit zentralem gebogenem Spalt	vertiefte ovale Gruben mit unterschiedlicher Orientierung a) mit zentralem länglichen Spalt b) teilweise runde zentrale Vertiefung nestförmig angelegte ovale Gruben mit deutlicher Untergliederung a) flach, sehr groß, ohne deutlichem Zentrum b) vertieft mit zentralem tiefem Spalt, sternförmige Orientierung
Hirse (Abb. 50)	Flache bis tiefe runde und ovale Gruben des kleineren Formats Größere mitteltiefe- bis tiefe runde und ovale Gruben	Nach 50 000 Zyklen zahlreiche Kratzspuren mit Überlagerungen, die in dieser Stärke, Anzahl und fehlenden Differenzierung bei keiner der untersuchten Getreidearten auftrat. a) Gruben rund, leicht vertieft, teilweise mit deutlichen Kratzspuren b) Gruben oval, flach, variable Ausdehnung mit 1 oder mehreren geringen Vertiefungen c) Gruben stärker vertieft, einfache Vertiefung ohne zentrale Ausprägung
Roggen (Abb. 51)	Mitteltiefe v-förmig ausgeprägte Gruben mittlerer Größe, mit spaltenförmiger Vertiefung, oft in Gruppen zusammenliegend Tiefere größere rundliche Gruben	a) ovale Gruben mit tiefem zentralem Spalt b) flache runde und ovale Gruben ohne Spalt
Leerwert (Kartoffelstärke oder reinem PBS)	Gesamtes Inventar aus kleinen und großen Gruben, runder bis ovaler Gestalt, flach aber z.T. auch mit großer Tiefe	n.t.

Anmerkung: n.t. nicht getestet

B 2. Diskussion zur Simulation am Kaukraftsimulator MUC3

2.1 Methodische Diskussion

2.1.1 Ermittlung des absoluten Zahnschmelzverlustes

Die Kräfte, welche im Kaukraftsimulator auf die Schmelzoberflächen wirken konnten, waren nicht nur in ihrem Belastungsweg (geteilte horizontale und vertikale Kaubewegung), sondern auch in ihren Dimensionen stark unterschieden zur ACTA-Simulation.

	Kaukraftsimulator	ACTA-Simulation
Gewichtsbelastung	20 N	15 N
Anzahl der Kauzyklen	50 000	200 000
Zahnschmelzverlust	Faktor 3 - 4	Faktor 1
Involvierte Kaufläche	< 1 mm ²	2,5 – 3,5 mm ²
Hydrodynamische Schmierung	Lokal statisch	dynamisch

Trotz der geringeren zyklischen Belastung (1/4 der ACTA-Simulation) waren die Zahnschmelzverluste um einen Faktor von 3 – 4 höher. Auch das Ausmaß oberflächlicher Macrowear in Relation zu einer deutlich geringeren Gesamtfläche, welche in das Kaugeschehen involviert war, lässt eine erheblich größere Belastung der Oberflächen im Kaukraftsimulator annehmen. Diese Belastung ging über die kompensatorischen Kräfte des Zahnschmelzes hinaus. Auch das fehlende elastische Moment einer Abfederung, welches *in vivo* im Desmodont durch die Sharpey'schen Fasern erzielt wird und der Verlust der *in vivo* wirksamen hydraulischen Bremswirkung durch die desmodontale Vaskularisierung (s. Kap. I B 6.1), konnte durch die Versuche mit dem reduzierten Impuls nicht kompensiert werden. Eine effektive Kompensation überlastender Kräfte fand vermutlich bei der ACTA-Simulation statt. Hier wurde die wirkende Kraft des seitlich auslenkbaren, mit dem Gewicht von 15 N belasteten Antagonisten bei der Simulation durch die hydrodynamische Gleitbewegung des Nahrungsbreies abgefedert. Die Vergleichbarkeit der absoluten Schmelzraten aus der ACTA-Simulation mit realen Schmelzraten (Teaford und Lytle 1996) aus *in vivo*-Studien unterstützt diese Hypothese.

2.1.2 Analyse der simulierten Microwear

Das Spektrum der Dimensionen der Gruben-Microwear ist für die untersuchten Zahnproben (simuliert und natürlich bekaut) in Tabelle 16 zusammengefasst. Mittelwerte der historischen Zahnproben sind teilweise den Ergebnissen aus der real komplexen Microwear an historischen Zahnproben vorweggenommen, s. Kap. III. Das Spektrum für z.B. die Grubenlängen reichte von 4,5 µm (kleinster Werte aus der Kaukraftsimulation) bis 172,5 µm (Maximalwert einer Probe der Ofnet-Höhle). Die Mittelwerte der Grubenlängen und -breiten zeigten eine deutliche Überlappung in den Dimensionen. Eine künstliche Begrenzung der Dimensionen und damit ein systematischer Artefakt konnte ausgeschlossen werden, da sowohl im unteren Bereich der Messskala (Auflösung 177 dpi → Bildpunktgröße 717 nm, 260 dpi → Bildpunktgröße 488,5 nm) als auch im oberen durch die Bildbegrenzung (bei den gewählten Einstellungen: 177 und 260 dpi → 500 µm horizontal und 350 µm vertikal) noch ein ausreichender Spielraum für die Veränderung von Spannweiten gegeben war.

Tabelle 16. Dimensionsspektrum der als Gruben definierten Microwear-Merkmale

Zahnproben	Anzahl der untersuchten Gruben	Spannweite der Länge (µm)	Grubentiefe (+/- s) (µm)	Spannweite der Breite (µm)	Grubentiefe (+/- s) (µm)	RATIO (Länge/Breite) (+/- s)
² Simulation Kaukraftsimulator MUC3	1490	4,5 - 163,5	14,2 (8,3) - 29,9 (23,2)	2,4 - 90,4	8,8 (4,9) - 18,6 (13,3)	1,5 (0,5) - 1,8 (0,7)
Simulation ACTA-Maschine ¹	189	11,6 - 188,9	28,6 (9,3) - 60,4 (26,2)	7,5 - 133,3	21,3 (5,7) - 42,1 (23,7)	1,29 (0,27) - 1,62 (0,55)
Wenigumstadt (fMA) ¹	226	7,9 - 149,3	43,9 (27,6)	3,6 - 116,1	32,9 (22,3)	1,4 (0,4)
Bittenbrunn ² (fMA)	1852	6,4 - 144,8	27,0 (15,8)	1,8 - 113,8	18,4 (11,4)	1,63 (0,73)
Brombach ² (fMA)	640	6,9 - 140,4	29,5 (17,4)	2,9 - 108,2	18,2 (11,4)	1,82 (0,85)
Waging (fMA) ²	3078	6,4 - 137,3	27,9 (14,5)	2,4 - 84,8	18,9 (10,3)	1,63 (0,72)
Weichering ² (Endneolithikum)	989	5,1 - 110,2	28,5 (15,2)	2,2 - 80,6	18,7 (10,6)	1,68 (0,71)
Ofnet-Höhle ² (Mesolithikum)	3299	5,9 - 172,5	27,2 (15,2)	2,6 - 145,1	17,3 (9,3)	1,70 (0,73)

Anmerkung: fMA frühes Mittelalter

¹Die Maße sind von Hand vermessen und neigungskorrigiert, (Gügel 1998, verändert)

²Die Maße wurden mit dem halbautomatischen Programm Microware 3.0 ermittelt (Ungar et al. 1991, Ungar 1995)

2.2 Inhaltliche Diskussion

2.2.1 Dentale Zahnschmelzabtragung in Abhängigkeit von definierten Nahrungskomponenten

In Tabelle 17 sind die absoluten Schmelzverluste dem Silikatgehalt im Versuchs-Getreide gegenübergestellt.

Tabelle 17. Schmelzverlust in Abhängigkeit vom Silikatgehalt des Testgetreides

Getreideart	Schmelzverlust mean (µm)	Silikatgehalt % Trockengewichtes
Kauzyklen	50 000	
Dinkel-A	-32,1	<0,01
Dinkel-B	-47,8	0,20
Einkorn	-39,2	n.b.
Emmer	-40,6	n.b.
Gerste	-31,2	0,18
Hafer	-71,4	0,03
Hirse	-83,4	1,46
Roggen	-86,0	0,01
Leerwert	-31,3	0

Die Hirse, mit einem hohen Gehalt an Silikat (1,46 % des Trockengewichtes), zeigte eine deutlich hohe Zahnschmelzabtragung (-83,4 µm) im Unterschied zur Getreidereferenz Dinkel-A, welche einen Gehalt an Silikat unter der Nachweisgrenze und nur eine geringe Abrasivität (-32,1 µm) aufwies. Die Getreidemedien Roggen und Hafer zeigten in absteigender Reihenfolge vergleichbar hohe Schmelzverlustwerte wie die Hirse, der Gehalt an Silikat war im Vergleich zur Hirse sehr gering (Roggen 0,01 %, Hafer 0,03 % des Trockengewichtes). Der Dinkel-B zeigte trotz eines ungefähr 6- bis 20fachen Silikatgehaltes eine deutlich geringere Abrasivität (Dinkel-B -47,8 µm) und die Gerste (-31,2 µm) lag

trotz des mittleren Silikatgehaltes (0,20 % des Trockengewichtes) in der Abrasivität vergleichbar niedrig mit dem Referenzgetreide.

Die Graphik (Abb. 52) verdeutlicht diese Ergebnisse. Zwischen dem Phytolithen-/Silikatgehalt und dem absoluten Verschleiß konnte mit Hilfe dieser Methode der Kausimulation kein monokausaler Zusammenhang gefunden werden.

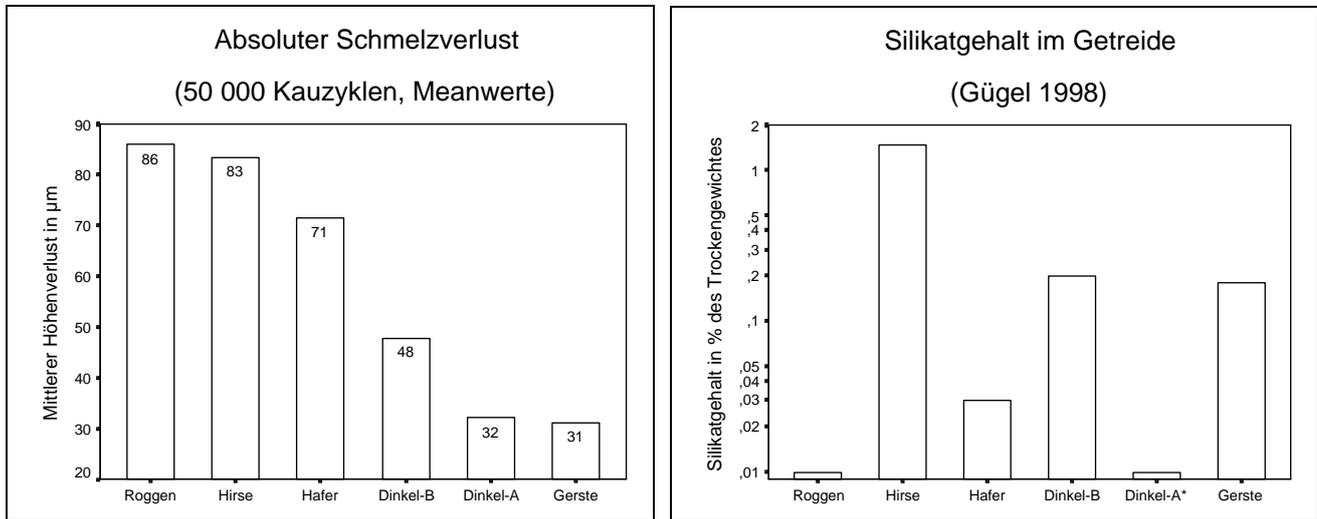


Abb. 42 Zahnschmelzverlust in Abhängigkeit vom Silikatgehalt des Getreides; a Absoluter Schmelzverlust nach 50 000 Kauzyklen am Kaukraftsimulator MUC3; Absoluter Silikatgehalt, Dinkel-A (b)* = unter der Nachweisgrenze

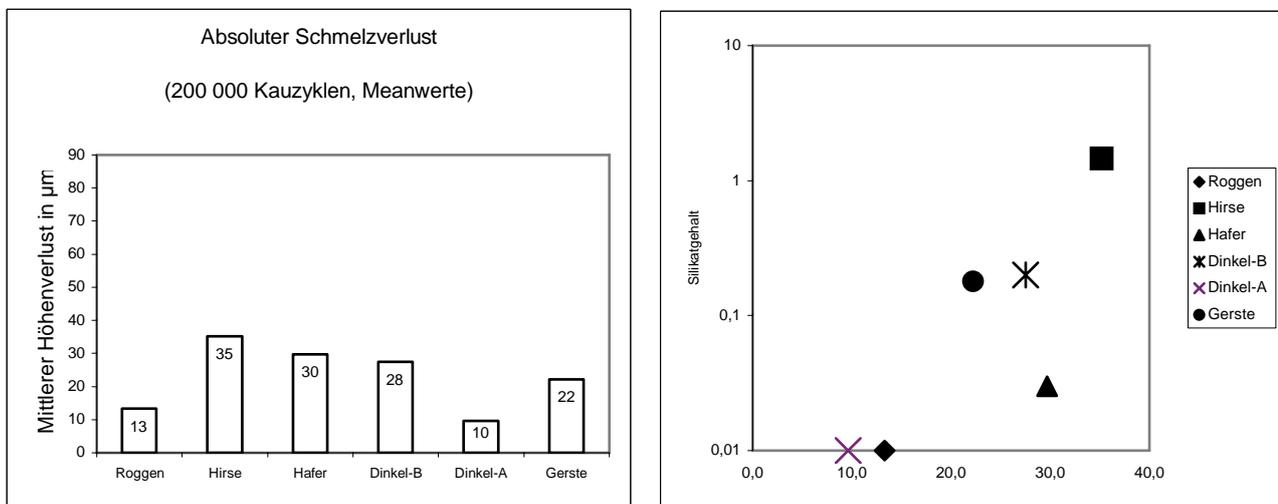


Abb. 43 Zahnschmelzverlust in Abhängigkeit vom Silikatgehalt des Getreides; a Absoluter Schmelzverlust nach 200 000 Kauzyklen an der ACTA-Maschine; b Zusammenhang zwischen absolutem Schmelzverlust und dem Logarithmus des Silikatgehaltes;

Vergleicht man die Abtragungswerte am Kaukraftsimulator (Abb. 52) und an der ACTA-Maschine (Abb. 53) werden zwei Tatsachen deutlich. Einerseits sind die Abtragungswerte der ACTA-Simulationsproben korreliert mit dem Silikatgehalt und beinhalten eine lineare Komponente, während dies nicht in der Kaukraftsimulation gezeigt werden konnte. Andererseits waren die Belastungen, welche auf den simulierten Oberflächen stattfanden stark unterschieden, eine Annahme, welche sich durch wesentlich höhere absolute Schmelzverluste der Zahnschmelzproben im Kaukraftsimulator belegen ließ.

2.2.2 Diskussion zum Bildungs- Auslöschungsprozess simulierter dentaler Microwear

Die Entwicklung dentaler Microwear war bei der Kaukraftsimulation mit großer Wahrscheinlichkeit von überlastenden Kräften, die in Materialaussprengungen und Ermüdungsfrakturen deutlich wurden, beeinträchtigt. Die dargestellten Facettenareale wiesen dennoch charakteristische Microwear-Gruben auf, deren Dimensionen durchaus in den Spannweiten realer Microwear-Gruben zu finden waren (Tabelle 16). Die Bildung und Auslöschung von Merkmalen war bereits nach einer geringen Kauzykluszahl von 50 000 Zyklen zu detektieren (Tabelle 18 und 19). Eine große Rolle bei diesen raschen Veränderungen dürften die durch die mechanische Kaubelastung kumulierenden Kräfte auf die Zahnschmelzoberfläche gespielt haben, die bei dieser Versuchsanordnung keine elastische Abfederung (Kap. I B 6.1; Kap. II B 3.1, S 78) erfuhren. Diese Kräfte führten zu einer Ermüdung des Materials und zu einer Reduktion des Bruchstopmechanismus. Die zu Beginn der Simulation rasch sich entwickelnde Dichte an Microwear-Gruben von im Mittel 15,1 (Hirse) bis 31,3 (Emmer) bezogen auf die normierte Fläche nahm bei allen Testmedien, einschließlich des Referenzgetreides, ab. Die Dichte in der Leerwert-Kontrolle veränderte sich kaum (Tabelle 19: im Mittel 15,3 bei 5 000 Zyklen, 16,0 bei 50 000 Zyklen). Die prozentuale Abnahme der Dichte von 5 000 nach 50 000 Kauzyklen lag bei den Getreidetestmedien zwischen -27,0 (Hafer) und -86,3 (Emmer) (Tabelle 19). Die Leerwert-Kontrolle zeigte, wie erwartet, nur eine geringe Zunahme der Dichte von 4,6 %. Diese Tatsache deutet auf Simulationsbedingungen hin, die zu relativ geringen Umbauvorgängen auf den Schmelzoberflächen führten. Umgekehrt kann dies als ein deutliches Indiz dafür gewertet werden, dass die Bildung Dentaler Microwear unter Simulationsbedingungen durch das Hinzufügen von Nahrungskomponenten verursacht werden kann. Bei der Reduktion der Dichte der Microwear-Gruben durch die Getreidezubereitungen spielte mit großer Wahrscheinlichkeit auch eine Zunahme an Mikrorissen und ein Ineinanderlappen bereits vorhandenen Gruben eine Rolle. Die mittleren prozentualen Zunahmen der Grubenlängen (Tabelle 19: 19,7 % bis 73,0 %) und, im geringeren Maße, der Grubenbreiten (Tabelle 19: 6,9 % bis 37,5 %) wiesen ebenso darauf hin. Sowohl auf den Facettenarealen der Simulation mit Referenzgetreide Dinkel-A als auch der Leerwert-Kontrolle konnte eine vergleichbare Wirkung nicht gefunden werden (Tabelle 19, Abb. 54).

Tabelle 18. Dichte der Gruben in Abhängigkeit von der Abrasivität des Getreidezubereitungen

Getreideart	Dichte der Gruben		Schmelzverlust mean (µm)	Silikatgehalt % Trocken- gewichtes
	5 000	50 000		
Kauzyklen			50 000	
Dinkel-A	30,7	10,6	-32,1	<0,01
Dinkel-B	18,5	7,7	-47,8	0,20
Einkorn	29,3	18,0	-39,2	n.b.
Emmer	31,3	4,3	-40,6	n.b.
Gerste	25,7	9,6	-31,2	0,18
Hafer	23,0	16,8	-71,4	0,03
Hirse	15,1	6,4	-83,4	1,46
Roggen	22,2	13,6	-86,0	0,01
Leerwert	15,3	16,0	-31,3	0

Gruben (normiert) = bezogen auf eine normierte Facettenfläche bei 200x REM-Vergrößerung

Tabelle 19. Mittlere % tuale Veränderung der Grubenparameter

Anderung Getreideart	Dichte %	Länge %	Breite %	Ratio %
Dinkel-A	-65,5	3,1	-6,9	18,8
Dinkel-B	-58,4	24,4	6,7	20,0
Einkorn	-38,6	30,3	16,4	13,3
Emmer	-86,3	73,0	37,5	26,7
Gerste	-62,6	37,0	18,5	11,8
Hafer	-27,0	16,6	9,8	6,7
Hirse	-57,6	23,0	10,5	12,5
Roggen	-38,7	19,7	12,0	0,0
Leerwert	4,6	-7,2	-21,2	18,8

Das fortschreitende Abtragen der Oberflächen war, wie in Tabelle 18 dargestellt ist, verbunden mit dem „Kauen an Sich“ auf den Oberflächen (Schmelzverlust von -31,3 bis -86,0 μm). Bei dem Prozess der Bildung und Auslöschung dentaler Microwear bzw. deren Dimensionsveränderung spielte offenbar der Grobheitsgrad und der Gehalt an abrasiven Partikeln eine größere Rolle als bei der absoluten Abtragung. Während sowohl die mittlere Grubenlänge als auch die -breite beim Referenzgetreide kaum Veränderungen aufwies (3,1 % Zunahme der Grubenlänge, -6,9 % Abnahme der Grubenbreite), nahmen die Dimensionen insbesondere der Grubenlängen aller Testgetreide (von 5 000 bis 50 000 Zyklen) im Mittel um 16,6 % (Hafer) bis 73,0 % (Emmer), diejenigen der -breite im Mittel um 9,8 % (Hafer) bis 37,5 % (Emmer) zu. In der Leerwert-Kontrolle nahmen die Dimensionen deutlich ab (Grubenlänge - 7,2%, -breite -21,2 %).

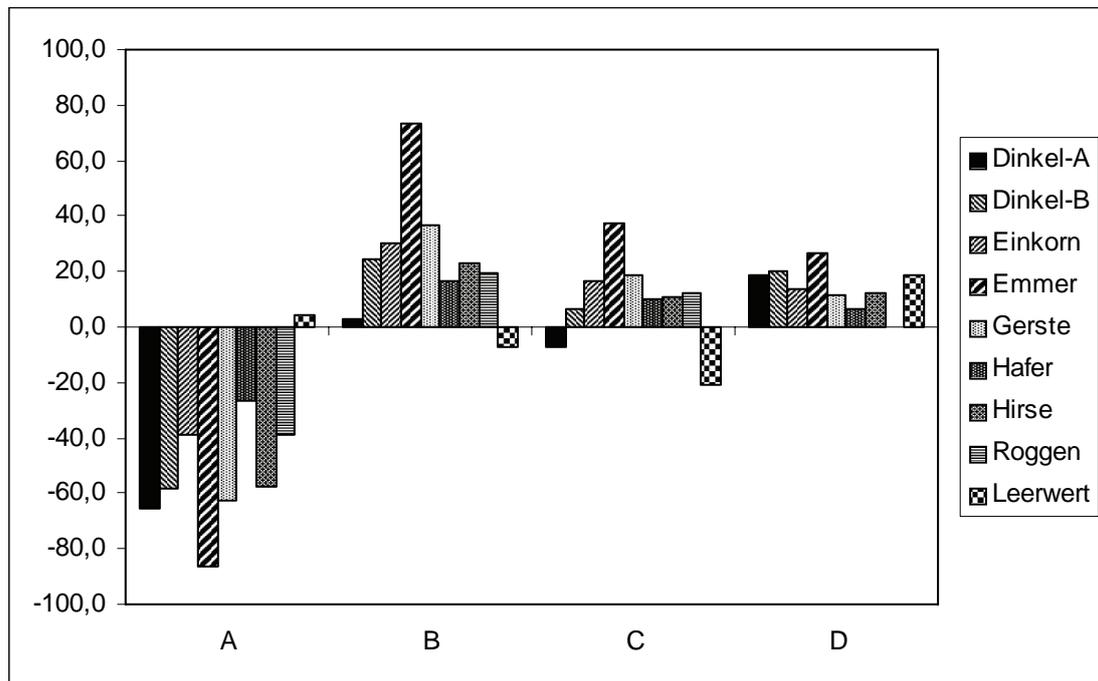


Abb. 44 Prozentuale Änderung der mittleren Grubenparameter während der Simulation von 5 000 bis 50 000 Kauzyklen (Bezugswert 5 000 Zyklen entspricht 100 %); A Grubendichte; B Grubenlänge; C Grubenbreite; D Verhältnis von Länge/Breite (Ratio);

Es kann davon ausgegangen werden, dass ein rascher Schmelzabtrag die Tiefe und die Durchmesser der komplexen Gruben fortlaufend, bis zu ihrem völligen Verschwinden reduziert. Dieser kontinuierlich wirkende als „turnover-Effekt“ bezeichnete Vorgang (Friedel 2000, Gügel 2003, Teaford und Lytle 1996,

Teaford und Oyen 1989a) beschreibt das fortschreitende Überschleifen bereits vorhandener und neu gebildeter Mikroläsionen. Die Ergebnisse der experimentell entstandenen Facettenareale stellen wie die Ergebnisse aus Untersuchungen an realer Microwear eine Momentaufnahme eines dynamische Prozesses dar.

2.2.3 *Diskussion zur Bildung charakteristischer Microwear-Gruben bei der Kaukraftsimulation*

In Abhängigkeit vom Getreide konnten vereinzelt charakteristische Gruben beschrieben werden, die trotz der subjektiven Beurteilung der Beobachter einige Übereinstimmungen aufwiesen. Übereinstimmend konnten Microwear-Gruben, die durch das „Kauen“ der Weizenarten Dinkel (A und B), Weizen, Einkorn und Emmer entwickelt wurden, als kleine flache, runde oder ovale Gruben beschrieben werden. Hafer und Roggen entwickelten bevorzugt mittelgroße bis große Gruben mit zentralem gebogenem Spalt oder spaltenförmiger Vertiefung, einzeln gelegen oder in Gruppen oder „Nestern“ vorkommend. Gerste entwickelte meist Gruben tiefer oder mittlerer Tiefe mit mehreren zentralen Eintiefungen oder kerbenförmiger Ausbildung. Die Hirse entwickelte ovale und runde Gruben variabler Größe. Besonders auffallend waren hier eher die ansonsten nur als maskiert vermuteten Kratzspuren gehäuft auffindbar. Eine Polymorphie bezüglich ganz spezifischer Eigenschaften oder Merkmale in Abhängigkeit vom Getreide trat nicht auf.

Bei den Betrachtungen zur Charakterisierung dentaler Microwear durch die Simulation ist zu berücksichtigen, dass es sich um das „Kauen“ homogener Nahrungsmittel handelte. Ein natürlicher Kauvorgang endet nach kurzer Zeit mit dem Verschlucken des mit Speichel vermengten Nahrungsbolus. Daraufhin wird erneut frisch zu zerkauende Nahrung in den Mund aufgenommen und zerkleinert. Bei einer Simulation wird über einen standardisierten Fortgang Nahrung zugeführt, zerkleinert und weitergekaut. Vorausgesetzt es handele sich um eine sehr einseitige reale Ernährungsweise, würde dennoch die Erneuerung des Nahrungsbreies eine divergierende Tatsache darstellen, welche bei der Beurteilung der Microwear zu berücksichtigen wäre.

III. Real komplexe Zahnschmelzabtragung und dentale Microwear

A. Material und Methoden

Die Untersuchung real komplexer Zahnschmelzabtragung und dentaler Microwear erfolgte an Stichproben aus fünf anthropologisch gut dokumentierten menschlichen Populationen aus dem Süddeutschen Raum vom Mesolithikum bis in das frühe Mittelalter. Sie schließt auch die Analyse des ersten Hominiden OH I aus der Oldoway-Schlucht in Ostafrika, Tanzania, aus dem Paläolithikum und das Individuum vom Kaufertsberg bei Lierheim im Donau-Ries aus dem Mesolithikum mit ein. Alle Skelettproben sind in der Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie in München magaziniert.

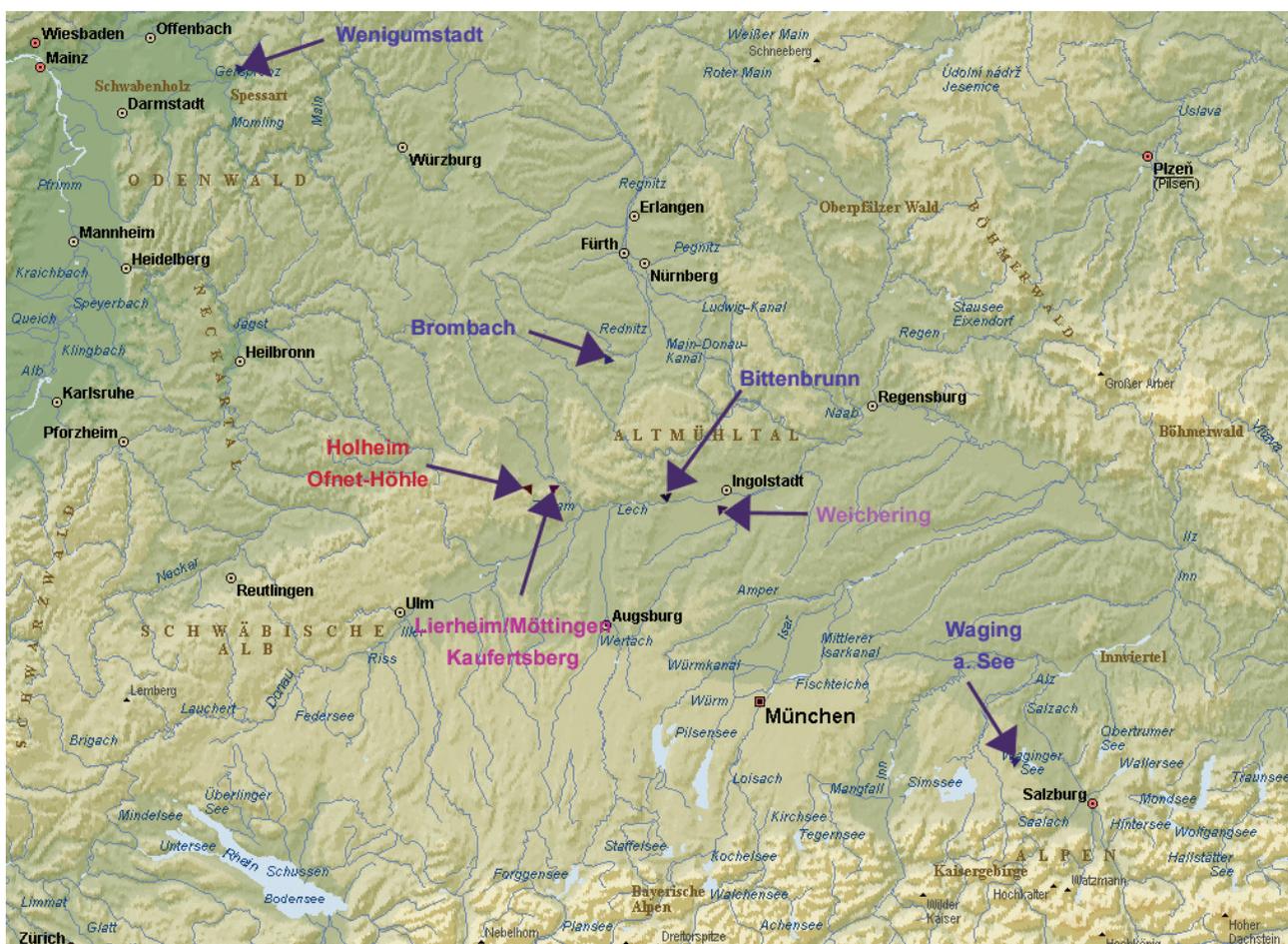


Abb. 55 Karte von Süddeutschland modifiziert aus Encarta Weltatlas 2000, 1993-1999 Microsoft Corporation, die Fundorte sind farbig gekennzeichnet (frühmittelalterlich: Waging am See, Bittenbrunn an der Donau, Brombach; (Wenigumstadt); endneolithisch: Weichering; spätmesolithisch: Ofnet-Höhle bei Holheim, Kaufertsberg bei Lierheim)

Ausgewählt wurden Skelettserien, welche eine für die Untersuchungen ausreichende Anzahl an Individuen der verschiedenen Altersstufen aufwiesen und mit hoher Wahrscheinlichkeit Ähnlichkeiten wie auch Unterschiede in ihren Ernährungsweisen hatten, die sich in der dentalen Microwear darstellen konnten. Die umfassende Skelettsammlung in München ermöglichte es nach den vorgenannten Kriterien Fundkomplexe vom Mesolithikum bis in das frühe Mittelalter für einen begrenzten geographischen Raum (diachron) zur Untersuchung zu Verfügung zu stellen, als auch für eine räumlich divergierende aber zeitgleiche Untersuchung an Individuen des frühen Mittelalters (synchron). Bei den Fundkomplexen handelte es sich um die „Schädelnester“ aus der Ofnet-Höhle (spätmesolithisch), die Bestattungen aus Weichering (endneolithisch, Glockenbecher) und Bittenbrunn (frühes Mittelalter) als repräsentativ für ein eng begrenztes geographisches Gebiet an der Donau (Abb. 55), sowie um Waging am See und Brombach aus dem ehemaligen Brombachtal aus dem frühen Mittelalter.

Alle Individuen der vorgenannte Fundkomplexe, außer diejenigen aus der Ofnet-Höhle, verstarben mit großer Wahrscheinlichkeit vorzeitig vor dem Erreichen des maximal zu erwartenden Lebensalters an Umständen, die nicht notwendigerweise an ihren menschlichen Überresten, den Knochen und Zähnen, nachweisbar sind. Die Individuen der Ofnet-Höhle stellten als geborgene Schädel aus den sog. „Schädelnestern“ eine Ausnahme unter den gewählten Skelettserien dar. Es handelte sich hier nicht um eine dem paläodemographischen Sterbeverlauf menschlicher Populationen folgenden, sondern um eine mit großer Wahrscheinlichkeit durch mechanische Fremdeinwirkung zu Tode gekommene Personengruppe (Schmidt 1913, Mollison 1936, Baum 1991, Orschiedt 1998) in engem zeitlichen Zusammenhang. Hier bestand die seltene Gelegenheit von einem Teil einer gesunden mesolithischen Bevölkerungsgruppe das Muster der Zahnabtragung und Dentalen Microwear zu untersuchen.

A 1. Beschreibung der einzelnen Fundkomplexe

1.1 Ofnet-Höhle, Holheim bei Nördlingen, Schwaben (Spätmesolithikum)

Die sog. „Schädelnester“, zwei Grabungskomplexe von insgesamt 33 menschlichen Schädeln von adulten und subadulten Individuen beiderlei Geschlechtes, wurden in der Ofnet-Höhle bei Nördlingen in Bayern 1908 ergraben und anthropologisch von Schmidt (1913) und Scheidt (1923) untersucht. Nach einer erneuten Untersuchung der Schädel durch Orschiedt (1998) kann aufgrund eindeutiger Belege tödlicher Hiebverletzungen davon ausgegangen werden, dass sämtliche Individuen erschlagen und zeitnah niedergelegt worden waren. Die ursprüngliche Datierung von 13 000 BP (Glowatzki und Protsch 1973), die mit der archäologischen Datierung von ca. 9000 BP (Naber 1974) nicht übereinstimmte, wurde anhand von ¹⁴C-Daten auf 7360 ± 80 BP (Kn 2481, Ofnet 8) in das Spätmesolithikum revidiert (Schulte im Walde u.a. 1986, Hedges u.a. 1989). Der gute Erhaltungszustand der Schädel und die geringe makroskopisch sichtbare Erosion an den Kiefern ließ eine Abtragungs- und Dentale Microwear-Analyse der Zahnoberflächen von den Gräbern 2, 3, 4, 8, 11, 13, 14, 15, 18, 21, 25, 29 und 32, wobei es sich um ein geschlechtsunbestimmtes, 8 weibliche und 4 männliche Individuen handelte, zu. Taute (1978) gab einen ersten Einblick in die Ernährungsgrundlage der noch gänzlich im Wildbeutertum verharrenden spätpaläolithischen und mesolithischen Bevölkerung Süddeutschlands. Anhand einer abrasionsanalytischen Untersuchung nach Smith (1984), die sowohl den Abrasionsgrad, als auch den Abrasionswinkel der ersten Molaren der Unterkiefer berücksichtigte, kam Baum (1991) zu dem Schluss, dass die Individuen der Ofnet-Höhle im Bereich der Jäger- und Sammlergruppen zu finden wären.

1.2 Weichering Lkr. Neuburg-Schrobenhausen, Oberbayern (Endneolithikum)

Das Gräberfeld aus dem Ingolstädter Becken zwischen Neuburg und Vohburg a.d. Donau umfasste 23 freigelegte Gräber, wovon 18 der Glockenbecherkultur, drei der Schnurkeramik und zwei der frühen Bronzezeit angehörten (Weinig 1991). Von alters her muss ein reger Handel bestanden haben, da eine der wichtigsten Verkehrsachsen Mitteleuropas über die südliche Niederterrasse zwischen südlichem Flußufer und Donaumoos verlief (Weinig 1991). Paläobotanische Untersuchungen (Küster 1995) weisen darauf hin, dass gute lokale Voraussetzungen für die Viehzucht und bedingt auch für den Ackerbau vorlagen. Dieser Umstand ließe auf eine relativ dichte Besiedelung schließen. Bodenproben der gleichen Zeitstellung aus der näheren Umgebung (Küster 1995) enthielten Reste von Einkorn (*Triticum monococcum*) und Emmer (*Triticum dicoccon*), in etwas jüngerem Fundmaterial wurde auch Gerste (*Hordeum vulgare*) nachgewiesen, sowie Spelzenreste und Körner, die zum Dinkel (*Triticum spelta*) gestellt werden können. Von den 23 Gräbern (anthropologische Untersuchung durch P. Schröter, Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie, München) wurden die insgesamt nicht reichlich ausgestatteten Gräber 1, 2, 3, 5, 10, 14, 16, 17, A und D der Glockenbecherkultur (1 männliches, 5 eher männliche, 3 weibliche, 1 eher weibliches) (Schröter 1997) für die weitere Analyse ausgewählt.

1.3 Bittenbrunn, Lkr. Neuburg-Schrobenhausen, Oberbayern (frühes Mittelalter)

Das frühmittelalterliche Gräberfeld von Bittenbrunn war eines der seltenen Gräberfelder des ostalammannischen Raumes und deckte einen Zeitraum um die Mitte des 5. Jahrhunderts bis zur Mitte des 7. Jahrhunderts ab, wobei es kontinuierlich als Bestattungsplatz genutzt wurde. Es lag ca. 300 m nordwestlich zur Siedlung Bittenbrunn am Beginn einer Flußschleife am nördlichen Ufer der Donau zwischen Steppberg und Neuburg an der Donau in einem eng begrenzten Flußtal im hochwasserfreien Hangbereich (Pohl 1995). Die bei der Grabung festgestellten 65 Bestattungen (Christlein 1971) gliederten sich in 57 Erwachsenengräbern mit archäologisch und anthropologisch 21 identifizierten Frauen- und 18 Männergräbern, 12 Frauen- und 5 Männergräbern (nur anthropologisch bestimmt), 7 Kindergräbern und ein als juvenil und „eher männlich“ bezeichnetes Skelett. Zur DMA konnten 6 Frauen (Gräber 5, 37, 51, 59, 62 und 73) und 5 Männer (Gräber 7, 13, 17, 34 und 42) in den Altersgruppen „juvenil“ und „adult“ und zusätzlich Grab 11, 28, 29 und 30 zur Bestimmung der Zahngesundheit und -abtragung ausgewählt werden.

1.4 Waging (am See), Lkr. Traunstein, Oberbayern (frühes Mittelalter)

Bei dem frühmittelalterlichen Reihengräberfeld Waging handelte es sich um ein mit Grabbeigaben vielfältig ausgestattetes Gräberfeld mit einem Umfang von ca. 400 Gräbern aus dem späten 6. bis ins frühe 8. Jahrhundert mit Spuren von bronze-, eisen- und römischer Besiedelung vor Ort (Knöchlein 1995). Ein für das Gebiet um den Waginger See erstelltes Pollendiagramm ließ auf eine Besiedlungs- und Ackerbaukontinuität seit der Antike schließen, wobei sich eine Besiedlungslücke von etwa 450 n. Chr. bis ins frühe 6. Jahrhundert nicht eindeutig widerlegen ließ (Küster 1990). Aus dem frühen 8. Jahrhundert sind im Waginger Gebiet eine große Anzahl bäuerlicher Anwesen nachgewiesen (Knöchlein 1995). Von den bisher 45 anthropologisch (P. Schröter, Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie, München) untersuchten Gräbern konnten für die DMA 8 Frauen (Gräber 5, 35, 52, 59, 104, 115, 141 und 152) und 3 Männer (Gräber 92, 136 und 155) und zwei Geschlechtsunbestimmte in den Altersgruppen „juvenil“ und „adult“ ausgewählt werden.

1.5 Brombach Lkr. Gunzenhausen-Weißenburg, Mittelfranken (frühes Mittelalter)

Aufgrund der geographischen und geologischen Lage befindet sich das Brombachtal an einer Nahtstelle. Der Brombach, dessen Quelle unmittelbar an der europäischen Wasserscheide liegt, welche die Flußsysteme der über Main und Rhein zur Nordsee führenden Rezat/Rednitz und der Altmühl über die Donau ins Schwarze Meer scheidet (Siegmond 1983), wurde in seinem Verlauf von zahlreichen Mühlen gesäumt (Lidl und Hahn 1989). Die klimatisch begünstigte hügelige Landschaft, die wie der gesamte fränkische Raum, auch während der Eiszeiten zur eisfreien Zone Mitteleuropas gehörte, war bereits während der mittleren Steinzeit (ab ca. 10 000 v. Chr) besiedelt. Das 1980 entdeckte frühmittelalterliche Gräberfeld wurde archäologisch auf das Ende des 7. bis Anfang des 8. Jahrhunderts datiert. Neben einzelnen gestörten Gräbern konnten 39 Gräber dem frühen und Grab 9 dem späten Mittelalter zugeordnet werden. Die anthropologische Untersuchung der Bestatteten erfolgte durch Siegmund (1983). Für die Untersuchungen an den Zähnen wurden die Gräber 1, 16a, 39, die eher Frauen zugeordnet werden, die Gräber 7, 35 und 36, die eher männliche Individuen bargen und nicht bestimmte Individuen aus Schnitt A Planum 5 Schädel 5, Schnitt A Planum 5 Grab 12 und Schnitt B Planum 4 Grab 2 herangezogen.

1.6 Historisch bedeutende Einzelproben

Die beiden im Folgenden beschriebenen Funde, der Schädel vom Kaufertsberg und der Hominide OH 1, welcher als erstes hominides Skelett in der Oldoway Schlucht in Tanzania, Afrika gefunden worden war, sind ebenfalls in der Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie in München magaziniert.

1.6.1 Schädel vom Kaufertsberg bei Lierheim, Gem. Appetshofen, Lkr. Donau-Ries (vorneolithisch)

In einer kleinen Höhle des Kaufertsberges, der „Hexenküche“, wurde während der Grabungen 1913 von Birkner und Frickhinger eine beigabenlose Kopfbestattung aus der vorneolithischen Zeit Bayerns entdeckt (Schröter 1983) und geborgen. Es handelte sich um einen vollständigen Schädel (Abb. 56, Frontal- und Lateralansicht Abb. 57 links Oberkiefer okklusal) mit dem Unterkiefer (Abb. 57 rechts) und dem 1. und 2. Halswirbel in natürlicher Lage (Birkner 1914 aus Dehn und Sangmeister 1954). Während nach archäologischen Kriterien die Schädel der Ofnet-Höhle als mesolithisch eingestuft werden können, gilt dies für den Schädel vom Kaufertsberg als nicht gesichert. Auch die Schädelmorphologie gibt keinen eindeutigen Beleg für das Vorliegen eines späten Jungpaläolithikers oder eines Mesolithikers. Nach dem anthropologischen Gesamtbefund wird der Schädel einem frühadulten, im dritten Lebensjahrzehnt verstorbenen Individuum zugewiesen. Die Geschlechtsdiagnose lautet übereinstimmend „männlich“ (Übersicht in: Schröter 1983). Es konnten keine Anzeichen von stumpfer Gewalt am Schädel nachgewiesen werden (Schröter 1983).

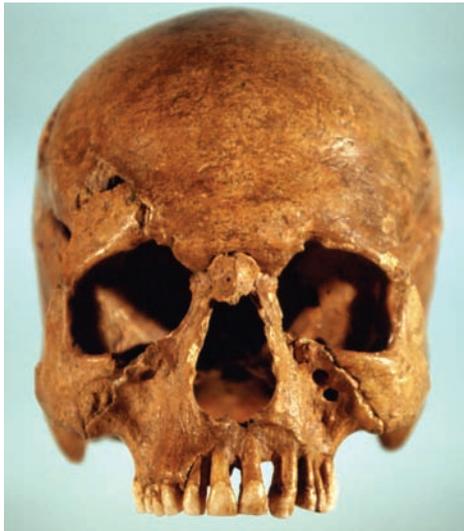


Abb. 56 Frontal- und Lateralansicht des Schädels vom Kaufertsberg bei Lierheim, Donau-Ries



Abb. 57 Okklusale Ansicht der Zahnreihen der Maxilla (links) und der Mandibula (rechts) des Schädels vom Kaufertsberg bei Lierheim, Donau-Ries

Bei der zahnmedizinischen Begutachtung von Ober- und Unterkiefer ergaben sich eine im Seitenzahnbereich noch vollständige Bezahnung. Im Frontzahnbereich fehlten postmortal Zahn 31, 32 und 42. Durch das ungeklärte Fehlen des Zahnes 22 verblieb eine Lücke zwischen Zahn 21 und 23. Zahn 23 zeigte als einziger Zahn Karies im Zahnhalsbereich. Es lagen keine Anzeichen von Zahnschmelzhypoplasie vor. Zahnsteinablagerungen waren ebenfalls nicht vorhanden. Der Abkautungsgrad kann als relativ fortgeschritten im Bezug auf das geschätzte Alter des Individuums eingestuft werden.

1.6.2 *Hominide Oldoway OH 1*

Der *Hominide OH 1* wurde während einer „Zentralafrikanischen Expedition“ 1913 in der Oldoway Schlucht in Tanzania gefunden und von Reck (1914) und Gieseler und Mollison (1929) anthropologisch beschrieben. Der Schädel konnte einem männlichen Individuum von etwas mehr als 40 Jahren zugeschrieben werden (Abb. 58 Frontal- und Lateralansicht). Weder in Verbindung mit dem Skelett noch in seiner nächsten Nähe wurden kulturelle Hinterlassenschaften aufgefunden, die einer zeitlichen Einstufung dienlich gewesen wären. Stratigraphische Untersuchungen des Fundortes und C14-Datierungen aus dem Knochenkollagen des Individuums und von Säugerknochen aus der gleichen Schicht legten ein Alter von ungefähr 17 000 Jahren (Leakey et al. 1972) nahe.

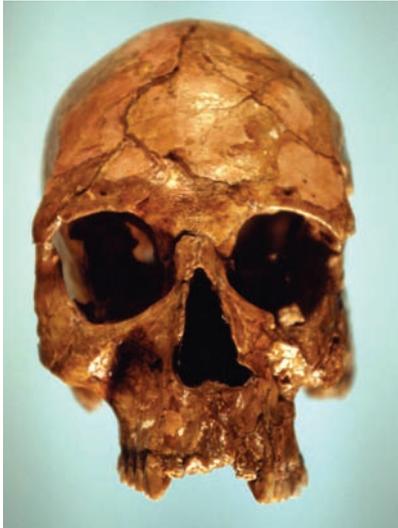


Abb. 58 Frontal- und Lateralansicht des Schädels des Hominiden OH 1, Oldoway Schlucht, Tanzania, Zentalafrika



Abb. 59 Okklusale Ansicht der Zahnreihen der Maxilla (links) und der Mandibula (rechts) des Schädels des Hominiden OH 1, Oldoway Schlucht, Tanzania, Zentalafrika

Der relativ gut erhaltene Gesichtsschädel zeigte eine stark prognathe Ausformung (Abb. 58). Im Frontzahnbereich fehlten die maxillaren Schneidezähne (Abb. 59 links) und die mandibularen Zähne 42, 43 und 44 (Abb. 59 rechts). Sie waren postmortem im Zahnalsbereich abgebrochen. Die übrige Bezahnung war gut erhalten. Die Canini waren besonders im Oberkiefer sehr kräftig entwickelt. Die bukkalen Frontzahnoberflächen der Zähne 31, 32 und 41 waren bis in den Dentinbereich kerbenförmig abgeschabt. An keinem der vorhandenen Zähne konnten Zeichen einer Zahnschmelzhyoplasie oder von Zahnstein gefunden werden. An jeweils einem Zahn trat Zahnalskaries (26) bzw. okklusale Karies (46) auf. Die Molaren waren stark abgetragen, die Oberflächen insbesondere im Unterkiefer waren nahezu plan abgetragen. Sowohl die bukkalen Höcker der Molaren im Oberkiefer als auch die Prominenz der Eckzähne im Oberkiefer deuteten auf das Vorhandensein einer lateralen Führung der Kieferbewegung beim Kauvorgang hin.

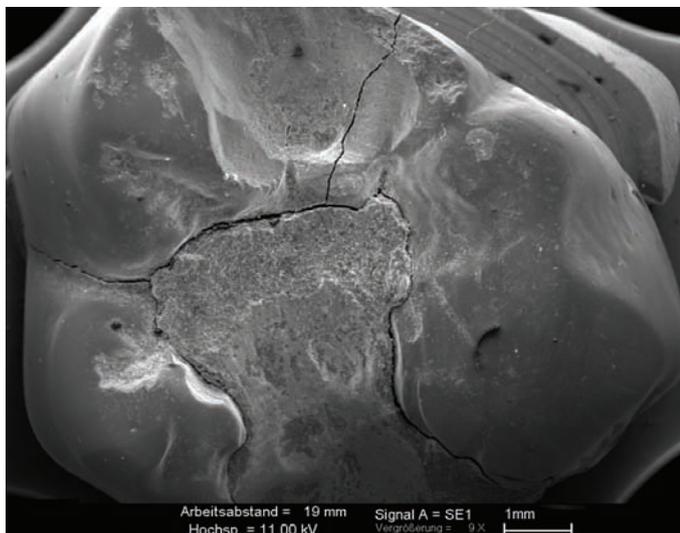
1.7 Rezente Zahnproben

Die vergleichenden Arbeiten zur Darstellung von Original und Replikat wurden an rezenten Molaren durchgeführt. Da aus naheliegenden Gründen nur stark beschädigte Zähne zahnärztlich aus dem Kiefer entfernt werden, standen nur Zähne zur Verfügung, welche ausnahmslos einen fortgeschrittenen Zerstörungsgrad aufwiesen und nicht mehr behandelt werden konnten. Anhand persönlicher Mitteilung durch den behandelnden Zahnarzt, stand auch häufig der Wunsch der Patienten, den entnommenen Zahn aufzubewahren, dem Vorhaben entgegen. Aus diesen Gründen konnten im Verlauf von ca. 6 Monaten nur

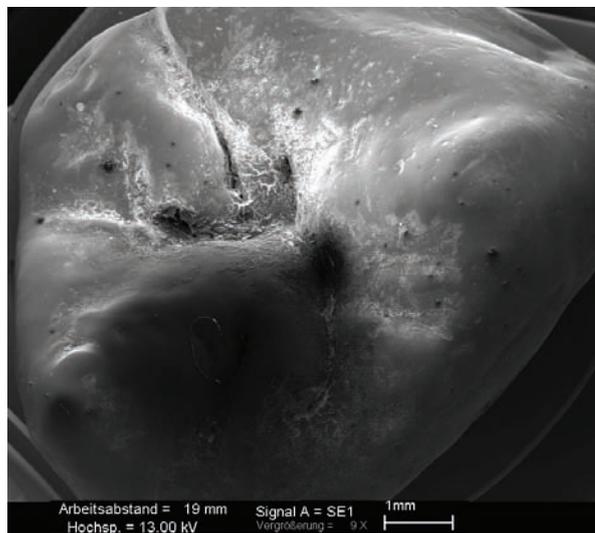
zehn Zahnproben während der täglichen Routine der unterstützenden Zahnarztpraxis in Regensburg gesammelt werden. In der folgenden Tabelle 20 sind die Zähne und ihr Erhaltungszustand eingetragen.

Tabelle 20. Rezente Zahnproben

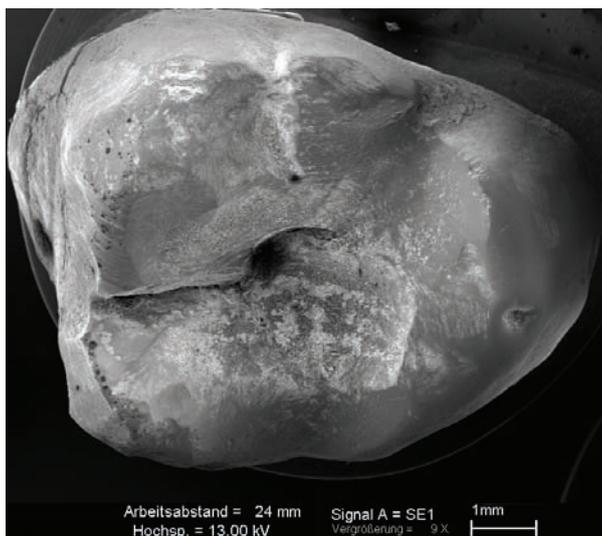
Individuum Nr.	Alter	Geschlecht	Zahn	Abtragungsgrad (nach Scott 1979b)	Zustand des Zahnes
K1	41	M	17	2	massive Störung des Zahnschmelzes durch Zangenspuren
K2	60	M	27	n.b.	großflächige Karies in der Zentralfissur
K3	64	W	16	n.b.	große Plombe in der Zentralfissur
K4	59	W	28	2-3	Facetten noch wenig ausgeprägt, kaum Karies, flache Gruben
K5	39	M	37	2-3	große Plombe in Zentralfissur
K6	36	W	18	2-3	große Plombe in Zentralfissur, kleine Facetten-Bereiche
K7	45	M	18	2-3	sehr scharfe Schliffkanten zw. Facette 9 und 6/5, OfI ganz plan, MM vh
K8	59	W	26	2-4	Plombe, breiter Spalt um Plombe, keine Facette 9, 6 und 5 vorhanden
K9	79	M	18	2-4	Zahnoberfläche stark porös, flächiger Lochfraß
K10	46	W	17	2-3	ganz lange zarte Kratzspuren, Schwarzfärbung



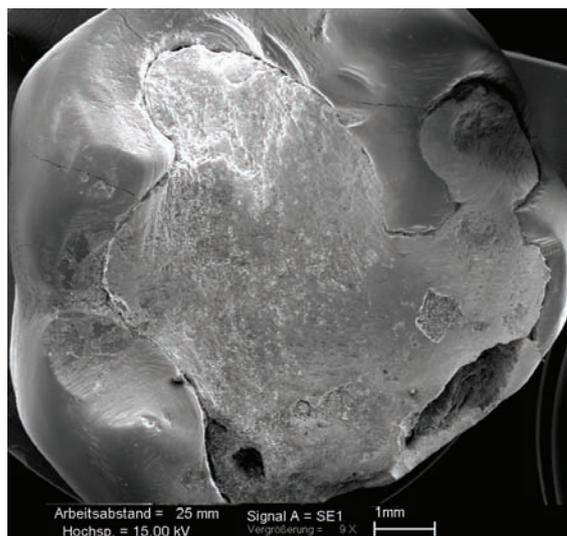
K3



K4



K7



K8

Abb. 60 REM-Übersichtsaufnahmen (10 x) der rezenten Molarenoberflächen der Individuen K3, K4, K7 und K8. Die Molaren der Individuen K3 und K8 sind großflächig mit Füllungswerkstoffen ausgekleidet, K7 zeigt scharfe Schliffacetten. Das Ausmaß der Beschädigung an K8 entspricht denjenigen der übrigen rezenten Zahnproben.

Durch die hochgradigen Beschädigungen und Restaurationsflächen, die *in vivo* an den rezenten Zahnproben stattgefunden hatten, konnten an einem Großteil der Flächen keine intakten Schmelzareale mehr aufgefunden werden (Abb. 60 Beispiele für den Erhaltungszustand der rezenten Zahnproben). Letztlich konnten von den zehn Zahnproben nur drei (K3, K4 und K7) zur Untersuchung der entsprechenden Facetten herangezogen werden.

A 2. Dentalanthropologische Untersuchung der Skelettserien

2.1 Analyse des Zahnstatus, der Zahngesundheit, der Okklusionsverhältnisse und des Grades der Zahnschmelzabtragung

Der Zahnstatus, die Zahngesundheit, die Okklusionsmerkmale und die Zahnabtragung wurde am Gebiß untersucht und im Befundbogen (Anhang 3) dokumentiert. Die Individualdaten wurden in einer EXCEL-Tabelle zusammengefasst.

Anhand der Kariesfrequenz und der An- bzw. Abwesenheit von Zeichen für Zahnschmelzhyoplasie oder alveolärer Prozesse am Gebiss wurde die Zahngesundheit ermittelt. Die Okklusionsmerkmale wurden nach der vorgeschlagenen Methode der F.D.I. Kommission für Klassifikation und Statistik von Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten (COCSTOC, Baume et. al 1973), welche vorwiegend morphologische und funktionelle Befunde erfasst, aufgenommen.

Zur Analyse der individuellen Zahnabtragung wurde nach der Attritions-Ermittlungs-Methode für jeden Quadranten der Molaren ein diskreter Abtragungswert von 1-10 ermittelt (Scott 1979 b, Anhang 2). Der Abtragungswinkel der Molaren wurde nach der relativ robusten Methode von Smith (1984) mit Hilfe eines selbstkonstruierten Instrumentes bestimmt. Das Instrument besaß einen langen Arm und wurde so auf die höchsten homologen Punkte des zweiten rechten und linken Molaren platziert, dass eine gedachte horizontale Linie als Basis entstand. Ein zweiter rotierender Arm wurde an die okklusale Ebene angelegt, wodurch der Winkel abweichend von der Horizontalen durch die Zeigerstellung entweder vom rechten oder vom linken Molaren an der Messskala angezeigt werden konnte. Bukkale Neigungen wurden mit positivem Vorzeichen, linguale Neigungen mit negativem Vorzeichen versehen. Die Neigungswinkel konnte mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm abgelesen werden. Der Zusammenhang zwischen Abtragungsgrad und –winkel im Unterkiefer wurde in Form einer Regressionsgerade dargestellt (Smith 1984, Gügel 2001). Die Abtragungsgeschwindigkeit der Zahnschmelz wurde nach der Hauptachsen-Analyse-Methode (Principal axis analysis, Sokal und Rohlf 1969, Scott 1979a) berechnet, wobei die relativ konstanten Durchbruchintervalle der Zähne des permanenten Gebisses genutzt wurden. Diese Hauptachsen-Analyse darf nicht mit der Hauptachsen-Analyse (major axis) der Dentalen Microwear verwechselt werden, welche den Parameter in Richtung der Längsachse der analysierten Microwear-Merkmale darstellt. Die Hauptachsen-Analyse-Methode unterscheidet sich von der Regressionsanalyse dadurch, dass bei dieser die quadrierten Abstände zur Ermittlung der Regressionsgerade parallel zur X- bzw. Y-Achse berechnet wurden, wogegen die quadrierten Abstände jener Hauptachsen-Analyse-Berechnung im rechten Winkel vom Punkt zur Geraden selbst bestimmt werden. Die Hauptachsen-Analyse-Methode macht keine Vorannahmen bezüglich der Messgenauigkeit oder Abhängigkeit der Variablen untereinander (Sokal and Rohlf, 1969). In der vorliegenden Untersuchung wurden die Paare M1M2 herangezogen, da diese in den untersuchten Kiefern regelmäßig vorhanden waren und einer relativ fixierten Durchbruchsequenz folgen (Oberkiefer: M¹ 6,1 – 6,7 Jahre, M² 11,9 – 12,8 Jahre, Unterkiefer: M₁ 5,9 – 6,9 Jahre, M₂ 11,2 – 12,2 Jahre; aus: Schroeder 1992). Der M3 war nicht regelmäßig vorhanden, entweder weil er noch nicht eruptiert oder nicht angelegt war.

2.2 Auswahl der Individuen für die Dentale Microwear Analyse

Die Auswahl der Individuen erfolgte nach folgenden Kriterien: das Individuum sollte eine weitgehend vollständige Bezahnung tragen mit mindestens einem opponierenden, in Okklusion stehenden, zweiten Ober- und Unterkiefermolar und die Zahnkronen sollten nicht fortgeschritten abradert sein (kein freiliegendes Dentin). Ein Sterbealter zwischen juvenil und mitteladult war deshalb für die Untersuchungen vorzuziehen. Das Gebiß sollte möglichst eine Normbissstellung (Okklusion der Angle-Klasse I, Schumacher et al. 1990) aufweisen und frei von auffälligen Anomalien sein; der Zahnschmelz sollte nicht durch die Bodenlagerung erodiert sein (Gügel 1998). In der Individuenliste für die Dentale Microwear Analyse (Anhang 4) sind die ausgewählten Molarenpaare getrennt nach Facetten und Bildanzahl aufgelistet. Die zur Auswertung der Dentalen Microwear Analyse geeigneten Facetten sind gekennzeichnet und nach Anwendung des jeweiligen Rasterelektronenmikroskoptypes getrennt notiert.

2.3 Fotografische Dokumentation der Experimente

Die in dieser Arbeit erscheinenden Experimentalaufnahmen wurden mit einer Automatik-Kamera (Nikon F 601) angefertigt. Als Film wurde entweder ein Kunstlichtdiafarbfilm (Kodak Ektachrome 64T) oder ein Diaschwarzweißfilm (Kodak Ektachrom 200) verwendet.

2.4 Fotografische Dokumentation der okklusalen Flächen der Molaren

Die okklusalen Flächen der Zähne wurden mit einem Stereomikroskop (M3, Wild Heerbrugg AG, Schweiz) mit 6,5 bis 40-facher Vergrößerung untersucht. Die Fotografien wurden mit einer Spiegelreflex-Kamera (Canon T90) erstellt, wobei ein Kunstlichtdiafarbfilm (Kodak Ektachrome 64T) verwendet wurde.

2.5 Präparation der Zahnproben für die Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Dentalen Microwear (DMA)

Von jedem Individuum wurde soweit möglich ein opponierendes Paar der zweiten Ober- und Unterkiefermolaren entnommen. An den ausgewählten Originalzähnen wurde die Zahnwurzel bis kurz vor der Schmelz-Zement-Grenze abgetrennt. Die Zahnoberflächen wurden schonend unter fließendem Wasser mit einem Baumwolltuch und einem feinem Pinsel gereinigt. Von den Okklusionsflächen der archäologischen Zähne wurden zur späteren Auffindung der Facetten fotografische Aufnahmen erstellt. Die Entwässerung und Trocknung erfolgte in einer aufsteigenden Alkoholreihe mit anschließender Azetonbehandlung. Nach der Nachtrocknung im Vakuumexsikkator wurden die Zahnproben mit Leitsilber auf Aluminiumstubs aufgeklebt und mit einer weichen Goldschicht zur rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung (s.u.) überzogen.

2.5.1 Herstellung hochauflösender Replikate

Zur Analyse der Dentalen Microwear der Zahnproben aus der Ofnet-Höhle und der Einzelproben wurden die Zähne mit Azeton von allen Kleberresten und durch Wärmebehandlung von den Wachsresten vorangegangener Restaurationsarbeiten an den Gebissen gereinigt. Nach der spontanen Trocknung wurden Replikate mit hochauflösendem Silikon (President Plus Jet light body, Zeichnungsschärfe von 1 µm, Coltène Whaledent, Konstanz) nach der Methode von Beynon (1987) geformt. Die Negativ-Replikate wurden nach Einhaltung der kurzen Abbindezeit mit Kunstharz (Araldite XW 396 und Araldite XW 397, 10 Teile :3 Teile, Fa. Ciba Geigy, Basel, Schweiz) abgegossen. Nach 48h Aushärtungszeit wurden die Positiv-Replikate auf Aluminiumträger mit Leitsilber aufgeklebt und 6,5 min bei 0,1 mbar und 20 mA mittels einer Sputteranlage (EMITECH K 550) mit einer weichen Goldschicht für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung beschichtet.

1.1 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Die SEM-Untersuchungen (Abk. SEM – Scanning electron microscopy) wurden an einem Rasterelektronenmikroskop des Types Philips XL 20 Series (ehem. Institut für Zoologie, München) mit digitaler Speicherung von Videosignalen festgelegter Auflösung und an einem LEO1430VP (Fakultät für Biologie Department I, Biodiversitätsforschung / Anthropologie der LMU München) durchgeführt, an welchem eine digitale Speicherung der Videosignale variabler Auflösung möglich war.

Die Zahnschmelzoberflächen (Originale und Replikate) wurden als Übersichtsaufnahme bei 8 – 15facher Vergrößerung, zur DMA mit 200-facher und für Detailaufnahmen mit variablen Vergrößerungen aufgenommen. Die Spannung der Kathode betrug 5 bis 15 kV (Kilovolt), der Arbeitsabstand wurde möglichst gering bei 3 bis 7 mm eingestellt. Die Schmelzoberfläche wurde weitestgehend im rechten Winkel zum Elektronenstrahl positioniert, um sowohl eine symmetrische Verteilung von Kontrast und Helligkeit als auch eine drei-dimensionale Scharfstellung des gesamten Bildausschnittes zu erzielen. Dadurch sollte möglichst jede Form der Verzerrung linearer Merkmale und eine damit verbundene Neigungskorrektur vermieden werden (kompensative Rasterstauchung, Lange und Blödorn 1981).

Die gesamte Oberfläche der Regionen der während des Kauvorganges gebildeten Facetten 9 (F9 – Phase II: Zerknacken und Zermahlen), 6 und 5 (F6 und F5 – Phase I: Wirkung von Scherkräften) (Kay und Hiimae 1974) auf den zweiten maxillaren und mandibularen Molaren wurden wie Gordon (1982) und Grine (1986) vorgeschlagen haben, in standardisierter Orientierung von bukkal nach lingual, von links (im Bild) nach rechts (im Bild) eingestellt und mäanderförmig durchmustert. Von jeder Facette wurden jeweils wenn möglich zwei Aufnahmen (200x: 712 x 484 Philips, 200x: 1024 x 725 pixels incl. Datenleiste LEO) erstellt (Anhang 4). Zur topographischen Orientierung und Wiederfindung wurde der jeweilige Bildausschnitt in dem Übersichtsbild der Zahnoberfläche markiert.

Die Fläche jeder Aufnahme betrug gerundet 0,177 mm² (Philips) bzw. 0,176 mm² (LEO) (Tabelle 21). Zur Berechnung der Flächen wurde jeweils der Wert für die Bildpunktgröße herangezogen (Tabelle 21). Die Flächen-Diskrepanz für die am Philips erstellten Bilder resultierte aus den Ungenauigkeiten der Abmessung von Balken- und Gitternetzabmessungen. Die Speicherung der Videosignale erfolgte im tif-Format. Inwiefern die Unterschiede in der Auflösung Einfluß auf die DMA (Dentale Microwear Analyse) hatten, wurde anhand einer Bilderserie (s. Kap. III B 3.3) untersucht.

Tabelle 21. Parameter zur Datenspeicherung der REM-Aufnahmen

	Auflösung (dpi)	Bildpunktgröße (bei 200x) (nm)	Bildspeicher (incl. Datenleiste)	Bildspeicher excl. Datenleiste)	Bildbreite (µm)	Bildhöhe (µm)	Fläche (x10 ⁶ µm ²)
Philips (gemessen)	177				470	355	0,167
Philips (berechnet)	177	717	712 x 484	712 x 484	510	347	0,177
LEO 1430VP (berechnet)	260	488,5	1024 x 725	1024 x 720	500	352	0,176

Zur Identifikation der gerasterten Zahnschmelzoberflächen wurden die Bilddateien nach folgendem Schlüssel (Tabelle 22) codiert.

Tabelle 22. Schlüssel zur Identifikation der Bilddateien

	Fundkomplex	Individuum /Grab	Lokalisation	Facette Nr.	Vergrößerung	Ausschnitt	Bildcodierung
Philips XL 20 Series/ LEO 1430 VP	A = Waging B = Bittenbrunn D = Brombach C = Weicherung O = Ofnet Kf=Kaufertsberg Old=Oldoway	1 bis 3 stellig	o = Facette auf dem Oberkiefermolaren M ² u = Facette auf dem Unterkiefermolaren M ₂	5 6 9	ueb = Übersicht 8 - 12x 1 = 200x 2 = 500x 3 = 1000x 4 = 2000x 5 = 5000x	a b c etc.	z.B. A5u61a = Waging A, Individuum 5, M ₂ u, Facette 6, SEM 1 = 200x, Bildausschnitt a

1.1.1 Computerunterstützte mikromorphometrische Auswertung der dentalen Microwear

Die Analyse der dentalen Microwear-Merkmale auf den Aufnahmen wurde mit Hilfe des semiautomatischen Computervermessungsprogrammes „MICROWARE 3.0“ (Ungar et al. 1991, Ungar 1995) direkt an den tif-Bildern an einem PC durchgeführt. Zur Bildanalyse wurden folgende Voreinstellungen im Programm gewählt: Auflösung 177 bzw. 260, Vergrößerung 200x, Verhältnis: Länge/Breite (Pit axis length ratio) 4 : 1. In Anlehnung an Grine (1986), Grine und Kay (1988) und Gordon (1988) wurden solche Läsionen auf dem Zahnschmelz, welche durch ein Längen:Breiten - Verhältnis > 4:1 gekennzeichnet waren, als Kratzspuren („scratches“) identifiziert, solche mit einem Längen:Breiten - Verhältnis von 1:1 bis 4:1 als Gruben („pits“).

Jedes Merkmal wurde durch vier Koordinaten identifiziert. Ein Koordinatenpaar beschrieb die Länge und Orientierung der Hauptachse des Merkmales (major axis) und das zweite Paar seine seitliche Ausdehnung (minor axis). Da automatisch die längere Achse als Hauptachse angesprochen wurde, waren Gruben nicht mehr durch ihre Orientierung nach bucco-lingual als Hauptachse, sondern durch ihre lineare Ausdehnung charakterisiert (im Unterschied dazu: Gügel 1998). Merkmale, deren Ausdehnung die Grenzen des Bildes überstiegen, wurden mit der Randbegrenzung als diskreter Wert integriert, um eine permanente Unterschätzung der Werte zu vermeiden. Gekrümmte Merkmale wurden als lineare Merkmale mit der Strecke von Anfangs- zu Endpunkt in die Analyse aufgenommen, da nach den Erfahrungen von Ungar (pers. Anmerkung) eine Verzerrung der Ergebnisse nicht gegeben wäre. In die Untersuchung gingen alle aufgefundenen, metrisch charakterisierbaren Schmelzläsionen ein.

Alle Einzeldaten der Merkmale eines Bildes wurden in einer EXCEL-Datei gespeichert und als einzelne Merkmale identifiziert und fortlaufend nummeriert. Folgende statistische Parameter wurden gleichzeitig berechnet und in eine EXCEL-Tabelle übertragen: 1) gesamte Merkmalsdichte (Anzahl der Merkmale pro Fläche) 2) Dichte der Gruben, 3) Dichte der Kratzspuren, 4) mittlere Länge der Gruben, 5) mittlere Breite der Gruben, 6) mittlere Länge der Kratzspuren, 7) Orientierung der Kratzspuren und 8) Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector length = R, Ungar 1994). Eine Anhäufung von Artefakten, eine lagerungsbedingte Zerstörung oder Störung von Oberflächen und eine artifiziell asymmetrische Verteilung der Merkmale führte zum Ausschluss des entsprechenden Schmelzareals, der entsprechenden Oberfläche oder des gesamten Individuums.

1.1.2 Morphologische Charakterisierung der Dentalen Microwear

Zur morphologischen Beschreibung einzelner als Gruben (pits) definierter Merkmale wurden die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen bei 200facher Vergrößerung herangezogen. Untersucht wurden sowohl Gruben als auch Kratzspuren. Zur besseren Charakterisierung einzelner morphologischer Ausprägungen und Auflagerungen wurden zusätzliche Detailaufnahmen in Vergrößerungen von 500fach

und höher erstellt. Als Grundlage hierzu dienten bisherige Beschreibungen einiger Autoren, die im Ergebnisteil (4.1) zusammengestellt sind. Es konnten aber auch Formen aufgefunden werden, die aufgrund ihrer Dimensionen und ihres Längen/Breitenverhältnisses zu den Gruben zählten, aber in ihrer individuellen Form abwichen und auf den Zahnoberflächen noch nicht näher beschrieben wurden. Zur graphischen Aufarbeitung und Darstellung der Bilddateien diente das Bildverarbeitungsprogramm Adobe PHOTOSHOP (Version 5.0 – 6.0).

A 2. Kontrolluntersuchungen zur Ermittlung individueller und systematischer Fehler bei der DMA

2.1 Statistische Verfahrensweise

Die Aufbereitung und statistische Analyse der Daten wurde mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft EXCEL (Version 6.0 – 2000) und dem Statistikprogramm SPSS (Version 10.0 – 12.0, SPSS Inc., Chicago, IL) durchgeführt.

Um Prüfverfahren an Statistischen Parametern anwenden zu können, wurde vorab eine Explorative Datenanalyse zur Klärung der Verteilung und Homogenität der Varianzen der Daten durchgeführt. Eine anschließende Multivariate (MANOVA) und Univariate Varianzanalyse (ANOVA) erbrachte Information darüber, ob überhaupt statistisch signifikante Ergebnisse innerhalb des Parameterpools erzielt werden konnten. Da größtenteils keine Varianzhomogenität angenommen werden konnte, wurde der robuste Test auf Gleichheit der Mittelwerte (Welch-Test) zur paarweisen Überprüfung herangezogen.

Bei der Analyse von Einzelwerten wurde ebenfalls vorab auf Normalverteilung überprüft. Da weder für die Originaldaten der Bilddateien, noch für die log-transformierten Daten eine Normalverteilung angenommen werden konnte, wurde für die weiteren Analysen der robuste Welch-Test, welcher unabhängig von der Verteilung ist, und anschließend bei Varianzungleichheit der Tamhane 2 Test zur paarweisen Überprüfung angewandt.

2.2 Testserie zur Identifikation der Dimensionen charakteristischer Microwear Merkmale

Zur statistischen Erfassung des individuellen Fehlers bei der Erkennung der Merkmalsgrenzen, in Abhängigkeit

- a) der Erkennung des individuellen Merkmales von Bild zu Bild
- b) von der Anzahl der aufeinanderfolgenden diagnostizierten Bilddateien (d.h. dem Ermüdungsgrad der Augen)
- c) von dem Grad der Wiedererkennung von Merkmalen nach variablen zeitlichen Intervallen zwischen der jeweiligen Merkmalerfassung

wurde eine Testserie erstellt. Hierfür wurde ein Bildausschnitt mit fünf bekannten Merkmalen ausgewählt (Abb. 61).

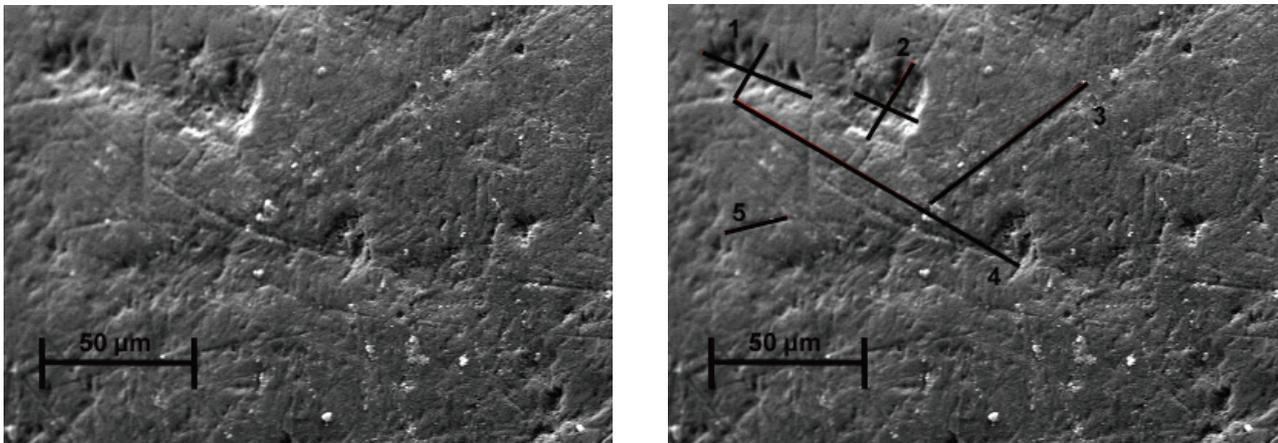


Abb. 61 Ausschnitt einer SEM-Aufnahme 200x, im rechten Bild sind die Merkmale markiert und nummeriert von 1 – 5

Diese Merkmale waren zwei Gruben unterschiedlicher Größe (1, 2) und drei Kratzspuren von unterschiedlicher Länge, mittel (3), lang (4) und kurz (5). Der Bildausschnitt wurde nach der Auswertung von 0, 8 und 16 Microwear-Bilddateien fünf mal hintereinander mit der Microwear-Software ausgewertet. Zur Markierung und Auswertung einer Bilddatei benötigt der geübte Beobachter wenigstens 15 - 20 Minuten, in Abhängigkeit von der Merkmalsdichte (ca. 150 Merkmale), im Fall des Bildausschnittes wurde ca. eine Minute benötigt. Nach jeweils einem Intervall von zwei bis sechs Wochen wurde der Vorgang viermal wiederholt. Die Markierung der Merkmale erfolgte stets in gleicher Reihenfolge.

2.3 Quantifizierung des Messfehlers innerhalb einer flächenidentischen Bildserie

Zur Erfassung quantitativer Ungenauigkeiten bei unabhängig gescannten d.h. nahezu identischen Oberflächen wurde eine Bildserie eines Facettenausschnittes (Abb. 62) erstellt und unabhängig voneinander ausgewertet.

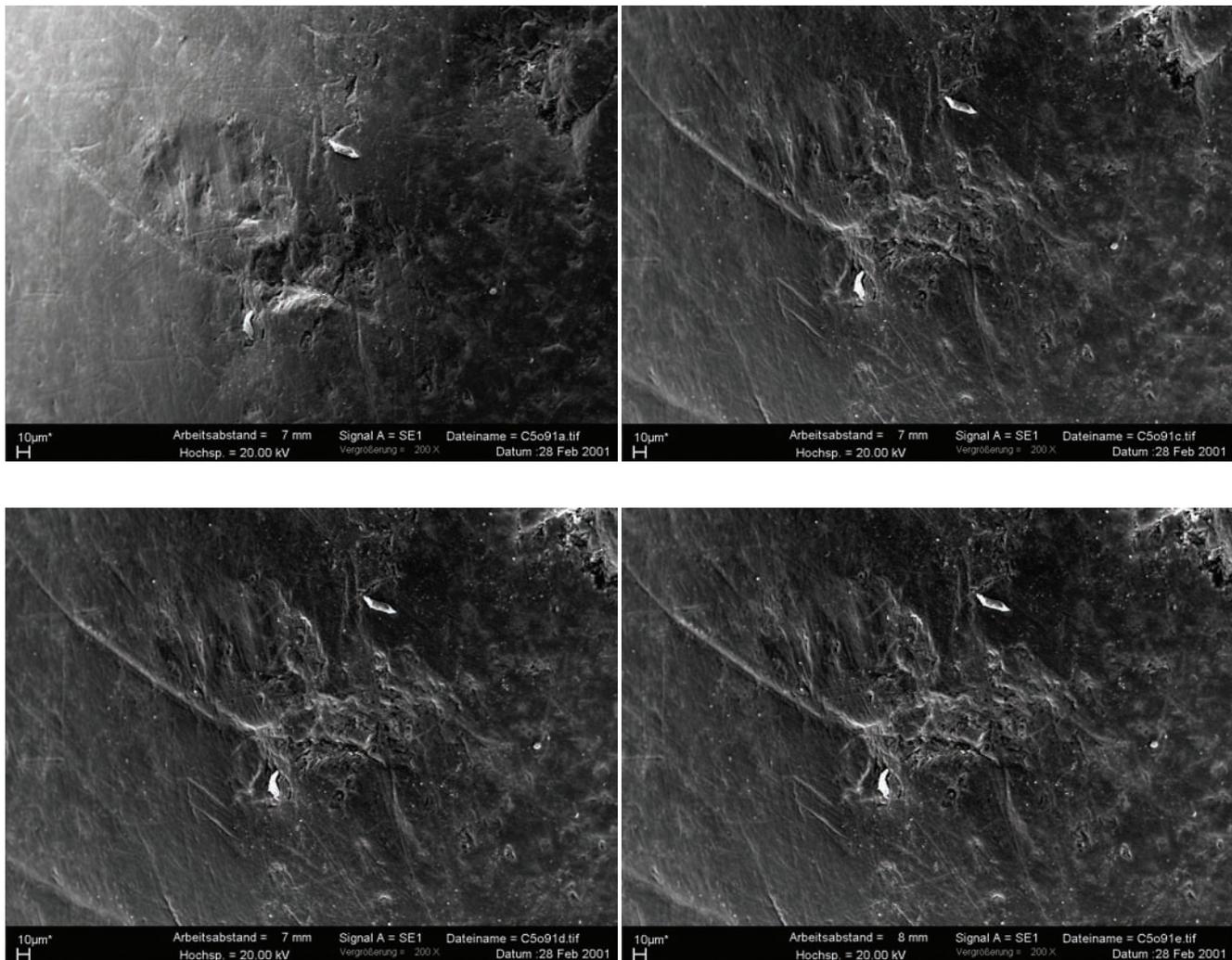


Abb. 62 REM 200x, Bild a, c, d und e als Beispiele für Bilddateien nach fortlaufend geringfügig veränderter Winkelstellung (Weichering Individuum 5, M², Facette 9)

2.4 Quantifizierung systematischer Effekte durch technische REM-Vorgaben

Der Gerätewechsel von einem Philips XL 20 Series zu einem LEO 1430 VP im weiteren Fortgang der rasterelektronenmikroskopischen Arbeiten machte einen systematischen Vergleich der dentalen Microwear notwendig. Die relativ variablen Möglichkeiten am LEO 1430 VP wurden den Vorgaben bezüglich des Bildspeichers am Philips-Gerät (Fläche bei 200facher Vergrößerung ca. 0,177 mm², Auflösung 177 dpi, Bildpunktgröße 717 nm) weitestgehend angepasst (Fläche bei 200facher Vergrößerung ca. 0,176 mm², Auflösung 260 dpi, Bildpunktgröße 488,5 nm). Zu klären war, ob die verbleibenden Diskrepanzen nur einen geringen oder einen signifikanten Einfluss auf die Erkennung der dentalen Microwear und deren metrische Grenzen hatten. Für die simultane Bilderserie wurden Facettenausschnitte auf den Schmelzoberflächen des Individuums 32 aus der Ofnet-Höhle zufällig

ausgewählt. Ein im folgenden nachgewiesener signifikanter Einfluss hatte eine statistische Auswertung aller Bilddateien getrennt nach der Anwendung des Rasterelektronenmikroskopes zur Folge.

2.5 Vergleichende Arbeiten zur Darstellung von Original und Replikat am Beispiel von rezenten Molaren
Um zu überprüfen, inwiefern ein metrischer Vergleich der Microwear-Merkmale von Original und hochaufgelöster Kopie zulässig wäre und nicht zu systematischen Fehlern führen würde, wurden von 5 rezenten Zahnproben die Ergebnisse der Microwear-Analyse unterschiedlicher Facetten vom Original und deren Kopie verglichen. Drei der Bildpaare sind im folgenden dargestellt (Abb. 63 - 65).

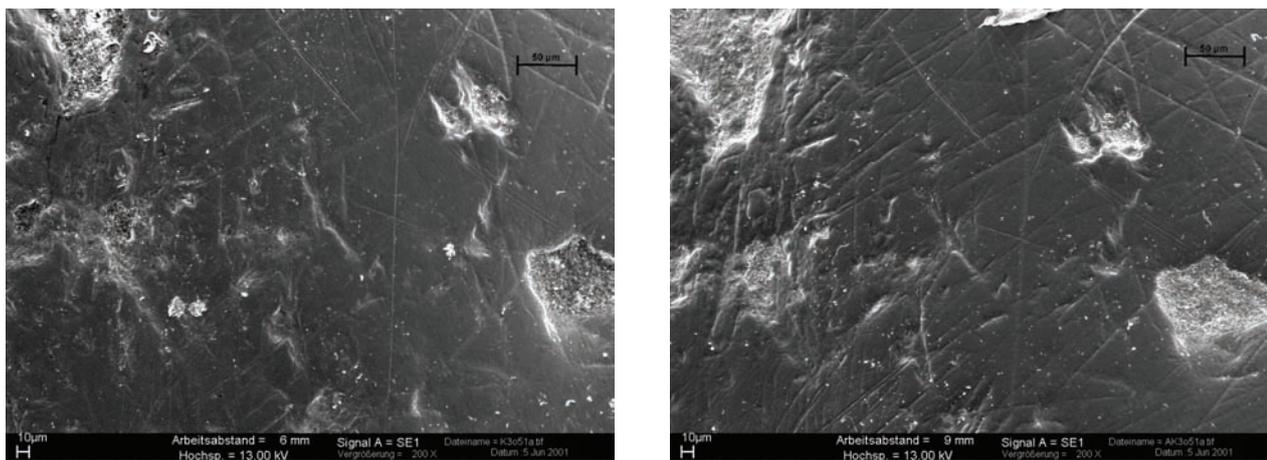


Abb. 63 Original (links) und Replikat (rechts) der rezenten Zahnoberfläche (K3) Facette 5 des M¹. SEM 200x

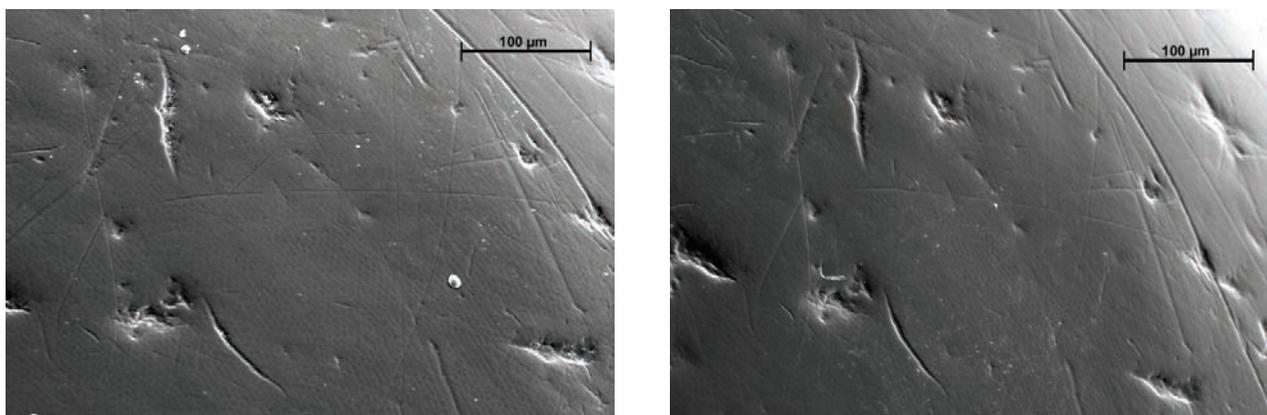


Abb. 64 Original (links) und Replikat (rechts) der rezenten Zahnoberfläche (K4) Facette 6 des M³ SEM 200x

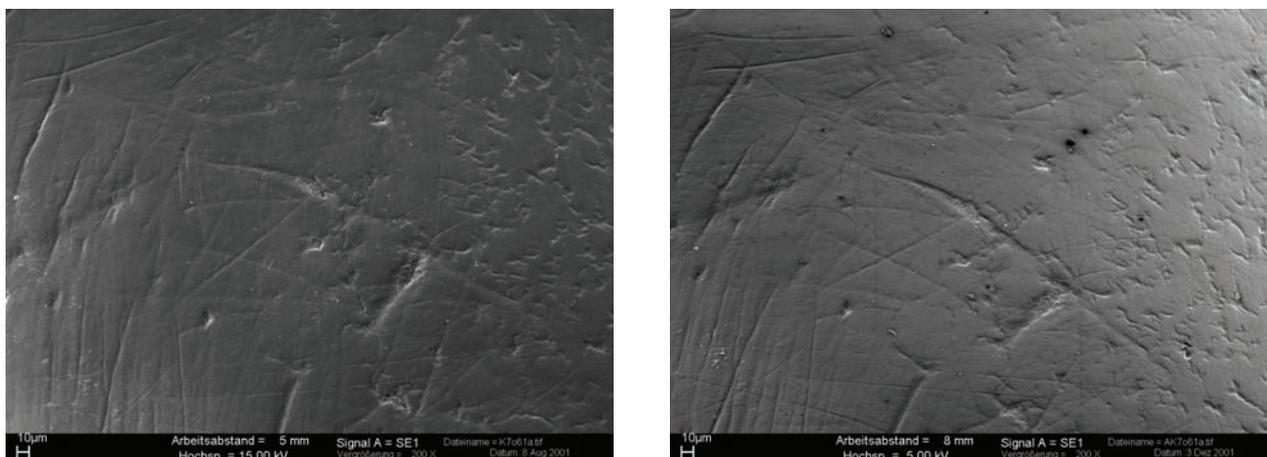


Abb. 65 Original (links) und Replikat (rechts) der rezenten Zahnoberfläche (K7) Facette 6 des M³ SEM 200x

A 3. Untersuchung der Stickstoff- und Kohlenstoffsignatur ausgewählter Individuen

Der Prozess einer Änderung in der Subsistenzstrategie menschlicher Gruppen kann anhand der Analyse stabiler Isotope, insbesondere der Kohlenstoff- und Stickstoffisotope aus dem Kollagen, aber auch aus der strukturellen Karbonatfraktion menschlicher Skelettfunde auf der Gruppen- sowie auf der Individualebene im Bezug auf das komplexe Nahrungsnetz untersucht werden (Asam et al. 2004). Die Methode beruht darauf, dass das Verhältnis stabiler Isotope bestimmter chemischer Elemente in der belebten Natur durch bio- und geochemische Prozesse verändert wird (Ambrose 1993) und dieses Verhältnis massenspektrometrisch ermittelt werden kann. Stabile Isotope, welche im Knochenkollagen gemessen werden, sind: ^{13}C und ^{12}C bzw. ^{15}N und ^{14}N . Die Verhältnisse von Kohlenstoff und Stickstoff reflektieren den Proteinanteil in der täglichen Nahrung jedes einzelnen Konsumenten. Veränderungen der Verhältnisse eignen sich daher zur Rekonstruktion von Veränderungen in den Präferenzen bestimmter Nahrungskategorien in der Ernährung, da ein systematischer Unterschied zwischen der Isotopenzusammensetzung der verzehrten Nahrung und dem Gewebe eines Konsumenten besteht. Im Stoffwechsel biologischer Gewebe wird unter physiologischen Bedingungen generell gegen das schwerere Isotop diskriminiert, es erfolgt eine kinetische Isotopenfraktionierung (Hoefs 1997). Dadurch unterscheiden sich die Isotopenwerte auf den einzelnen Trophiestufen im Verlauf der Nahrungskette signifikant. In enger Beziehung zu den Eiweißkomponenten der Nahrung stehen die Isotopenwerte des Knochenkollagens (Konsument), entsprechend des Baustoffwechsels.

Knochenkollagen als vorwiegende organische Matrix des relativ schwer löslichen und dadurch über einen langen Zeitraum hin erhaltenen Knochenminerals, wird von diesem fast vollständig maskiert. In Abhängigkeit von den Eigenschaften der bodenlagernden Umgebung (Wiechmann et al. 1999) erhöht diese natürliche Konservierung die Chance intaktes, nicht von der Dekomposition erfasstes Knochenkollagen zu isolieren und die Isotopiewerte von Kohlenstoff und Stickstoff u.a. zu ermitteln. Kohlenstoff und Stickstoff liegen in Form des häufigen leichten Isotopes (^{12}C : 98,89 % bzw. ^{14}N : 99,64 %) und des seltenen schweren stabilen Isotopes (^{13}C : 1,11 % bzw. ^{15}N : 0,36 %) vor (Faure 1986, aus Ambrose 1993).

Lokale Isotopenzusammensetzungen der jeweiligen Nahrungsressourcen, umweltbedingte und physiologische Auswirkungen auf die Größenordnung der Fraktionierungsfaktoren zwischen Nahrung und Gewebe, die generell im Promillebereich, also sehr gering liegen, wie auch der mögliche Einfluss diagenetischer Veränderungen unter der Liegezeit sind zu beachten. Jedes Molekül ist gekennzeichnet durch ein spezifisches $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ bzw. $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ – Verhältnis. Aus den ermittelten Werten lässt sich auf die Isotopenwerte der konsumierten Nahrungsmittel zurückschließen (Ambrose 1993). Aus technischen Gründen werden diese Werte auf einen definierten Standard (PDB $\delta^{13}\text{C}$; AIR $\delta^{15}\text{N}$)- einer internationalen Konvention folgend – bezogen:

$$\delta *X = - \frac{*X / X_{\text{Probe}}}{*X / X_{\text{Standard}}} - 1$$

wobei mit *X jeweils das schwerere Isotop bezeichnet wird. Dieses Verhältnis $\delta *X$ kann positiv oder negativ sein. Je höher der Wert jedoch ist, desto stärker wird die untersuchte Probe mit dem schwereren Isotop angereichert sein.

In der vorliegenden Untersuchung wurden Proben von jeweils 5 Individuen der beschriebenen Skelettserien, an welchen auch die DMA durchgeführt werden konnte, entnommen. Untersucht wurden

jeweils Knochenproben gleicher anatomischer Aspekte (Rippenfragmente, O`Connell et al. 2001). In Ausnahmefällen wurden Clavicula-, Fibula- oder ein Zehenknochenfragmente untersucht. Nach der Aufbereitung der Proben (Laborprotokoll zur Kollagen-Gelatine-Extraktion s. Anhang 5), wurden die Elemente in Form reiner Gase massenspektrometrisch bestimmt. Die Konzentration des isolierten Knochenkollagens, die enthaltene Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentration, sowie deren molares Verhältnis C/N, welches typischerweise zwischen 2,9 und 3,6 liegt (DeNiro 1985 aus Ambrose 1993), wurde bestimmt. Die Werte geben wertvolle Hinweise auf Probenqualität, Erhaltungsgrad, Kontamination und dem Entweichen von Vakuum während der Oxidation und abkühlenden Destillation (Ambrose 1993). Die Daten der stabilen Isotope von 9 Individuen aus der mesolithischen Ofnet-Höhle, welche bereits von Bocherens et al. (1997) publiziert wurden, konnten in die Untersuchungen mit aufgenommen werden.

Die Analyse der stabilen Isotope aus isoliertem Kollagen aus Knochen, strukturellem Carbonat und dentalem Gewebe kann dazu genutzt werden, die individuelle Ernährung des Menschen und menschlicher Gruppen im Bezug hinsichtlich deren Position auf der Ebene der Trophiestufe innerhalb des Nahrungsnetzes des entsprechenden Paläoökosystemes zu bestimmen (Gruppe et al. 2003, Asam et al. 2004), wird die Kombination von Abrasionsparametern mit der Dentalen Microwear Analyse der Individuen dazu angewandt, detaillierte Informationen über die Ernährung und der damit verbundenen dentalen Gesundheit, über Inhaltsstoffe und Verunreinigungen der verzehrten Nahrungsmittel sowie über Formen der Zubereitung von Speisen (Grupe et al. 2003, Gügel 2003) zu erhalten. Letztlich sollten die Verknüpfung der erzielten Resultate weiteren Aufschluss über verhaltensbiologische und kulturelle Hintergründe und Entwicklungen im Hinblick auf das komplexe Nahrungsverhalten des *Homo sapiens sapiens* ermöglichen.

B. Ergebnisse

B 1. Parameter zur Zahngesundheit

Die Anzahl der nach den Kriterien für die DMA ausgewählten Individuen je Fundkomplex lag zwischen 8 und 15 Personen. Bei keinem der Individuen der fünf untersuchten Gruppen konnte Karies im Frontzahnbereich diagnostiziert werden. Die Kariesrate an Zähnen des Seitenzahnbereichs (Tabelle 23) der Individuen des Mesolithikums (Ofnet-Höhle) lag mit 17,7 % sehr hoch, bei den frühmittelalterlichen zwischen 8,1 und 12,9 % und bei den Vertretern der Glockenbecherkultur bei 5,8 %, also am niedrigsten. Der antemortale Zahnverlust im Seitenzahnbereich (SZB) war bei den Individuen von Weichering mit 13,9 % im Vergleich am höchsten. Im Frontzahnbereich (FZB) lag er bei den Individuen der Ofnet-Höhle am höchsten, wobei diese Gruppe zusätzlich einen sehr starken Abkauungsgrad an den noch verbleibenden Zähnen des FZBs zeigte. Ein antemortaler Zahnverlust im FZB war bei den frühmittelalterlichen Individuen aus Waging und Brombach nicht nachweisbar, während sowohl die Individuen von Bittenbrunn als auch diejenigen von Brombach im SZB und Bittenbrunn zusätzlich im FZB geringfügige Verluste an Zähnen aufwiesen. Diese lagen aber deutlich niedriger im Vergleich zu denjenigen der Gruppe des Endneolithikums (2,1 %) und des Mesolithikums (3,6 %). Im SZB lag der antemortale Zahnverlust der frühmittelalterlichen Populationen deutlich unter demjenigen der Glockenbecherkulturträger (13,9 %), jedoch deutlich über denjenigen aus dem Mesolithikum (1,1 %) außer bei den Individuen von Waging, bei welchen der Verlust geringer (0,4 %) war.

Tabelle 23. Zahnstatus und Zahngesundheit im Front- und Seitenzahnbereich

		Anzahl beobachteter Zähne	Anzahl kariöser Zähne	Zähne in Dentition oder nicht angelegt	Absoluter AMTL	AMTL (%)	Kariesintensität (%)
Bittenbrunn	FZB	129	0	1	2	1,1	
	SZB	209	27	9	10	3,4	12,9
	Gesamt	338	27	10	12	3,2	8,0
	FZB/SZB	0,62					
Brombach	FZB	80	0	2	0	0	
	SZB	136	11	14	10	5,4	8,1
	Gesamt	216	11	16	10	3,3	5,1
	FZB/SZB	0,59					
Waging	FZB	105	0	1	0	0	
	SZB	180	20	15	1	0,4	11,1
	Gesamt	285	20	16	1	0,3	7,0
	FZB/SZB	0,58					
Weichering	FZB	78	0	0	2	2,1	
	SZB	103	6	9	21	13,9	5,8
	Gesamt	181	6	9	23	9,3	3,3
	FZB/SZB	0,76					
Ofnet-Höhle	FZB	111	0	0	6	3,6	
	SZB	231	41	11	3	1,1	17,7
	Gesamt	342	41	11	9	2,1	12,0
	FZB/SZB	0,48					

Anmerkung: FZB: Frontzahnbereich; SZB: Seitenzahnbereich; AMTL: antemortaler Zahnverlust

Die Anzahl der von Karies betroffenen Individuen lag bei den Individuen der Ofnet-Höhle mit 78,6 % ähnlich hoch wie Bittenbrunn und Brombach, wogegen Waging und Weichering einen mit 46,2 % bzw. 44,4 % geringeren Erkrankungsgrad aufwiesen (Tabelle 24). In allen untersuchten Gruppen außer der Ofnet-Höhle konnten an einzelnen Individuen (n = 1 - 3) Anzeichen von Hypoplasie am Zahnschmelz nachgewiesen werden. Diese waren jedoch nicht ausgeprägt und betrafen meist nur einzelne Zähne. Das Vorhandensein von Zahnstein konnte ebenfalls in allen Gruppen außer derjenigen der Ofnet-Höhle nachgewiesen werden, hier deutete sich jedoch eine Häufung in Waging (7/13), Weichering (4/9) und Bittenbrunn (3/15) in absteigender Reihenfolge an. Von den insgesamt 61 Zahnstatten konnten aufgrund des geringen Erhaltungsgrades der Kiefer die Okklusionsbeziehungen nur von 25 Individuen ermittelt werden. Für 20 dieser 25 Individuen konnte mit großer Sicherheit eine Normbissstellung angenommen werden.

Tabelle 24. Zahngesundheit der Individuen, die für die Dentale Microwear Analyse herangezogen werden konnten

	Individuen untersucht	Individuen mit kariösen Zähnen	Kariesrate (%)	Individuen mit Anzeichen von Hypoplasie	Individuen mit Zahnstein	Beobachtbare Okklusionsbeziehungen	Individuen mit gesicherter Normbisslage
Bittenbrunn	15	12	80	2	3	5	3
Brombach	10	7	70	1	1	2	1
Waging	13	6	46,2	1	7	6	6
Weichering	9	4	44,4	3	4	2	2
Ofnet-Höhle	14	11	78,6	0	0	10	8

Anmerkung: In den Spalten ist die jeweilige Anzahl der Individuen mit dem entsprechenden Befund angegeben

B 2. Parameter zur Abtragungscharakteristik

2.1 Makroskopisch messbare molare Abtragungsmuster

Die Individualdaten sind im Anhang 6 dargestellt. Der Wert für den Abtragungsgrad stellt den mittleren Score (= Bewertungsmaß aus vier Quadranten gemittelt) dar. Die beim Durchbruch der posterioren Zähne charakteristische Neigung nach lingual wurde durch ihren Gebrauch fortlaufend verändert. Aufgrund der Bekauung der Zähne bei der Nahrungszerkleinerung wurden die Höcker durch den natürlichen Verschleiß allmählich abgetragen. Es entstanden Abtragungsmuster an den beteiligten Oberflächen, die in Abhängigkeit von der Ernährungsweise unterscheidbar waren (Smith 1984, Baum 1991, Gügel 2001, 2003). Bei der Darstellung des Abtragungswinkels in Abhängigkeit vom Abtragungsgrad der historischen Individuen (Abb. 66) wurde eine Verschiebung der vom Ursprung her nach lingual geneigten Oberflächen in Richtung einer flachen bis bukkalen Neigung der kauenden molaren Zahnschmelzflächen sichtbar. Aufgrund der selektiven Auswahl der Individuen war im besonderen im Bereich von Abtragungsgraden zwischen 2 und 4 ein solcher Effekt darstellbar. Sowohl die Ermittlung einer Trendlinie (Abb. 66) als auch die Berechnung der Regression (Tabelle 25) ergaben Unterschiede in der Veränderung der Neigung der Kauoberflächen zwischen den Fundkomplexen Bittenbrunn, Waging und der Ofnet-Höhle (Abb. 66). Die Korrelation der Wertepaare war zwar relativ gering, aber ein Trend der Individuen aus der Ofnet-Höhle zeigte, dass bereits bei geringfügigem Abkautungsgrad eine flache Neigung auftrat, während die ackerbäuerlichen Individuen noch eine sehr stark nach lingual orientierte Neigung vorwiesen. Dies änderte sich mit zunehmender Abkautung in eine bukkale Neigung, wobei die Molarenhöcker der frühmittelalterlichen Individuen häufig einseitig bukkal vollständig abgetragen wurden. Bei den Individuen der Ofnet-Höhle wurden die vier Höcker relativ gleichmäßig abgetragen, sodass eine insgesamt wesentlich flachere Abkautung der Seitenzähne stattgefunden hatte.

Tabelle 25. Regressionsgleichung (linear)

	Steigung	Konstante	Korrelation
Waging	1,534483	-26,265517	0,669
Bittenbrunn	1,341349	-24,966819	0,674
Ofnet-Höhle	0,534910	-11,830330	0,487

Die in die Grafik integrierten Werte der Individuen vom Kaufertsberg und der Oldoway-Schlucht (Hominide OH 1) wiesen auf noch flachere Abtragungsmuster im Vergleich zu den mesolithischen Ofnet-Schädeln hin.

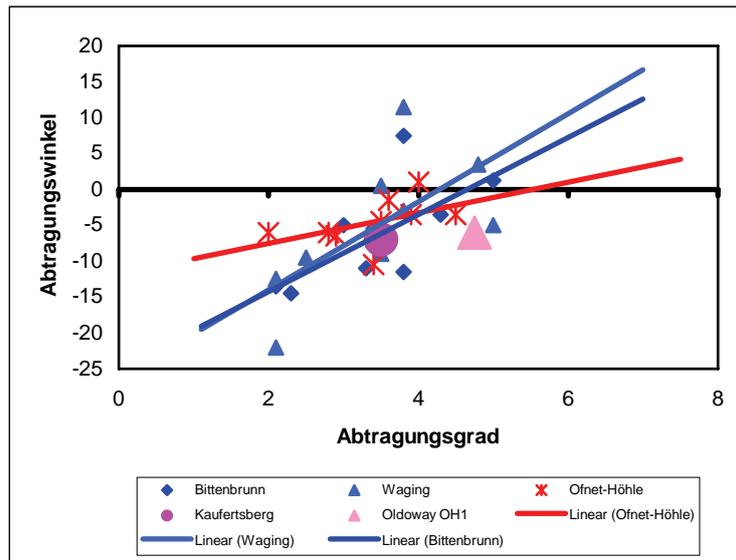


Abb. 66 Abtragungswinkel abhängig vom Abtragungsgrad der zweiten Unterkiefermolaren (Waging, Bittenbrunn, Ofnet-Höhle). Beim Zahndurchbruch wiesen alle Unterkiefermolaren eine linguale Orientierung der Kronenoberfläche auf. Allmählich mit Zunahme der Abtragung verändert sich der Winkel in eine bukkale Stellung. Ackerbauern (blaue Linien) entwickeln größere bukkale Abtragungswinkel als Jäger-Sammler (rote Linie). Integriert sind die Werte des Individuums vom Kaufertsberg und des Hominiden OH 1.

2.2 Makroskopisch messbare molare Abtragsrate

Da Paare von nebeneinanderstehenden Molaren in einem relativ eng begrenzten zeitlichen Intervall von 6 Jahren durchbrechen, war es möglich, die Abtragsrate unabhängig vom Individualalter zu bestimmen. Die Intensität des Zusammenhanges zwischen den beiden Variablen, Abtragungsgrad des ersten und des korrespondierenden zweiten Molaren in einem Streudiagramm, wird durch die Höhe des Korrelationskoeffizienten „r“ (Tabelle 26) ausgedrückt. Je näher der Wert gegen 1,000 geht, desto deutlicher existiert eine systematische Verknüpfung, je stärker er sich gegen Null bewegt, desto zufälliger ist der Vorgang. Um einen Trend der Punktwolken zu ermitteln, wird das bivariate Streudiagramm durch zwei senkrecht aufeinander stehende Linien (Haupt- und Nebenachse; bzw. „Principal and Minor axis“) beschrieben (Sokal und Rohlf 1969). Die Abtragungsgeschwindigkeit wird durch das Steigungsmaß der resultierenden Hauptachsengleichung (principal axis equation) repräsentiert, d.h. durch ein diskretes Maß ohne Einheit (Scores) in einem definierten Zeitraum. Ein Beispiel zur Berechnung der Hauptachsengleichung ist in Anhang 7 gegeben. Kein Molar der ausgewählten Individuum überstieg den kritischen Abtragungswert von 36 (Score = 40 beschreibt die obere Grenze des diskreten Scorings der vier Quadranten) und jedes Paar wurde ausgeschlossen, welches für den M2 einen höheren Wert aufwies als für den M1. Die Abtragungsraten der Individuen aus Wenigumstadt bei Aschaffenburg am Main, einem frühmittelalterlichen Gräberfeld (Gügel 1998), welches Gegenstand der Untersuchungen zur

Auffindung spezifischer Microwear-Gruben und von Phytolithe im Zahnschmelz war, sind zum Vergleich in Tabelle 26 aufgenommen.

Tabelle 26. Ermittlung der Abtragungsrate/-geschwindigkeit (Steigungsmaß als diskretes Maß ohne Einheit; Scott 1979b)

Unterkiefer	*M ₁	*M ₂ (y)	N	r	**Hauptachsen- gleichung	95% CI	M ₁ , wenn M ₂ = 4	M ₂ , wenn M ₁ = 40
Bittenbrunn	21,1	14,8	22	0,783	12,32 + 0,589y	0,387<b<0,834	14,7	>40,0
Brombach	23,7	14,2	15	0,720	7,31 + 1,156y	0,655<b<2,150	11,9	28,3
Waging	18,6	14,7	20	0,910	2,63 + 1,083y	0,836<b<1,410	7,0	34,5
Wenigumstadt	21,4	17,0	26	0,795	1,424 + 1,174y	0,851<b<1,650	6,1	32,9
Weichering	22,7	16,4	9	0,560	5,03 + 1,073y	0,226<b<6,519	9,3	32,6
Ofnet-Höhle	19,7	13,5	21	0,780	0,87 + 1,394y	0,963<b<2,123	6,4	28,1

Oberkiefer	*M ¹	*M ² (y)	N	r			M ¹ , wenn M ² = 4	M ² , wenn M ¹ = 40
Bittenbrunn	18,0	10,4	16	0,658	14,33 + 0,352y	0,142<b<0,593	15,7	>40,0
Brombach	22,2	12,8	16	0,860	3,85 + 1,438y	1,022<b<2,120	9,6	25,1
Waging	18,7	12,6	19	0,880	1,64 + 1,349y	1,012<b<1,847	7,0	28,4
Wenigumstadt	21,1	14,0	30	0,723	7,252 + 0,989y	0,678<b<1,440	11,2	33,1
Weichering	21,0	13,8	10	0,890	7,54 + 0,975y	0,602<b<1,571	11,4	33,3
Ofnet-Höhle	17,5	11,1	22	0,780	4,13 + 1,198y	0,818<b<1,804	8,9	29,9

Anmerkung: * mittlere Abtragungswerte auf vier Quadranten, N Anzahl der Zahnpaare, r Korrelationskoeffizient, CI Confidenzregion; **Berechnung der Hauptachsengleichung anhand der diskreten Scores; Scott 1979b; Berechnungsbeispiel im Anhang 7

Obleich der Bereich des mittleren Abtragungsgrades an den Oberkiefer- und Unterkiefermolaren relativ eng war (Tabelle 26: Bittenbrunn M₁/M₂ 21,1/14,8; Brombach M₁/M₂ 23,7/14,2; Waging M₁/M₂ 18,6/14,7; Wenigumstadt M₁/M₂ 21,1/14,0, Weichering M₁/M₂ 22,7/16,4; Ofnet-Höhle M₁/M₂ 20,6/13,6), demonstrierte er doch die differenzielle Abtragungsrate zwischen den Gruppen. Eine Steigung von ungefähr 1,0 würde anzeigen, dass die Abtragungsrate von M₁ und M₂ nahezu gleich wären, wogegen eine Steigung der Abtragungswerte kleiner als 1,0 höhere Raten für M₂ oder niedrigere für M₁ indizieren würden. Umgekehrt würde ein Steigungsmaß größer als 1,0 niedrigere Raten für M₂ oder höhere für M₁ anzeigen. Die Individuen aus Bittenbrunn zeigten mit Abstand die niedrigsten Steigungsmaße (Unterkiefer 0,589; Oberkiefer 0,352) bei geringer Überlappung der Konfidenzregionen mit den übrigen Gruppen. Der Hinweis, dass der M2 nach dem Durchbruch im Vergleich zu seinem korrespondierenden M1 rascher abgetragen wird und die Tatsache, dass die Zähne aus Bittenbrunn die höchsten Abtragungswerte für den ersten Molaren zum Zeitpunkt des Durchbruches des zweiten Molaren (Tabelle 26: Score M1, wenn M2 = 4; Unterkiefer Uk 14,7; Oberkiefer Ok 15,7) zeigten, ließ auf den Verzehr einer stark abrasiv wirkenden Kost schließen. Die ersten Molaren würden - rechnerisch betrachtet - den maximal bewertbaren Abtragungswert von 40 jeweils dann erreichen, wenn der M2 ebenfalls stark abgetragen wäre. Die übrigen Gruppen überlappten in ihren 95% Vertrauensbereichen, aber das mittlere Steigungsmaß tendierte zu 1,0 bei Weichering (Uk: 1,073; Ok: 0,975), Waging (Uk: 1,083) und Wenigumstadt (Ok: 0,989). Geringfügig höher war es bei Brombach (Uk: 1,156) und Wenigumstadt (Uk: 1,174) und am höchsten bei den Individuen der Ofnet-Höhle (1,198/1,394), Waging (Ok: 1,349) und Brombach (Ok: 1,438). Diese Werte verdeutlichen, dass die zweiten Molaren gleich oder geringfügig langsamer abgetragen wurden als die ersten Molaren, die eher okklusalen Kontakt hatten (Abb. 67 und 68).

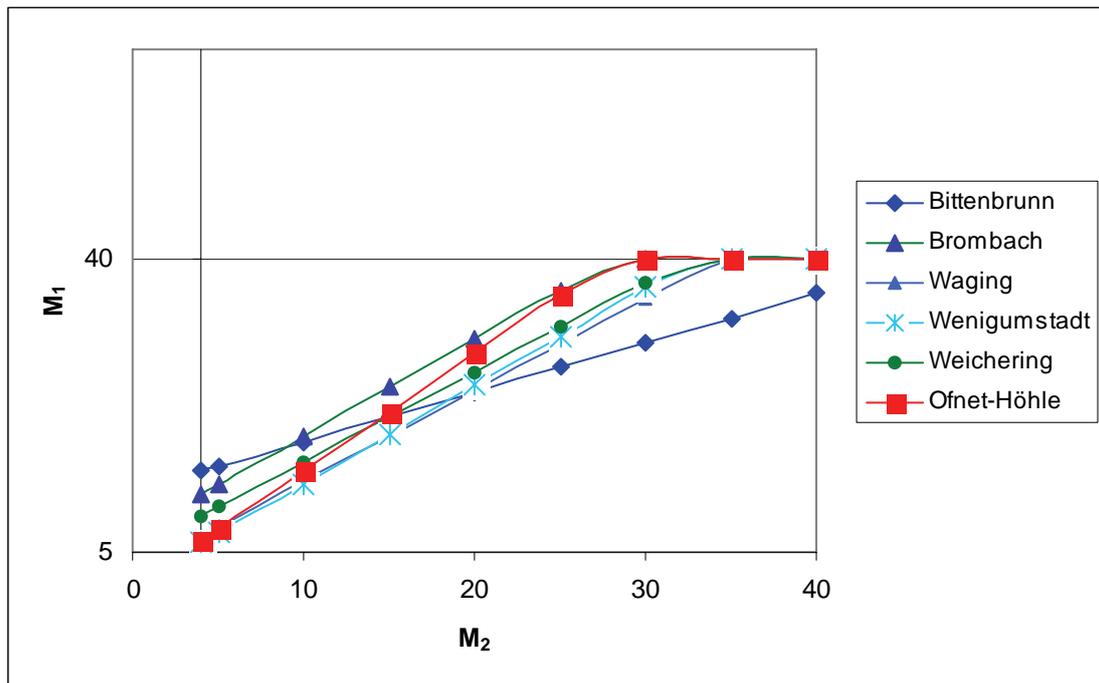


Abb. 67 Progression der Molarenabtragung im Unterkiefer unter Berücksichtigung der Hauptachsengleichung (Scoresumme maximal = 40; diskrete Score von 1 bis 10 für jeden Quadrant; Scott 1979b, s. Anhang 2)

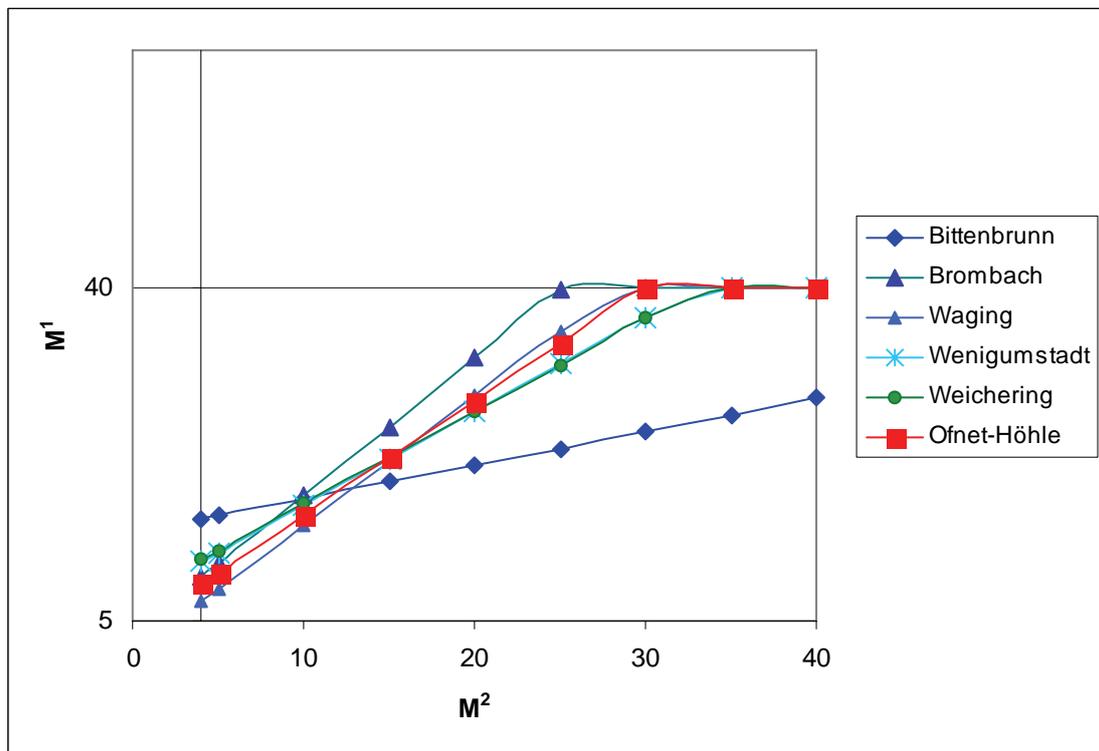


Abb. 68 Progression der Molarenabtragung im Oberkiefer unter Berücksichtigung der Hauptachsengleichung (Scoresumme maximal = 40; diskrete Score von 1 bis 10 für jeden Quadrant; Scott 1979b, s. Anhang 2)

Eine geringe Abtragung des M₁ zum Zeitpunkt des Durchbruches von M₂ (Score = 4) zeigten die ersten Unterkiefermolaren von Waging (7,0), Wenigumstadt (6,1) und der Ofnet-Höhle (6,4). Etwas stärker abgetragen waren die Molaren von Weichering (9,3) und Brombach (11,9), während die Molaren von Bittenbrunn die höchsten Werte für den M₁ aufwiesen (14,7 und 15,7). Den maximal erreichbaren

Bewertungswert von 40 für den M1 würden die zweiten Molaren von Brombach (Uk: 28,3; Ok: 25,1), Waging (Ok: 28,4) und der Ofnet-Höhle (Uk: 28,1; Ok: 29,9) relativ frühzeitig im Abtragungsgeschehen erreichen, ein Zeichen für eine relativ hohe Abtragsrate. Mittlere Werte erzielten Weichering, Wenigumstadt und Waging für den Unterkiefer in aufsteigender Reihenfolge und Wenigumstadt und Weichering für den Oberkiefer.

B 3. Ergebnisse der Kontrolluntersuchungen zur Dentalen Microwear

3.1 Identifikation der Dimensionen charakteristischer Microwear Merkmale

Die Mittelwerte der einzeln untersuchten charakteristischen Merkmale, nach dem Zeitpunkt und dem Tag des Testes zusammengefasst, sind im Anhang 8 tabellarisch dargestellt. Sie wurden mit einem Multivariaten Test (MANOVA, Anhang 9) auf signifikante Unterschiede überprüft. Anhand dieser Testserie konnte gezeigt werden, in welchem engem absoluten und relativen Bereich sich die Erkennung der Länge einzelner Merkmale bewegten. Dieser Bereich war sowohl vom Ermüdungsgrad der Augen als auch von der individuellen Erkennung der Grenzen durch den Beobachter abhängig. Die Streubreite (VK %) betrug bei mittellangen und langen Kratzspuren meist weniger als 2 %, bei Gruben und kurzen Kratzspuren in fast allen Fällen weniger als 5 %. Die Streubreite der Breite der Einzelmerkmale war sehr variabel. Für Gruben betrug sie meist weniger als 10 %. Die Kratzspurbreite stellte aufgrund der hierfür vergleichbar geringen Auflösung der Bilddateien (1 pixel = 0,4885 µm bei 200x) und der Feinheit der Kratzspuren, die dadurch nicht erfasst werden konnte, nur einen diskreten Wert dar, welcher lediglich dazu diente, eine Trennung zwischen Gruben und Kratzspuren zu erzielen. Die Abweichungen der Längen nach längeren Pausen (Test Nr. 1 - 5; Anhang 8.) verursachte bei Kratzspuren eine Streubreite (für alle Testserien zusammengenommen) von weniger als 5 %, bei Gruben von weniger als 10 %. Ein Ermüdungseffekt bei der Erkennung der Merkmalsgrenzen (Vergleich der Zeitpunkte Zp an einem Tag) spielte insbesondere bei langen Merkmalen eine Rolle (Abb. 69). Damit begrenzte sich die Anzahl der auswertbaren Bilddateien auf eine für den jeweiligen Beobachter individuell durchführbare Anzahl. Die Durchführung einer Testserie zur Merkmalserkennung nach längeren Analysepausen ist zu empfehlen.

In erster Linie diene dieses Prozedere dazu, Sicherheit in der Erkennung von Merkmalsgrenzen in der Serie und über die Zeit hinweg zu gewinnen. In der Routine der Dentalen Microwear Analyse stellte es ein wertvolles Qualitätskriterium für den systematischen Fehler von Tag zu Tag dar. Diese Vorgehensweise würde den individuellen Fehler verschiedener Beobachter bei der Erkennung von Merkmalen und deren Grenzen quantifizieren und minimieren.

Die individuelle Erkennung von Merkmalsgrenzen birgt ein Potential an Ungenauigkeit auf die Ergebnisse aus Bilddateien mit einer großen Anzahl von Merkmalen. Durch eine statistische Untersuchung der einzelnen Bilddateien lässt sich diese Ungenauigkeit systematisch erfassen.

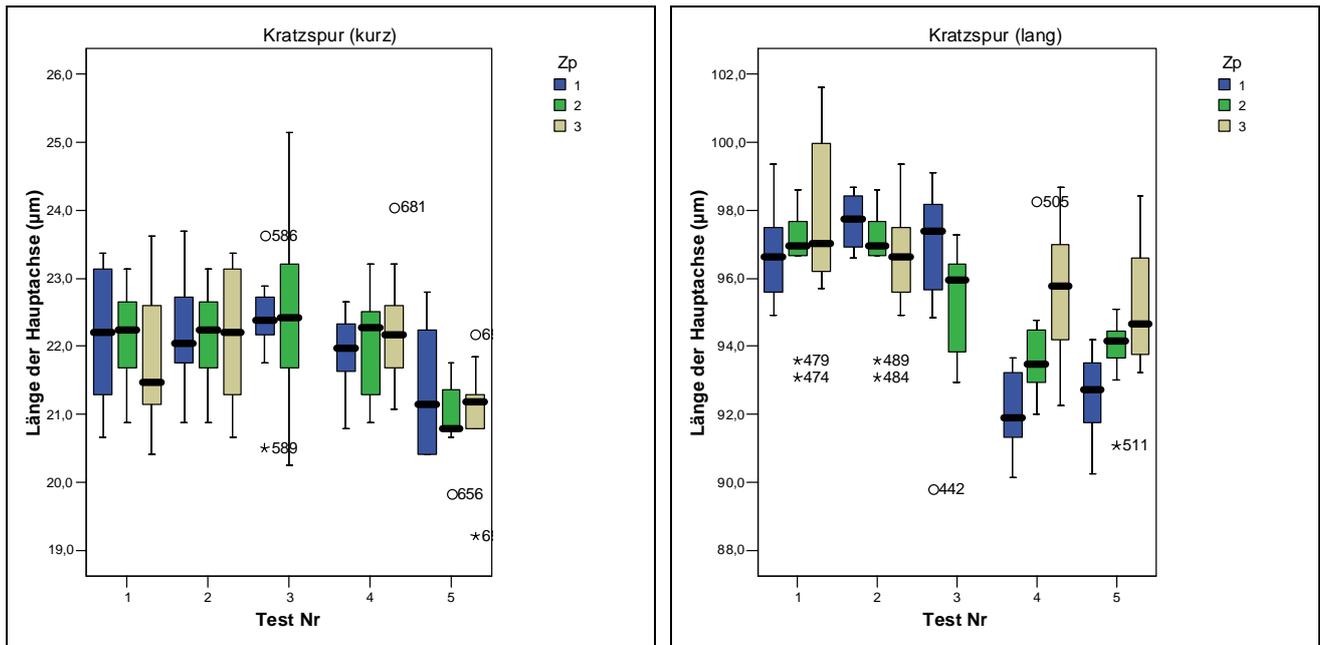


Abb. 69 Boxplot (SPSS 11.0) der Längen der Hauptachsen von zwei Microwear-Kratzspuren (links kurz, rechts lang) getrennt nach Zeitpunkt (Zp) der Auswertung von 0 bzw. 8 bzw. 16 Bilddateien und nach dem Tag der Untersuchung (Test Nr. 1 – 5 in zeitlichen Intervallen zwischen zwei bis sechs Wochen)

3.2 Systematische Erfassung des Messfehlers innerhalb flächenidentischer Bilder

Die statistischen Parameter der Bilderserie (Tabelle 27) zeigten große Übereinstimmung sowohl in der Merkmalsdichte und der Dichte der Kratzspuren, als auch in der mittleren Länge der Kratzspuren und der mittleren Länge und Breite der Gruben (VK < 10 %). Die Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (R) lag in einem vergleichbaren aber weitgestreuten Bereich zwischen 0,414 und 0,541, d.h. eine nicht durch reinen Zufall verteilte Orientierung im zwei-dimensionalen Raum. Die Dichte der Gruben wich mit 5 Gruben im Durchschnitt voneinander ab.

Tabelle 27. Systematische Erfassung von Mittelwertparametern dentaler Microwear an identischen Bildern (Weichering, Individuum 5, M², Facette 9)

Bild	Dichte der			Länge der						Breite der		R
	Merkmale	Kratzspuren	Gruben	Merkmale (µm)	s +/-	Kratzspuren (µm)	s +/-	Gruben (µm)	s +/-	Gruben (µm)	s +/-	
a	122	92	30	39,6	33,4	44,8	36,4	23,7	12,5	15,3	9,9	n.b.
b	100	83	17	46,2	30,6	49,4	32,0	30,6	14,8	19,4	6,9	0,529
c	125	108	17	44,0	32,2	46,9	33,5	25,7	9,2	16,9	6,4	0,476
d	115	99	16	47,8	31,6	50,5	32,9	30,9	11,9	21,8	7,1	0,449
e	112	91	21	45,3	31,1	49,7	32,7	26,0	8,6	18,7	6,2	0,414
f	111	87	24	46,7	36,4	52,7	38,9	25,2	8,2	16,8	7,4	0,541
MW	114,2	93,3	20,8	44,9		49,0		27,0		18,2		0,482
s +/-	8,9	9,0	5,4	2,9		2,8		3,0		2,3		0,053
VK %	7,8	9,6	26,0	6,5		5,7		11,1		12,7		11,1

Anmerkung: s Standardabweichung, MW Mittelwert, VK Variationskoeffizient, R mittlerer Vektor der Kratzspurorientierung als Maß für die Verteilung; Bilder a bis f.

In einem nachfolgenden statistischen Testverfahren (Anhang 10) konnte jedoch gezeigt werden, dass sich die metrischen Parameter (Länge der Hauptachse, natürlicher Logarithmus der Hauptachse) in keinem Fall unterschieden. Die Verteilung der Länge der Kratzspuren - hier an zwei Beispielen gezeigt (Abb. 70) - war sehr einheitlich.

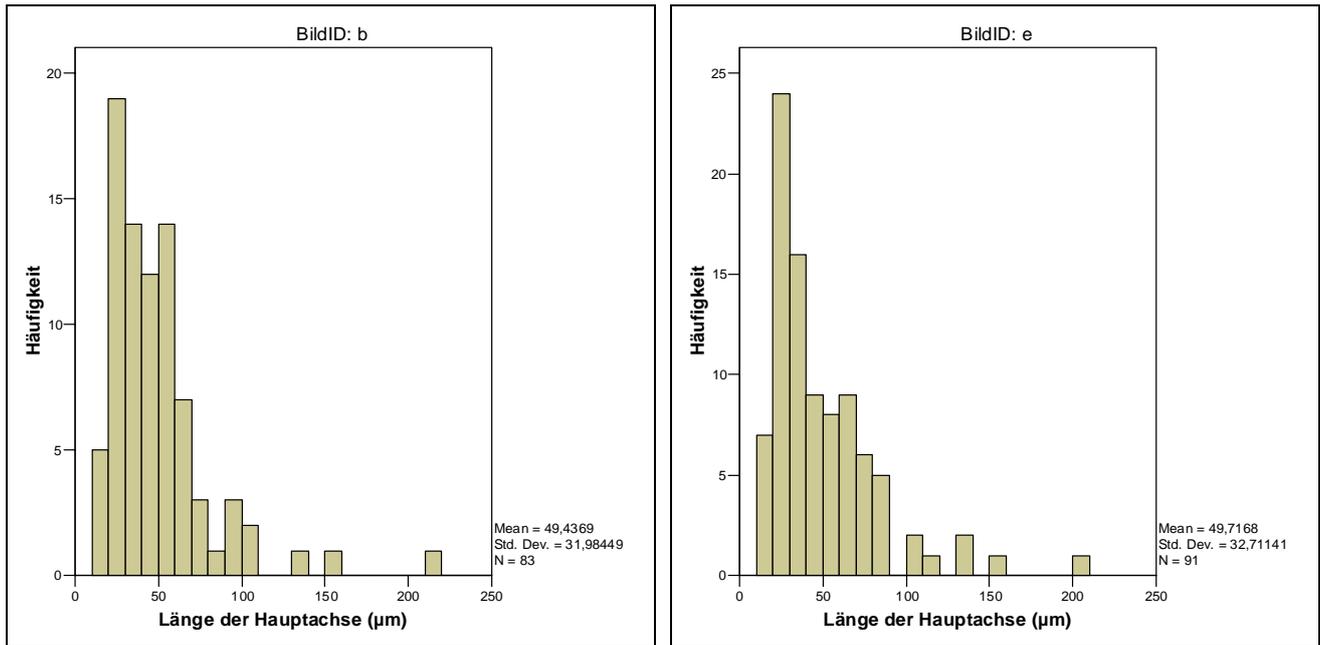


Abb. 70 Verteilung der Kratzspuren an zwei Beispielen (s. a. Abb. 62)

Auch bei einer zufälligen Gruppierung (4 verschiedene Kombinationen) der Bilddateien ergab sich in keinem Parameter ein signifikanter Unterschied. Eine tendenzielle Ausnahme stellte Bild a (Abb. 62) dar. Es wurde in der Position der Oberfläche bei ungekippter Stellung des SEM-Probentellers aufgenommen und war nach den Kriterien für SEM-Aufnahmen nicht optimal eingestellt. Die Randbereiche zeigten eine leichte Unschärfe. Dies spiegelte sich in geringfügig abweichenden Parametern wieder. Die Unterschiede waren aber auch hier, abgesehen von der Anzahl der Gruben (Signifikanzniveau 5 %), nicht signifikant.

3.3 Systematische Charakteristik dentaler Microwear durch unterschiedliche technische Bedingungen am Rasterelektronenmikroskop

Bei der Untersuchung systematischer Effekte durch technische REM-Vorgaben war ein deutlicher Trend in der Kratzspurdichte und der Länge der Kratzspuren zu beobachten.

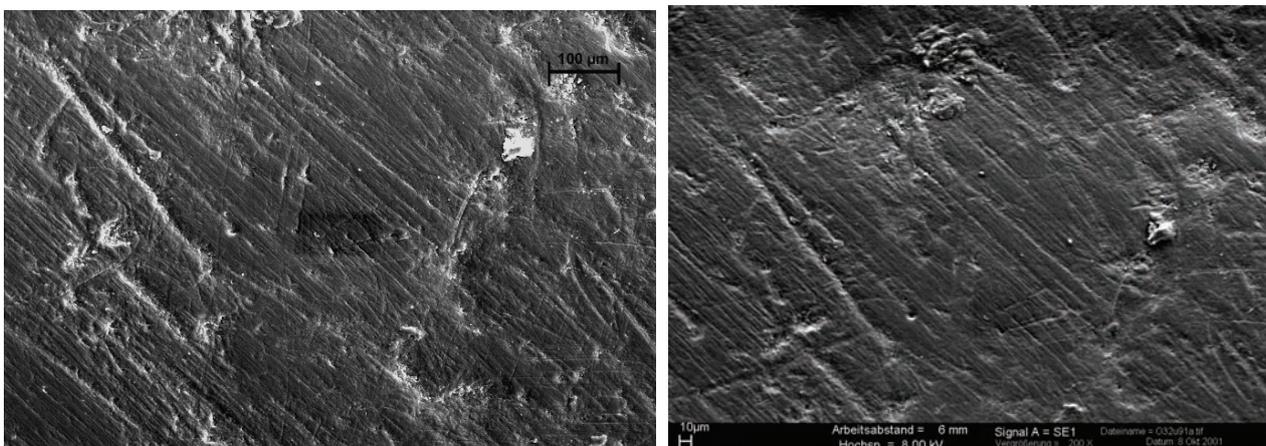


Abb. 71 Bilddateien im Vergleich: links: Philips XL 20 Series (177 dpi), rechts: LEO 1430 VP (260 dpi), jeweiliger Maßstab im Bild, Originalvergrößerung 200x, Facette 9, M₂, Individuum 32, Ofnet-Höhle.

Die Bilddateien, welche am Philips XL 20 aufgenommen wurden, zeigten eine niedrigere Kratzspurdichte und deutlich längere Kratzspuren auf allen untersuchten Facetten (Abb. 71 links und 72, Anhang 11 Lagemaße der Kratzspuren).

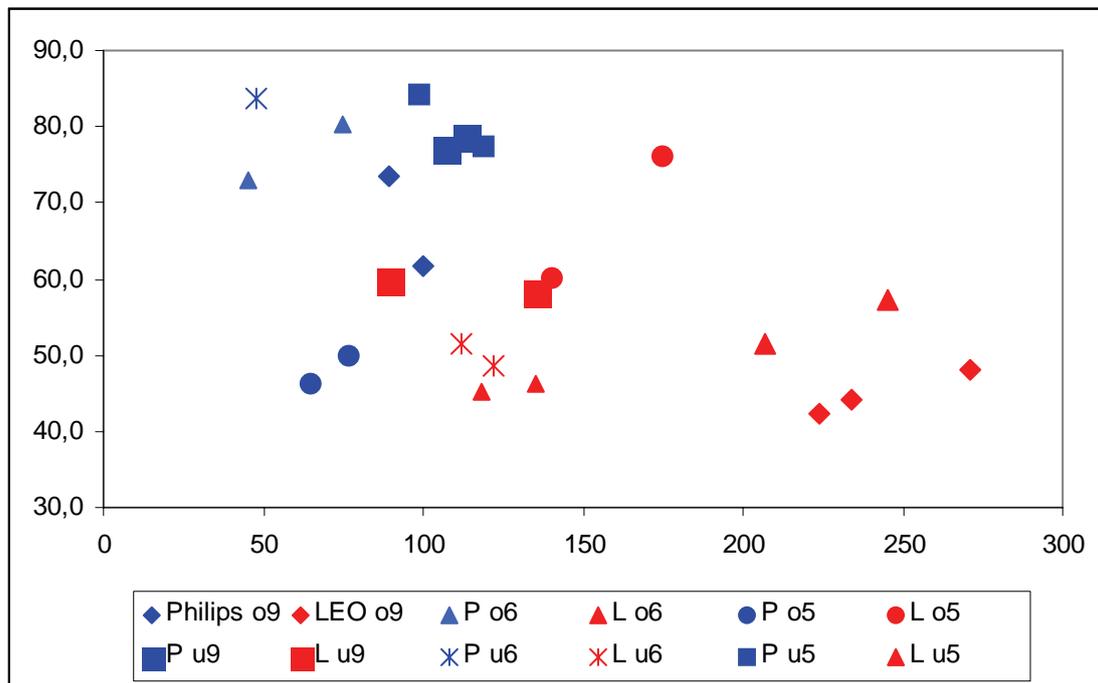


Abb. 72 Dentale Microwear in Abhängigkeit vom Bildspeicher (Auflösung) des Rasterelektronenmikroskopes (rot: LEO 1430 VP = L, blau Philips XL 20 Series = P); X-Koordinate: Merkmalsdichte; Y-Koordinate: mittlere Länge der Kratzspuren (μm); Facetten: o Oberkiefer, u Unterkiefer;

Tabelle 28. Statistik und einfaktorielle ANOVA der Kratzspuren nach Facetten getrennt in Abhängigkeit von der Auflösung

Ofnet Ind 32 Facette M_2	Anzahl der Merkmale (N)	Mittelwert	s +/-	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
u9 Philips (P) In (Hauptachse)	220(2)	4,2	0,6	1	9,903	29,540	0,000*
LEO 1430 VP (L)	224(2)	3,9	0,6	442	0,335		
P Länge der Hauptachse (μm)	220(2)	77,9	47,8	1	39876,344	21,652	0,000*
L	224(2)	58,9	37,5	442	1841,666		
u6 Philips (P) In (Hauptachse)	48(1)	4,2	0,7	1	8,602	24,636	0,000*
LEO 1430 VP (L)	234(2)	3,7	0,6	280	0,349		
P Länge der Hauptachse (μm)	48(1)	83,7	62,8	1	45314,604	28,755	0,000*
L	234(2)	49,9	33,2	280	1575,865		
u5 Philips (P) In (Hauptachse)	218(2)	4,2	0,6	1	25,902	64,865	0,000*
LEO 1430 VP (L)	452(2)	3,8	0,6	668	0,399		
P Länge der Hauptachse(μm)	218(2)	80,6	49,2	1	98233,433	54,791	0,000*
L	452(2)	54,7	38,6	668	1792,874		

Signifikanzniveau 0,1 %, (N): Anzahl der analysierten Bilddateien

Die Längen der Hauptachsen für beide DMA-Serien zeigten eine linksgipfelige Häufigkeitsverteilung (Abb. 73 und 74, Facette u9). Merkmale mit kürzerer Ausdehnung dominierten. Alle Mittelwerte der Kratzspuren der Bilddateien am Philips, mit Ausnahme von Facette o5, waren hochsignifikant länger als die Mittelwerte der Bilder, die am LEO 1430 VP aufgenommen wurden. Eine Ursache hierfür lag im Unterschied der Bildpunktgröße, die als Basis zur Streckenanalyse diente. Das Ausmaß der Unterschiede war jedoch dadurch nicht erklärbar. Ein mittlerer Unterschied von 20 μm würde eine Differenz in der

Markierung der Hauptachsen von 26–28 (717 nm Bildpunktgröße) bzw. 39–41 (488,5 nm Bildpunktgröße) Pixel bedeuten. Selbst für einen ungeübten Beobachter wäre solch ein Fehler unrealistisch.

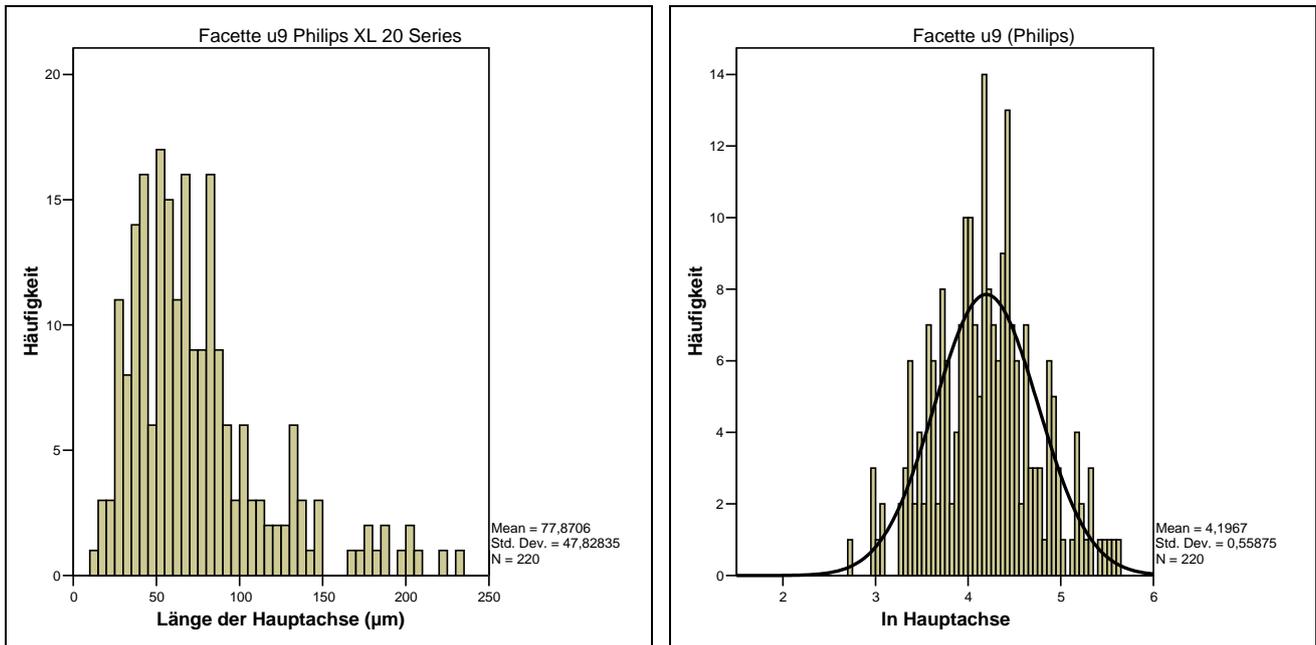


Abb. 73 Häufigkeitsverteilungen der Kratzspuren, Facette 9, Unterkiefermolar M₂, Ind 32, Ofnet-Höhle (Philips XL 20 Series, 200x), links: absolute, rechts: ln-transformierte Länge der Kratzspuren, Linie entspricht der Normalverteilungskurve

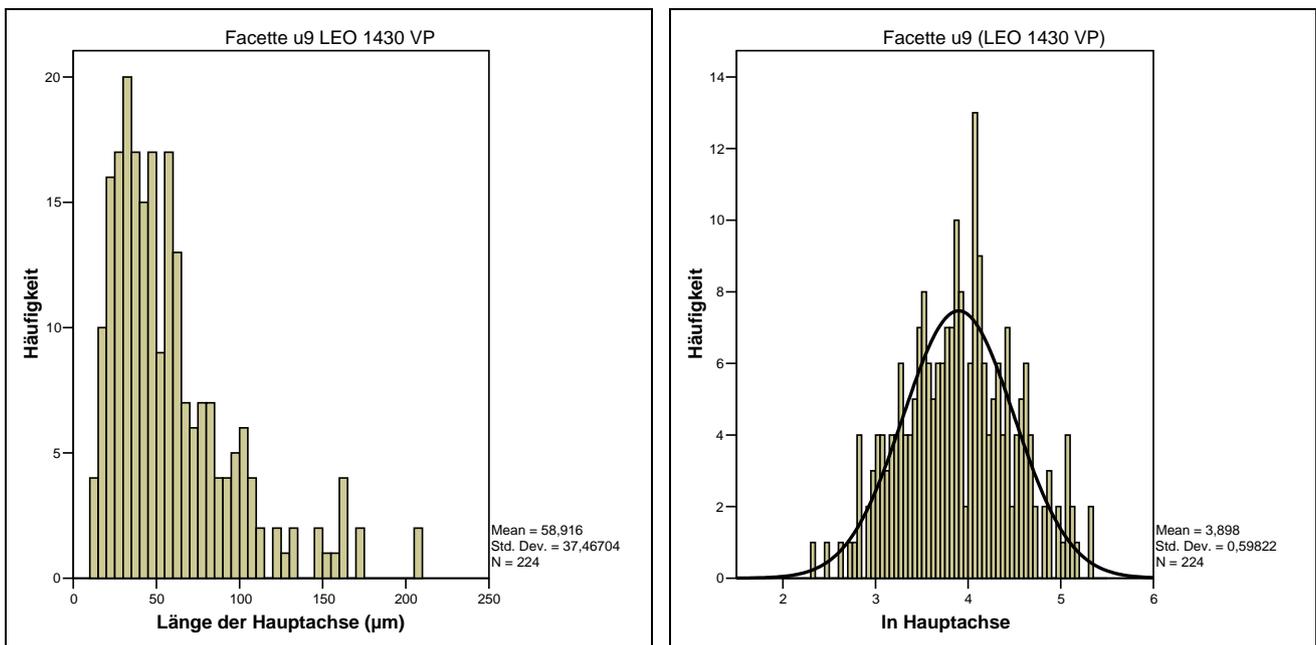


Abb. 74 Häufigkeitsverteilungen der Kratzspuren, Facette 9, Unterkiefermolar M₂, Ind 32, Ofnet-Höhle (LEO 1430 VP, 200x), links: absolute, rechts: ln-transformierte Länge der Kratzspuren, Linie entspricht der Normalverteilungskurve

Bei der Aufteilung der Kratzspuren nach Häufigkeiten in Längensklassen wurde deutlich, dass vor allem Unterschiede in den Häufigkeiten der kurzen Kratzspuren vorlagen (Abb. 73, Anhang 11 Lagemaße der Kratzspuren). In den Bilddateien des LEO 1430 VP lagen erheblich mehr kurze Kratzspuren vor als in denjenigen des Philips. Betrachtete man das fünfte Perzentil für die Facette u9, dann erhielt man für die Werte des LEO 18,5 bzw. 18,3 µm, während diejenigen des Philips 28,2 bzw. 27,4 µm betragen, d.h.

ungefähr 50 % längere Kratzspuren. Die Verteilung wurde exemplarisch für die Facette u9 des Unterkiefermolaren dargestellt, sie wäre aber auch charakteristisch für die weiteren untersuchten Facetten (Anhang 11).

3.4 Systematischer Vergleich Dentaler Microwear von Original und Replikat am Beispiel von rezenten Molaren

Die statistischen Mittelwerte und ein systematisch statistischer Vergleich der Bilddateien und Einzelmerkmale wurden im Anhang 12 dargestellt. Die statistischen Mittelwertparameter von Original und Replikat stimmten in allen Fällen sehr gut überein (Anhang 12A). Es konnte gezeigt werden, dass sich die Bilddateien von Original und Replikat sowohl in der Streubreite (Homogenität der Varianzen) als auch in den Mittelwerten in keinem Fall signifikant voneinander unterschieden (Welch-Test; Normalverteilung der Einzelmerkmale lag nicht vor).

Bei der Untersuchung von Einzelmerkmalen, die jeweils fünfmal unabhängig voneinander vermessen wurden, lagen teilweise signifikante Unterschiede vor (Anhang 13). Diese Unterschiede zeigten jedoch keinen einheitlichen Trend hin zu einer Verlängerung oder Verkürzung der Merkmale. Der Effekt der Wiedererkennung von Merkmalen könnte hier eine größere Rolle spielen, eine Annahme die aus dem Hinweis resultiert, dass mit wenigen Ausnahmen die Standardabweichungen sehr niedrig waren. Auch die Ergebnisse zur Identifikation der Merkmalsgrenzen (s. 3.1) liessen diesen Schluss zu. Es konnte deshalb davon ausgegangen werden, dass Microwear-Ergebnisse, welche anhand von hochauflösenden Replikaten gewonnen wurden, das Originalbild der Microwear-Muster als auch der Microwear-Dimensionen zuverlässig widerspiegeln. Eine Detailaufnahme bei 2000facher Vergrößerung gibt einen weiteren Einblick in das feinzeichnende Potential der angewandten Abgusstechnik (Abb. 75).

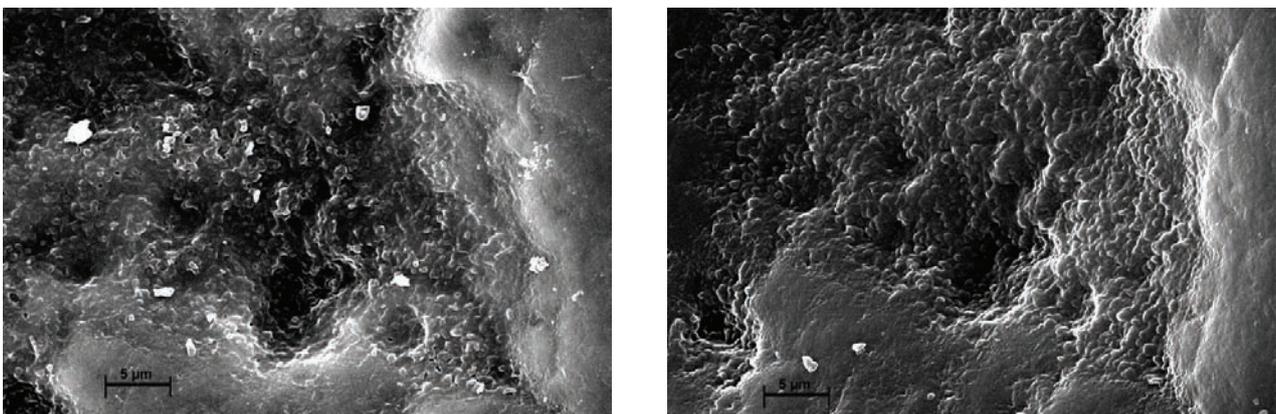


Abb. 75 Original (links) und Replikat (rechts) eines Details auf der rezenten Zahnoberfläche (K3) Facette 5 des M¹. SEM 2000x; Replikat im Uhrzeigersinn um ca. 11° gedreht.

B 4. Real komplexe dentale Microwear (Mikroläsionen) auf den Zahnschmelzoberflächen

4.1 Morphologische Beschreibung historischer Zahn- und Zahnschmelzoberflächen

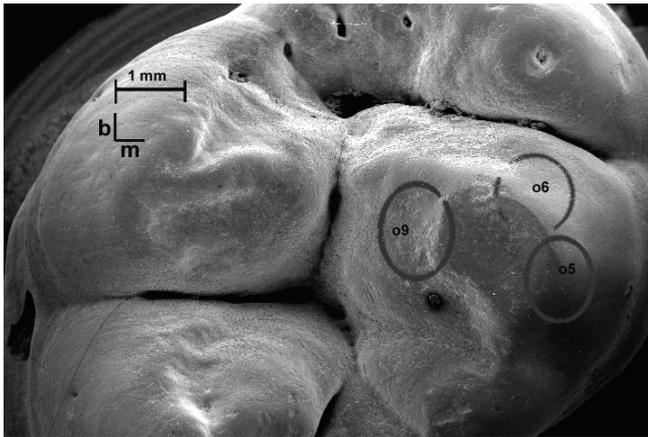
Im Folgenden sind natürlich entstandene Zahnoberflächen, die lediglich durch die Bodenlagerung Veränderungen erfuhr, dargestellt. Einzelne sekundär entstandene Artefakte wurden beispielhaft mit aufgenommen. Es handelt sich ausnahmslos um rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen. Der Maßstab und die Orientierung sind im Übersichtsbild angegeben. Die Detailaufnahmen, in welchen keine Orientierung angegeben ist, sind generell von bukkal (links im Bild) nach lingual (rechts im Bild) dargestellt.

Als Grundlage zur Analyse und Beschreibung der Oberflächenveränderungen von natürlich bekautem Zahnschmelz dienten Beschreibungen aus der Literatur. In Tabelle 29 (B 4.2, S. 123) sind diese Beschreibungen zusammengestellt. Darüber hinaus konnten zahlreiche Merkmale gefunden werden, welche aufgrund ihrer Dimensionen und ihres Längen/Breitenverhältnisses zu den Microwear-Gruben zählten, aber in ihrer individuellen Form abwichen und als Merkmale auf Zahnoberflächen noch nicht beschrieben wurden. Beschrieben werden auch morphologisch charakteristische Microwear-Kratzspuren, -Rinnen und Musterbildungen, welche aufgefunden werden konnten. Auf der Suche nach den tatsächlichen Verursachern dentaler Microwear konnten zahlreiche Mikropartikel gefunden werden, welche in engem Zusammenhang mit Veränderungen des Zahnschmelzes standen.

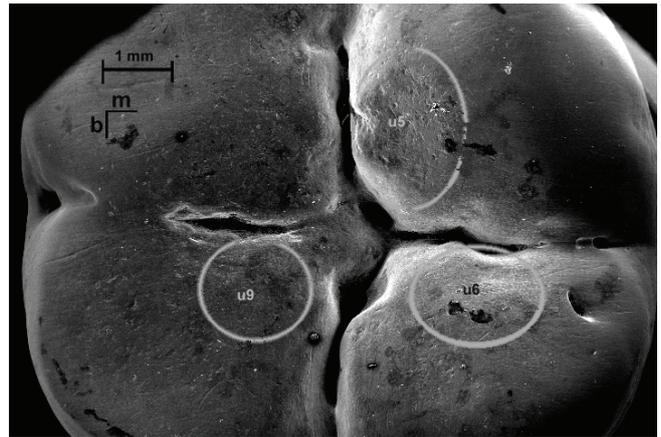
Um der besonderen Situation von Untersuchungen an historischem Zahnmaterial gerecht zu werden, wird der Diagnostik dentaler Microwear ein allgemeiner Teil über Strukturen und mögliche Artefakte auf Zahnschmelzoberflächen vorangestellt. Diese Strukturen und Artefakte sind der tatsächlichen Charakterisierung der Dentalen Microwear vorgelagert und wurden bei der Bewertung der Dentalen Microwear mit berücksichtigt.

4.1.1 Abtragung und Facettenbildung auf historischen Zahnoberflächen

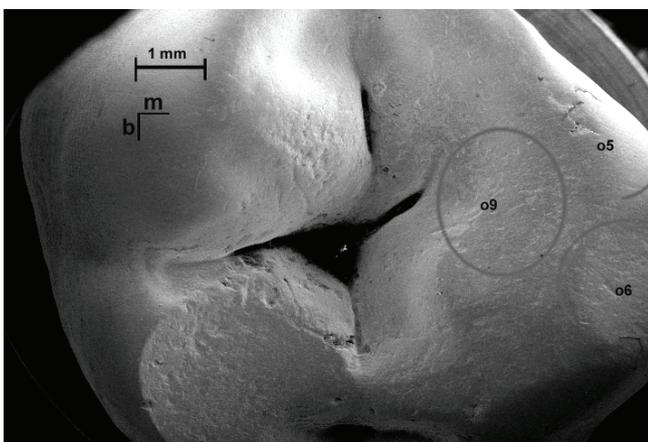
An allen untersuchten historischen Zähnen waren bereits mit dem bloßen Auge sichtbarer Abrieb oder durch zu hohe mechanische Belastung verursachte lokal begrenzte Zahnschmelzverluste, die sog. Macrowear zu beobachten. In den dargestellten Beispielen von REM-Übersichtsaufnahmen sind solche Schmelzareale deutlich zu erkennen (Abb. 76 A – F). Die Facettenareale, welche für die Dentale Microwear Analyse herangezogen wurden sind jeweils markiert.



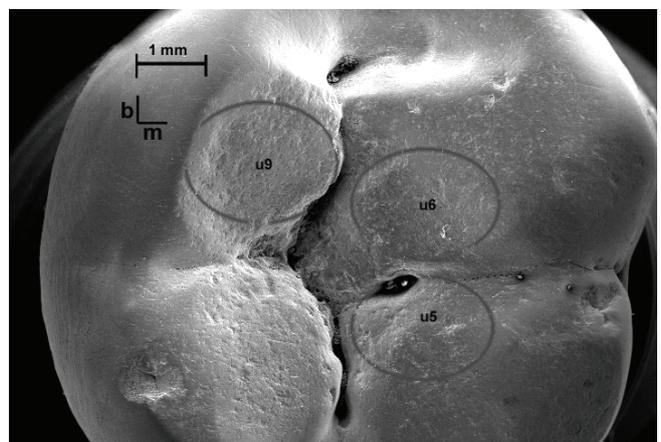
A Waging Ind 141 (OK links)



B Waging 136 (UK links)



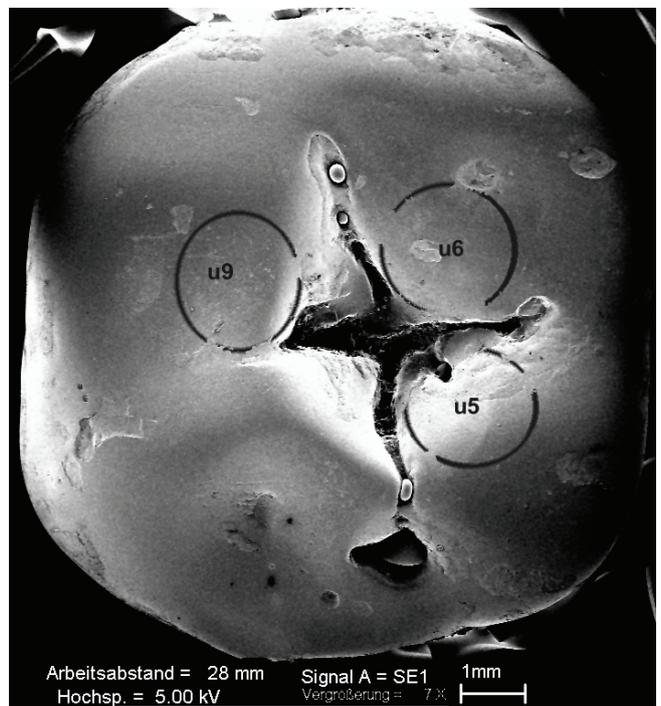
C Waging Ind 152 (OK rechts)



D Waging Ind 152 (UK rechts)



E Ofnet-Höhle Ind 25 (OK links)

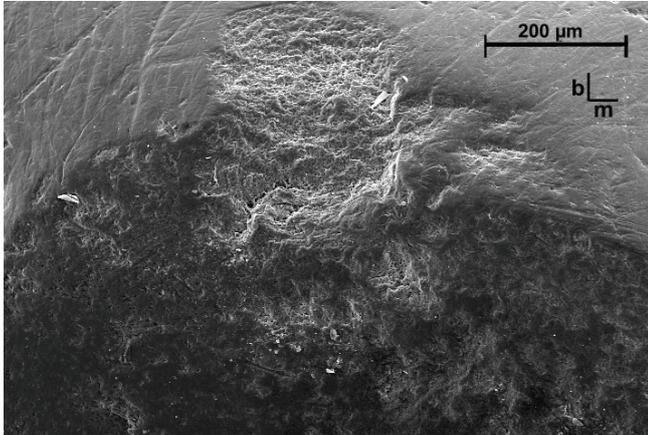


F Kaufertsberg (UK rechts)

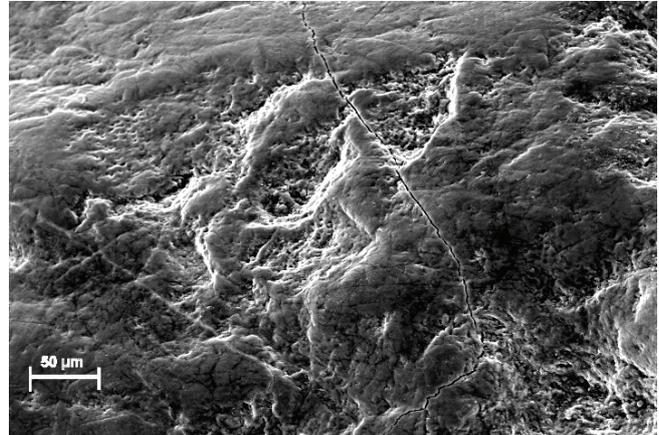
Abb. 76 REM-Übersichtsaufnahmen von historischen Zahnkronen; verschiedene Facettenbildungsstadien, Markierung zeigt die für die DMA untersuchten Facettenareale an.

4.1.2 Randständige oder okklusale Ablätterung oder Abspregung - Dentale Macrowear

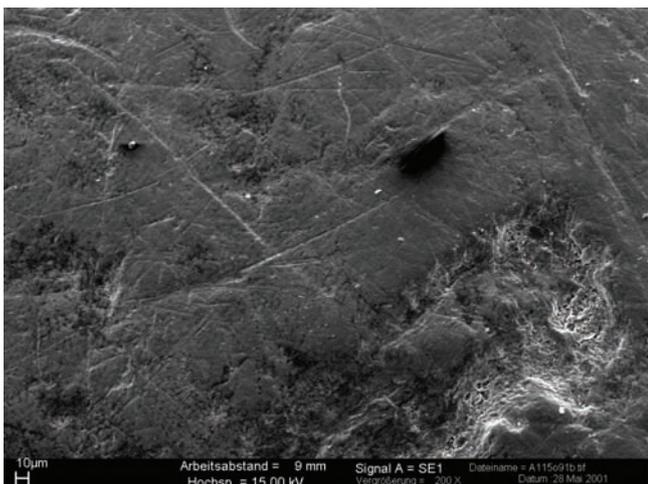
Großflächige Schmelzgruben (Abb. 77 A - D), Rinnen (Abb. 77 E) und sog. „Buckelpisten“ (Abb. 77 F) traten besonders gehäuft dann auf, wenn die Zahnhöcker noch in relativ ursprünglicher Form vorhanden waren. Mit zunehmender Abtragung der Höcker verringerte sich die Wahrscheinlichkeit für großflächige Schmelzverluste.



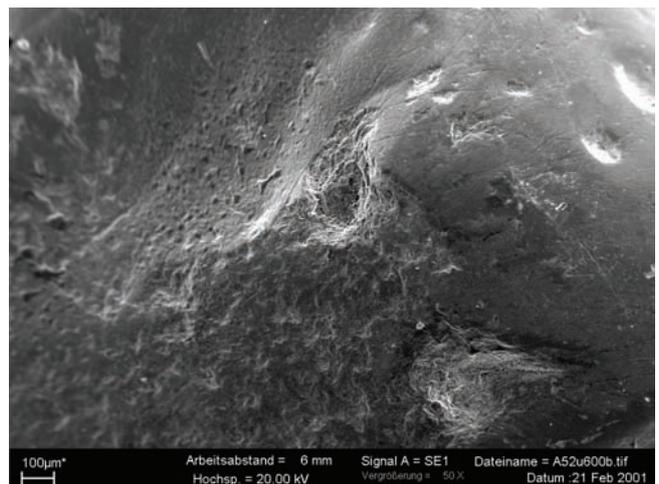
A Waging Ind 141 (u9)



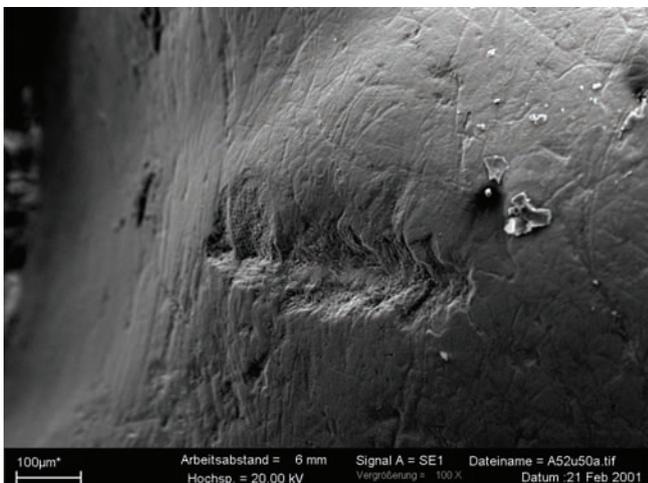
B Brombach Ind 16A (u6)



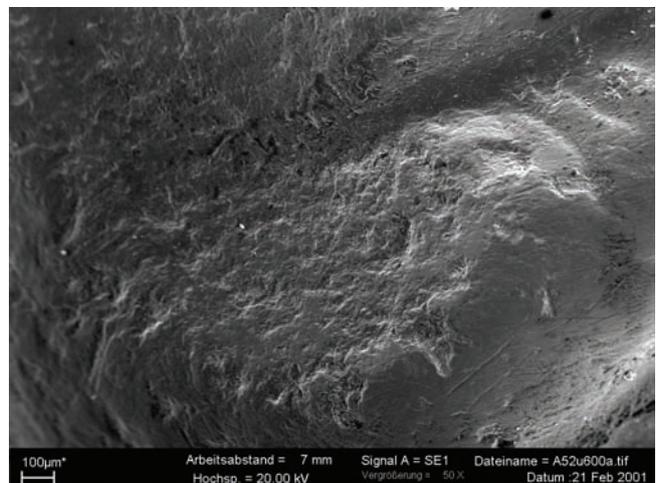
C Waging Ind 115 (o9)



D Waging Ind 52 (u6)



E Waging Ind 52 (u5)

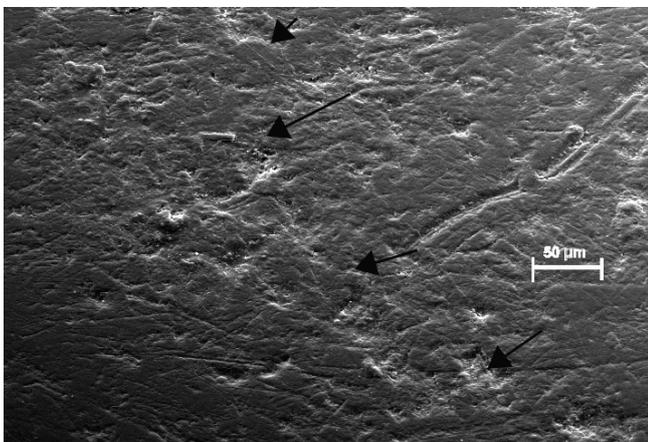


F Waging Ind 52 (u6)

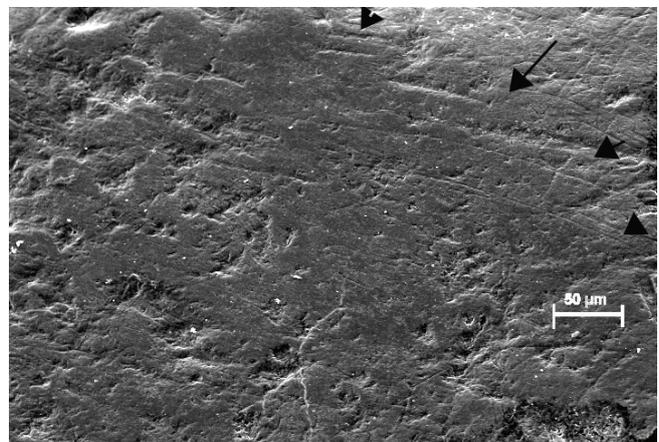
Abb. 77 REM-Detailaufnahmen: Beispiele Dentaler Macrowear

4.1.3 Charakteristische Morphologie von Schliiffacetten

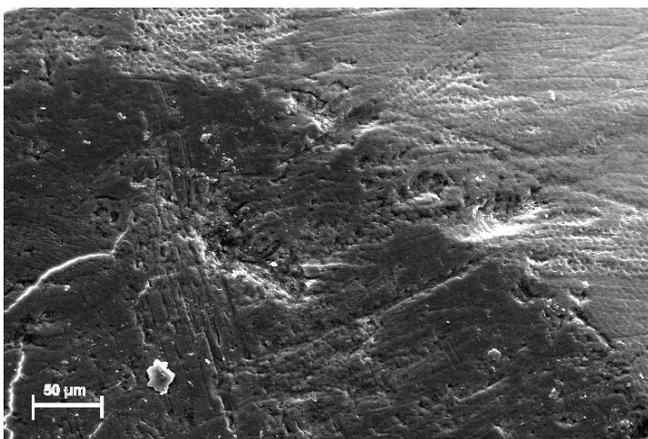
Sobald der Zahn in Okklusion steht, ist er den sich entwickelnden Kräften beim Zahngebrauch ausgesetzt. Das Ineinandergreifen der oberen mit den unteren Zahnreihen führt zu einer sukzessiven Ausbildung von Schleifarealen, den Facetten an den Zahnoberflächen. Abhängig von den dominierenden Kräften, der Richtung der einwirkenden Kräfte und den Flächen, welche direkt oder indirekt aufeinander wirken, entstehen sanft auslaufende (Abb. 75 A), variabel stumpfe (Abb. 75 B, C) und unterschiedlich scharfkantige (Abb. 75 D) Umrandungen der Facetten. Die individuelle Ausprägung einzelner Facetten war sehr variabel. Ausgenommen der scharfkantigen Facetten wiesen Facettenränder alle Übergangsformen der Begrenzung auf. Die scharf begrenzten und glatt polierten Facetten entstehen vorwiegend beim direkten Zahn-Zahn-Kontakt (Mekota 1997) oder beim Kauen unter stark abrasiven Bedingungen (Bergbauarbeiter – Hickel 1987, Geophagie – Djemal et al. 1998) und wurden in dieser Studie nicht weiter verfolgt.



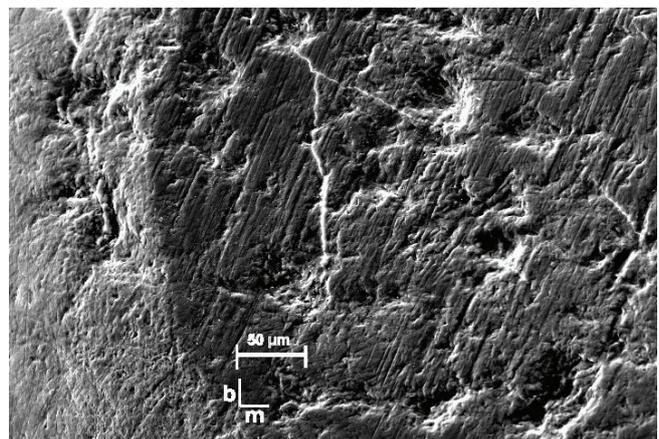
A Ofnet-Höhle Ind 32 (o5), Facettenrand fließend



B Bittenbrunn Ind 5 (u5), Facettenrand auslaufend



C Waging Ind 104 (o5), Facettenrand deutlich, gerundet

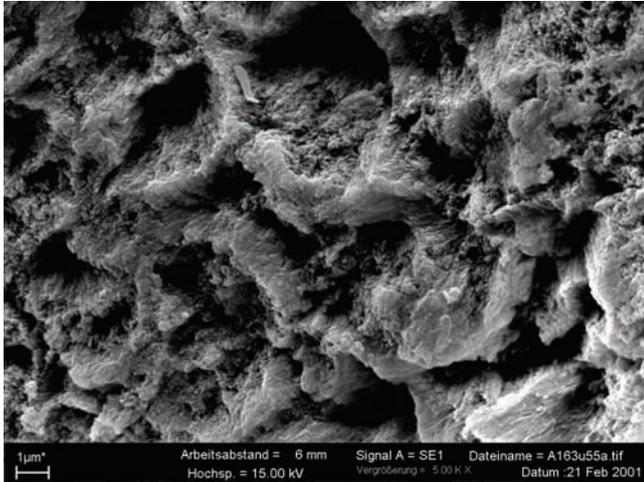


D Waging Ind 104 (u5), Facettenrand deutlich, schwach scharfkantig

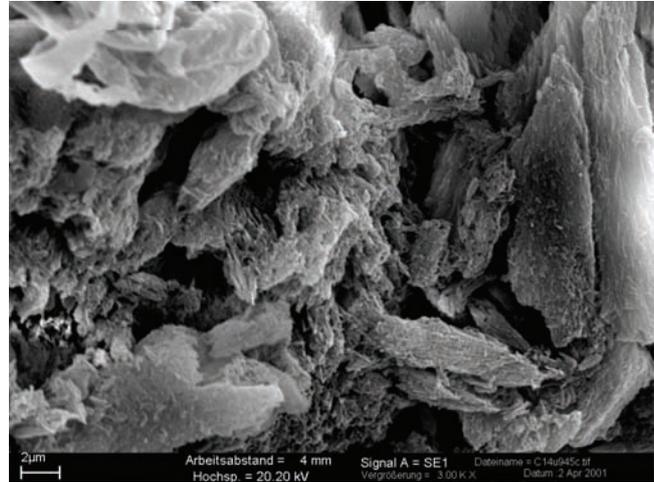
Abb. 78 REM-Aufnahmen: Ausprägung der lokalen Abgrenzung entstandener Schliiffacetten

4.1.4 Morphologie freigelegter Zahnschmelzprismen und des Dentins

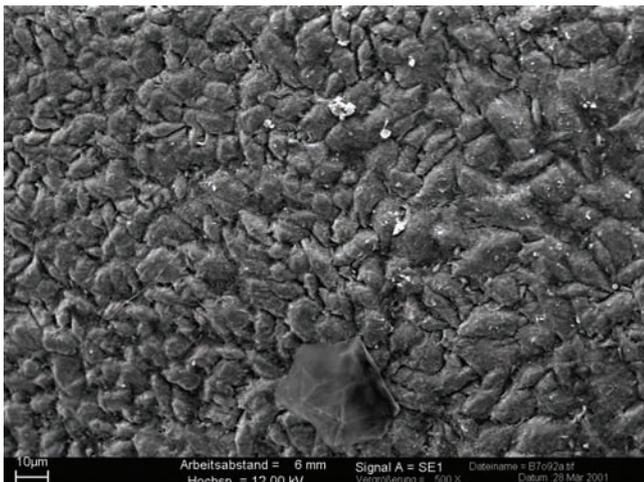
Während der mechanischen Belastung von Zahnschmelz können durch Überbeanspruchung Schmelzprismen freigelegt (Abb. 79 A – C) und Strukturen wie Tomes` Fortsätze (Abb. 79 D) sichtbar werden, welche meist nur nach besonderer Präparation (z.B. Bruch- und Ätztechnik) darstellbar sind.



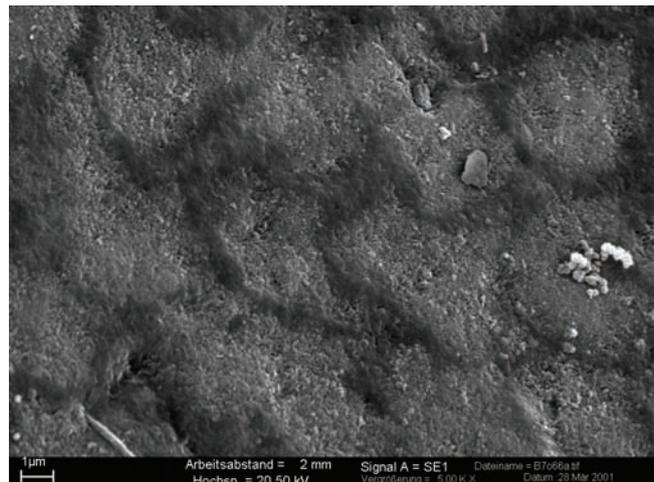
A Zahnschmelzprismen aus Kristalliten aufgebaut



B Gestörte Schmelzprismen



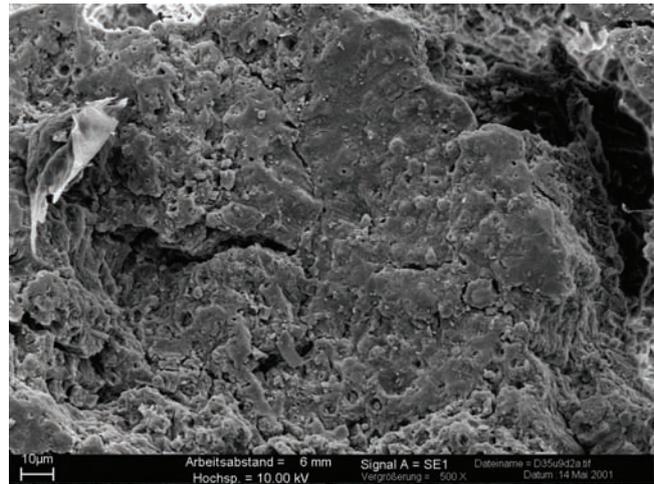
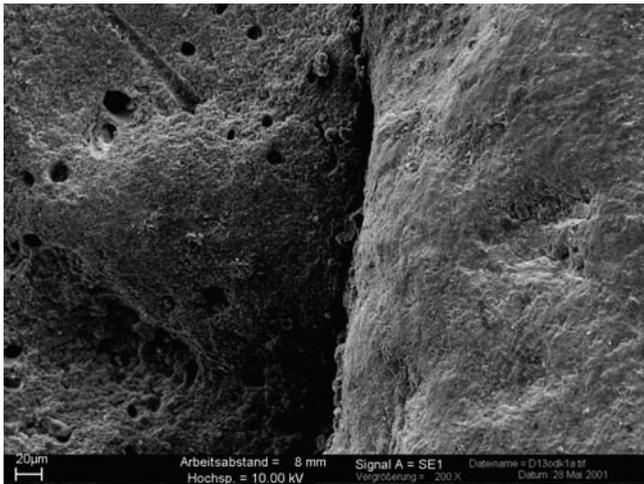
C schräg angeordnete Schmelzprismen



D mikrostrukturelle Anordnung der Zahnschmelzprismen im Querschnitt an der Oberfläche sichtbar (s. Abb. 9, S. 21)

Abb. 79 REM-Aufnahmen: Zahnschmelzstrukturen auf nativen historischen Zahnoberflächen, Maßstab im Bild

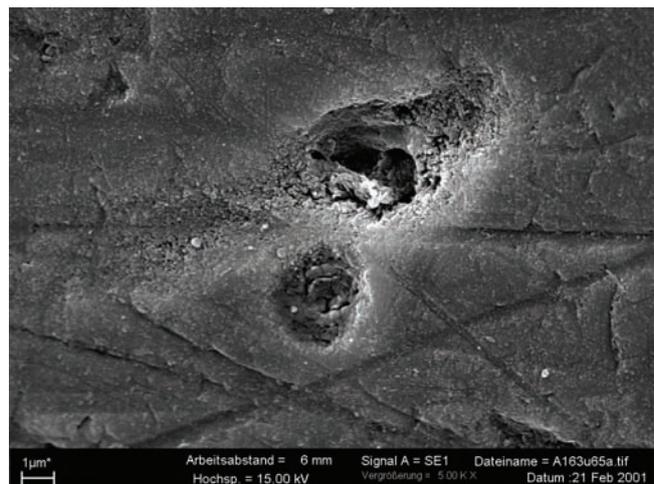
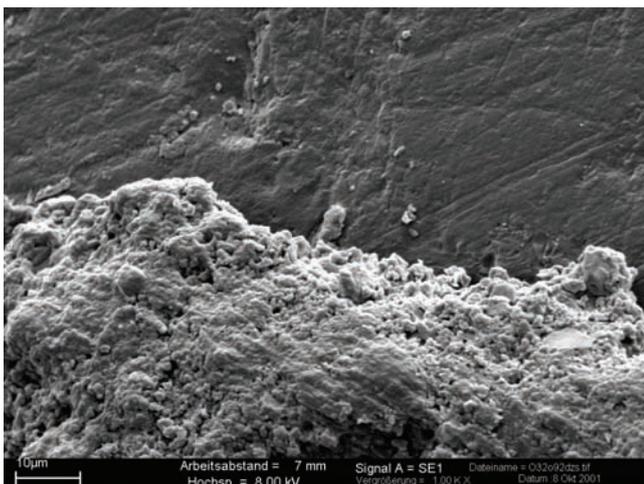
Ein starker Abrieb von Zahnschmelz resultiert in der Freilegung von Zahnbein (Dentin). In Abb. 80 A ist der Übergang von einem Zahnschmelzareal zu einer Dentininsel dargestellt. Abb. 80 B zeigt freigelegtes Dentin, dessen prismatische Struktur, welche lockerer und ungeordneter ist als diejenige des Zahnschmelz, zum Teil gestört ist.



A Übergang zwischen Zahnschmelz und Dentin (mit Bohrkanälen) B erodierte prismatische Struktur von freigelegtem Dentin
Abb. 80 REM-Aufnahmen: Dentin

4.1.5 Morphologie von Zahnstein und Kariöser Läsionen

Auflagerungen von Zahnstein (Abb. 81 A) und Zeichen kariöser Oberflächenläsionen (Abb. 81 B) waren auffindbar.

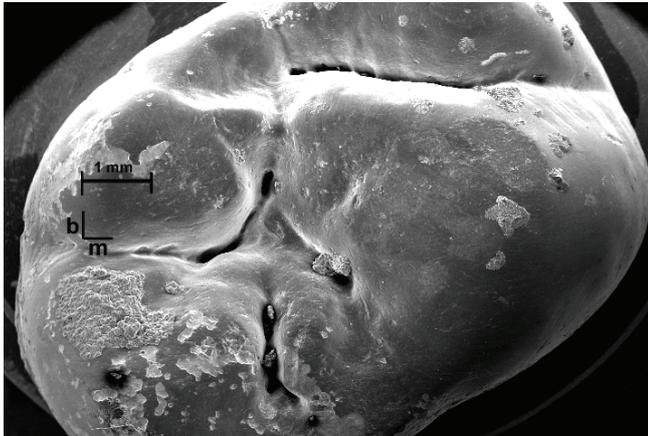


A Zahnschmelz mit Auflagerung von Zahnstein B Kariöse Läsion an der Schmelzoberfläche
Abb. 81 REM-Aufnahmen: Zahnstein und Karies

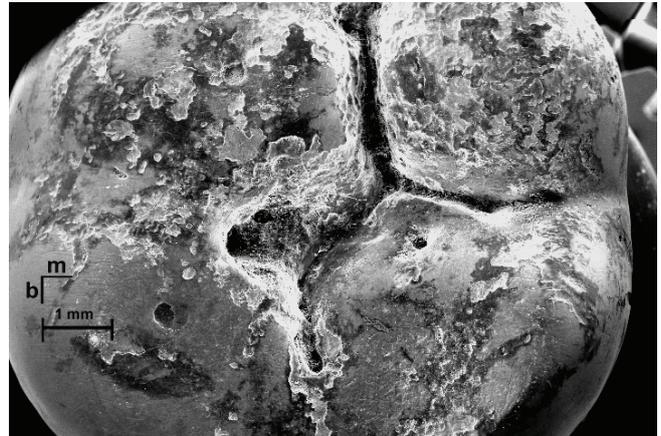
4.1.6 Artefakte auf den Zahnschmelzoberflächen durch die Bodenlagerung

Durch die Bodenlagerung sind die Relikte unterschiedlichen Bedingungen ausgesetzt. Spezielle Bedingungen hinterlassen Veränderungen sog. Artefakte auch auf den Zahnoberflächen. Solche Artefakte können inselartig (Abb. 82 A) oder großflächig (Abb. 82 B) auftreten. Die häufigsten Artefakte waren Zahnschmelzabblätterung (Abb. 82 B, C, D), mikrobieller Befall (Abb. 82 D – H, J, L), Bildung von Mikrorissen (Abb. 82 I, J und L), Auflagerungen und Verunreinigungen (Abb. 82 A, K und L), Säureerosion (Abb. 82 M, N) und erosive Beschädigung während der Bodenlagerung durch Boden- und Luftpartikel (Abb. 82 O – R). Ein mikrobieller Befall war stets gekennzeichnet durch eine lokale Schwärzung der Oberfläche (geringere Anzahl von SE durch z.B. Anhäufung chemischer Elemente niedrigerer Ordnungszahl), entweder auffindbar in Mikroläsionen (Abb. 82 E, G, H, J) oder zufällig (Abb.

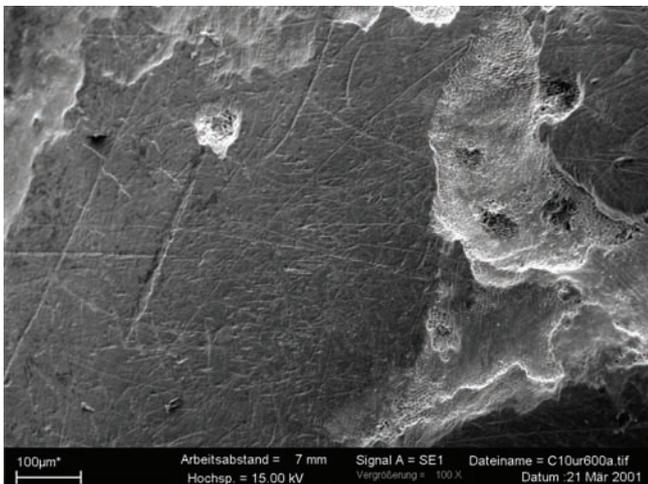
82 F, L), welche sich bei höherer Auflösung als direktes Umfeld von nachweisbaren Mikroorganismen darstellte. Exemplarisch ist dies in Abb. 82 H belegt.



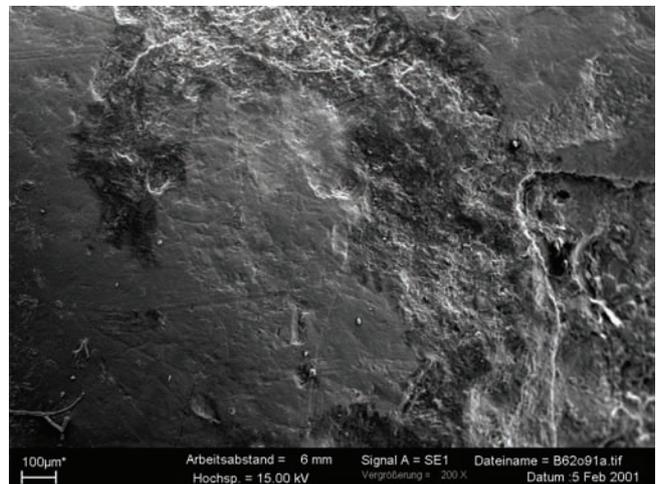
A Bittenbrunn Ind 17 (OK) Artefakte inselartig



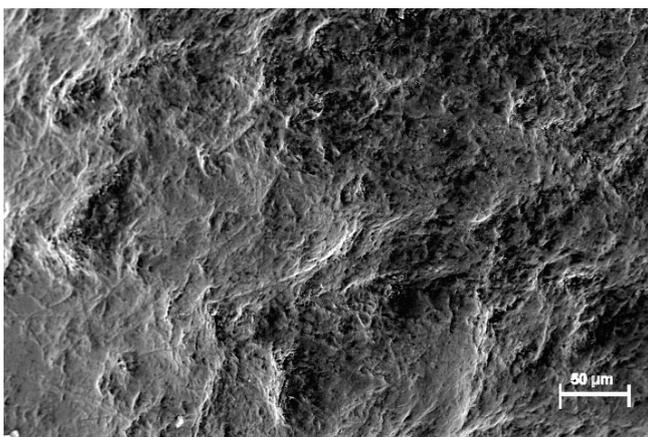
B Weichering Ind 3 (UK) Artefakte großflächig



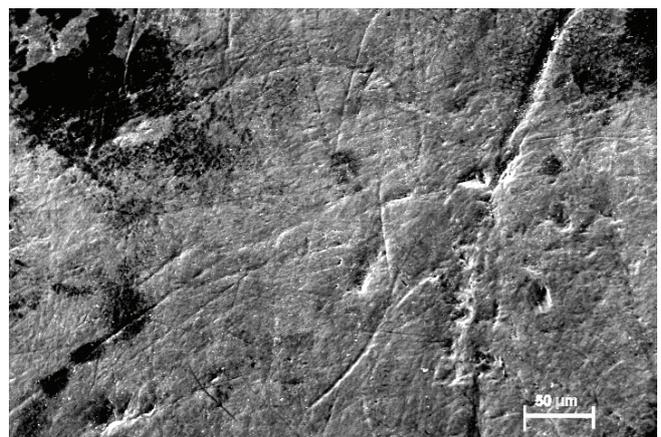
C Abblätterung



D Abblätterung in Verbindung mit mikrobiellem Befall



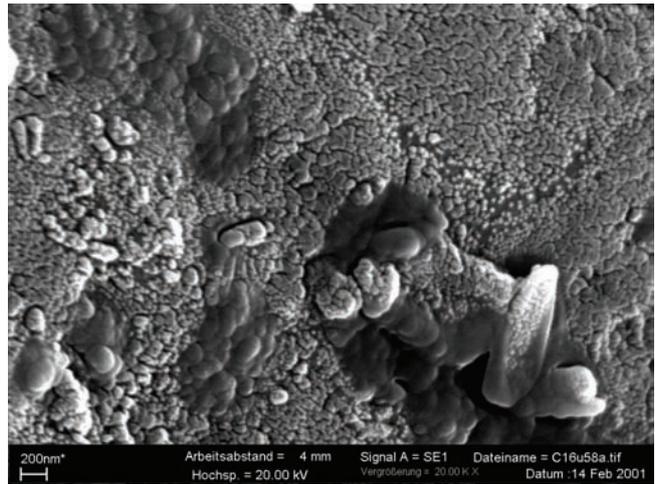
E Waging Ind 152 (u9), mikrobieller Befall der Gruben



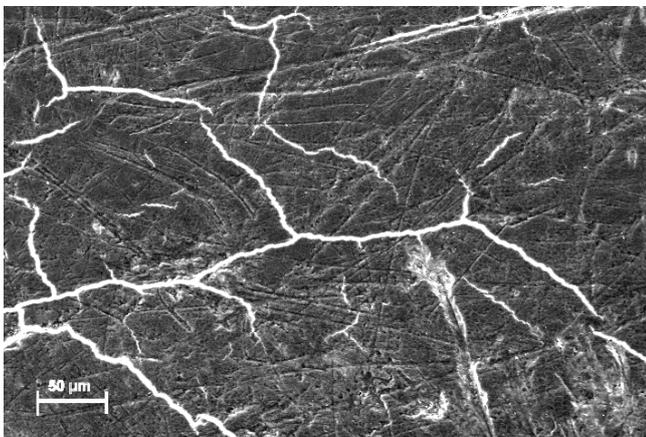
F Weichering Ind 3 (u6), mikrobieller Befall, Läsionsunabhängig



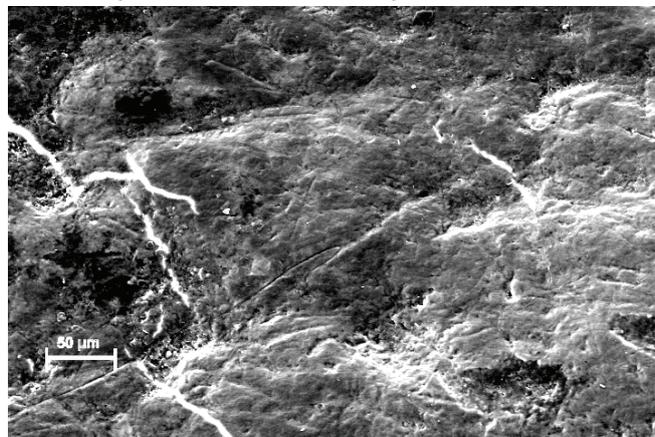
G mikrobieller Befall der Kratzspuren



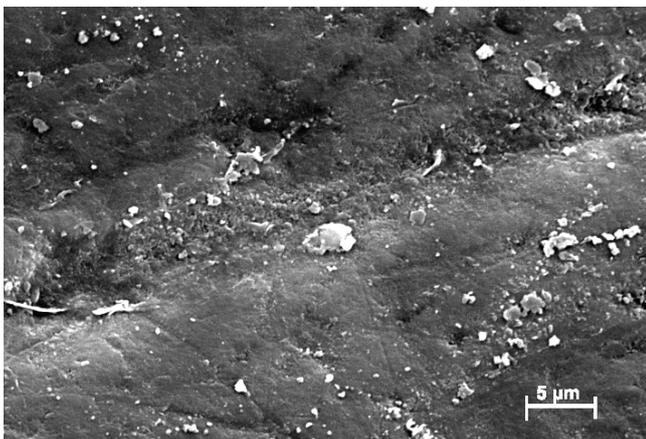
H Detail des mikrobiellen Befalles der Kratzspuren G;
Schwärzung des Umfeldes der Mikroorganismen



I Waging Ind 59 (u6) großflächige Mikrorissbildung



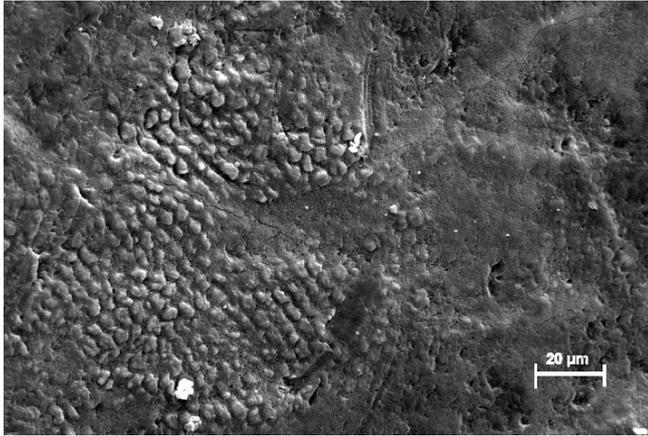
J Weichering Ind 17 (u6) Mikrorisse



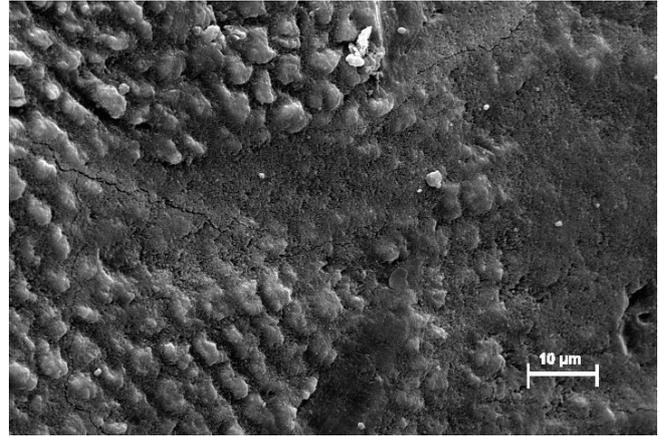
K Bittenbrunn Ind 37 (o9) lokale Anhäufung von Mikropartikeln



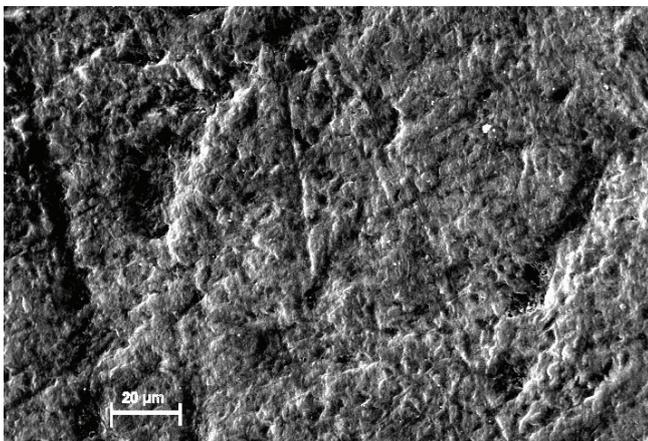
L Bittenbrunn Ind 37 (u6) multiple Artefakte



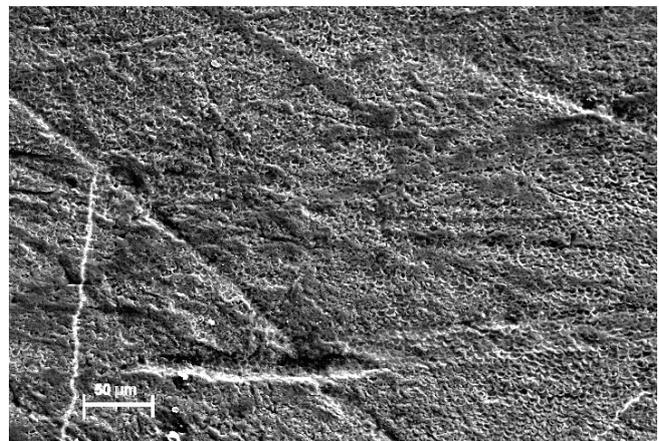
M Brombach Ind 7 (o5) Erhebungen durch leichte Säureätzung;



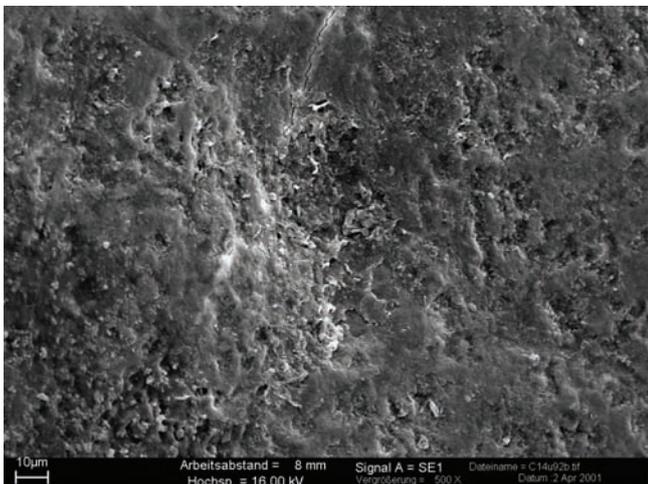
N Detail von M



O Waging Ind 104 (u6) erosive Überlagerung der Microwear

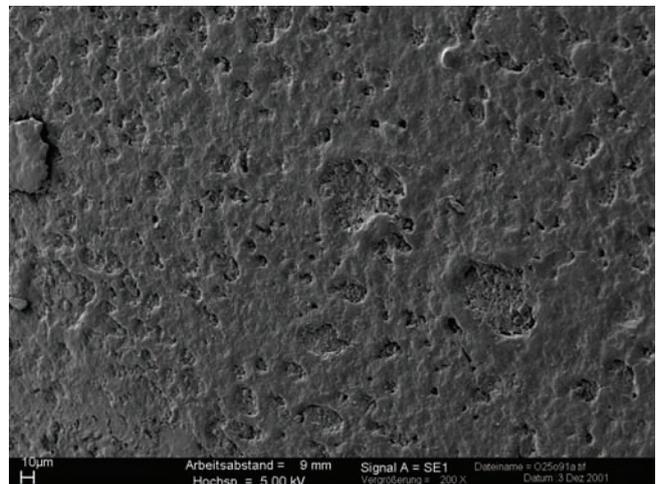


P Bittenbrunn Ind 59 (u5) Erosion überdeckt die Dentale Microwear



Q Vollständige Zerstörung der Microwear durch Erosion

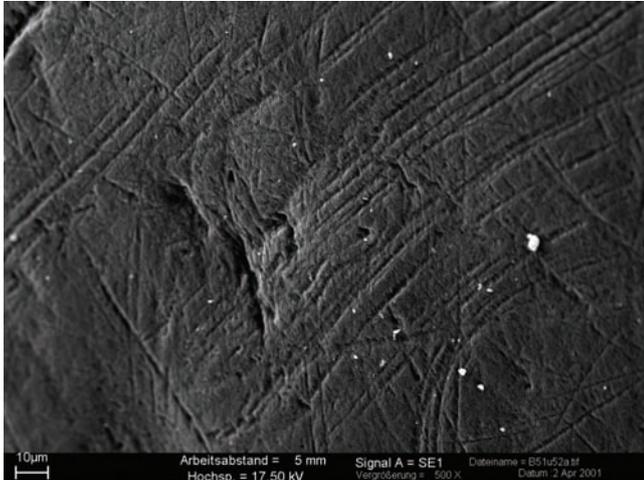
Abb. 82 REM-Aufnahmen: Artefakte durch Bodenlagerung



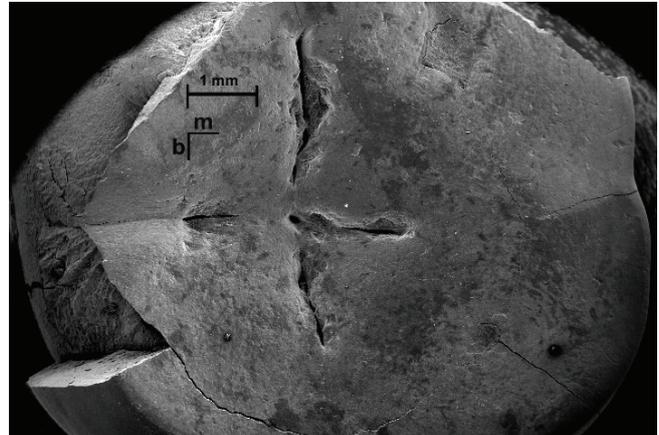
R Vollständige Zerstörung der Microwear durch Erosion

4.1.7 Artefakte durch die Präparation der historischen Zahnproben

Artefakte in Form mehrfach parallel angeordneter Kratzspuren (Abb. 83 A) entstanden durch eine ungeeignete Reinigung der Oberflächen. Sie überlagerten die reale Microwear. Großflächige Schmelzabsprengungen traten durch Trocknung der historischen Proben auf (Abb. 83 B).



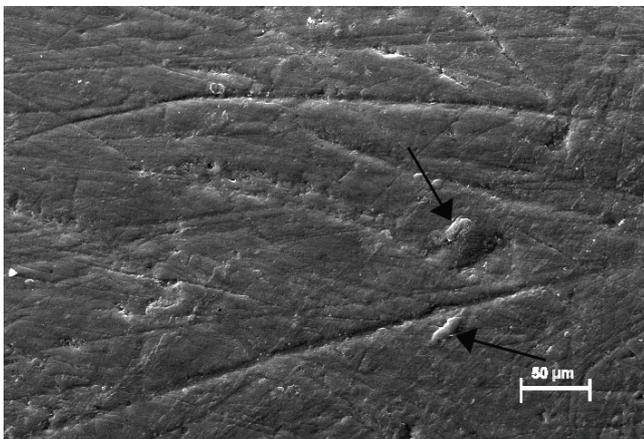
A sekundäre Kratzspuren



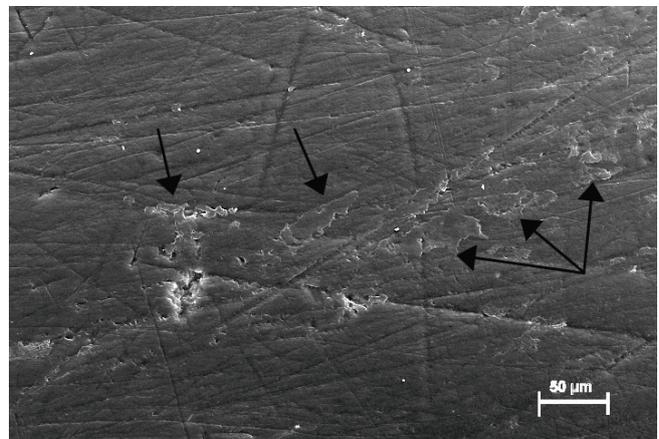
B Schmelzabsprengung durch Sprödigkeit und Trocknung

Abb. 83 REM-Aufnahmen: sekundäre Artefakte

Blasenbildung durch eingeschlossene Luft (Abb. 84 A) oder unregelmäßige Aushärtung der Silikonmasse (Abb. 84 B) führten zu vereinzelt auftretenden Abgussartefakten.



A Ofnet-Höhle Ind 11 (u5) Blasenbildung durch eingeschlossene Luftbläschen während des Abformens



B Ofnet-Höhle Ind 11 (o6) Schuppchenartige Bildungen deuten auf eine unregelmäßige Aushärtung des Silikons hin

Abb. 84 REM-Aufnahmen: sekundäre Artefakte

4.2 Merkmale dentaler Microwear

In Tabelle 29 sind allgemeine Kennzeichen dentaler Microwear-Muster und –Merkmale mehrerer Autoren zusammengestellt. Zur Belebung dieser sehr schematischen Skizzierung von Mikroläsionen folgt im Anschluss an die Tabelle eine Serie rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen der Individuen, welche für die Dentale Microwear Analyse ausgewählt wurden. Der zusammengestellte Katalog besonderer Details auf Zahnschmelzoberflächen dient einerseits zur Dokumentation der untersuchten Facettenareale aus den beschriebenen Fundkomplexen und Einzelfunden, andererseits als Referenz für weitere Untersuchungen, welche die morphologische und die morphometrische Analyse von historischen Zahnschmelzoberflächen zum Thema haben.

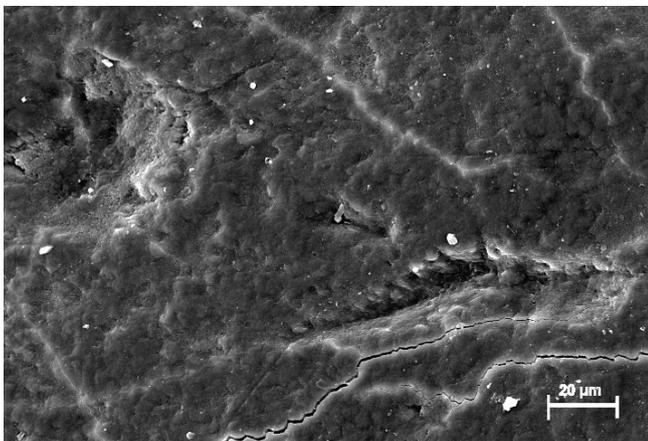
Tabelle 29. Allgemeine Charakterisierung von dentalen Microwear-Mustern bzw. Merkmalen auf Zahnschmelzoberflächen

	Beschreibung	Interpretation
Kratzspuren („striations“)	Lineare Eintiefungen unterschiedlicher Dimension mit mehr oder weniger gerundeten oder scharfen Rändern	Anwesenheit steinchenartiger Verunreinigungen, die auf der dentalen okklusalen Oberfläche während des Kauvorganges (abscherende Phase) entlanggezogen werden (Walker 1976, Puech et al. 1983, Rose 1983, Gügel et al. 2001)
Gruben („pits“)	Mehr oder weniger tiefe Einsenkungen von unterschiedlicher Grösse aber mit nahezu gleicher Länge und Breite	Entstehen während der Press- oder Quetschphase durch kleine harte Partikel (z.B. steinige Verunreinigungen, Phytolithe) (Gordon 1982, Puech et al. 1983, Lalueza Fox et al. 1994, Gügel et al. 2001)
Sichelförmige Rinnen („gouges“)	Breite und stark gebogene Kratzspuren, häufig s-förmig, mit abgerundeten oder scharfen Rändern	Produziert während außertzentrischer Kieferbewegungen (Gordon 1982), auch durch nicht-ernährungsbedingten Zahngebrauch (Brace et al. 1981, Puech 1981)
Polierte Facetten („polished facets“)	Flache oder abgerundete Flächen, bedeckt oder auch nicht, mit feinen Kratzern und kleinen Grübchen	1) Polierende Wirkung ausgeübt durch pflanzliche Fasern (Anwesenheit von Silikat / Phytolithe) (Ryan 1979, Brace et al. 1981) 2) Zahngebrauch unabhängig von der Ernährung (Borgognini Tarli et al. 1989)
Randständige oder okklusale Abblätterung – Absprengung („marginal/occlusal chippings/flakes“)	Gewinkelte Eintiefungen aufgrund des Verlustes von Schmelzsplinten unterschiedlicher Größe bzw. Ausdehnung	1) Anwesenheit großer Stücke harter Verunreinigungen in der Nahrung (z.B. Fragmente von Mollusken-Schalen) (Rose et al. 1983) 2) Parafunktion und nicht nahrungsmittelbedingter Zahngebrauch (besonders randständige Abblätterungen der anterioren Zähne) (Brace et al. 1981) 3) Post-mortale Beschädigung (Puech 1983)
Randständige Kerben („marginal grooves“)	Lineare Eintiefungen, die breiter sind als Kratzspuren, im allgemeinen bucco-lingual orientiert und bevorzugt an den Frontzähnen lokalisiert	Zahngebrauch unabhängig von der Ernährung, vermutlich durch kraftvolles Bearbeiten von Fasern (z.B. Fäden oder Angelschnüre) (Borgognini Tarli et al. 1989)
Kerben im Bereich der Zahnzwischenräume („interproximal grooves“)	Röhrenförmige Kerben mit langgestreckten parallelen Kratzspuren oder Kratzern, bucco-lingual orientiert, im allg. um die Zement-Schmelz-Grenze lokalisiert	1) Gebrauch von Zahnstickern etc. (Ubelaker et al. 1969, Schulz 1977, Berryman et al. 1979) 2) Absonderung von Steinchen während des Schluckens (Wallace 1974)
Schmelzfrakturen („enamel fractures“)	Brüche oder Risse variabler Länge, Richtung und Lokalität, im allg. sichtbar bei kleiner oder ohne Vergrößerung	1) Post-mortale Beschädigung (Puech 1983) 2) Schwerer Kaustress (wiederholte Beladung) (Turner, Cadien 1969, Borgognini Tarli et al. 1989)
Zahnschmelz-Mikrorisse („enamel microcracks“)	Fissuren von 0,1 – 0,2 µm Weite mit kreisförmigem oder gezackte Muster	Kaustress (wiederholte lokale Beladung) (Peters 1982)
Furchung mit Kratzern („striated furrows“)	Okklusale lineare Eintiefungen mit abgerundeten Kanten, an welchen feine parallele Kratzer auftreten	Vermutlich durch Zugspannung während des Zermahlens von pflanzlichen Fasern oder Sehnen oder durch nicht nahrungsmittelbedingten Zahngebrauch entstanden (Borgognini Tarli et al. 1989)

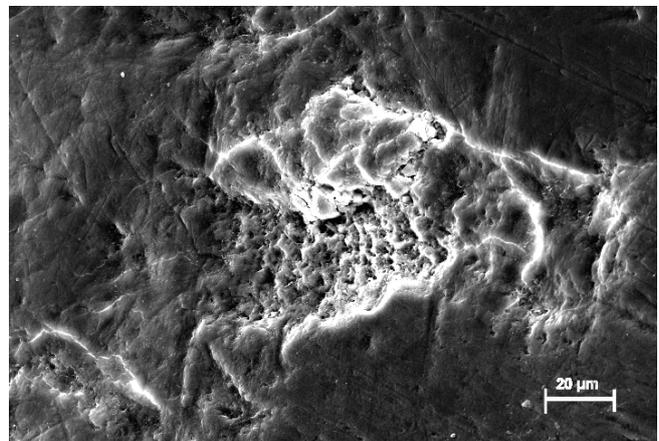
4.2.1 Entstehung und Auslöschung dentaler Microwear (turnover)

Für nahezu alle Mikroläsionen auf Zahnschmelzoberflächen gilt, dass sie während der aktiven Kaubewegung einer fortlaufenden Überlagerung (turnover) unterliegen. Jedes individuelle Merkmal stellt eine Momentaufnahme der aktuellen Situation dar. Nur in ganz seltenen Fällen kann der Bildungsmoment eines Merkmales festgehalten werden.

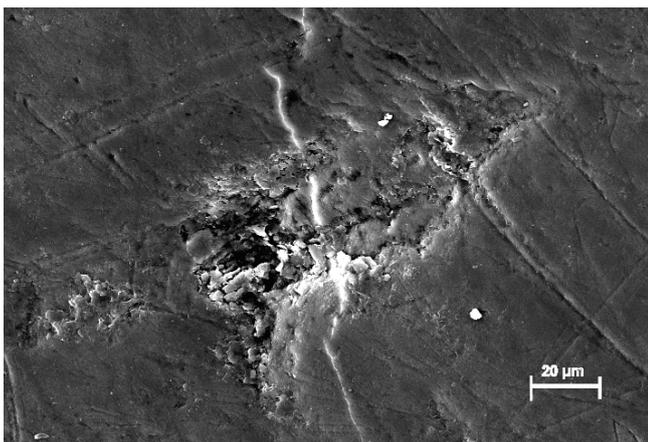
In Abb. 85 A – D sind Bildungsmomente von Gruben (A – C)) und einer breiten Kratzspur (D) dargestellt. Durch Krafteinwirkung, welche die Stabilitätseigenschaften der Oberfläche überschritten, entstanden begrenzte Eindellungen (Abb. 85 A) und Spannungsrisse (Abb. 85 B – D). Die lädierte Oberfläche wurde im Verlauf weiterer Belastungen abgehoben und/oder aufgeschoben. Die aus dem allgemeinen Verbund herausgetrennte Substanz wurde sukzessive abgetragen und entfernt. An ihrem Ursprungsort blieb je nach lokaler Anordnung der Schmelzprismen eine lokale Läsion zurück.



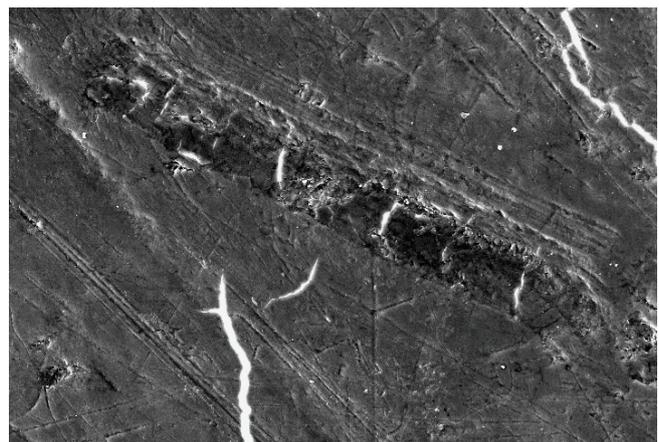
A Brombach Ind 7 (o9) Eindellung der Schmelzoberfläche



B Bittenbrunn Ind 17 (o9) Schmelzaufwerfung und Prismenfreilegung



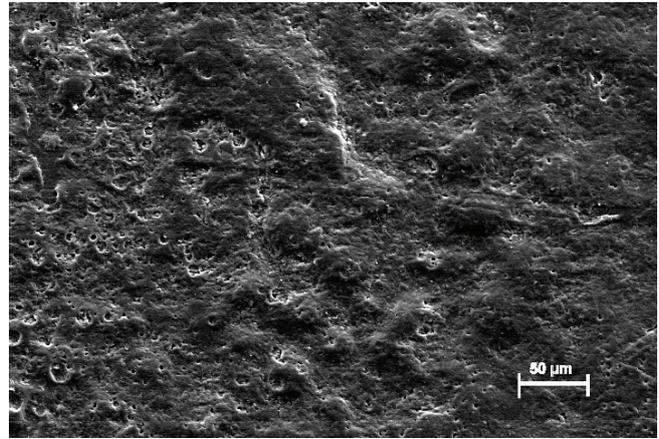
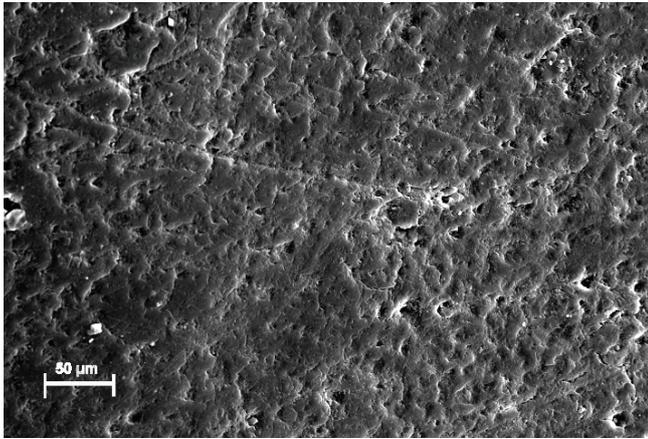
C Brombach Ind 39 (o9) „gepflügte“ Grube



D Brombach Ind 39 (o9) breite Kratzspur mit geteilten Schmelzaufschiebungen

Abb. 85 REM-Aufnahmen: A – D Entstehung von Mikroläsionen

Eine Vielzahl solcher Läsionen verursachte auf Zahnschmelzoberflächen im frühen Stadium der Entstehung von Microwear sog. „Buckelpisten“ (Abb. 86 A, B).

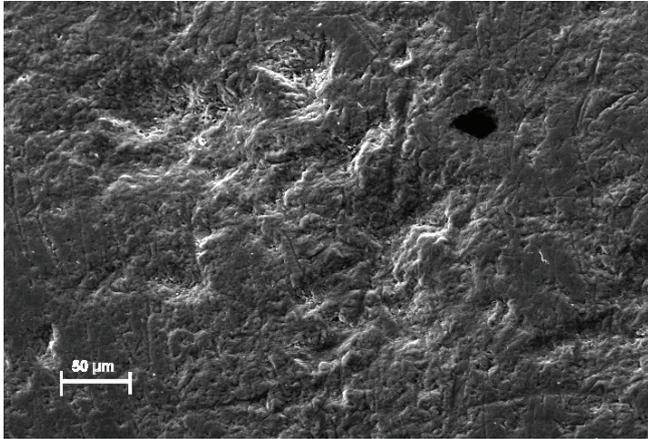


A Ofnet-Höhle Ind 4 (u9)

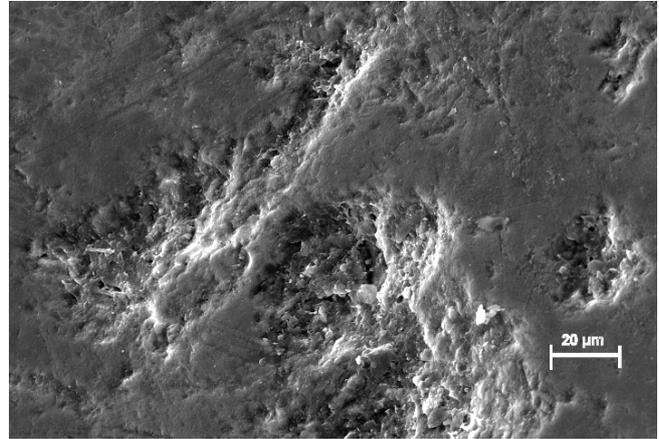
B Ofnet-Höhle Ind 29 (o6)

Abb. 86 REM-Aufnahmen: Auftreten von sog. „Buckelpisten“ im frühen Stadium der Entstehung dentaler Microwear

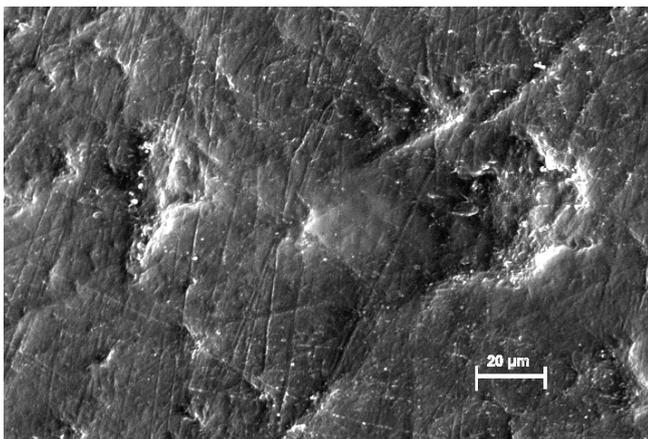
Mikroläsionen werden nicht repariert, sie werden aber im Verlauf des Abtragungsgeschehens mehr oder weniger rasch von neuen Läsionen überlagert und abgetragen (Abb. 87). Dieser turnover-Effekt entwickelt mit zunehmender Abtragung (Zunahme von A → F) eine plan polierte, von Kratz- bzw. Schleifspuren dominierte Oberfläche.



A Waging Ind 152 (o9), überlagerte Gruben Rändern

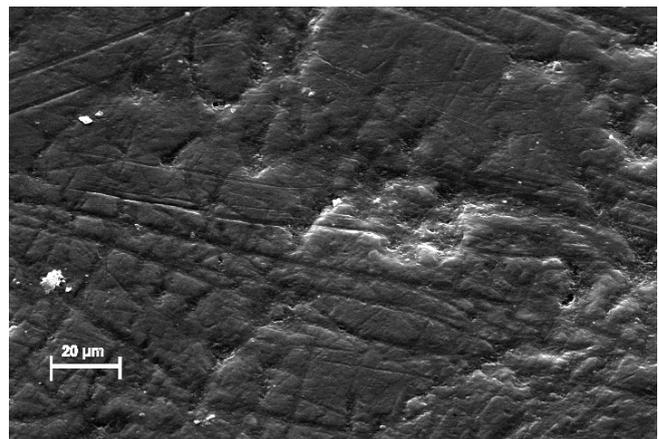


B Bittenbrunn Ind 34 (u6), mehrere Gruben mit deutlich plan polierten Rändern

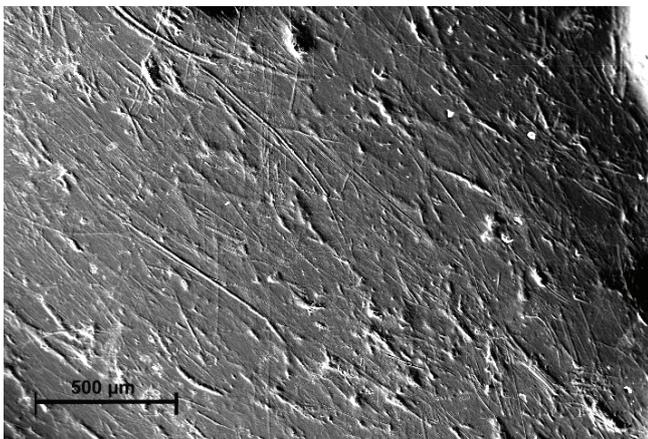


C Ofnet-Höhle Ind 21 (o9)

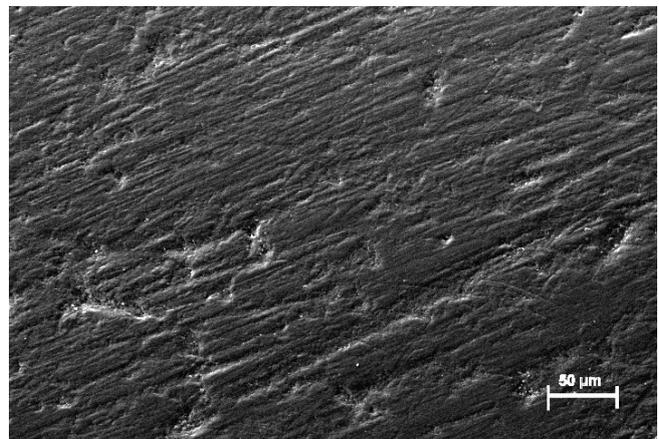
Nahezu vollständig überschlossene Gruben, Kratzspuren treten deutlich in den Vordergrund



D Ofnet-Höhle Ind 4 (u6)



E Ofnet-Höhle Ind 3 (u9)



F Ofnet-Höhle Ind 32 (o9)

Flächen sind plan geschliffen und mit zahlreichen Kratzspuren bedeckt, Orientierung der Kratzspuren erscheint homogen in eine Richtung

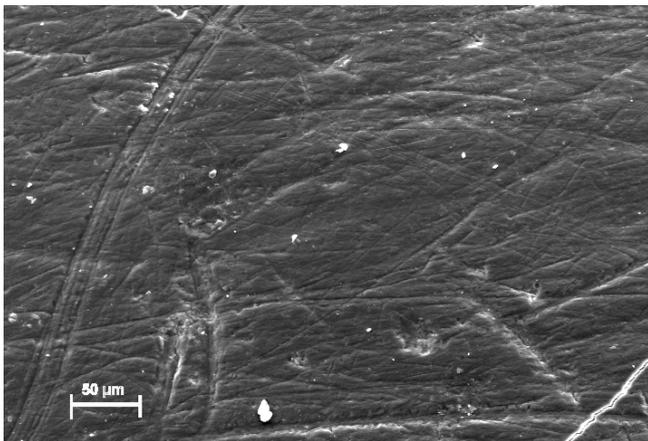
Abb. 87 REM-Aufnahmen A – F Überlagerung und Auslöschung von Mikroläsionen durch den sog. turnover-Effekt

4.3 Dentale Microwear Merkmale

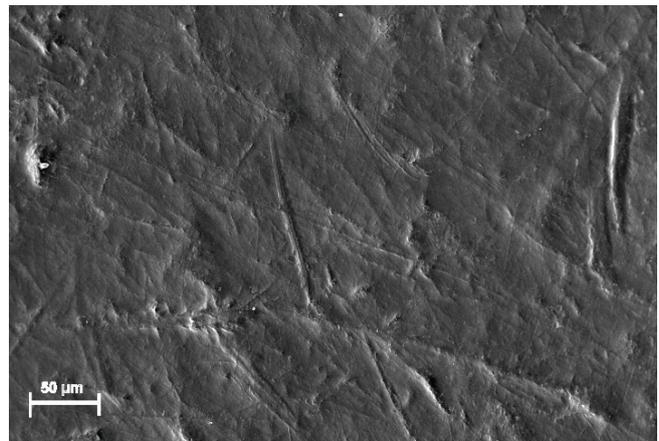
Im Folgenden wurden die Merkmale in der Art eines Kataloges unter Berücksichtigung der Kategorien Microwear-Kratzspuren, Kratzspuren mit besonderer Charakteristik, Microwear-Gruben, Besondere Musterbildungen und Ein- und Auflagerungen dargestellt. Diese Vorgehensweise wurde einer katalogartigen Darstellung getrennt nach den Fundorten präferiert, da über eine individuelle Formation und Ausprägung von dentalen Microwear Merkmalen noch keine systematischen Untersuchungen vorlagen und -liegen. Ein auf diese Weise relativ unkompliziert entstehender Referenzkatalog dentaler Microwear Merkmale wäre, unter Einbindung der Individual- und der historischen Daten, fortlaufend erweiterbar.

4.3.1 Microwear-Kratzspuren („striations“)

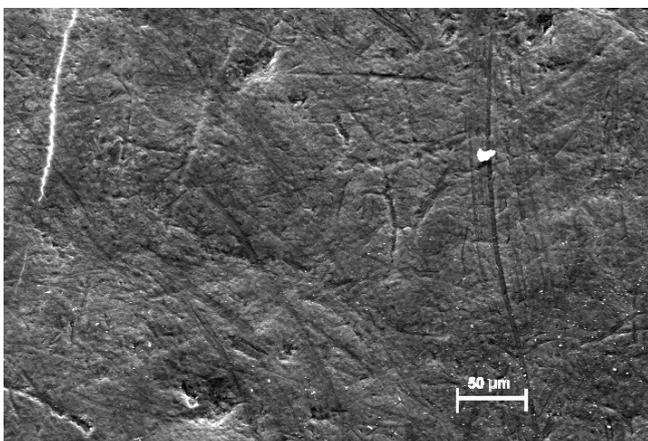
Auf allen Zahnschmelzarealen waren eine Vielfalt von Kratzspuren mit variabler Orientierung im Winkel von 0 - 180° relativ zur Ausrichtung der Zahnoberfläche von bukkal (links) nach lingual (rechts) auffindbar. An vier Facettenarealen verschiedener Zahnproben (Abb. 88 A - D) ist das breite Repertoire an Kratzspurausbildungen exemplarisch dargestellt. Abhängig von der gewählten Auflösung konnten kurze feine Kratzspuren ebenso gut abgebildet werden, wie lange breite, die sich teilweise über die gesamte Oberfläche erstreckten. Bei 200x-Vergrößerung waren meist alle vorhandenen Kratzspuren in ihrer totalen Ausdehnung darstellbar. Die Kanten von Kratzspuren konnten weich abgerundet, scharfkantig, gefranst oder/und unterschiedlich schräg aufeinander zulaufend sein.



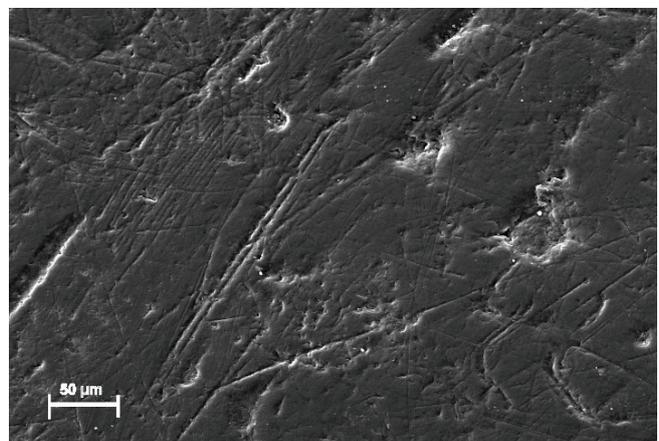
A Waging Ind 92 (u6)



B Ofnet-Höhle Ind 11 (u9)



C Waging Ind 136 (o5)



D Ofnet-Höhle Ind 18 (o9)

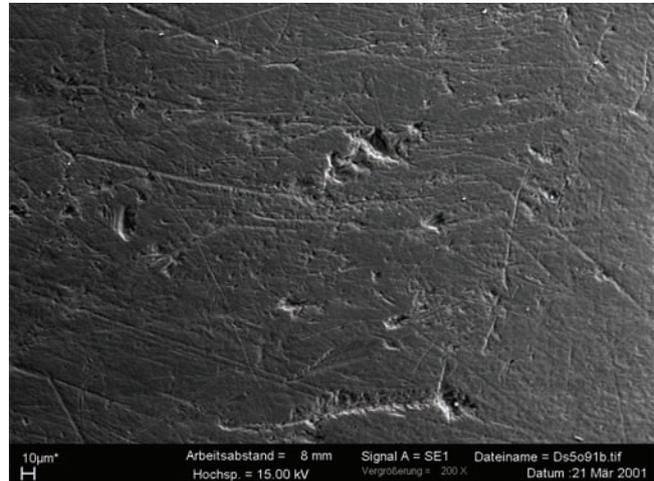
Abb. 88 REM-Aufnahmen 200x Beispiele für die vielfältige Ausprägung von Kratzspuren

4.3.2 Kratzspuren mit besonderer Charakteristik

In seltenen Fällen waren besonders ausgeprägte Kratzspuren zu finden. Diese konnten tief und kurz sein, wobei der Rand gezackt oder ausgefranst (Abb. 89 A, B) war. Teilweise fanden sich in nächster Nähe kleine Partikel, bei welchen es sich z.B. um Schmelzfragmente oder um exogen zugeführte, abrasiv wirkende Partikel handelte.



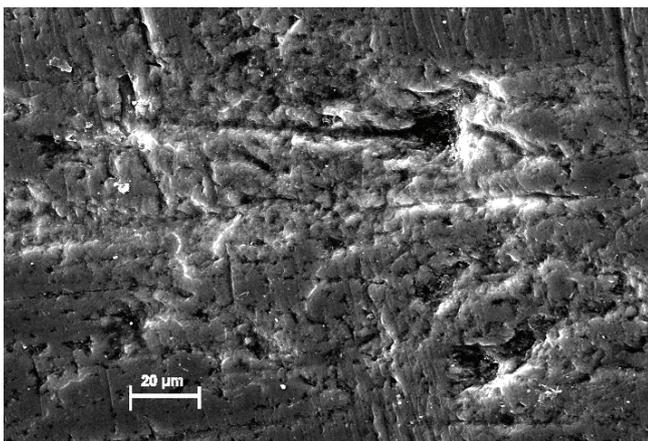
A REM 1000x: Waging Ind 35, kurz, gezackt mit Auflagerung endständiger pfeilspitzenförmiger Grube



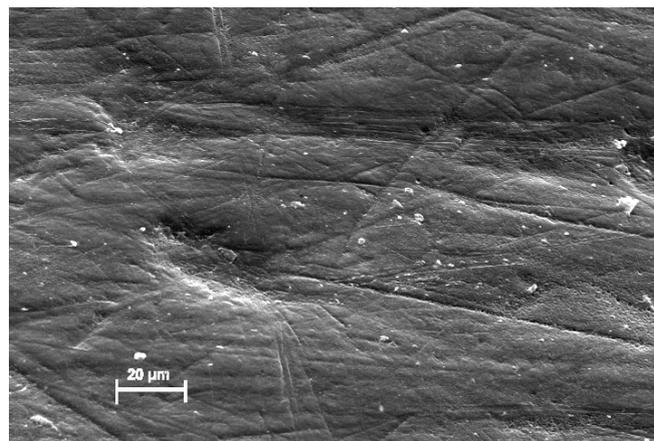
B REM 200x: Brombach Ind 5, lange gezackte Kratzspur mit

Abb. 89 Kratzspuren mit gezacktem Rand

Es traten tiefe (Abb. 90 A) oder flache (Abb. 90 B) Kratzspuren mit anfang- oder endständiger Grube auf. Der Entstehungsmoment mit Kratzspuren verbundener Gruben ließ sich nur entscheiden, wenn Mikrorisse am Grubenrand auftraten oder abrasive Partikel am Kratzspurende haften blieben. Am Ende der leicht aufgetriebenen Kratzspuren sind teilweise Mikropartikel aufgelagert (Abb. 90 C, D) oder sie sind mit einem Detail in die Kratzspur versenkt (Abb. 90 E, F).



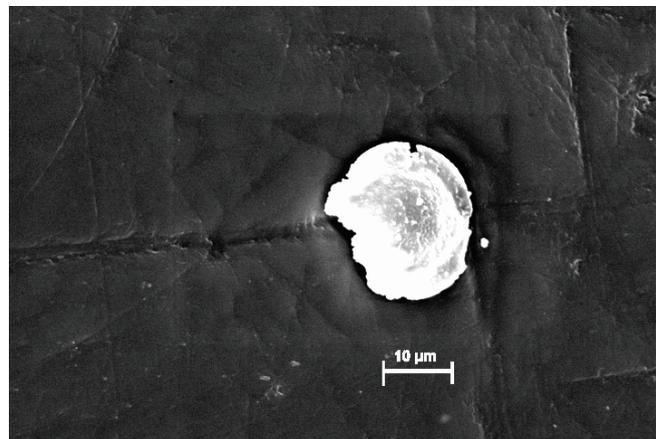
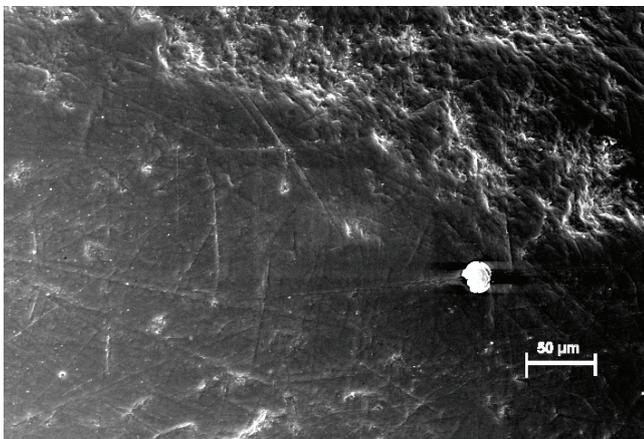
A Waging Ind 104 (o9) leicht erodierte tiefe Kratzspur mit endständiger tiefer Grube (Mikrorisse)



B Ofnet-Höhle Ind 21 (o5) Kratzspur mit Grube



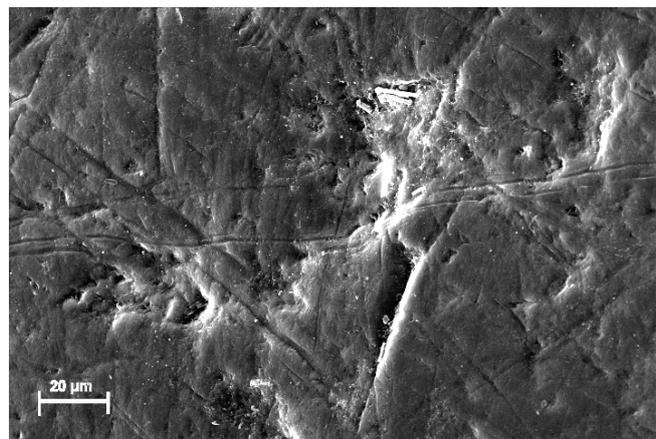
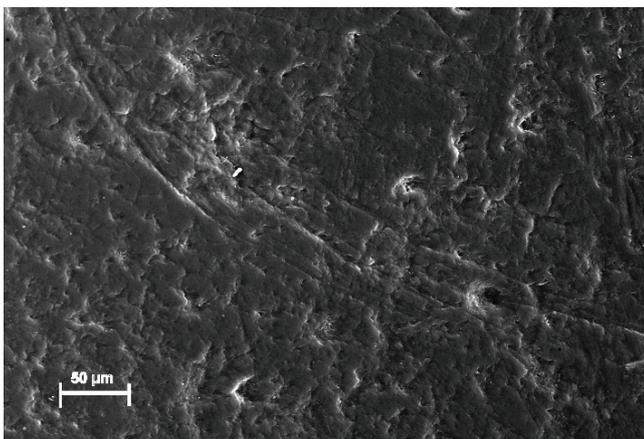
C und D Bittenbrunn Ind 51 (Detail D 5000x) Kratzspuren mit weicher Kante, verbreitertem Ende, teilweise mit endständiger Auflagerung



E Ofnet-Höhle Ind 21 (o6) Kratzspur mit eingelagertem Partikel → F

Abb. 90 Kratzspuren in Verbindung mit Gruben und oder endständiger Auf- bzw. Einlagerung

Insbesondere auf den Oberflächen der Individuen der Ofnet-Höhle waren lange, gebogene Kratzspuren zu finden (Abb. 91 A). Kurze gebogene Kratzspuren waren auf allen Oberflächen nachweisbar (Abb. 91 B).

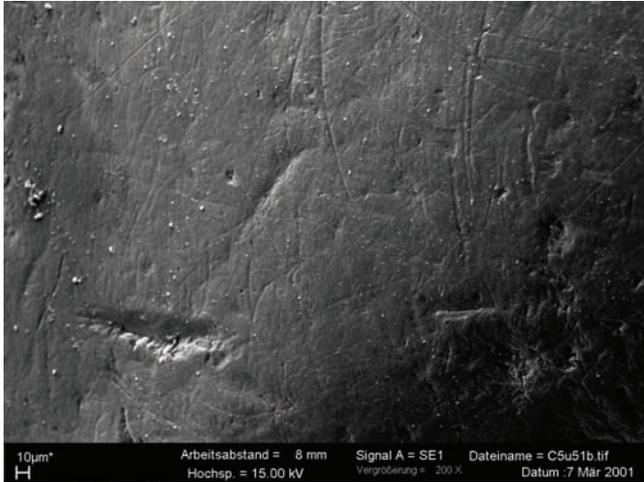


A Ofnet-Höhle Ind 8 (o6)

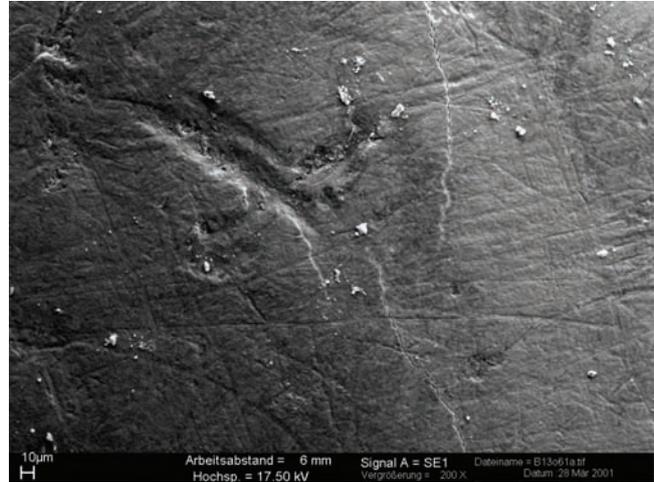
B Bittenbrunn Ind 34 (o9)

Abb. 91 gebogene Kratzspuren

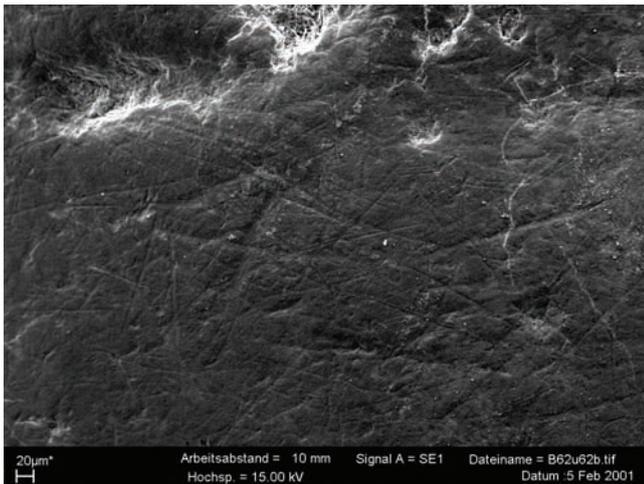
Manche Kratzspuren mit einem kleinen Längen- zu Breitenverhältnis (Rinnen oder Kerben; „gouges“) waren besonders geformt. Vereinzelt waren es Formen wie eine Lanzenspitze (Abb. 92 A), lange und/oder walzenförmige Rinnen (Abb. 92 B, C, E, F, H) und Formen von tiefen, komplexen Kerben (Abb. 92 D) und Scharten (Abb. 92 G).



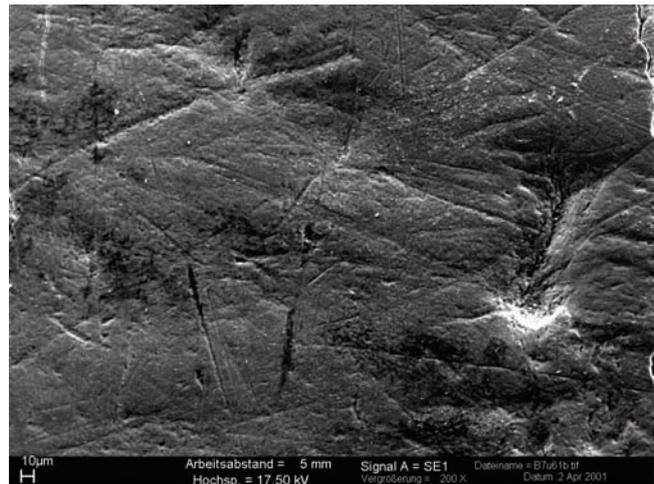
A Weichering Ind 5 (u5) tiefe Kerbe, Form einer Lanzenspitze



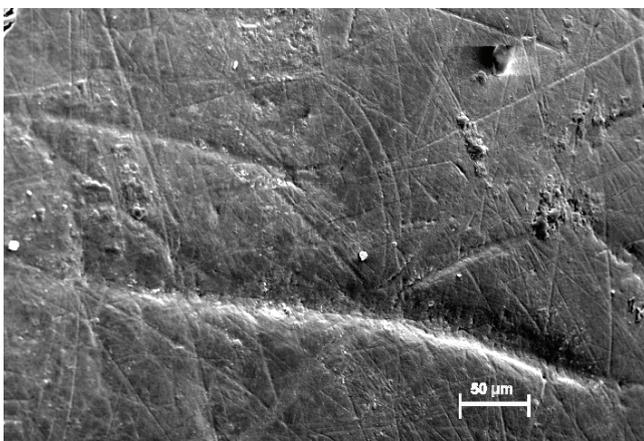
B Bittenbrunn Ind 13 (o6) Rinne



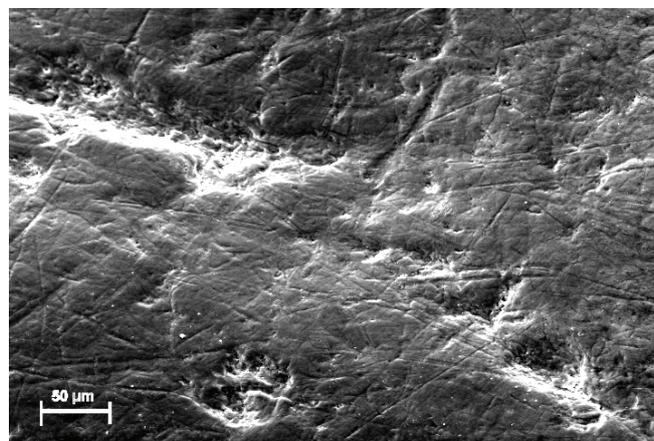
C Bittenbrunn Ind 62 (u6), walzenförmige Rinne



D Bittenbrunn Ind 7 (u6) tiefe, komplexe Kerbe



E Bittenbrunn Ind 37 (o6) lange Rinne



F Bittenbrunn Ind 17 (u6) walzenförmige Rinne, Gruben variabel



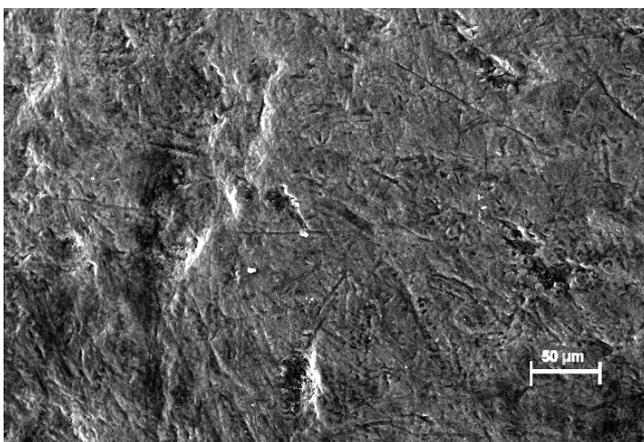
G Weichering Ind D (u5) tiefe Scharten



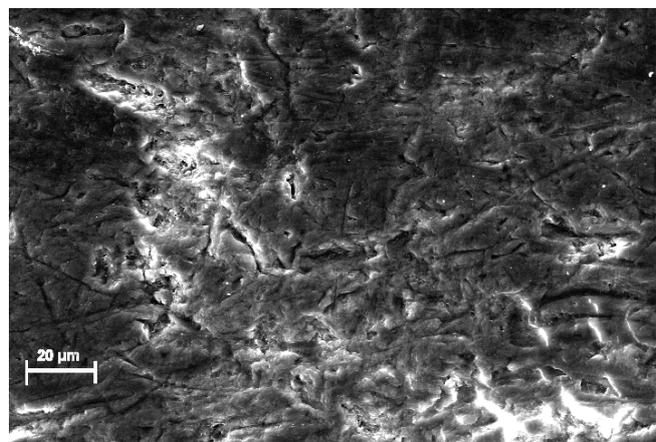
H Kaufertsberg (u6) lange Rinnen, teilweise gebogen

Abb. 92 A – H Kratzspuren mit besonderen Merkmalen

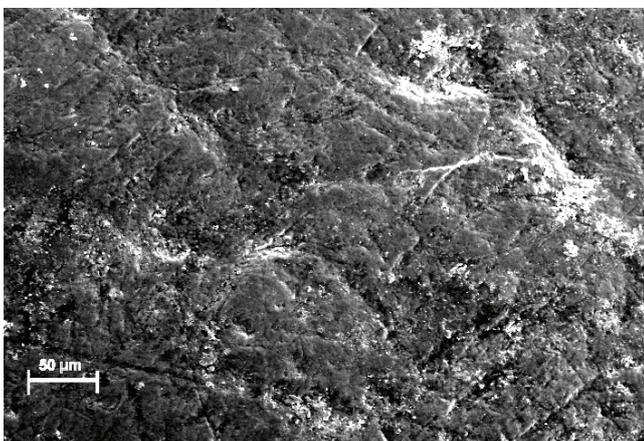
Manche Kratzspuren hinterließen eine besondere Musterung auf der Schmelzoberfläche. Aufgefunden wurden sternförmige Anordnungen kurzer Kratzspuren (Abb. 93 A), Schartenfelder (Abb. 93 B), parallel angeordnete Kratzspuren im rechten Winkel zur Kaurichtung, welche durch eine zentrale Leitbahn senkrecht durchbrochen war (Abb. 93 C, D). Einzelfälle wiesen überkreuzte Kratzspuren (Abb. 93 E), besondere Schartenformationen (Abb. 93 F) und parallele Strichmusterungen in ungeordneter (Abb. 93 G) und in geordneter Formation (Abb. 93 H) auf.



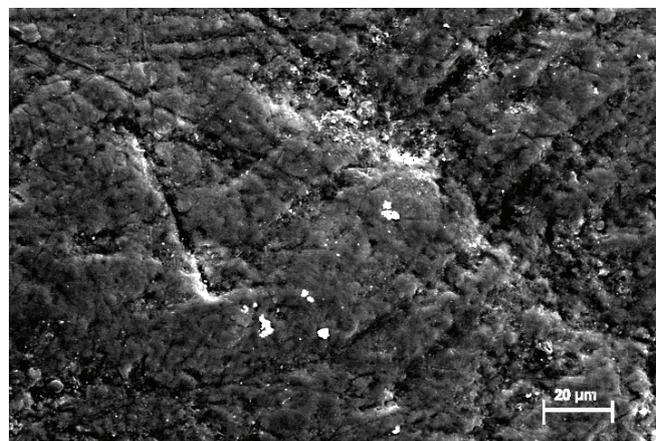
A Waging Ind 136 (u5) sternförmige Anordnung

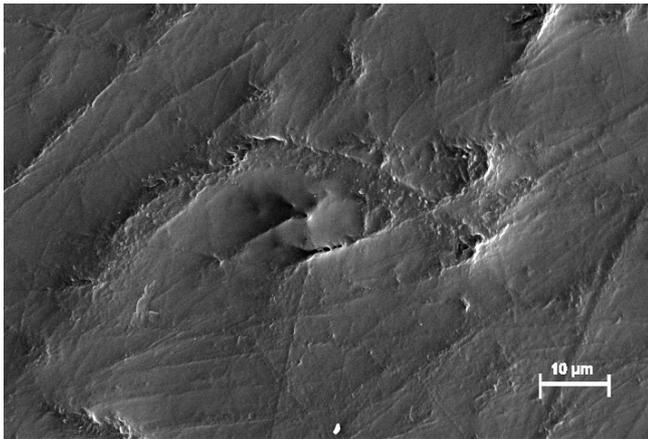


B Waging Ind 92 (u9) Schartenfeld

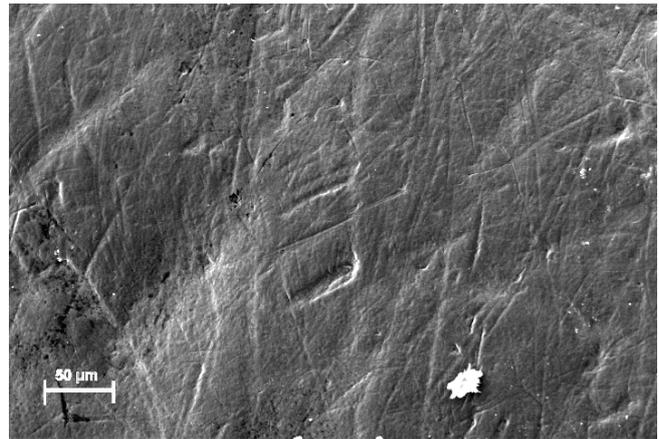


C und D Weichering Ind D (o9) regelmäßige Strichmusterung mit zentraler Senkrechten, mikrobieller Befall

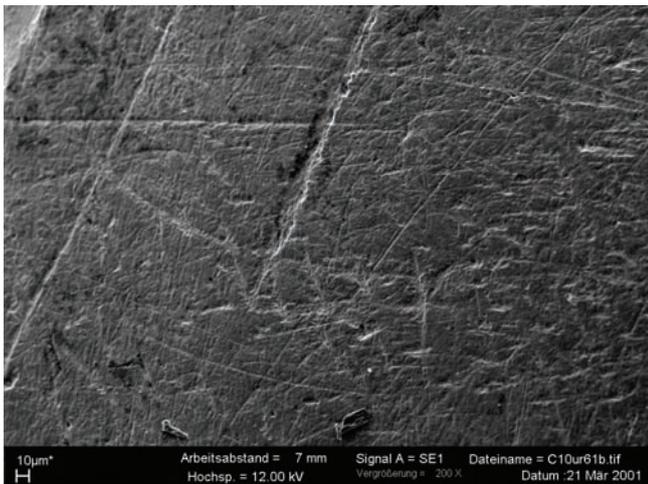




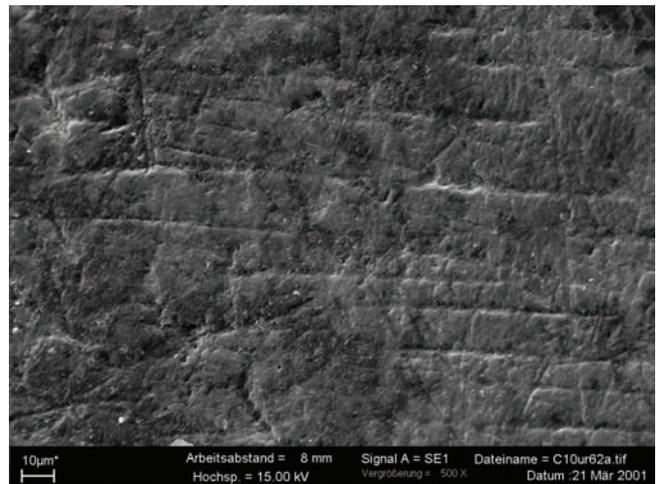
E Ofnet-Höhle Ind 11 (o9) 1000x Kreuzmuster



F Weichering Ind 2 (o6) unregelmäßige Zahnrad- oder Kammform



G Weichering Ind 10 (u6) Schartenfeld



H Weichering Ind 10 (u6) treppenförmige Streifung

Abb. 93 Besondere Musterbildung durch Kratzspuren

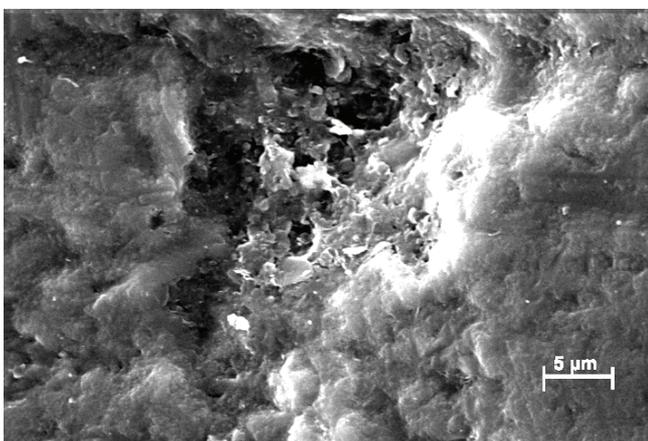
4.3.3 Microwear-Gruben („pits“)

Neben runden und einfach ovalen Gruben gab es eine Vielzahl von Formen, deren Längen- und Breitenverhältnis zur Kategorie der Gruben führte (Abb. 94 A – AF). Einige dieser besonderen Formen traten eher gehäuft auf, manche waren jeweils nur an einem einzelnen Individuum auf den untersuchten Facettenarealen nachweisbar. Zu den eher gehäuft auftretenden Gruben zählten dreieckförmige, glockenförmige und Gruben mit einem pfeilspitzenartigen Anfang oder Ende. Zur Wahrung der Übersicht sind die Formen als alphabetische Liste vorweg beschrieben. Die Beschreibungen sind mit den Bildunterschriften identisch.

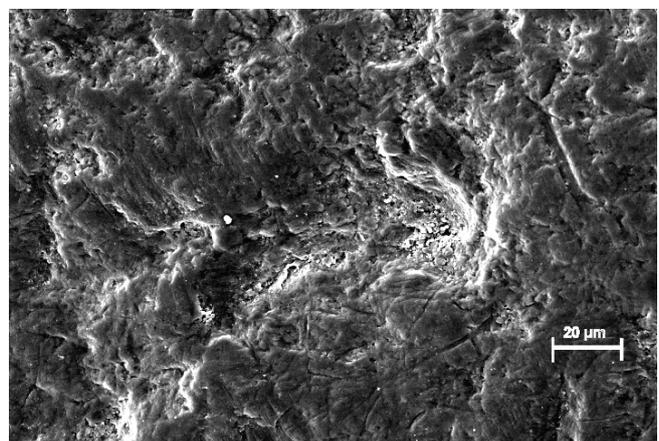
Die geringe Anzahl an besonderen Gruben in der Gesamtheit der als Gruben kategorisierten Merkmale ließ es nicht als sinnvoll erscheinen, eine Häufigkeitsverteilung der besonderen Grubenformen durchzuführen. Eine Beschreibung der besonderen Grubenformen war sinnvoll und aufschlussreich. Charakteristische Bildungen, auch wenn sie nur als Einzelfälle oder sehr selten auftraten, geben Positivhinweise auf bestimmte Eigenschaften der verursachenden Partikel. Der vorgelegte Formenkatalog, sowohl der Microwear-Gruben als auch der Auf- und Einlagerungen auf bzw. in den Zahnschmelz kann als vergleichender Katalog für weitergehende Studien historischer Zahnschmelzoberflächen dienen.

Abb. 94 A – AF REM-Aufnahmen: Besondere Grubenformen, Maßstab im jeweiligen Bild

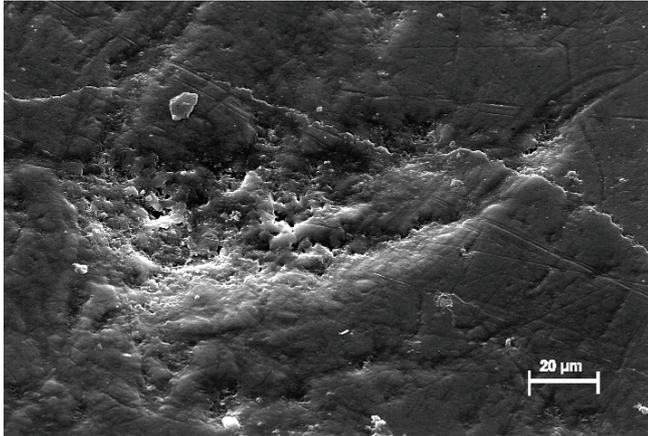
A	Waging Ind 104 (o9)	Grube dreiecksförmig
B	Waging Ind 141 (u5)	Grube bohnenförmig
C	Ofnet-Höhle Ind 4 (u6)	Grube glockenförmig
D	Bittenbrunn Ind 17 (u6)	Grube glockenförmig
E	Waging Ind 163 (u5)	Grube in Form einer „Ohrmuschel“
F	Waging Ind 52 (u)	Spitzgrube mit zentralem Loch
G	Waging Ind 92 (o9)	Grube in Form einer „Sichel“
H	Ofnet-Höhle Ind 18 (o6)	Grube in Form einer „Ohrmuschel“, mit turnover
I	Bittenbrunn Ind 34 (u9)	Grube mit scharkantiger Einlagerung
J	Bittenbrunn Ind 34 (u6)	Grube hufeisenförmig
K	Brombach Ind 7 (o9)	ovale Grube mit tiefem zentralen Einschnitt „Roggen- oder Haferform“, Mikrorissbildung
L	Ofnet-Höhle Ind 3 (o9)	Doppelgrube, vordere mit zentraler Kerbe
M	Weichering Ind 3 (u9)	Grube kreuzförmig „Windrad“
N	Weichering Ind 3 (u9)	wie M
O	Waging Ind 59 (u9)	Kerbe mit Einlagerung
P	Waging Ind 136 (o6)	Kerbe dreiflügelig
Q	Bittenbrunn Ind 17 (u5)	Kerbe sichelförmig
R	Bittenbrunn Ind 34 (o5)	Kerbe pfeilspitzenförmig
S	Waging Ind 92 (o6)	Würfel mit zentralem Schmelzerhalt
T	Ofnet-Höhle Ind 18 (o9)	Grube dreiecksförmig und Würfel mit zentraler Schmelzinsel
U	Bittenbrunn Ind 51 (o9)	Grube „amphorenförmiger“ Einschnitt
V	Weichering Ind 2 (o5)	Einprägung „pinselförmig“
W	Ofnet-Höhle Ind 8 (o5)	Einprägung „schmetterlingsförmig“
X	Weichering Ind 2 (u6)	Eindellung wie die Schale eines Schneckenhauses
Y	Bittenbrunn Ind 62 (u9)	rechter Rand; Imprägnation „pfeilschwanzkrebsförmig“
Z	Bittenbrunn Ind 62 (o5)	„Nester aus Gruben“
AA	Weichering Ind 5 (u9)	halbmondförmig angeordnete Doppelkerbe Pfeil mit Materialaufschiebung in einer senkrecht dazu hinführenden Kerbe
AB	Brombach Ind 35 (u5)	pfeilspitzenförmige Grube am Ende einer walzenförmigen Rinne
AC	Waging Ind 35 (o6)	spitz aufeinander zulaufende Kratzspurschenkel
AD	Weichering Ind 5 (u6)	wie AC
AE	Kaufertsberg (u9)	Kratzspur mit pfeilspitzenförmiger Grube
AF	Kaufertsberg (u5)	gezackte und dreiecksförmige Eindellung



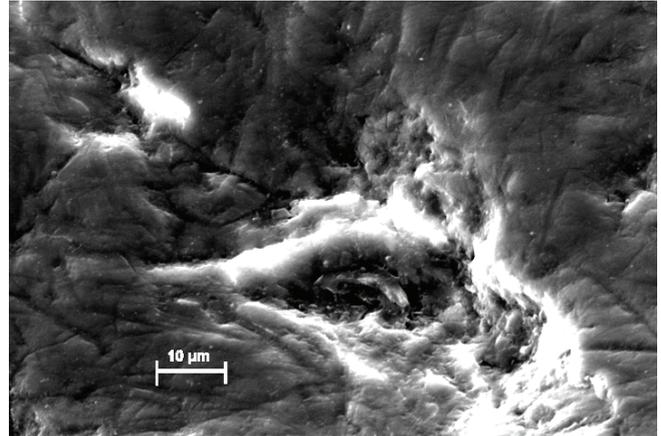
A Waging Ind 104 (o9) Grube dreiecksförmig



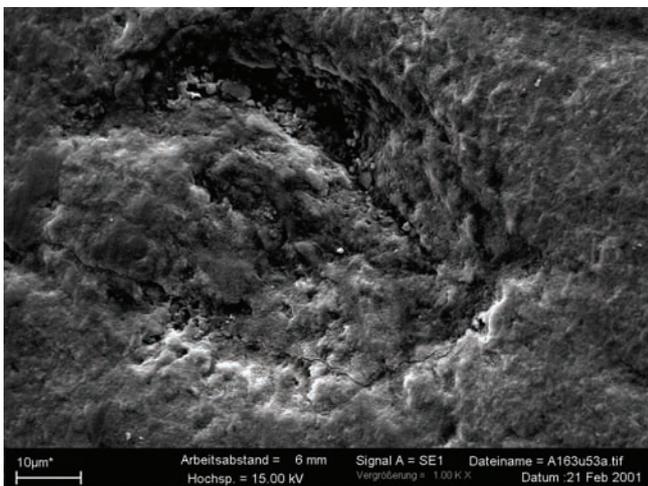
B Waging Ind 141 (u5) Grube bohnenförmig



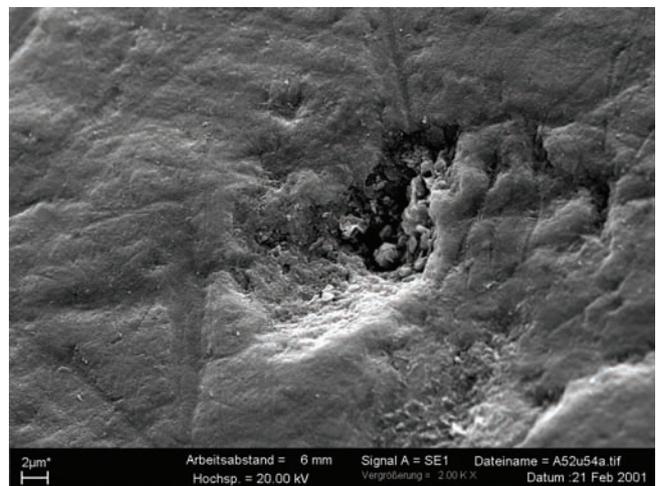
C Ofnet-Höhle Ind 4 (u6) Grube glockenförmig



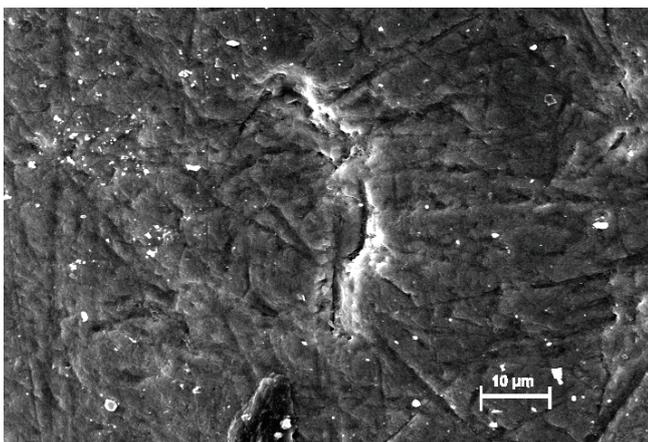
D Bittenbrunn Ind 17 (u6) Grube glockenförmig



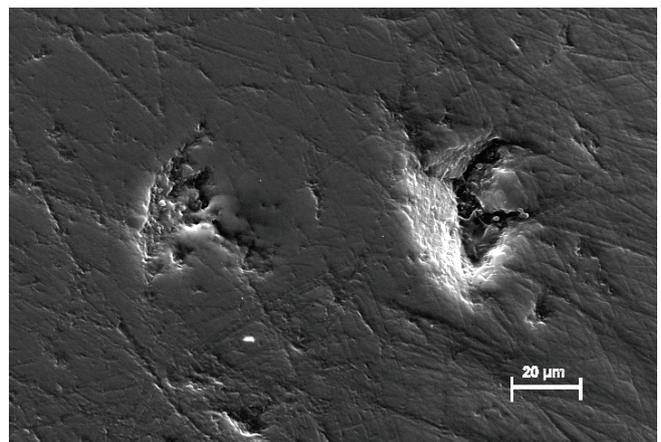
E Waging Ind 163 (u5) Grube in Form einer "Ohrmuschel"



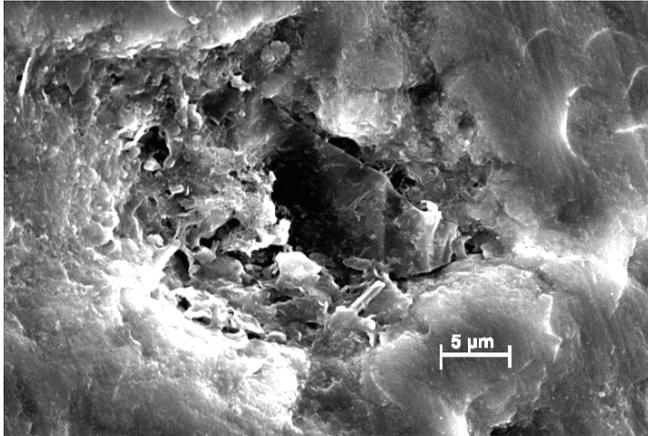
F Waging Ind 52 (u) Spitzgrube mit zentralem Loch



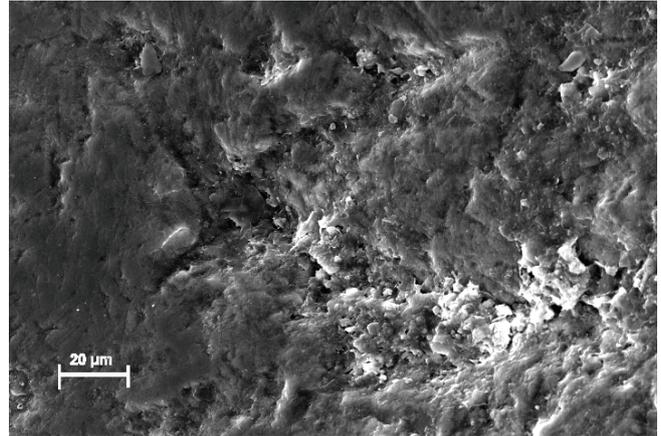
G Waging Ind 92 (o9) Grube in Form einer "Sichel"



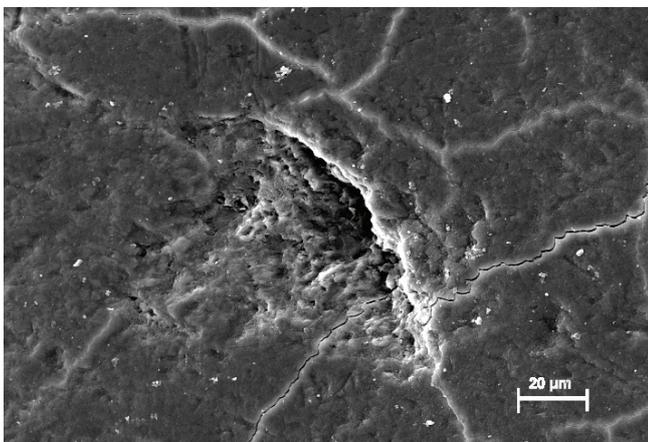
H Ofnet-Höhle Ind 18 (o6) Grube in Form einer „Ohrmuschel“, mit turnover



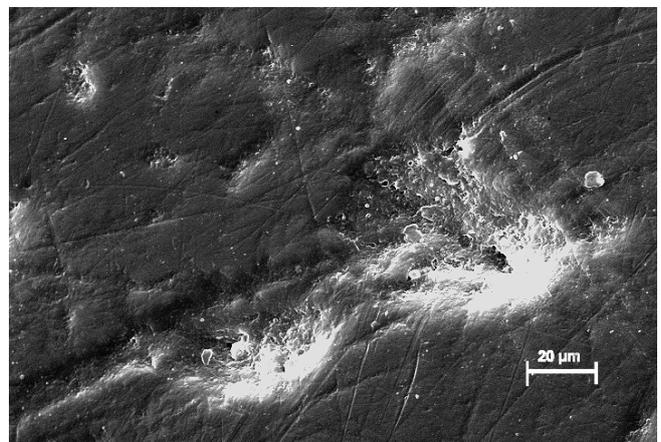
I Bittenbrunn Ind 34 (u9) Grube mit scharkantiger Einlagerung



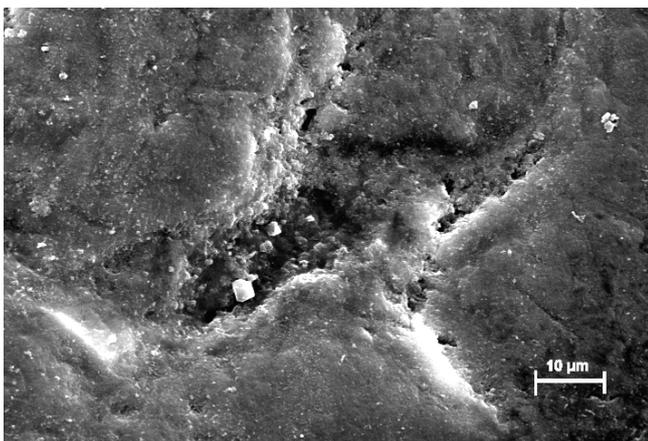
J Bittenbrunn Ind 34 (u6) Grube hufeisenförmig



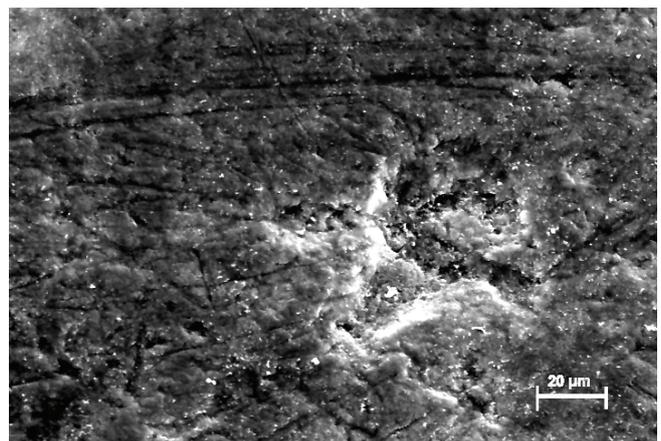
K Brombach Ind 7 (o9) ovale Grube mit tiefem zentralen Einschnitt „Roggen- oder Haferform“, Mikrorissbildung



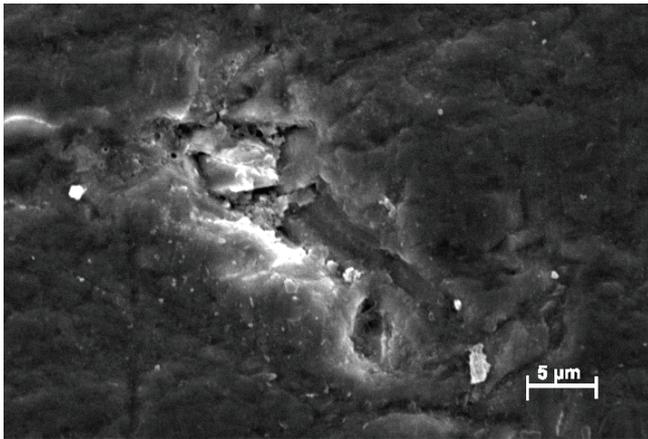
L Ofnet-Höhle Ind 3 (o9) Doppelgrube, vordere mit zentraler Kerbe



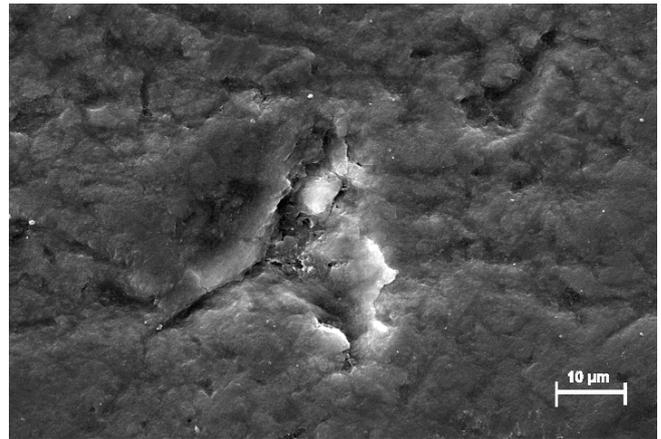
M Weichering Ind 3 (u9) Grube kreuzförmig „Windrad“



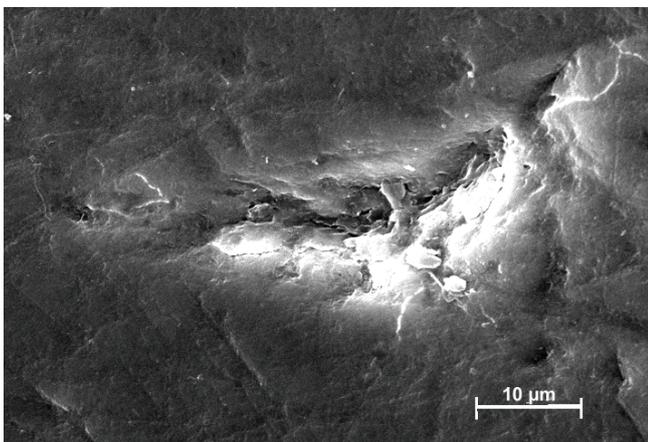
N wie M Weichering Ind 3 (u9)



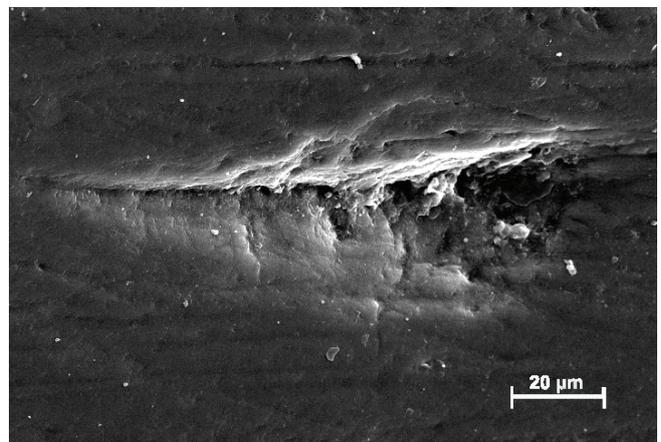
O Waging Ind 59 (u9) Kerbe mit Einlagerung



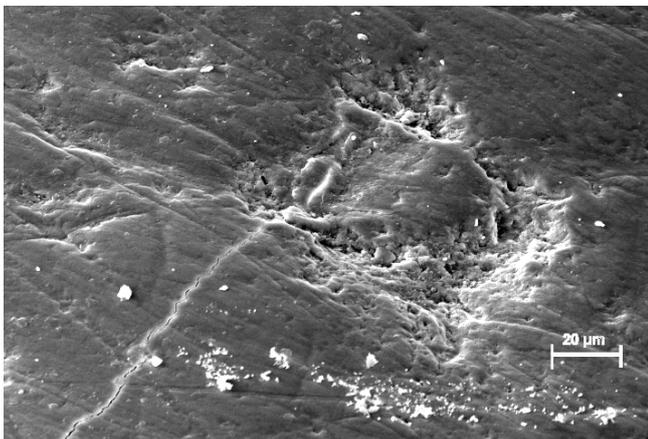
P Waging Ind 136 (o6) Kerbe dreiflügelig



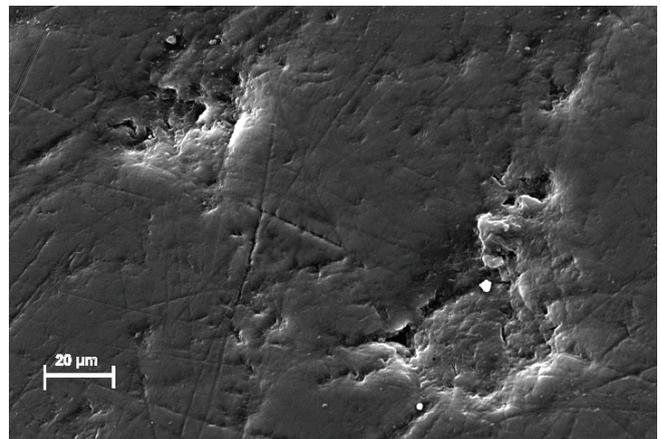
Q Bittenbrunn Ind 17 (u5) Kerbe sichelförmig



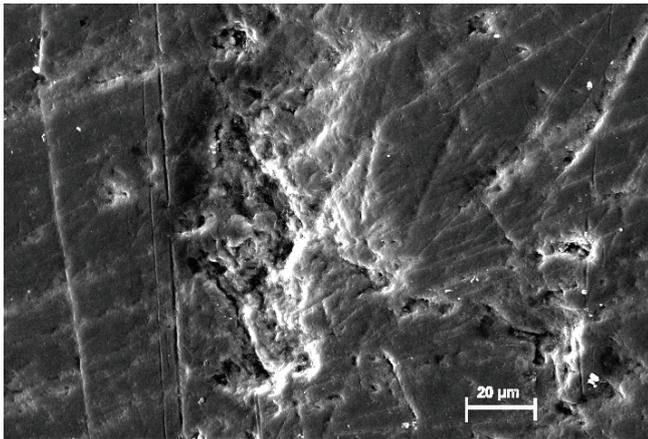
R Bittenbrunn Ind 34 (o5) Kerbe pfeilspitzenförmig



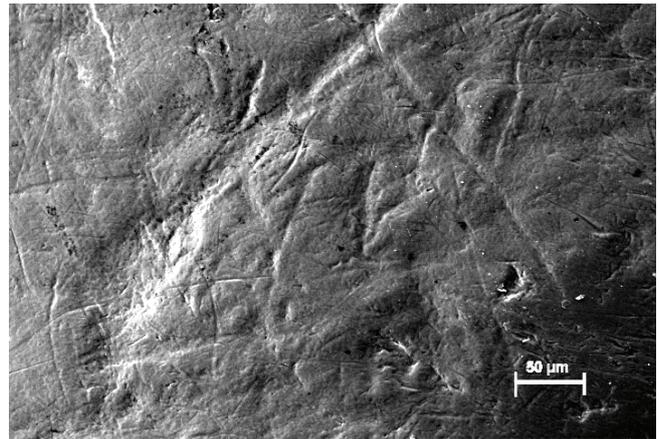
S Waging Ind 92 (o6) Würfel mit zentralem Schmelzerhalt



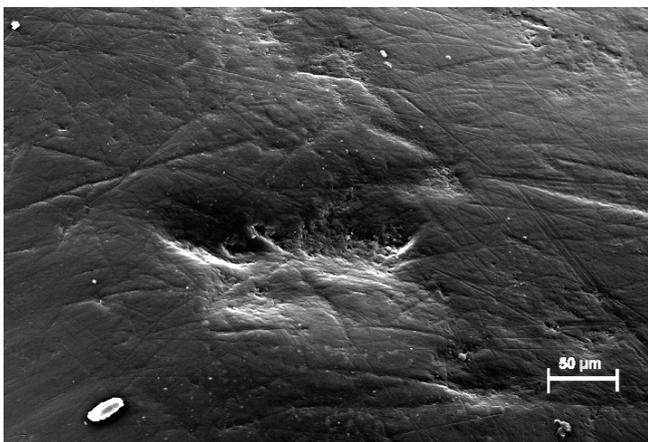
T Ofnet-Höhle Ind 18 (o9) Grube dreiecksförmig und Würfel mit zentraler Schmelzinsel



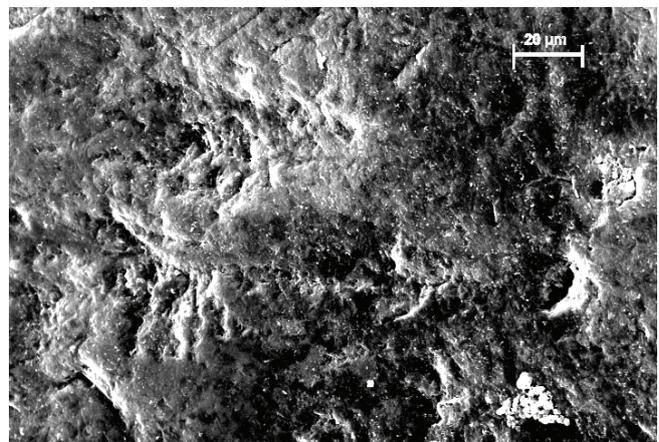
U Bittenbrunn Ind 51 (o9) Grube „amphorenförmiger“ Einschnitt



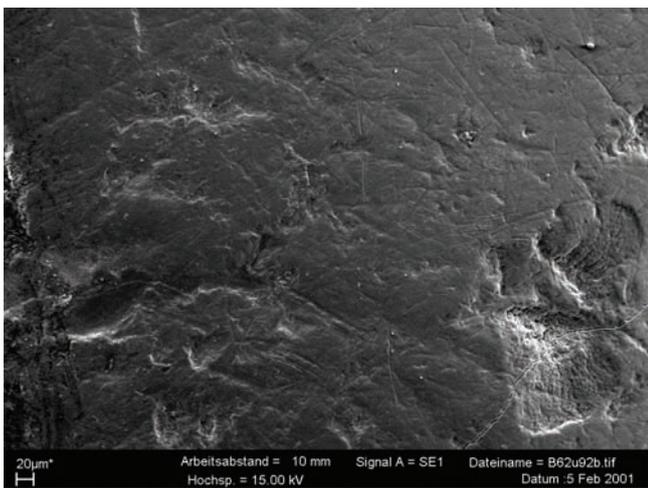
V Weichering Ind 2 (o5) Einprägung „pinselförmig“



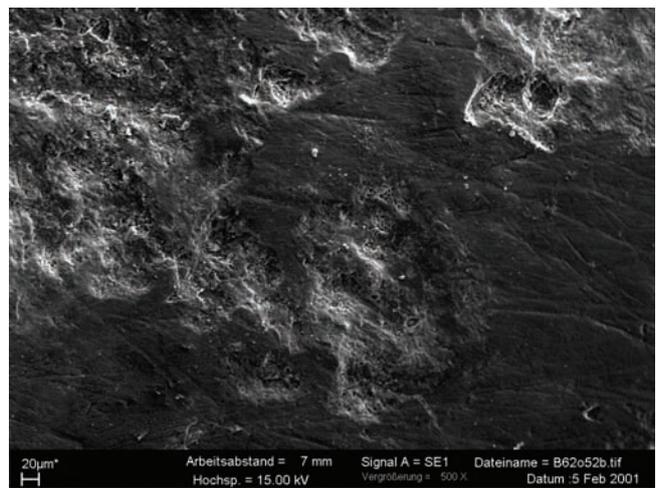
W Ofnet-Höhle Ind 8 (o5) Einprägung „schmetterlingsförmig“



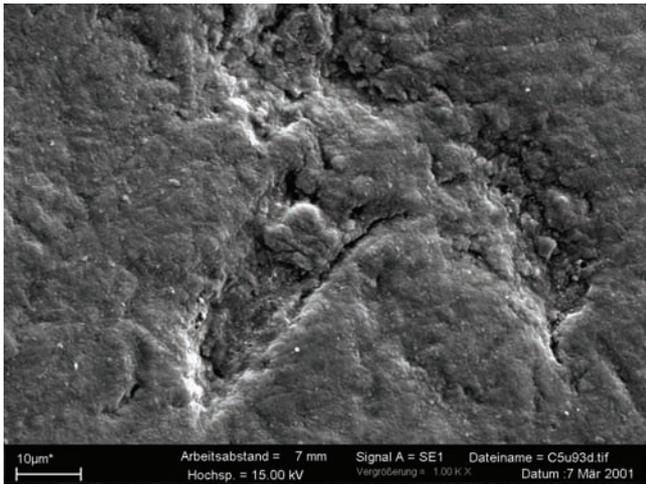
X Weichering Ind 2 (u6) Eindellung wie die Schale eines Schneckenhauses



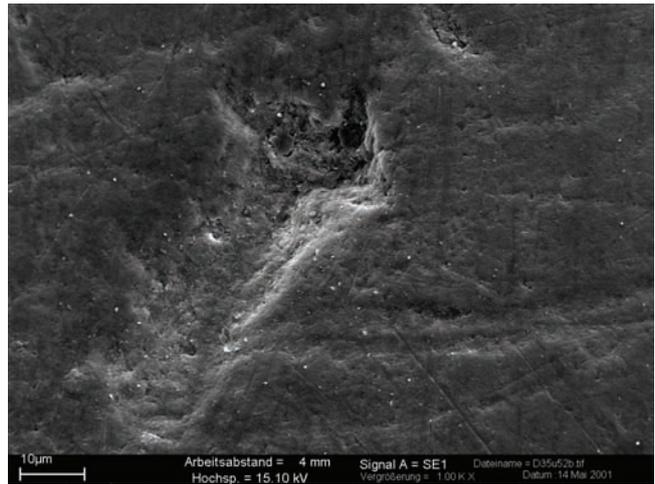
Y Bittenbrunn Ind 62 (u9) rechter Rand; Imprägnation „pfeilschwanzkrebsförmig“



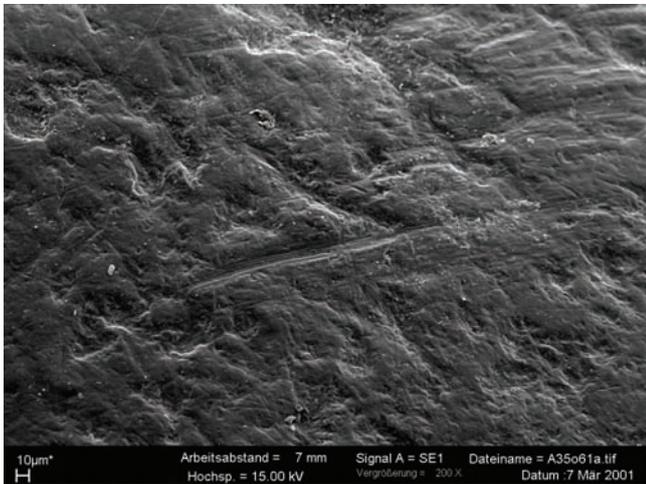
Z Bittenbrunn Ind 62 (o5) „Nester aus Gruben“



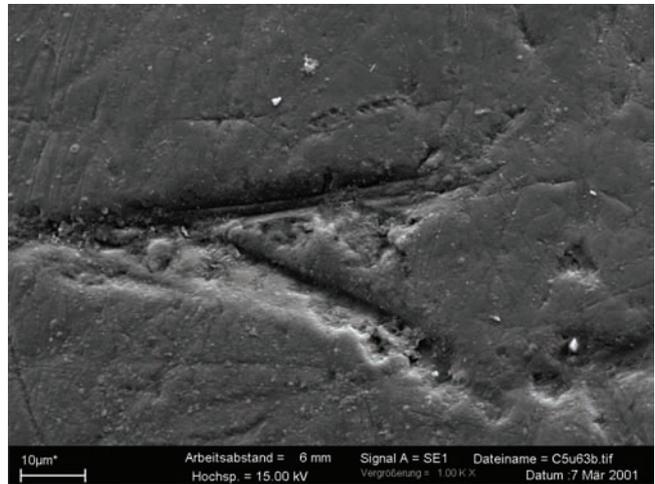
AA Weichering Ind 5 (u9) halbmondförmig angeordnete Doppelkerbe Pfeil mit Materialaufschubung in einer senkrecht dazu hinführenden Kerbe



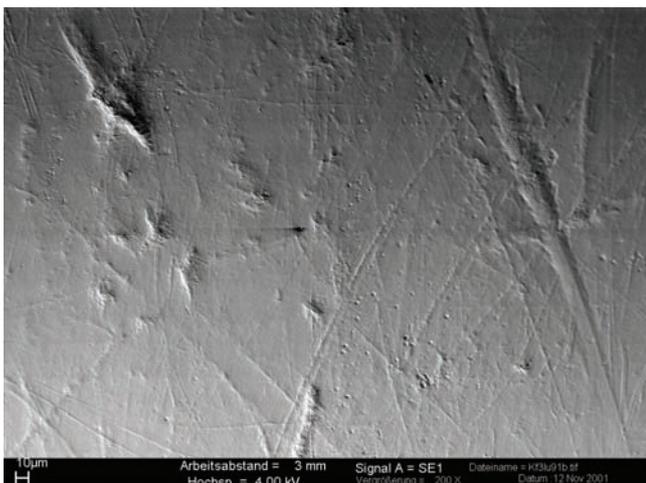
AB Brombach Ind 35 (u5) pfeilspitzenförmige Grube am Ende einer walzenförmigen Rinne



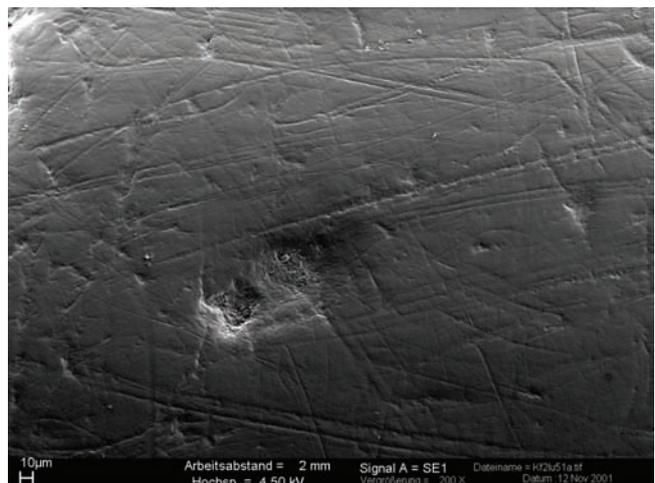
AC Waging Ind 35 (o6) spitz aufeinander zulaufende Kratzspurschenkel



AD Weichering Ind 5 (u6) wie AC



AE Kaufertsberg (u9) Kratzspur mit pfeilspitzenförmiger Grube



AF Kaufertsberg (u5) gezackte und dreiecksförmige Eindellung

Abb. 94 A – AF REM-Aufnahmen: Besondere Grubenformen, Maßstab im jeweiligen Bild

4.3.4 Besondere Musterbildungen

Nicht nur auffallende Einzelmerkmale charakterisierten historische Zahnschmelzoberflächen, sondern auch die Komposition der Merkmale auf eng umschriebenen Schmelzarealen. Nicht selten traten mehrere Merkmale in Gemeinschaft auf (Abb. 95).

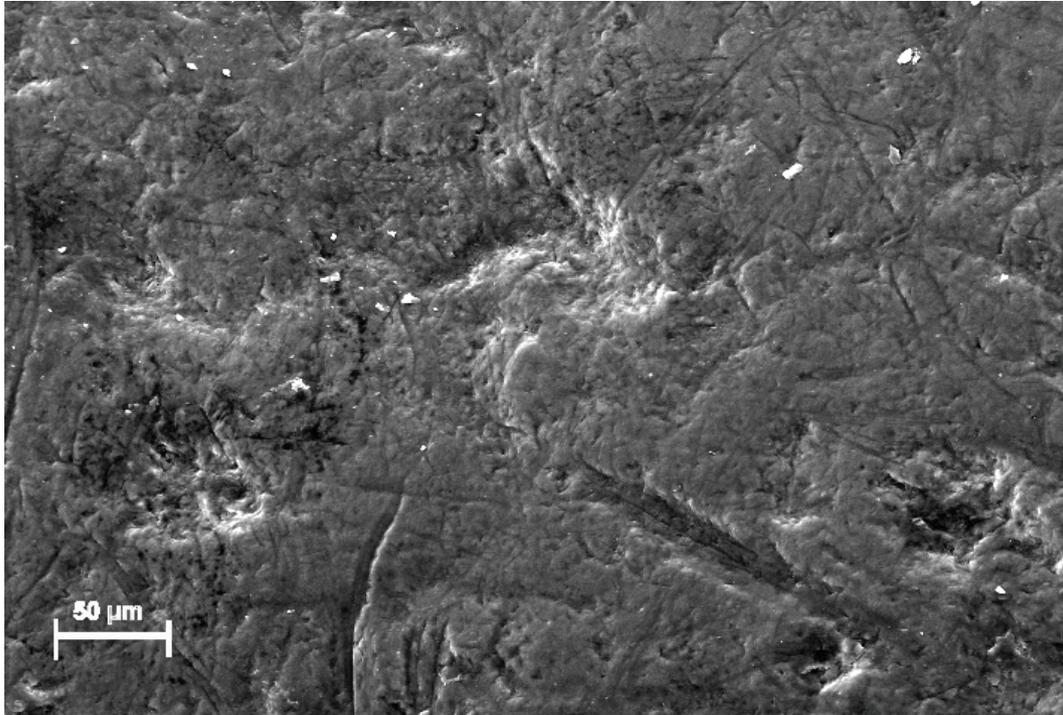
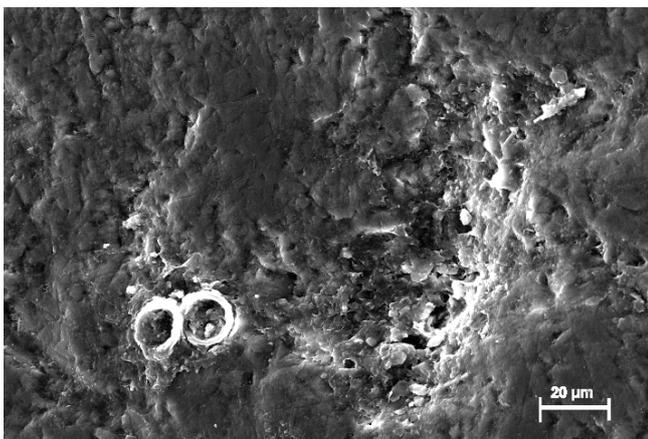
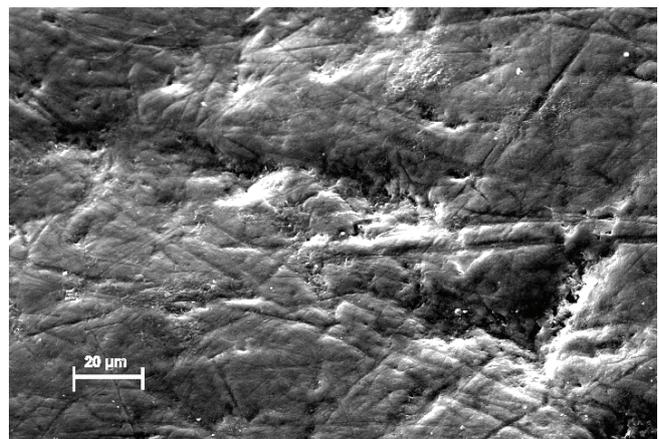


Abb. 95 Waging Ind 136 (o9) komplexes Microwearmuster mit Kerbe, Grube, halbmondförmige Kerbe, gebogene Kratzspur, breite Kratzspur, zwei kleine Gruben

Besonders auffallende Formationen, wie die ringförmige Umlagerung von Schmelzarealen (Abb. 96 A) oder eine treppenförmige Anordnung von Gruben (Abb. 96 B) stellten Einzelfälle dar.



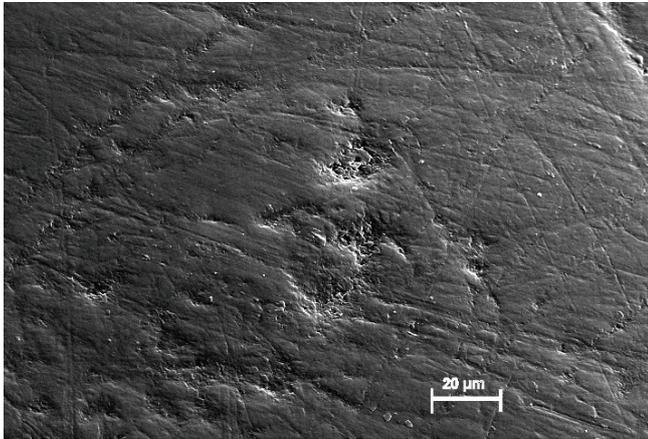
A Bittenbrunn Ind 34 (u6) ringförmige Auflagerung neben einer ovalen Grube (Actinomyceten?)



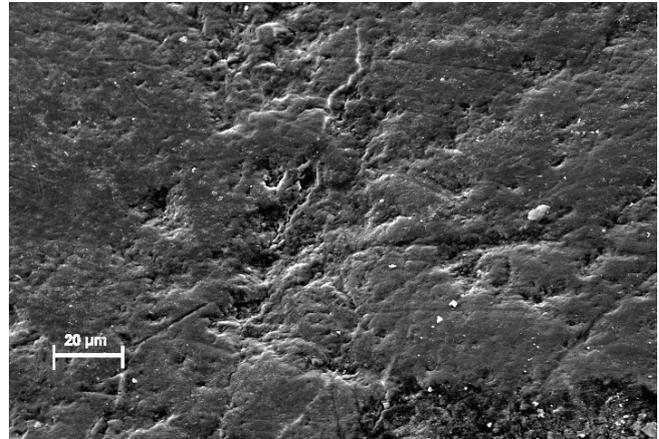
B Bittenbrunn Ind 17 (u6) treppenförmige Grubenanordnung

Abb. 96 Einzelbeispiele mit besonders charakteristischen Merkmalen

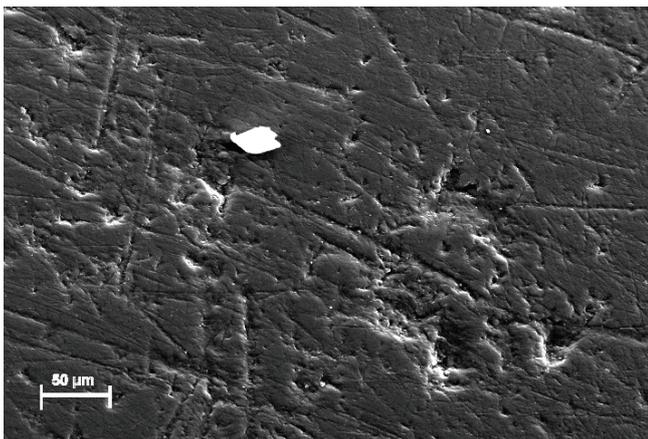
Gruben konnten vereinzelt (Abb. 94 A - AF), in geordneter und ungeordneter Reihenfolge (Abb. 97 A, B), in Gemeinschaft mit besonderen Kratzspuranordnungen (Abb. 97 C) und an exponierten Stellen wie Höckerspitzen oder Kronenkanten (Abb. 97 D) auftreten.



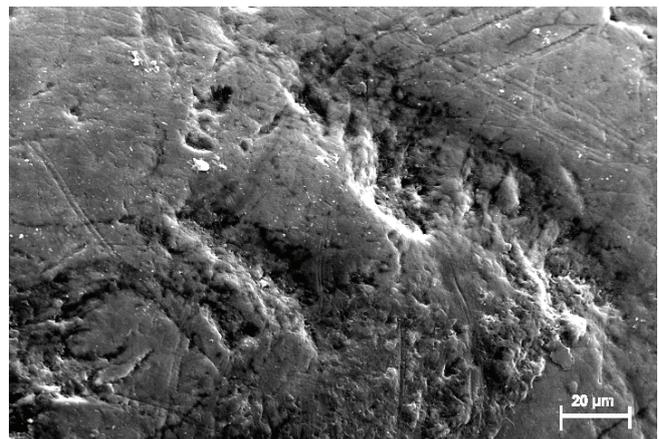
A Ofnet-Höhle Ind 4 (o5) fünf Gruben in bogenförmig angeordneter Folge



B Bittenbrunn Ind 5 (u5) Gruben bogenförmig angeordnet



C Ofnet-Höhle Ind 18 (o6) halbkreisförmig angeordnetes Grubenfeld neben geordnetem Muster mittellanger parallel verlaufender Kratzspuren



D Brombach Ind 16a (u9) großflächige Grubeneindellungen an einem Grad des Kronenreliefs

Abb. 97 Beispiele für Grubenfelder in unterschiedlicher Ausprägung

Manchmal traten besonders komplexe Grubenformationen auf (Abb. 98, 99), welche untereinander in direktem Zusammenhang stehen konnten d.h. zu einem Bildungsereignis gehören konnten. Meist zeigten sie mehrere Ebenen der Eintiefung (Abb. 98, 99). Dieses Merkmal spräche zwar weder für noch gegen einen gemeinsamen Entstehungszeitpunkt, es ist allerdings ein Hinweis dafür, dass asymmetrische Kräfte oder anders geformte Partikel auf die Oberfläche eingewirkt hatten.

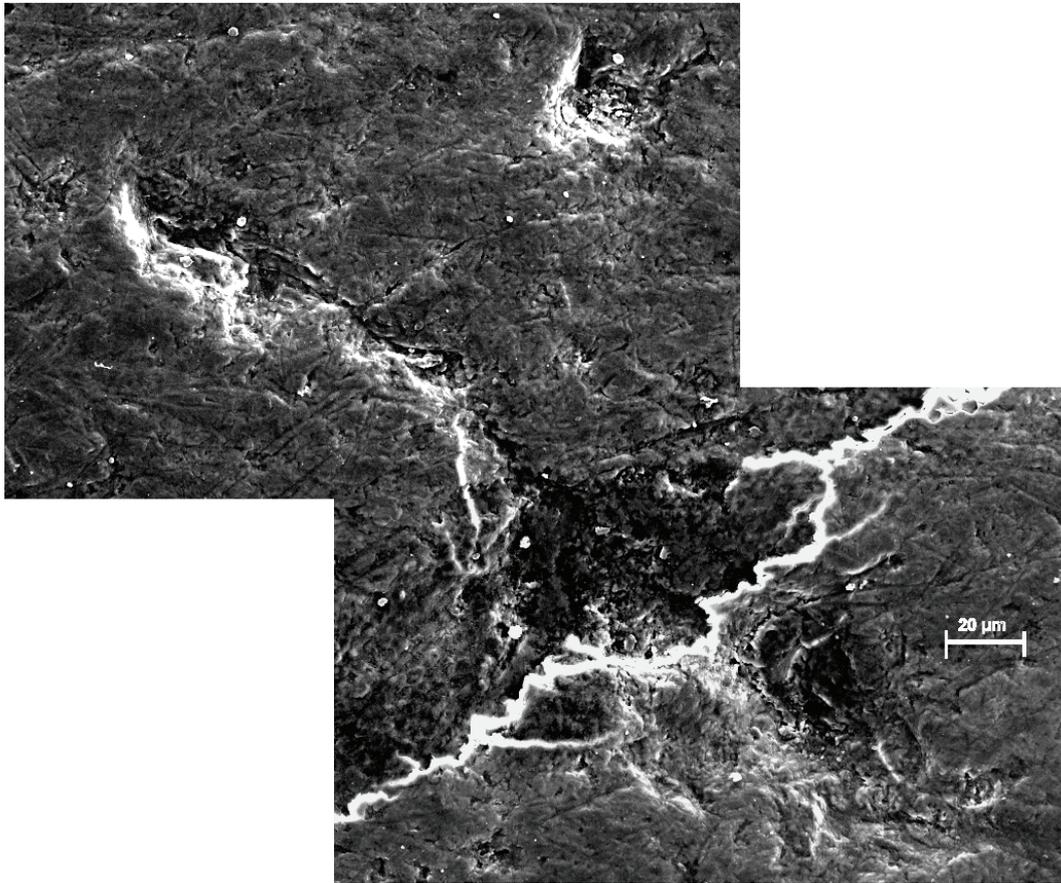


Abb. 98 Waging Ind 5 (o9) komplexe Grubenformation mit deutlicher Mikrorissbildung in Höhe der tieferen großen Grube, Ausdehnung in mehrere hintereinandergeschaltete oberflächlichere Microwear-Gruben; verschiedene Ebenen der Eintiefung weisen auf unterschiedlich stark ausgeübte Kräfte hin.

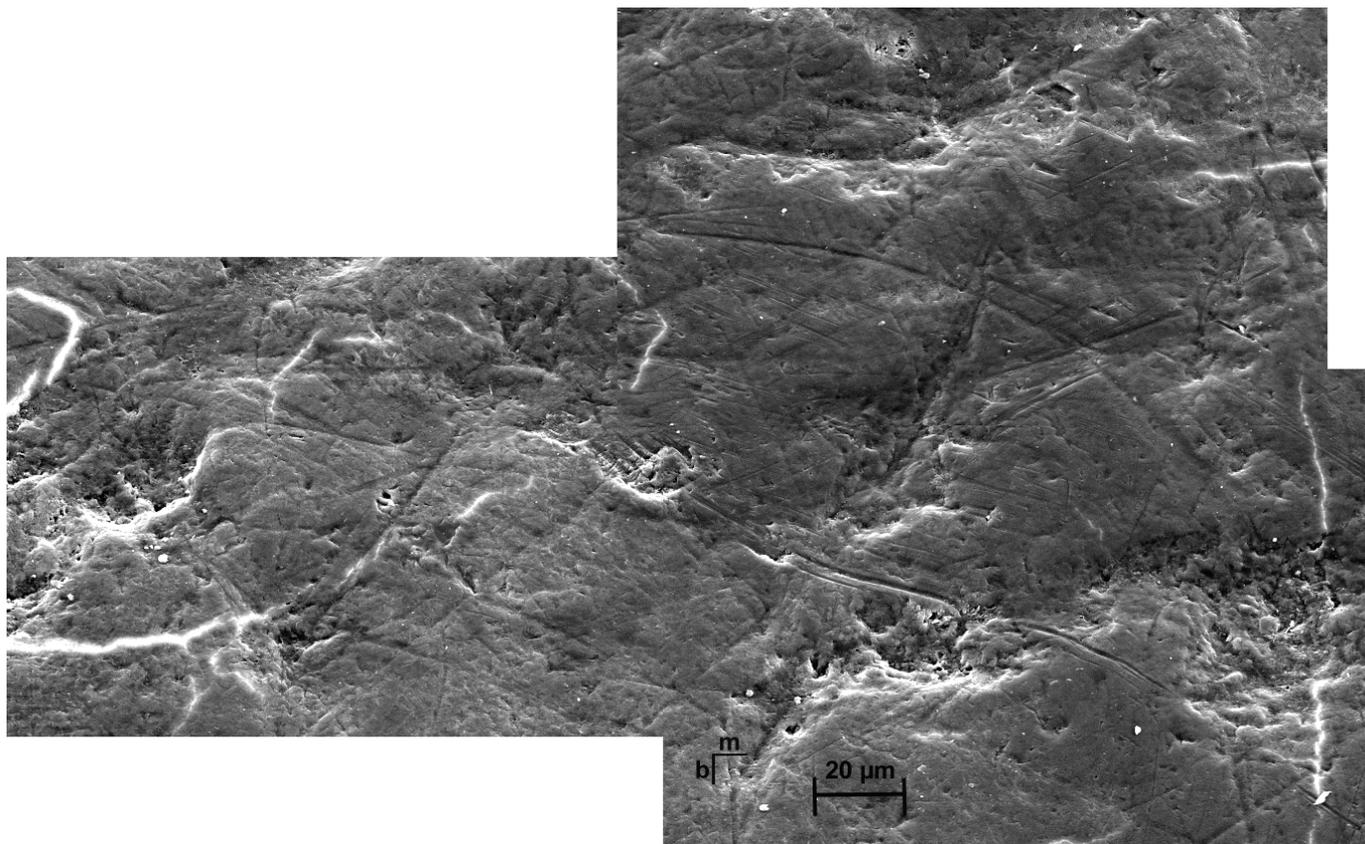


Abb. 99 Panorama Weichering Ind 17 (o5) komplexes Gruben- und Kratzspurmuster

4.3.5 Ein- und Auflagerungen auf Zahnschmelz

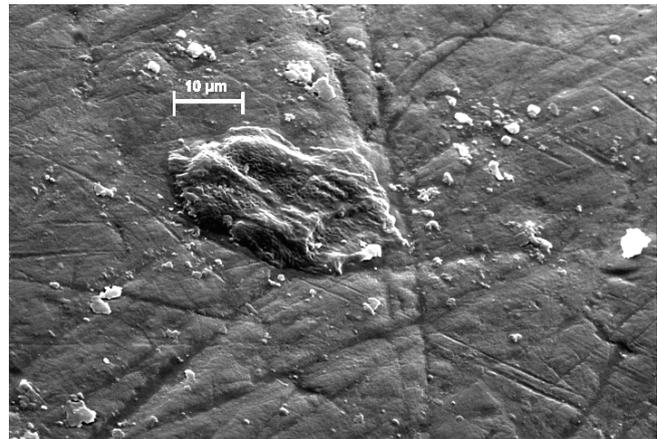
Eine Vielfalt an rund bis faserig geformten Auflagerungen, Schmelzfragmenten, Mikropartikeln und Phytolithe waren auf den historischen Schmelzoberflächen auffindbar. Die gezeigten Besonderheiten (Abb. 100 A – W) stellen das diagnostizierte Repertoire an konservierten Formen dar. Nicht charakterisierbare, amorphe Partikel in unterschiedlicher Präsenz und Größe konnten auf allen Oberflächen nachgewiesen werden (B, O, P). Vereinzelt konnten Keime der Mundflora z.B. *Actinomyces* (I) als fadenförmige Gebilde, welche prismatische Strukturen umlagerten, nachgewiesen werden. Diagnostisch von Bedeutung sind jedoch nur Partikel, welche entweder im Schmelz konserviert waren (C, D, E, F, J, V, W), in naher Verbindung mit einem charakteristischen Microwear-Merkmal standen (E, F, G, H, S, T, V, W) oder eine relativ gute Einordnung in eine Partikelkategorie (A, D, E, F, I, J, K, L, N, Q, R, S, T, U, V, W) zuließen. Eine Häufung definierter Partikel war bei keinem der untersuchten Individuum nachweisbar. Nahezu auf allen Zahnoberflächen der frühmittelalterlichen Individuen, aber auch vereinzelt auf den Oberflächen der endneolithischen und mesolithischen Individuen waren Partikel nachweisbar, bei welchen es sich vermutlich um Phytolithe aus Getreide handelte (A, E, F, J, K, L, N, Q, R, V, W). Solche amorphen Silikatstrukturen, welche als harte Spelzverunreinigungen beim Verzehr von Getreide unbemerkt aufgenommen und mitgekaut werden, gruben sich teilweise tief (E, F), teilweise aber auch nur oberflächlich (J, K, L, Q, R, V, W) in den Schmelz ein. Partikel, in deren nächster Nähe ein Negativabdruck auf dem Zahnschmelz auffindbar waren (T) stellten eine Rarität dar (Gügel et al. 1998).

Abb. 100 A – W Besondere Ein- und Auflagerungen auf historischem Zahnschmelz

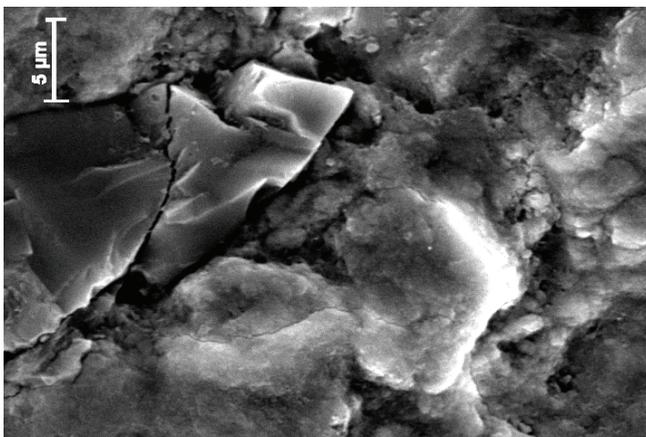
A	Waging Ind 35 (o5)	faserförmige und papillenförmige Auflagerungen
B	Waging Ind 141 (o6)	flache runde Auflagerung umgeben von Mikropartikeln
C	Waging Ind 5 (o6)	scharfkantige spitze Einlagerung
D	Waging Ind 92 (u9)	Mikropartikel am Ende einer Kratzspur
E und F	Bittenbrunn Ind 13 (o5)	ovale Grube mit Einlagerung zahlreicher stabförmiger Elemente (Stabphytolithe?)
G und H	Bittenbrunn Ind 17 (o9)	Grubeneindellung mit Schmelzfragmentauflagerung? oder verschiebung
I und J	Bittenbrunn Ind 34 (u6)	Doppelringförmige Schmelzprismenumlagerung(links), Stabphytolith (rechts)
K und L	Bittenbrunn Ind 17 (o9)	Ansammlung von papillenförmigen Phytolithen in Kettenformation; Mikropartikel unterschiedlicher Größe
M	Brombach Ind 35 (u9)	scharfkantige Auflagerung
N	Brombach Ind 5 (o6)	papillenförmige Auflagerung
O und P	Brombach Ind 36 (u6)	blattförmige, röntgendichte, flach-ovale Auflagerungen, mit plastisch veränderbarer Komponente
Q und R	Brombach Ind 35 (u9)	papillenförmige Phytolithe zum Teil oberflächlich in den Schmelz versenkt
S	Brombach Ind 7 (o6)	flacher, scharfkantiger Partikel entlang einer Kratzspur
T	Brombach 9 (o6)	Mikropartikel (links) mit negativem Formabdruck (rechts)
U	Weichering Ind 10 (u5)	Mikropartikel in Form von Mikroabschlagsartefakten (pfeilspitzenförmig)
V	Weichering Ind 2 (o6)	dreieckförmige Papille in einer offenbar passenden Grube versenkt, freigelegte Schmelzprismen sichtbar
W	Ofnet-Höhle Ind 21 (o6)	Papille kopfüber in Kratzspur versenkt



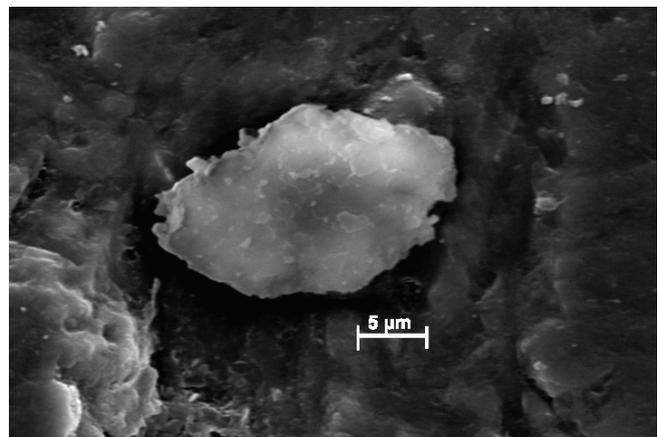
A Waging Ind 35 (o5) faserförmige (links)- und papillenförmige (rechts) Auflagerungen



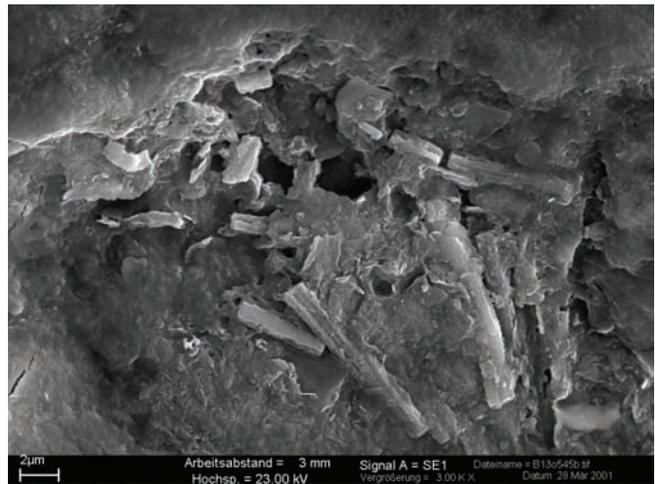
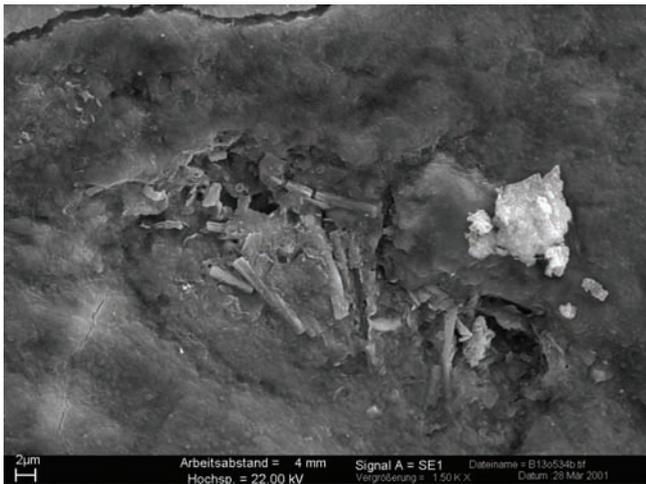
B Waging Ind 141 (o6) flache runde Auflagerung umgeben von Mikropartikeln



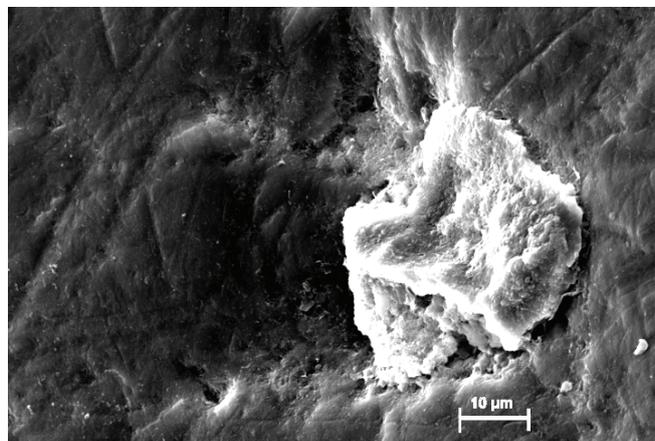
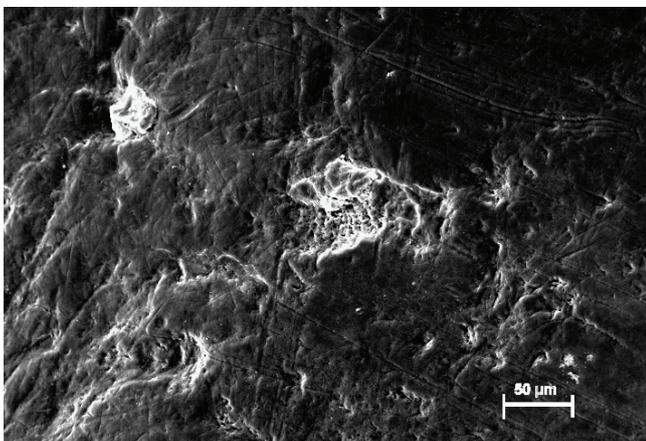
C Waging Ind 5 (o6) scharfkantige spitze Einlagerung



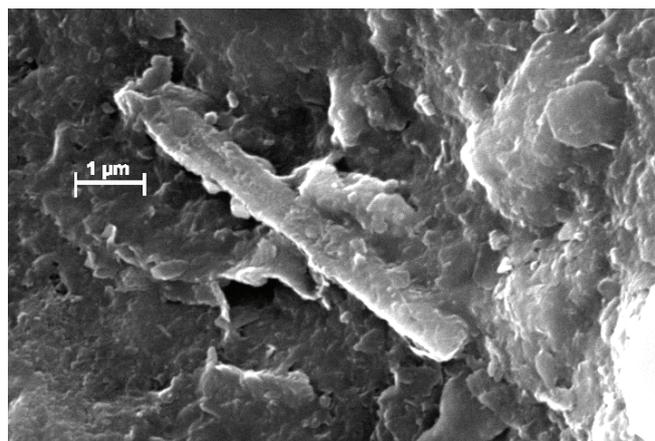
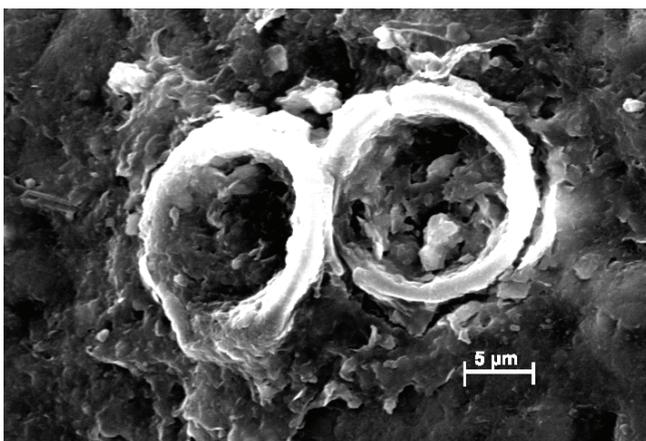
D Waging Ind 92 (u9) Mikropartikel am Ende einer Kratzspur



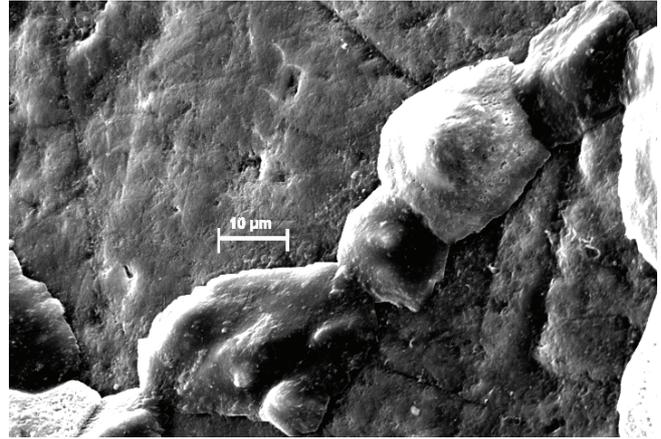
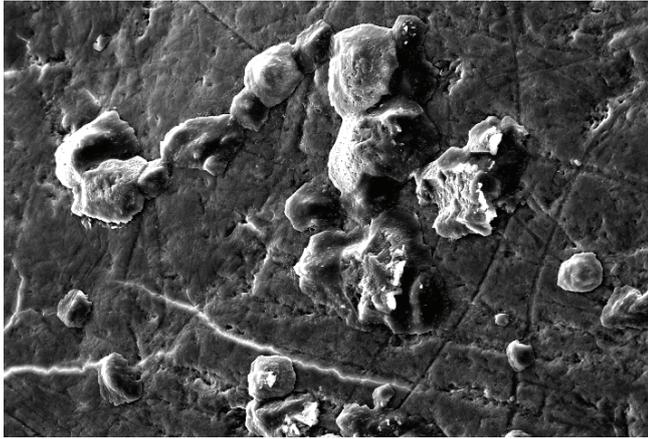
E und F Bittenbrunn Ind 13 (o5) ovale Grube mit Einlagerung zahlreicher stabförmiger Elemente (Stabphytolithe)



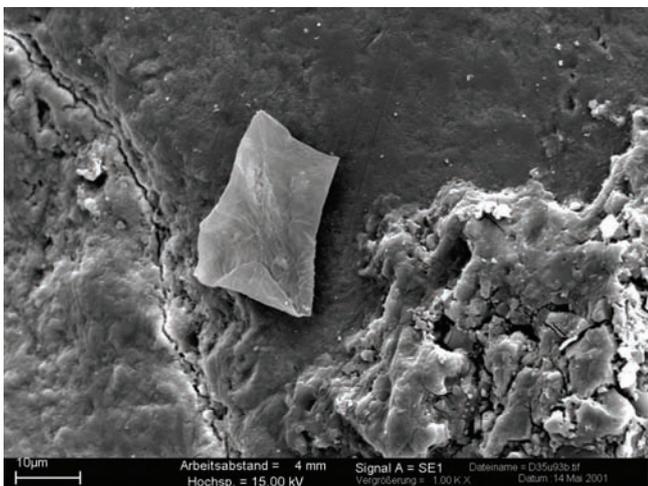
G und H Bittenbrunn Ind 17 (o9) Grubeneindellung mit Schmelzfragmentaflagerung oder -verschiebung



I und J Bittenbrunn Ind 34 (u6) Doppelringförmige Schmelzprismenumlagerung, vermutlich fadenförmige Actinomyceten (links), Stabphytolith (rechts)



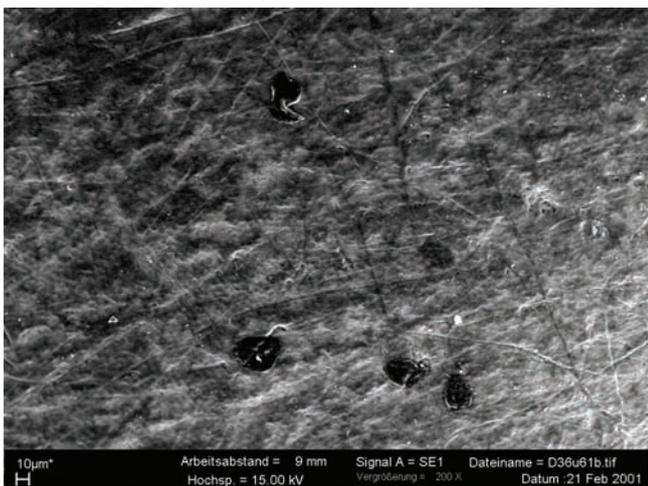
K und L Bittenbrunn Ind 17 (o9) Ansammlung von papillenförmigen Phytolithen in Kettenformation; Mikropartikel unterschiedlicher Größe



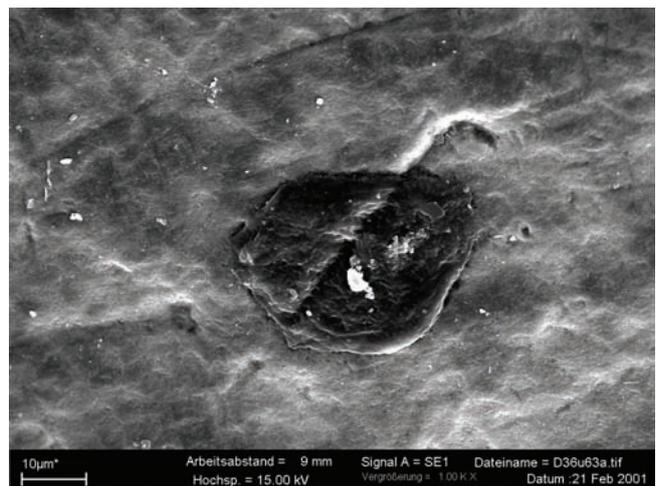
M Brombach Ind 35 (u9) scharfkantige Auflagerung

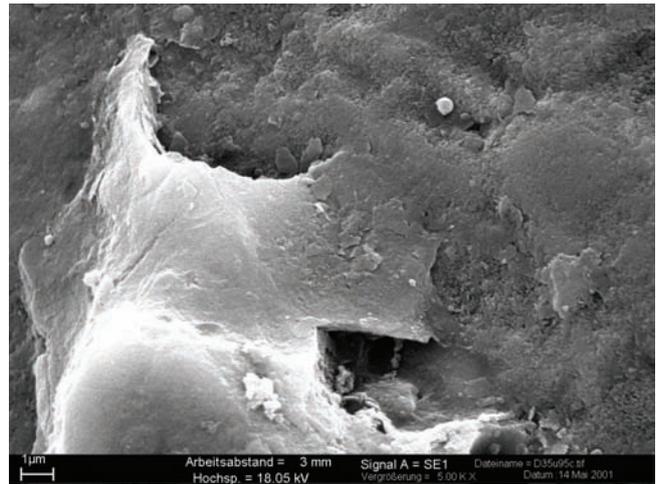
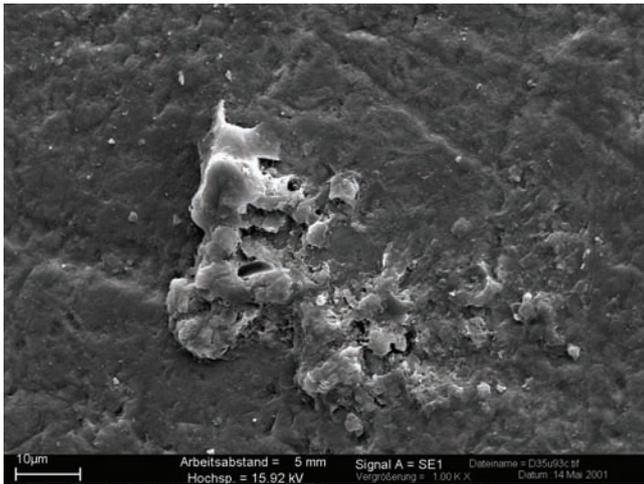


N Brombach Ind 5 (o6) papillenförmige Auflagerung

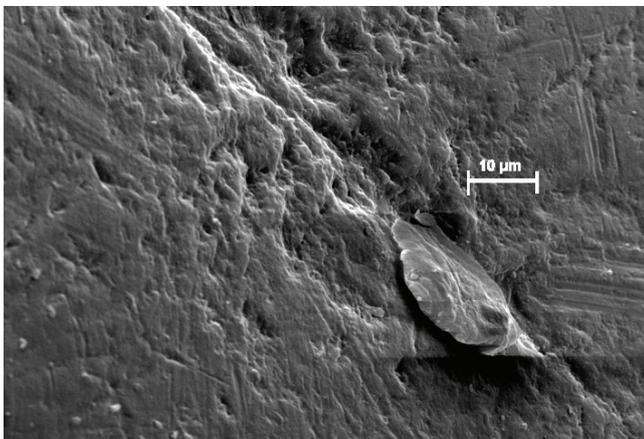


O und P Brombach Ind 36 (u6) blattförmige, intensitätsarme, flach-ovale Auflagerungen, mit plastisch veränderbarer Komponente

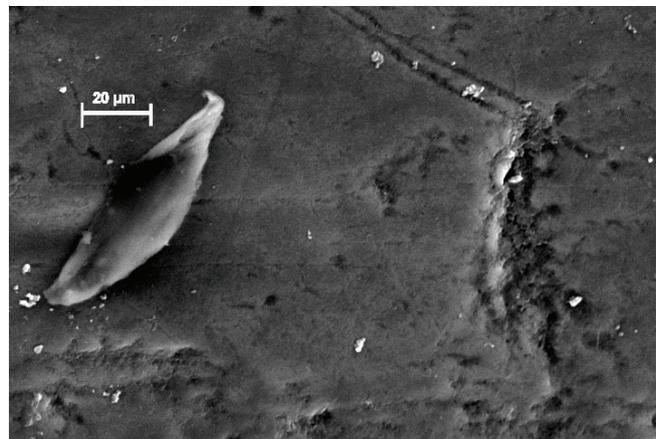




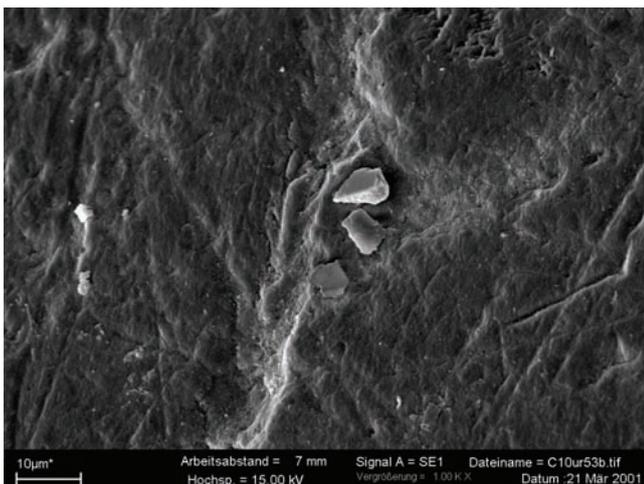
Q und R Brombach Ind 35 (u9) papillenförmige Phytolithe zum Teil oberflächlich in den Schmelz versenkt



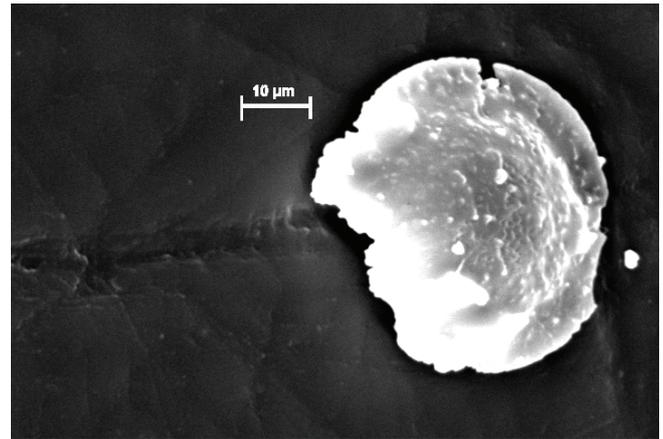
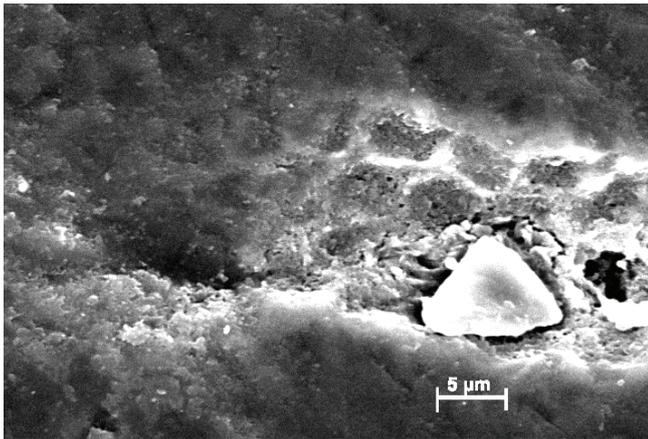
S Brombach Ind 7 (o6) flacher, scharfkantiger Partikel entlang einer Kratzspur



T Brombach 9 (o6) Mikropartikel (links) mit negativem Formabdruck (rechts)



U Weichering Ind 10 (u5) Mikropartikel in Form von Mikroabschlagsartefakten (pfeilspitzenförmig)



V Weichering Ind 2 (o6) dreieckförmige Papille in einer offenbar passenden Grube versenkt, freigelegte Schmelzprismen sichtbar

W Ofnet-Höhle Ind 21 (o6) Papille kopfüber in Kratzspur versenkt

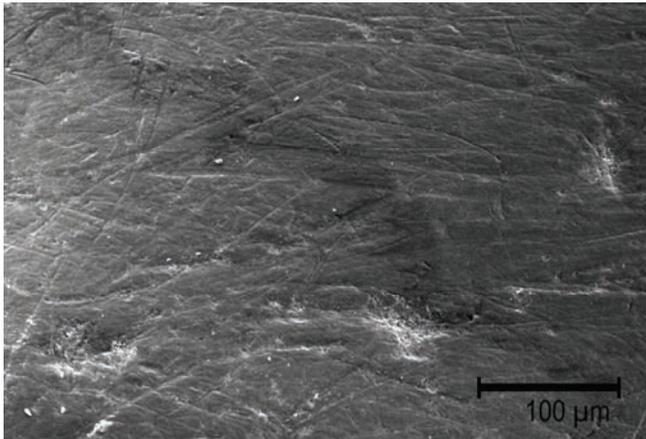
Abb. 100

A – W Besondere Ein- und Auflagerungen auf historischem Zahnschmelz

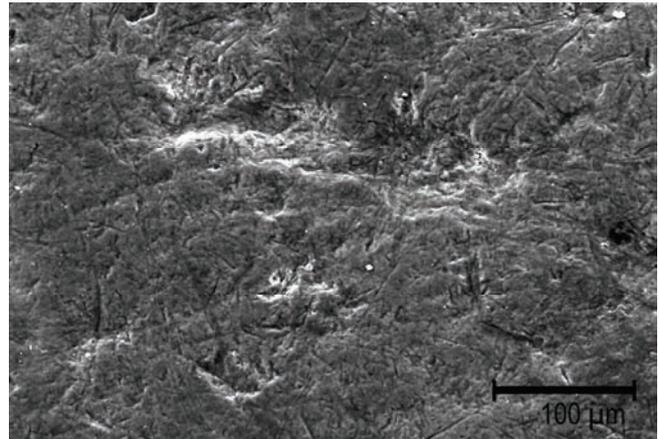
4.4 Morphometrische Charakterisierung Dentaler Microwear auf Ober- und Unterkiefermolaren

4.4.1 Beispiele real komplexer Dentaler Microwear auf definierten Facettenregionen

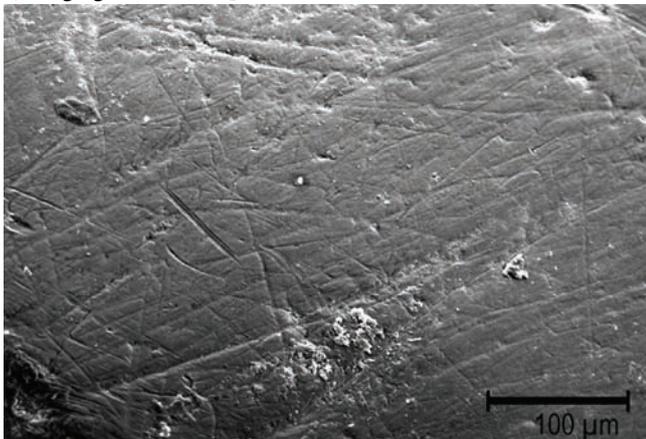
Die folgenden Abbildungen (Abb. 101 – 110, jeweils a - f zeigen ausgewählte Regionen auf den Facetten der zweiten Ober- und Unterkiefermolarenpaare der Fundkomplexe Waging, Bittenbrunn, Brombach, Weicherung und der Ofnet-Höhle. Es sind sowohl Oberflächen am Philips XL 20 als auch am Leo 1430 VP dargestellt. Die Tafeln sind so strukturiert, dass analog zu den Tabellen der Dentalen Microwear-Parameter (Tabelle 30 – 32: Philips XL 20 Series und Tabelle 33 – 35: LEO 1430 VP, sowie auch im Anhang 14) die Reihenfolge nach den Facettenregionen u6 (a) und u9 (b), o6 (c) und o9 (d), u5 (e) und o5 (f) der Unter- und Oberkiefermolaren beibehalten wurde.



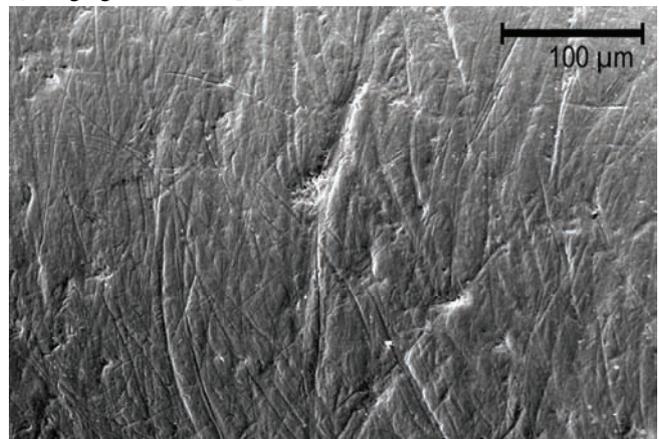
a) Waging Grab 141 M₂ Facette u6



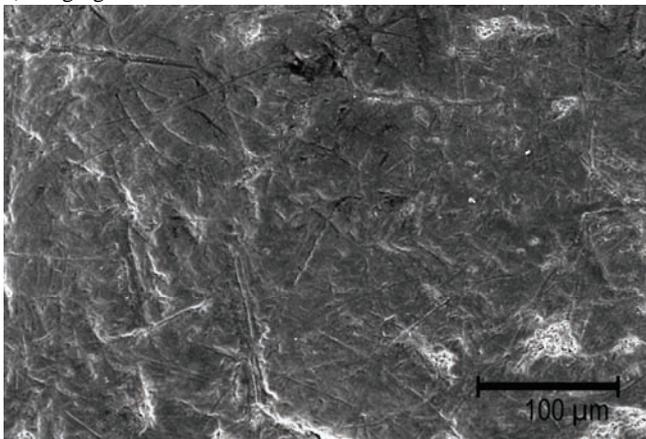
b) Waging Grab 136 M₂ Facette u9



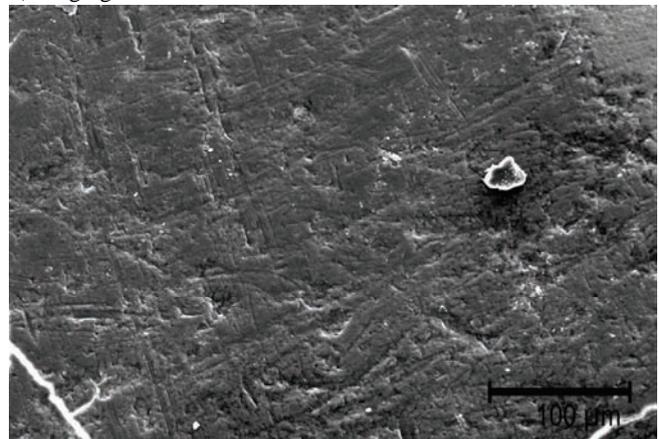
c) Waging Grab 141 M² Facette o6



d) Waging Grab 141 M² Facette o9

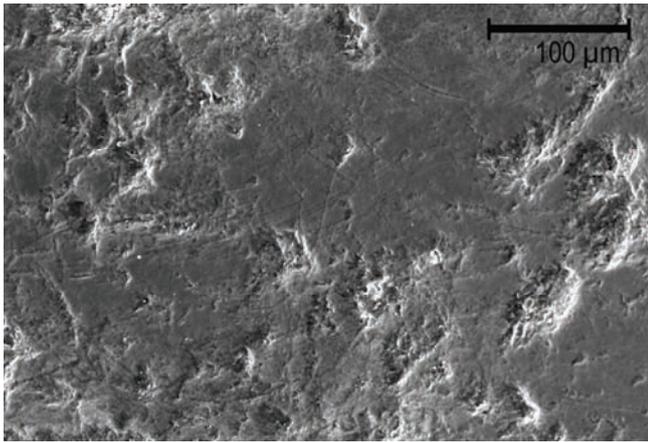


e) Waging Grab 141 M₂ Facette u5

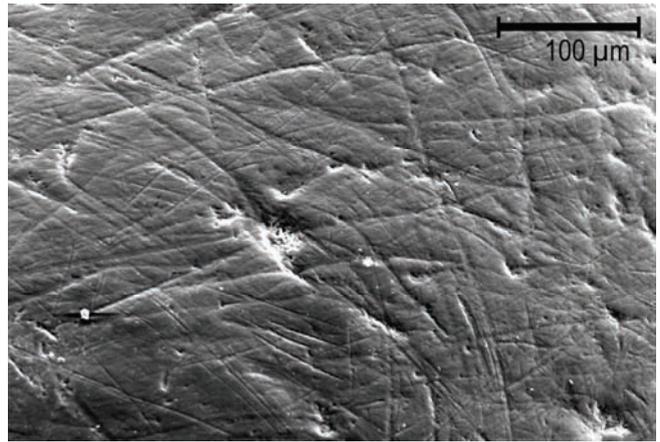


f) Waging Grab 104 M² Facette o5

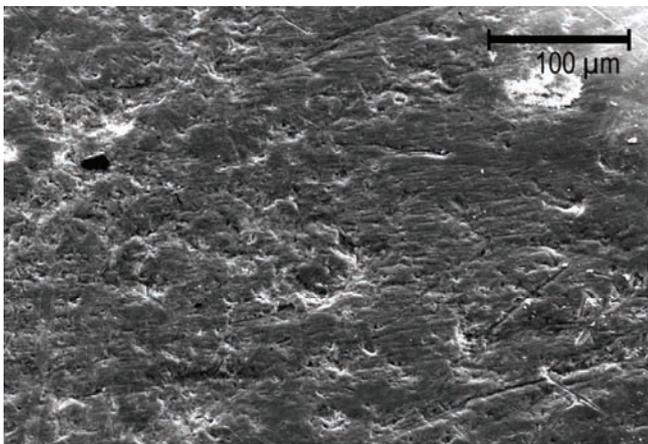
Abb. 101 a – f Waging SEM (200x, Philips XL20 Series) Orientierung der Facetten von bukkal nach lingual (li → re)



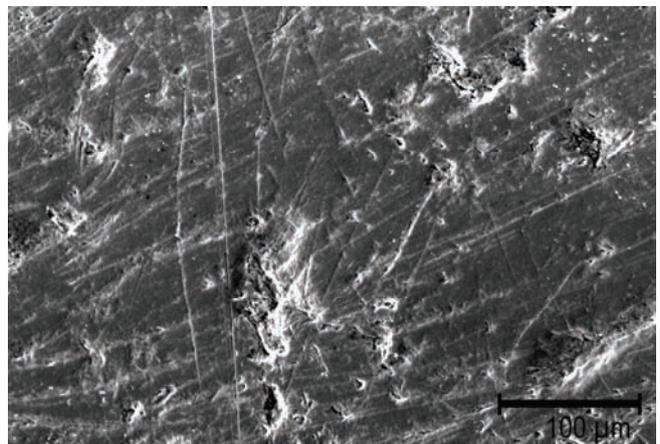
a) Bittenbrunn Grab 34 M₂ Facette u6



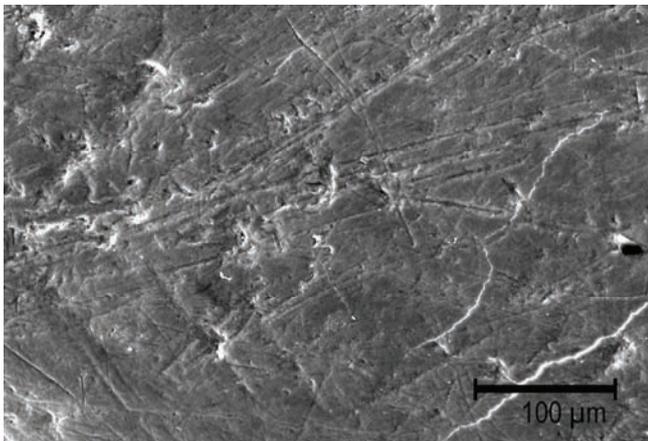
b) Bittenbrunn Grab 17 M₂ Facette u9



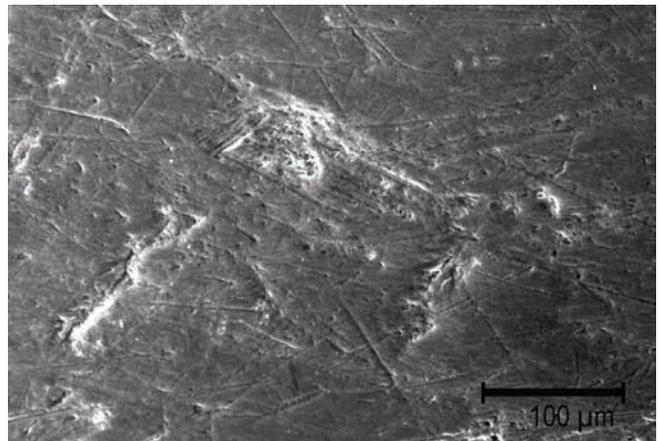
c) Bittenbrunn Grab 17 M₂ Facette o6



d) Bittenbrunn Grab 51 M₂ Facette o9

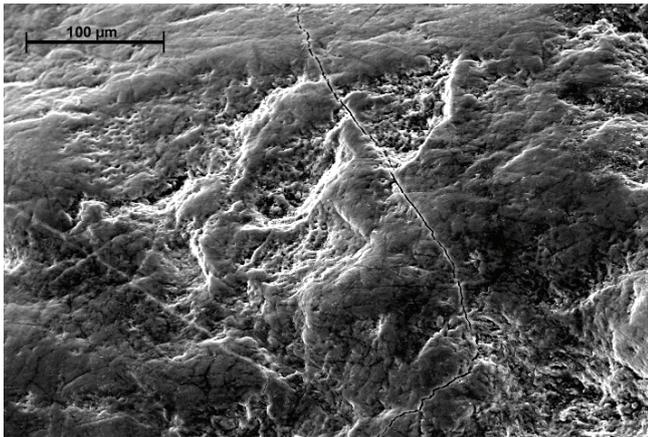


e) Bittenbrunn Grab 17 M₂ Facette u5

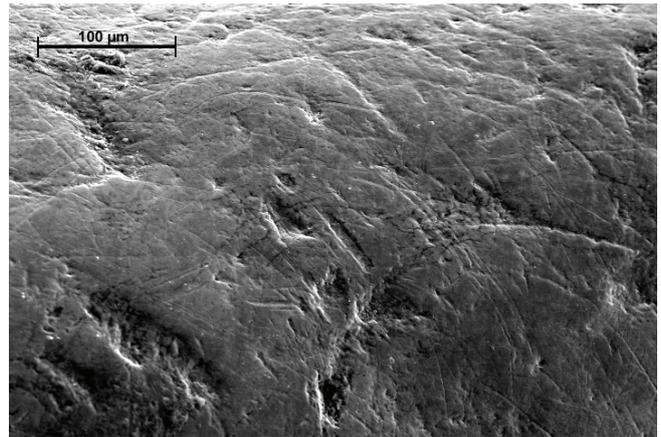


f) Bittenbrunn Grab 17 M₂ Facette o5

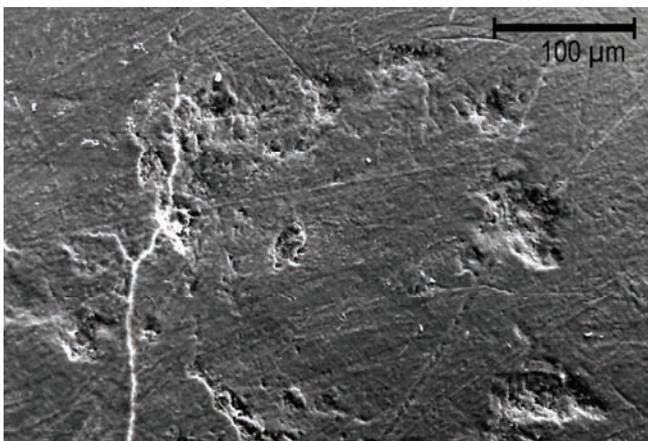
Abb. 102 a- f Bittenbrunn SEM (200x, Philips XL20 Series) Orientierung der Facetten von bukkal nach lingual (li→re)



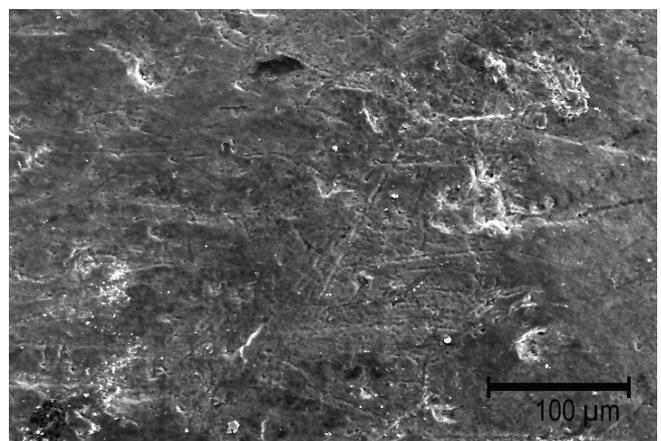
a) Brombach Grab 16A M₂ Facette u6



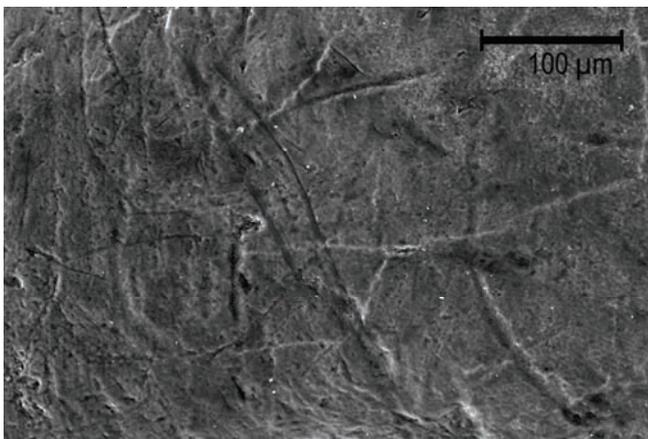
b) Brombach Grab 16A M₂ Facette u9



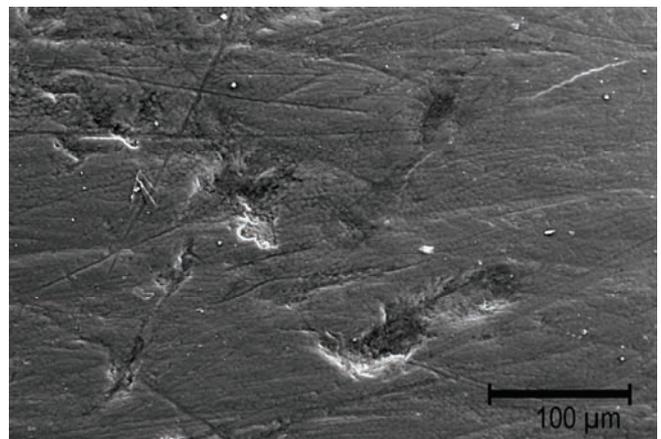
c) Brombach Grab 39 M² Facette o6



d) Brombach Grab 35 M² Facette o9



e) Brombach Grab 7 Facette u5



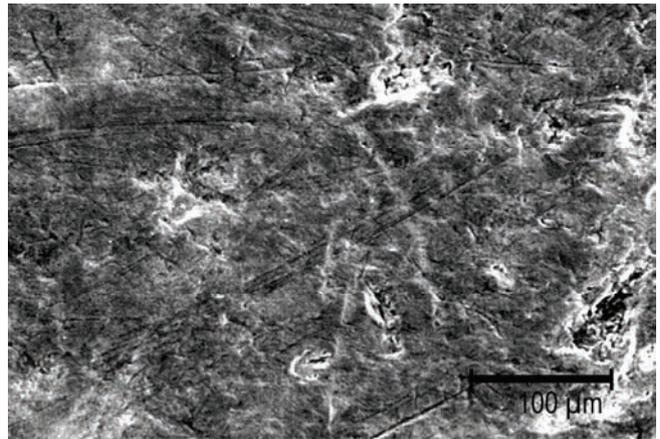
f) Brombach Grab 36 M² Facette o5

Abb. 103

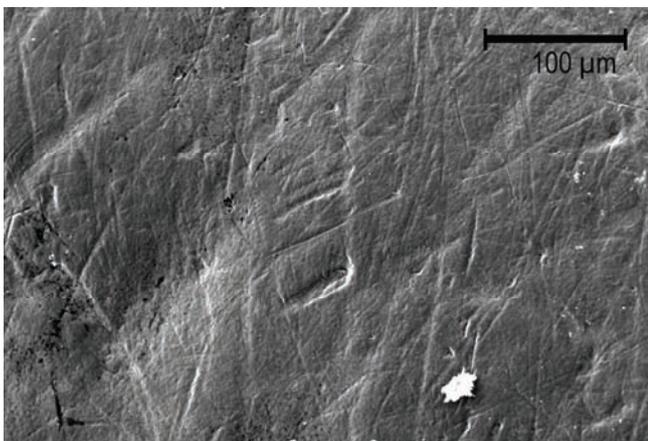
a- f Brombach SEM-(200x, Philips XL20 Series) Orientierung der Facetten von bukkal nach lingual (li → re)



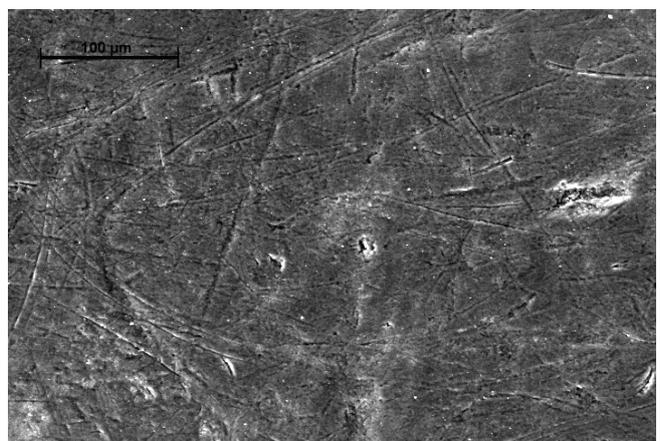
a) Weichering Grab 3 M₂ Facette u6



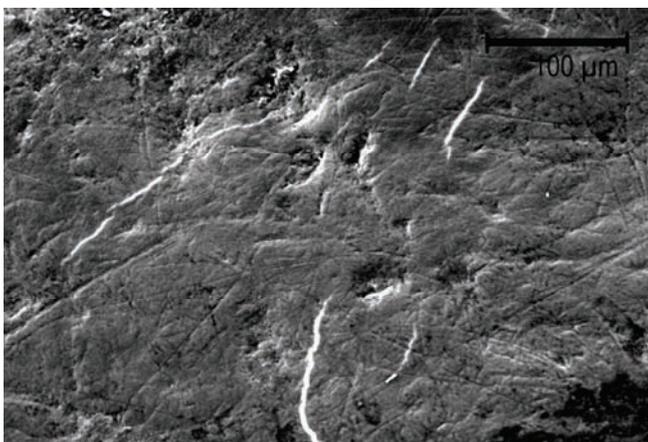
b) Weichering Grab 3 M₂ Facette u9



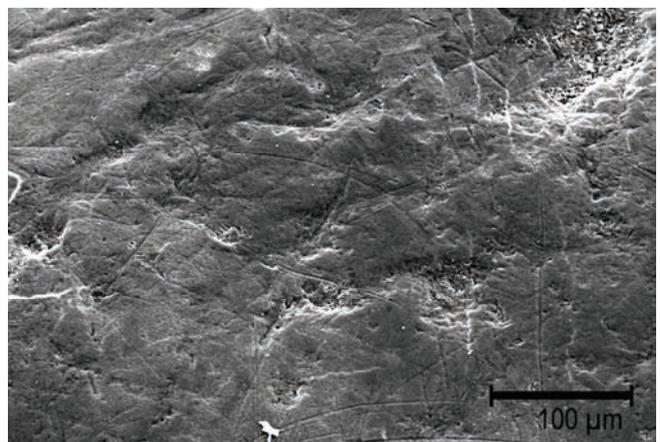
c) Weichering Grab 2 M² Facette o6



d) Weichering Grab 2 M² Facette o9

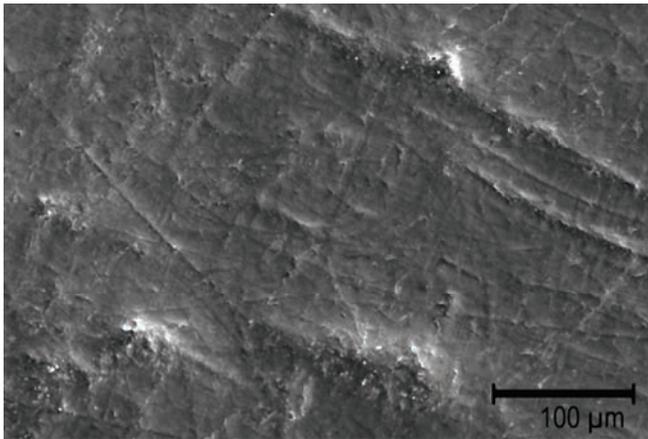


e) Weichering Grab 17 M₂ Facette u5

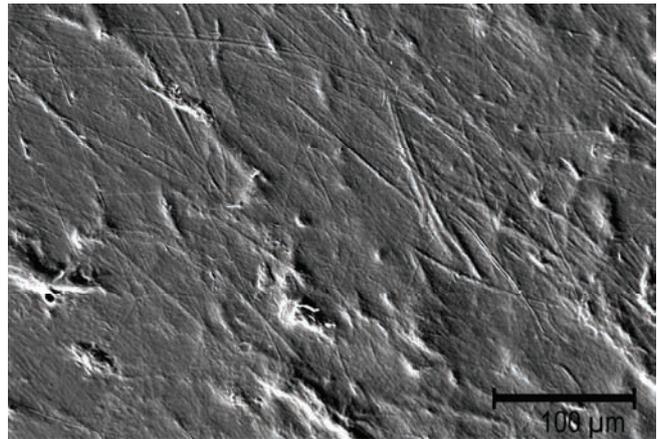


f) Weichering Grab 17 M₂ Facette o5

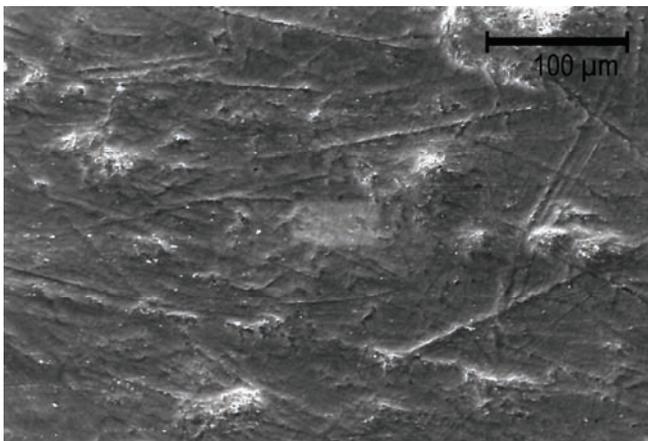
Abb. 104 a- f Weichering SEM-(200x, Philips XL20 Series) Orientierung der Facetten von bukkal nach lingual (li→re)



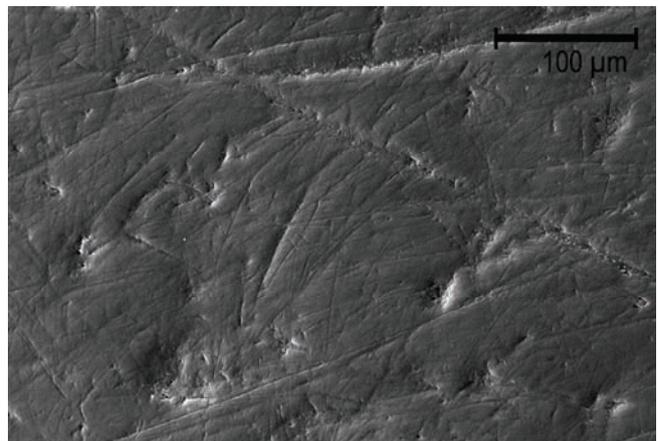
a) Ofnet (R) Schädel 11 M₂ Facette u6



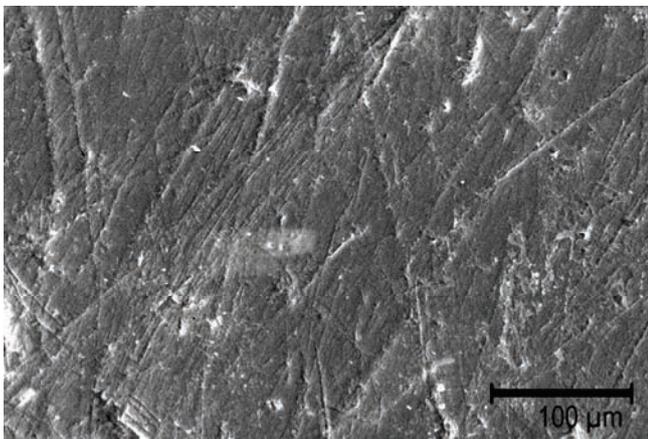
b) Ofnet (R) Schädel 3 M₂ Facette u9



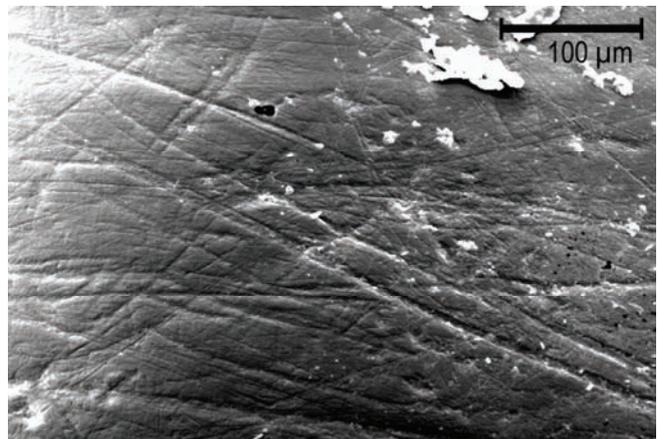
c) Ofnet (R) Schädel 21 M₂ Facette o6



d) Ofnet (R) Schädel 11 M₂ Facette o9

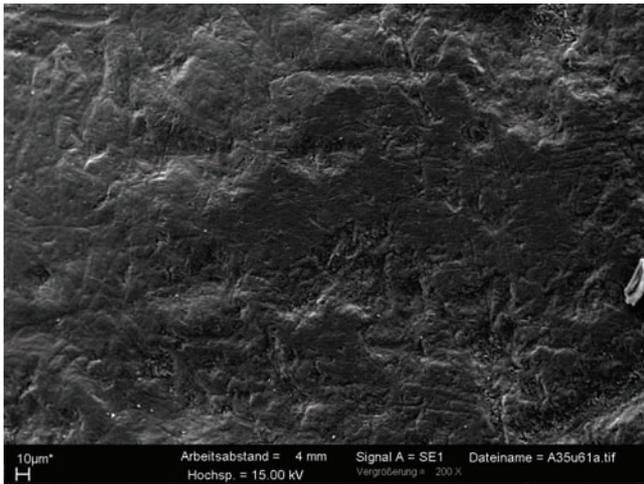


e) Ofnet (R) Schädel 21 M₂ Facette u5

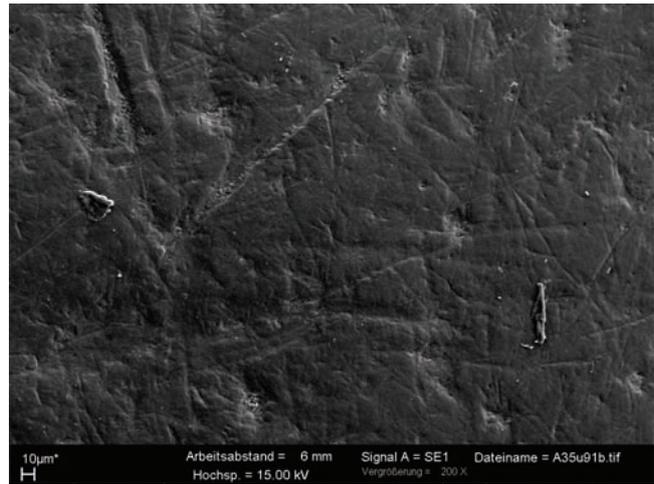


f) Ofnet (R) Schädel 3 M₂ Facette o5

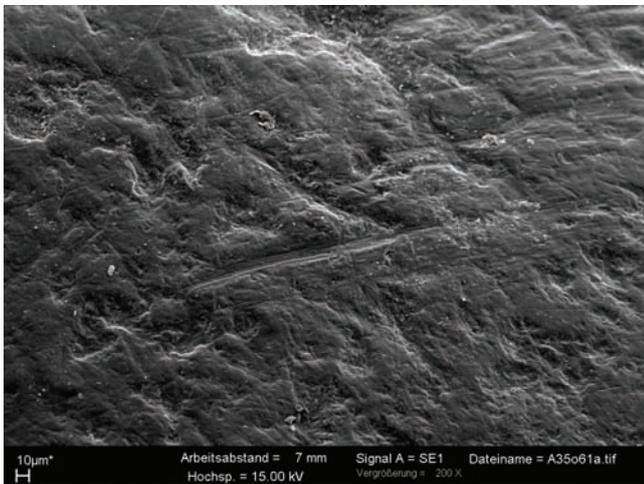
Abb. 105 Ofnet-Höhle SEM (200x, Philips XL20 Series) Orientierung der Facetten von bukkal nach lingual (li → re).
R=Replikat



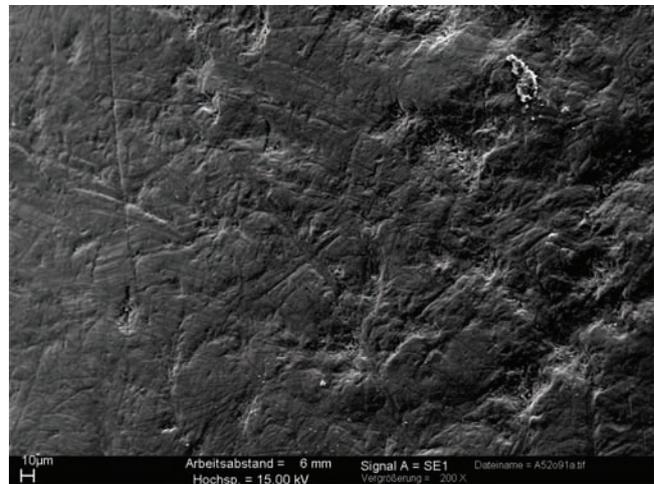
a) Waging Grab 35 M₂ Facette u6



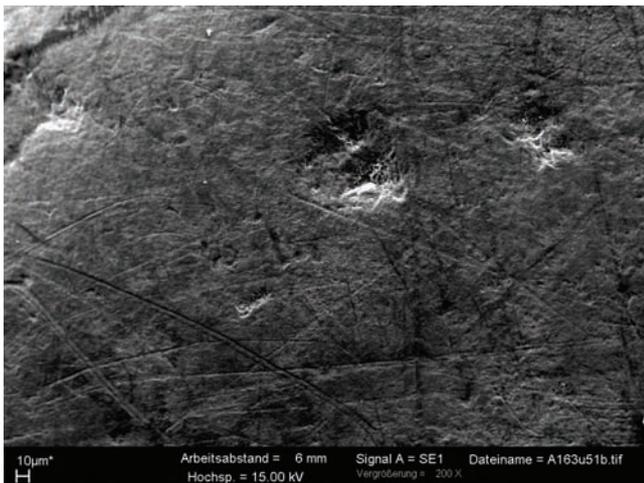
b) Waging Grab 35 M₂ Facette u9



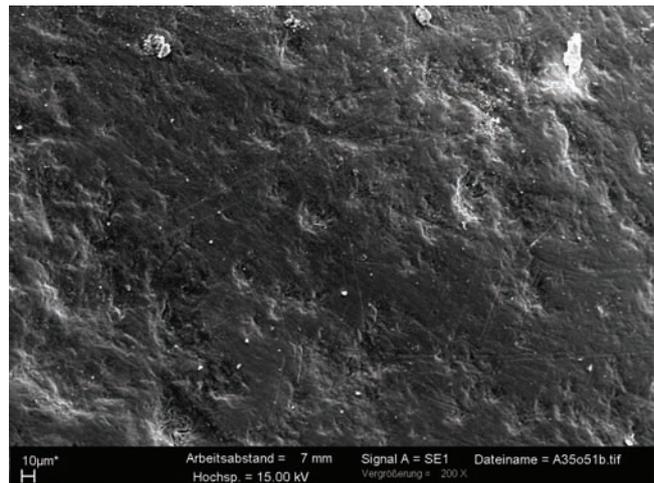
c) Waging Grab 35 M² Facette o6



d) Waging Grab 52 M² Facette o9

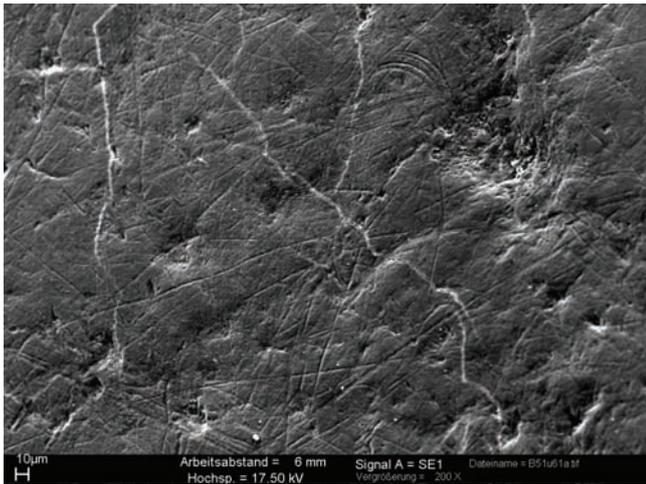


e) Waging Grab 163 M₂ Facette u5

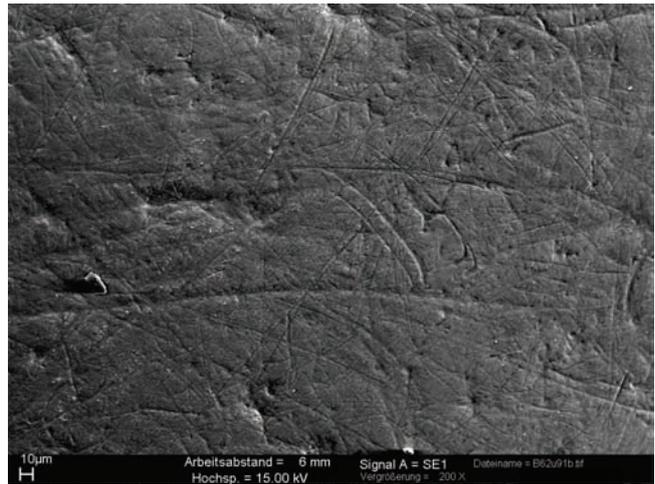


f) Waging Grab 35 M² Facette o5

Abb. 106 a – f Waging SEM (200x, LEO 1430 VP) Orientierung der Facetten von bukkal nach lingual (li→re).



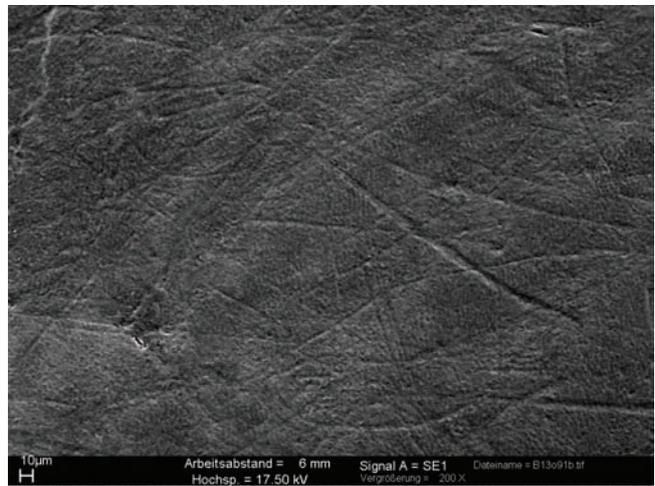
a) Bittenbrunn Grab 51 M₂ Facette u6



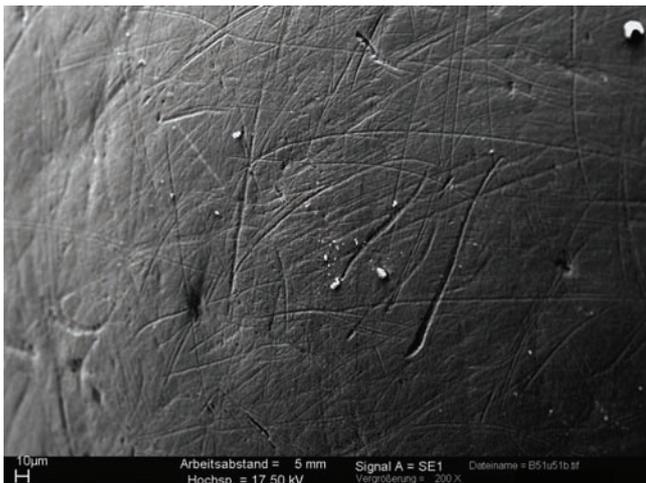
b) Bittenbrunn Grab 62 M₂ Facette u9



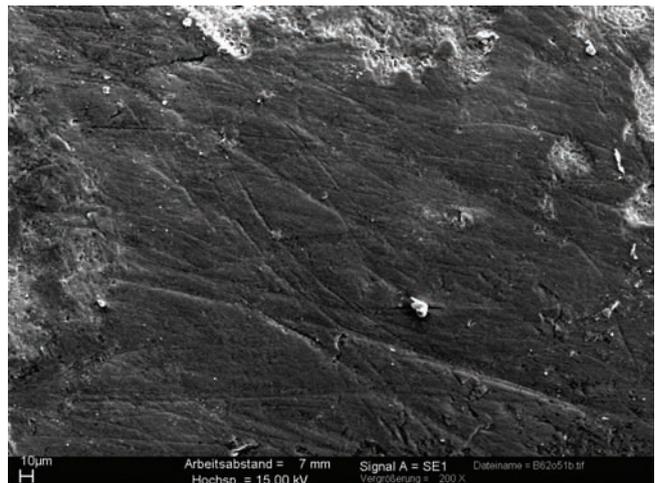
c) Bittenbrunn Grab 13 M₂ Facette o6



d) Bittenbrunn Grab 13 M₂ Facette o9



e) Bittenbrunn Grab 51 M₂ Facette u5



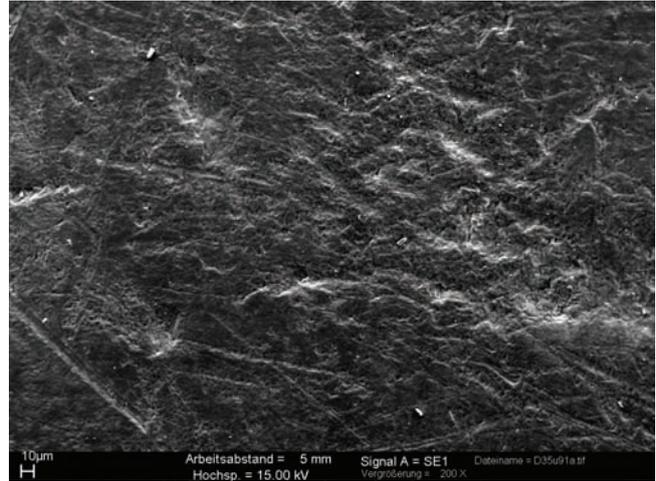
f) Bittenbrunn Grab 62 M₂ Facette o5

Abb. 107

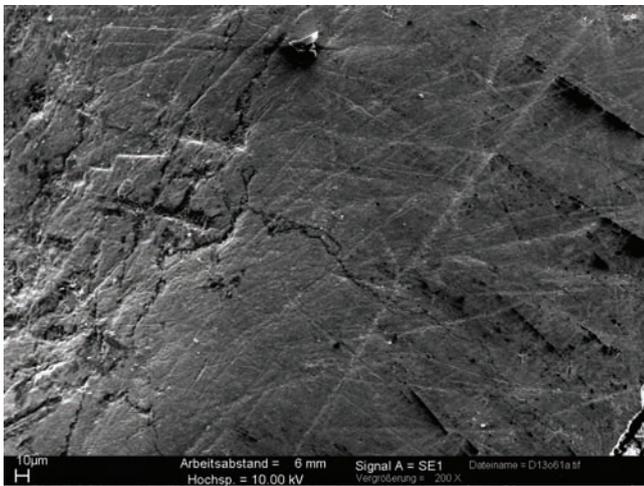
a – f Bittenbrunn SEM (200x, LEO 1430 VP) Orientierung der Facetten von bukkal nach lingual (li→re).



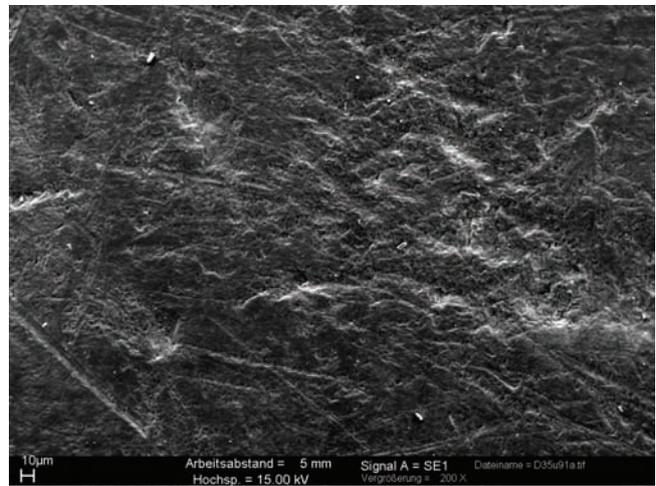
a) Brombach Grab 36 M₂ Facette u6



b) Brombach Grab 35 M₂ Facette u9



c) Brombach Grab 13 M₂ Facette o6

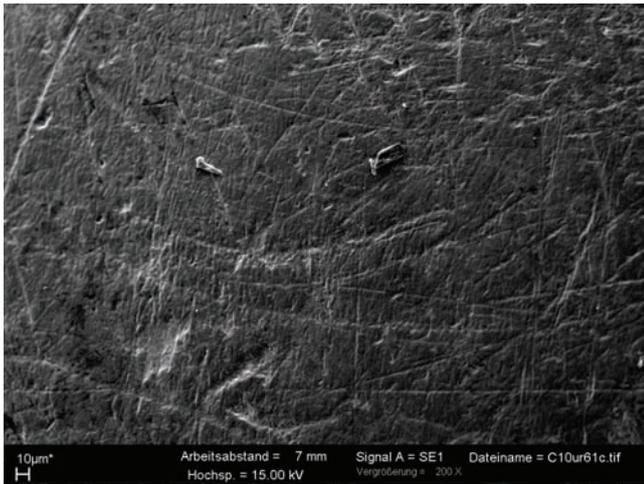


d) Brombach Grab s5 M₂ Facette o9

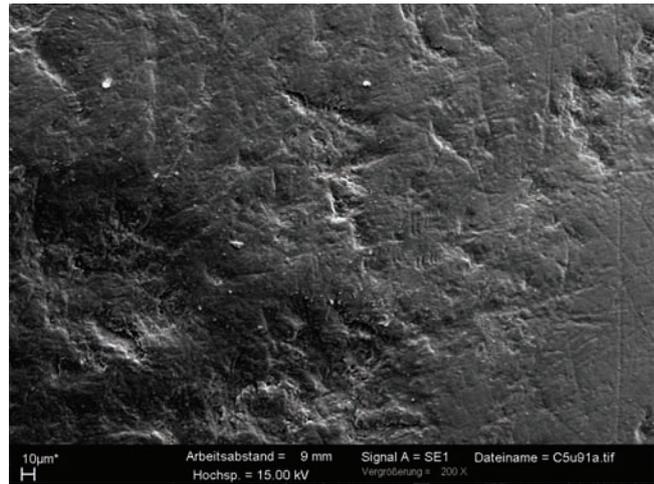


e) Brombach Grab 35 M₂ Facette u5

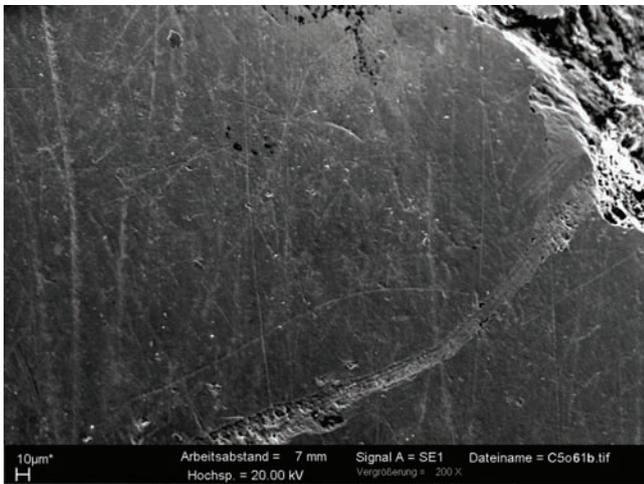
Abb. 108 a – e Brombach SEM (200x, LEO 1430 VP) Orientierung der Facetten von bukkal nach lingual (li→re); M² Facette o5 keine Abbildung.



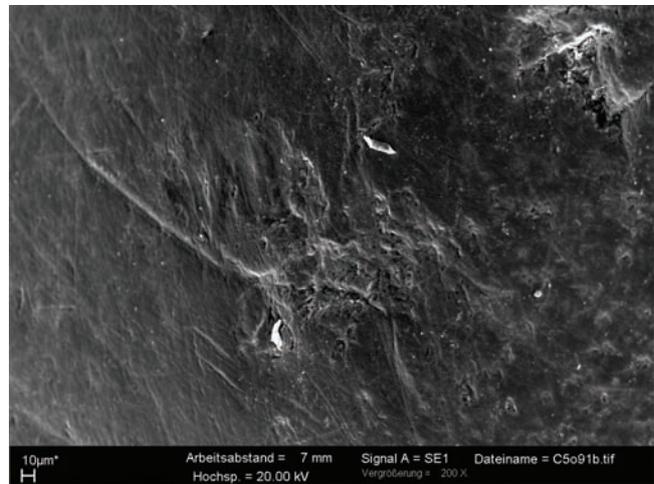
a) Weichering Grab 10 M₂ u6



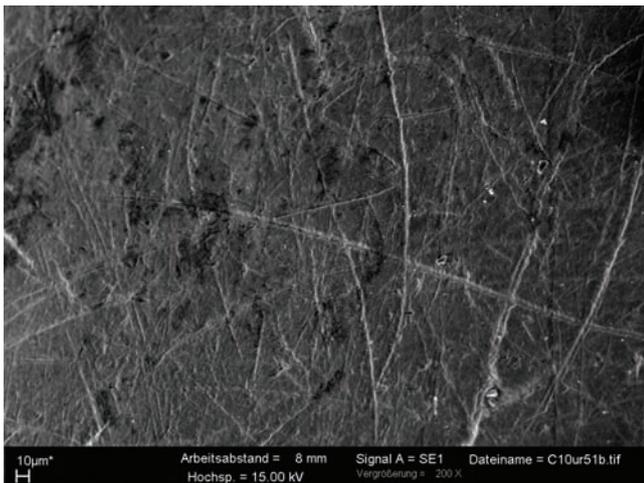
b) Weichering Grab 5 M₂ u9



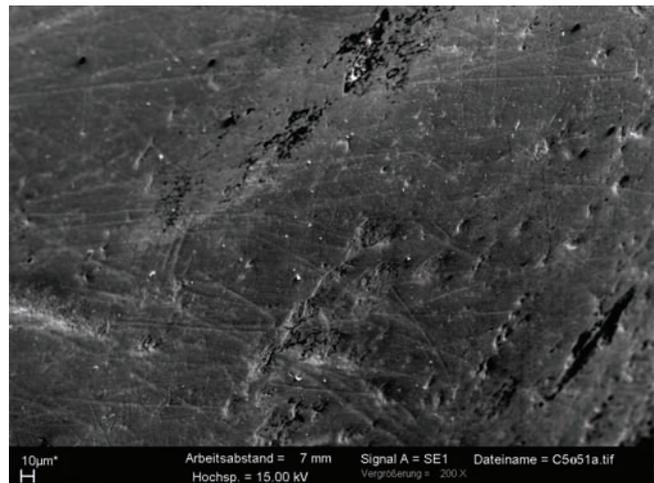
c) Weichering Grab 5 M² o6



d) Weichering Grab 5 M² o9

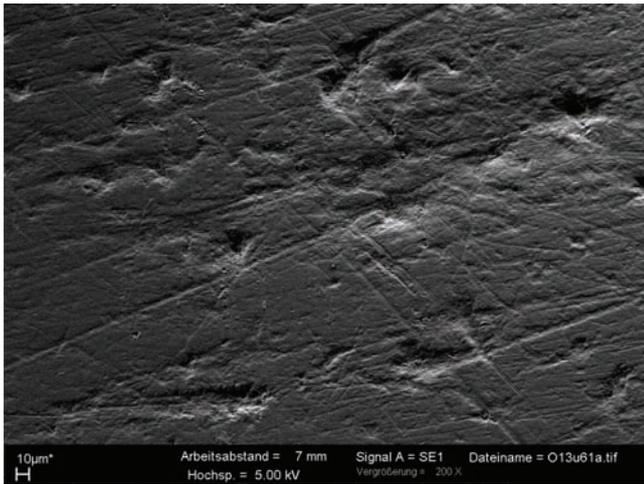


e) Weichering Grab 10 M₂ u5

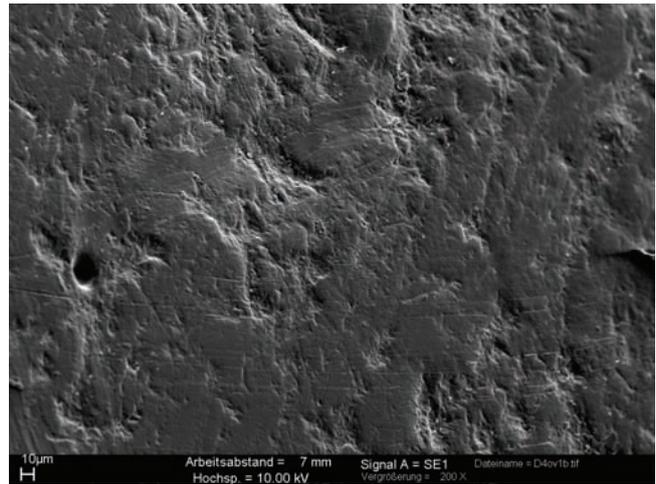


f) Weichering Grab 5 M² o5

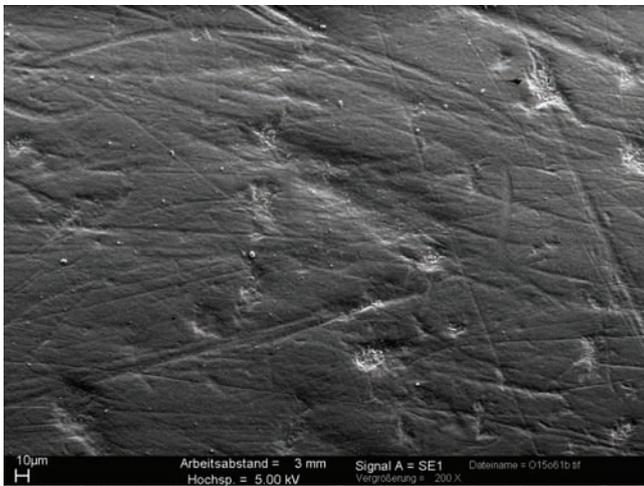
Abb. 109 a - f Weichering SEM (200x, LEO 1430 VP) Orientierung der Facetten von bukkal nach lingual (li→re).



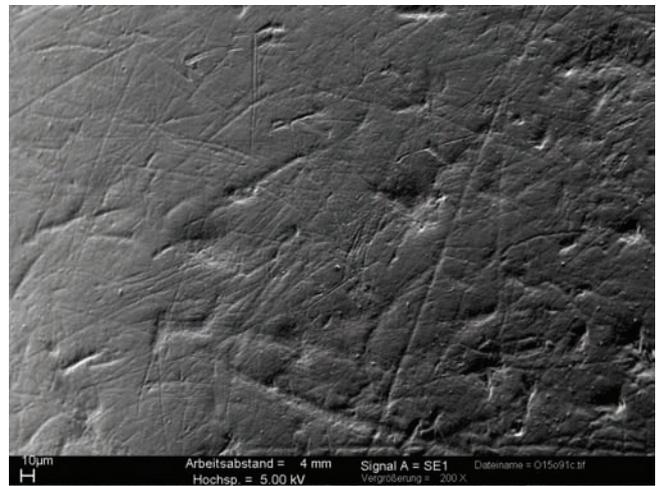
a) Ofnet-Höhle Ind 13 M₂ u6 (R)



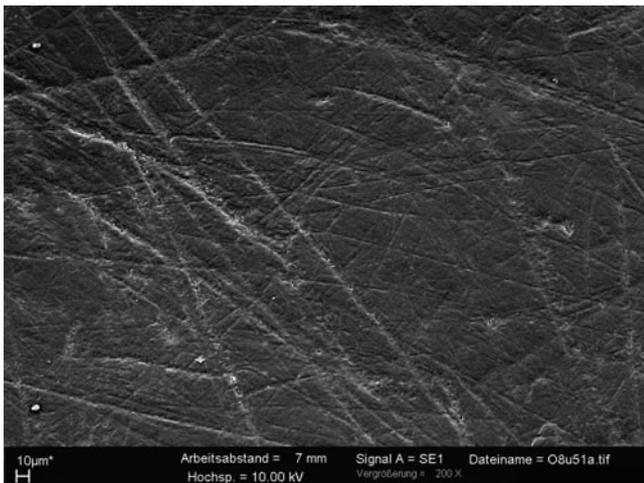
b) Ofnet-Höhle Ind 21 M₂ u9 (R)



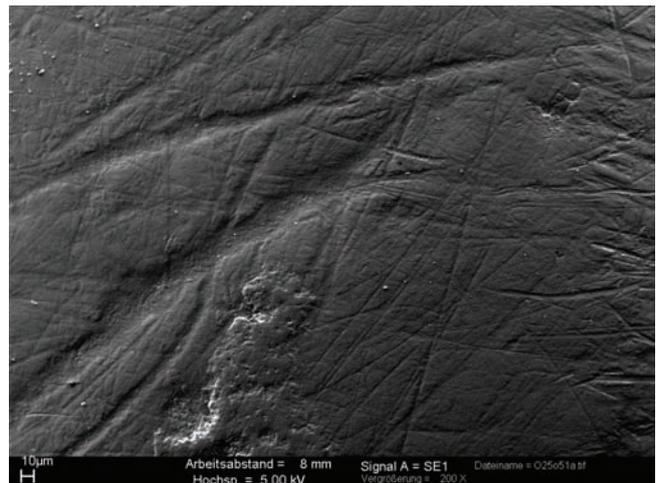
c) Ofnet-Höhle Ind 15 M² o6 (R)



d) Ofnet-Höhle Ind 15 M² o9 (R)



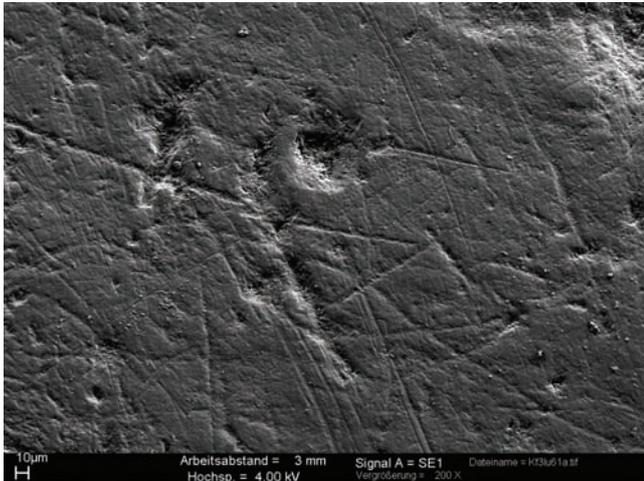
e) Ofnet-Höhle Ind 8 M₂ u5 (R)



f) Ofnet-Höhle Ind 25 M² o5 (R)

Abb. 110 a - f Ofnet-Höhle SEM (200x, LEO 1430 VP) Orientierung der Facetten von bukkal nach lingual (li→re).
R=Replikat

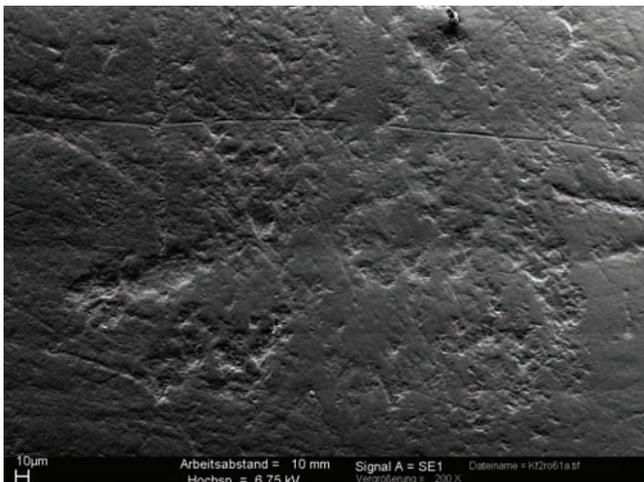
4.4.2 Real komplexe Dentale Microwear auf den Molaren der Individuen vom Kaufertsberg und der Oldoway Schlucht



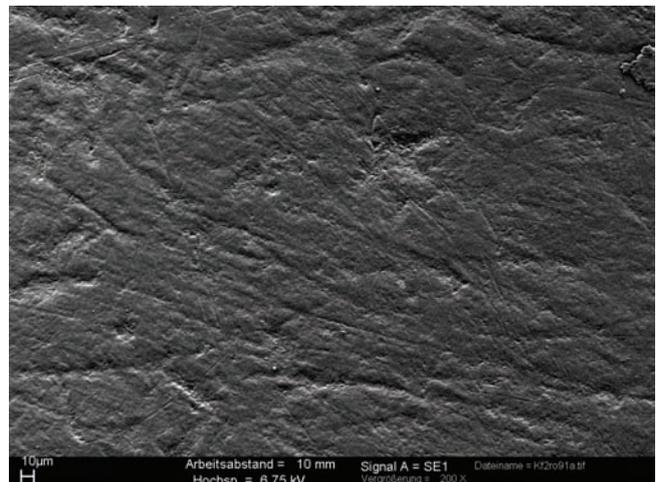
a) Kaufertsberg M₂ Facette u6 (R)



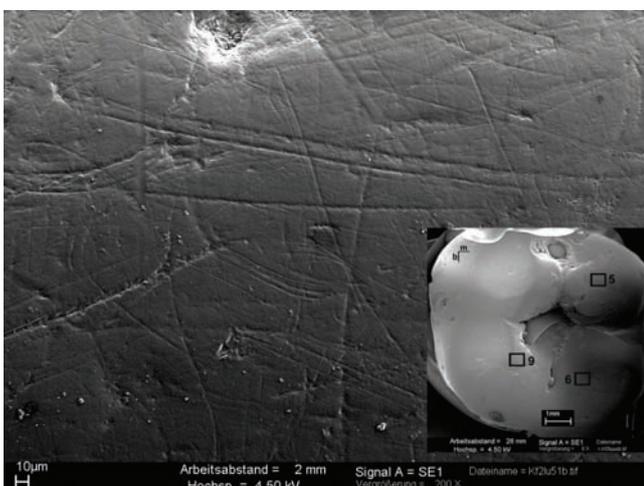
b) Kaufertsberg M₂ Facette u9 (R)



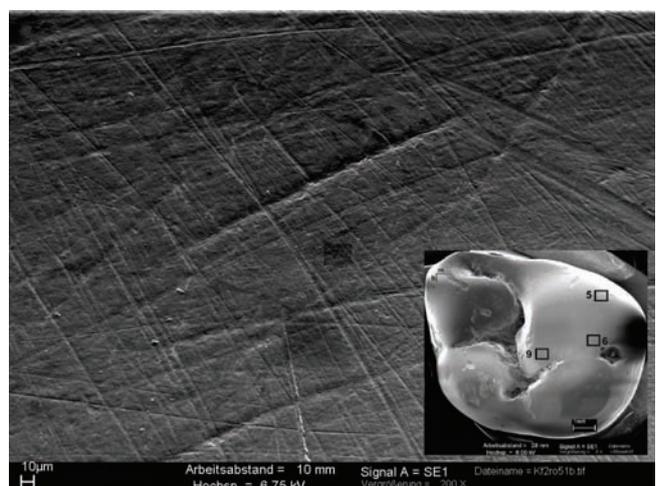
c) Kaufertsberg M² Facette o6 (R)



d) Kaufertsberg M² Facette o9 (R)



e) Kaufertsberg M₂ Facette u5 (R)



f) Kaufertsberg M² Facette o5 (R)

Abb. 111 a – f Hominide Kaufertsberg REM 200x: Übersichtsaufnahme der okklusalen Oberflächen der Molaren: Markierung der Facettenregionen in den Aufnahmen der Facette u5 (links) bzw. o5 (rechts). R=Replikat

Panoramaaufnahmen von Zahnoberflächen geben einen Eindruck von der homogenen Verteilung dentaler Microwear auf funktionell umschriebenen Schmelzarealen (z.B. Abb. 112, 113).

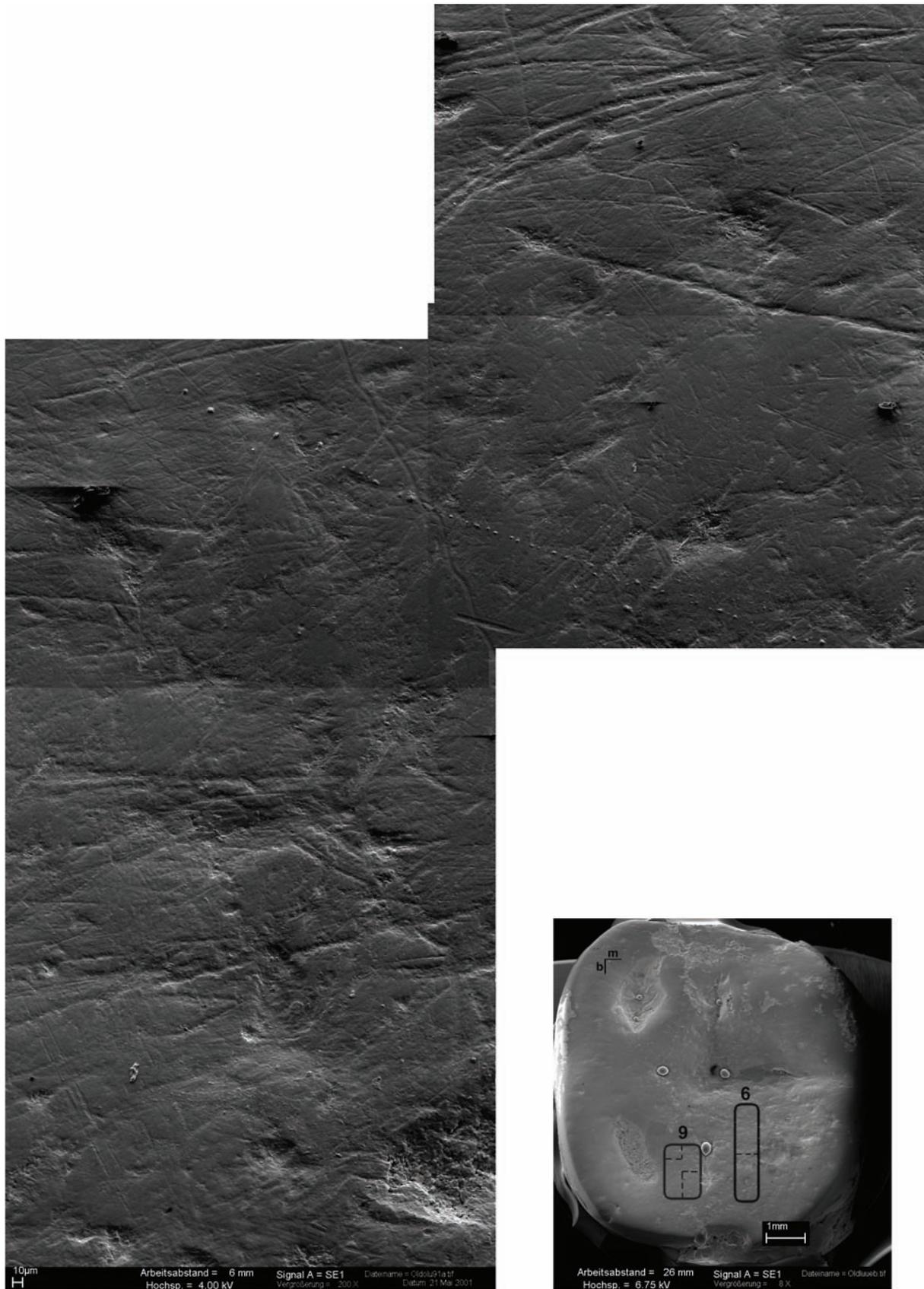


Abb. 112 REM 200x: Hominide Oldoway OH1 M₄ links, Panorama der Facette u9, Übersichtsaufnahme der okklusalen Oberfläche des M₂; Markierung der Facettenregionen u9 und u6

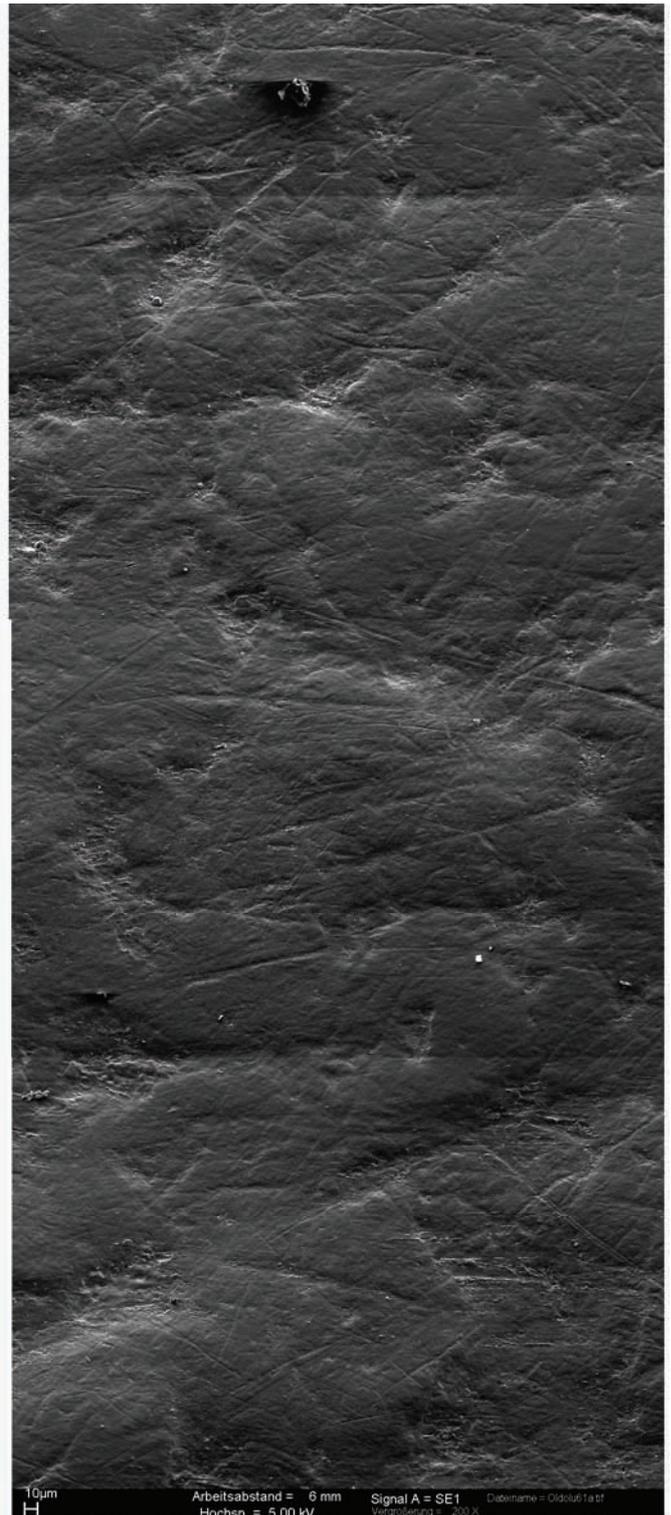
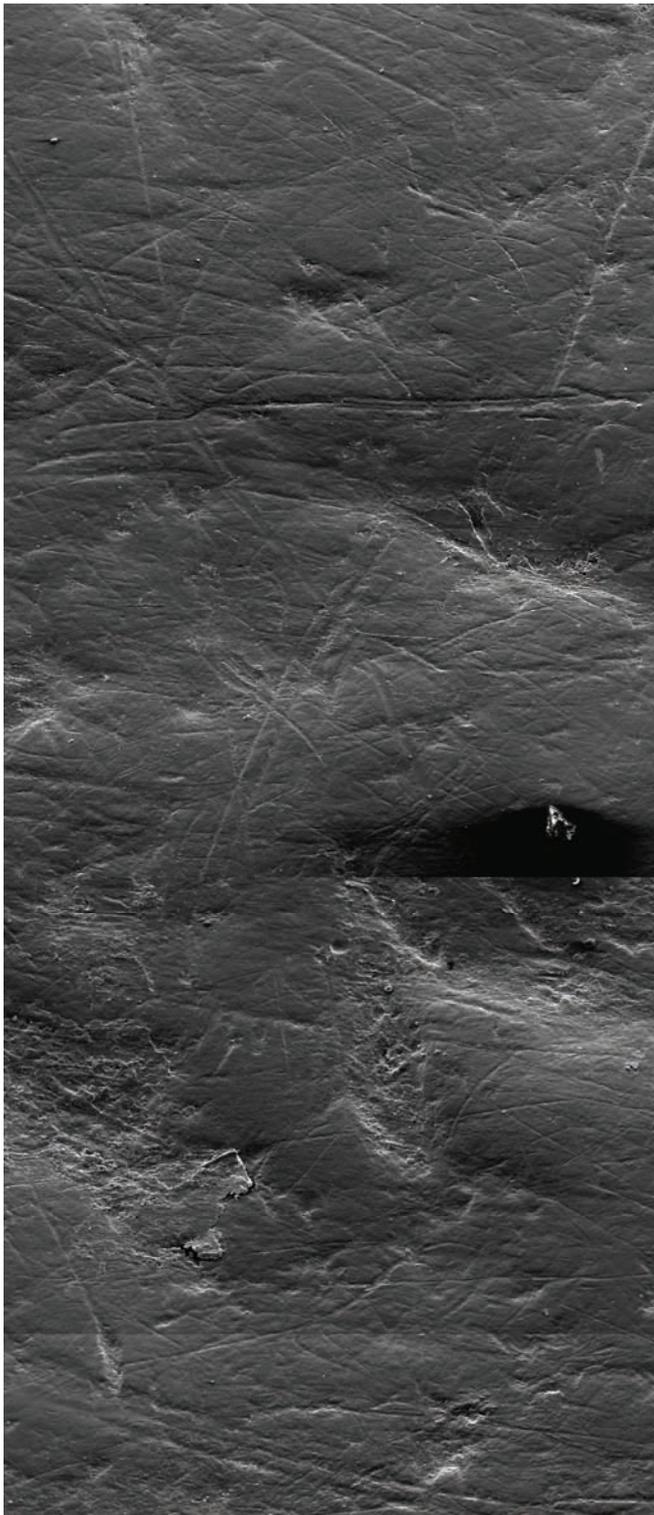
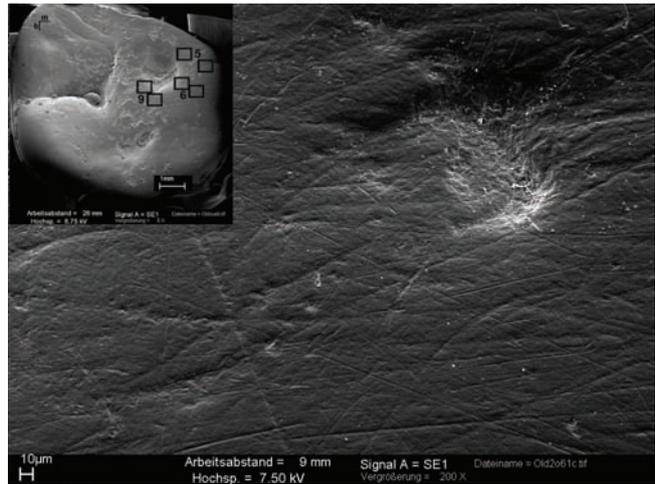
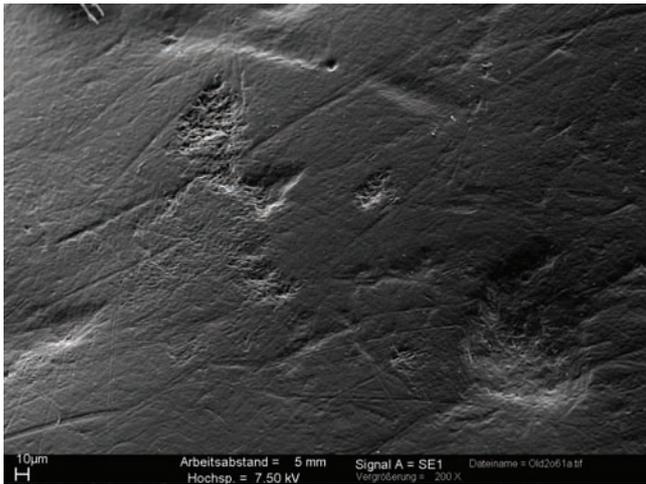
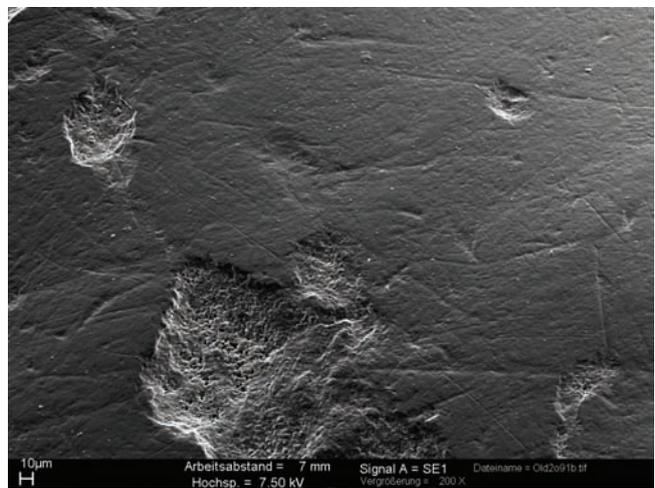
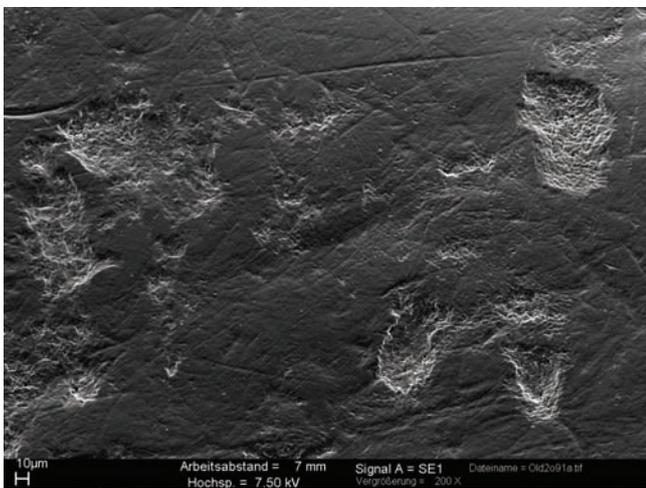


Abb. 113
rechts)

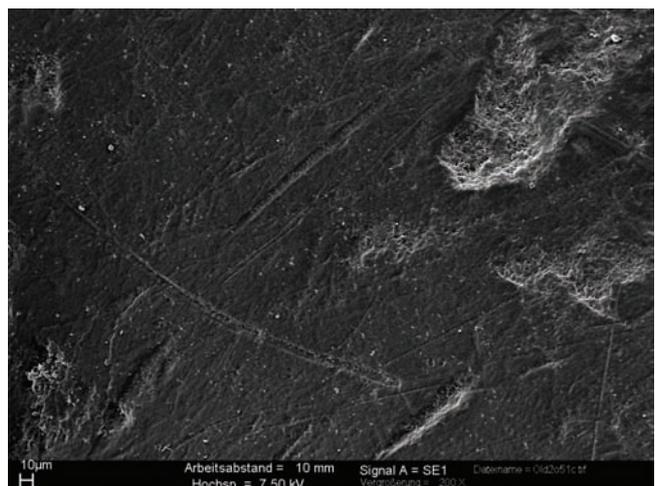
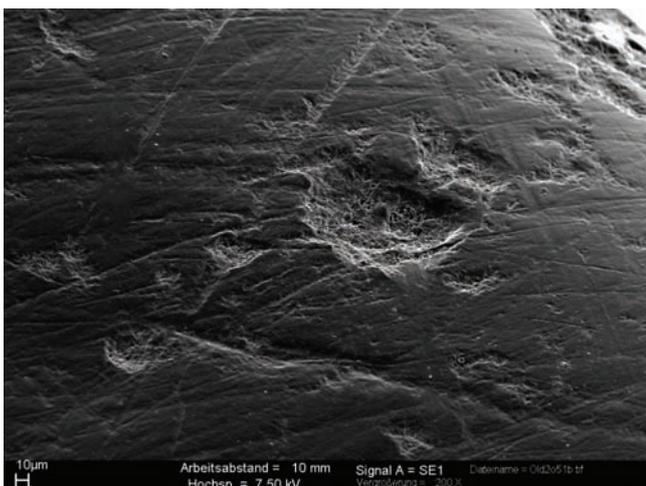
REM 200x: Hominide Oldoway OH1 M₂ links, Panorama der Facettenregion u6 (s. Übersicht in Abb. 112



Hominide Oldway OH1 M² Facette o6



Hominide Oldway OH1 M² Facette o9



Hominide Oldway OH1 M² Facette o5

Abb. 114 REM 200x: Hominide Oldway OH 1; Facettenregionen des Oberkiefermolaren M²

4.4.3 Parameter Dentaler Microwear definierter Facettenregionen zeitlich (diachron) und regional (synchron) getrennt lebender menschlicher Gruppen

Die statistischen Einzelparameter der definierten Facettenregionen 6, 9 und 5 der Unterkiefer- und Oberkiefermolaren sind tabellarisch im Anhang 14 zusammengefasst. Die Einzelergebnisse aller Dentalen Microwear Analysen der Bilddateien wurden in EXCEL-Tabellen zusammengefasst und als Datenfiles (REMgesamt, REMgesGruben, REMgesKratz, Tabelle LEO und Philips) zusammengestellt. Sie sind der vorliegenden Arbeit auf einer CD-ROM beigelegt.

Von den insgesamt $N = 648$ untersuchten Facettenarealen waren $N = 515$ für die DMA auswertbar. Sie repräsentieren die Dentale Microwear der Individuen der fünf Fundkomplexe und der beiden Einzelindividuen (Kaufertsberg, Oldoway OH 1). Die Anzahl der analysierten Areale ist im Folgenden nach Fundkomplexen (A) und nach Facetten (B) aufgelistet. Die von der statistischen Erfassung ausgeschlossenen REM-Aufnahmen zeigten Artefakte (s. Abb. 82, 83, 84) wie oberflächliche Erosion, Mikrorisse, Schmelzabspaltungen, Auflagerungen, Unschärfe der Aufnahme oder eine stark asymmetrische Verteilung von Merkmalen ($N = 124$, d.h. nahezu 20 % der REM-Aufnahmen).

Häufigkeit der untersuchten Facettenareale

A Fundkomplexe

	Gesamt	Waging	Bittenbrunn	Brombach	Weichering	Ofnet-Höhle	Kaufertsberg	Oldoway OH 1
Philips XL 20 Series	228	66	38	22	16	86	n.b.	n.b.
LEO 1430 VP	287	44	44	25	38	78	30	28

B Facettenregionen

Facette	Gesamt	u5	u6	u9	o5	o6	o9
Philips XL 20 Series	228	35	39	41	41	35	37
LEO 1430 VP*	287	46 (54)	50 (64)	48 (63)	26 (28)	28 (40)	31 (38)

* Angaben in Klammern: Anzahl einschließlich der Proben vom Kaufertsberg und des Hominiden Oldoway OH1

Die Statistischen Einzelparameter der dentalen Microwear Analyse wurden im Statistikprogramm SPSS 11.0 nach Gruppen zusammengefasst. Die Mittelwerte der Parameter (N_{total} = Mittlere Anzahl der Merkmale auf allen analysierten Flächen ($0,176 \text{ mm}^2$); NG = Dichte der Gruben; % Gruben = relativer Anteil der Gruben an der Merkmalsdichte; GL = Länge der Gruben; GB = Breite der Gruben; NK = Dichte der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren; KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Kratzspurenlängen; R = Parameter zur Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector) ihre Standardabweichungen und die zugrundeliegende Anzahl sind getrennt nach eingesetztem Rasterelektronenmikroskop in Tabelle 30 - 32 (Philips XL 20 Series) und Tabelle 33 - 35 (LEO 1430 VP) zusammengestellt.

Tabelle 30. Statistische Parameter real komplexer dentaler Microwear auf menschlichen mandibularen und maxillaren Molaren (Philips XL 20 Series)

	M ₂ Region Facette 6										M ₂ Region Facette 9									
	N	NG	% Gruben	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL(µm)	KL (SD)	R	N	NG	% Gruben	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	KL (SD)	R		
Waging																				
mean	108,3	116,8	16,3	15,0	33,6	19,6	100,5	64,3	47,1	0,474	109,2	24,3	24,3	28,2	19,7	84,9	55,8	38,6	0,363	
s +/-	32,7	21,9	15,9	17,1	18,1	5,0	29,7	11,6	13,4	0,115	28,5	16,6	20,4	6,7	5,4	35,8	18,1	17,8	0,188	
n	66	11	11	11	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
Bittenbrunn																				
mean	91,8	87,2	26,0	34,6	29,6	20,6	61,2	53,7	39,0	0,431	107,0	11,3	10,5	25,7	16,8	95,7	73,5	54,8	0,602	
s +/-	26,7	33,5	14,2	19,6	5,7	4,4	37,5	19,6	17,8	0,161	24,5	5,7	5,4	10,4	4,8	21,9	18,8	17,8	0,197	
n	38	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Brombach																				
mean	61,6	40,8	9,2	23,2	53,3	32,7	31,7	99,4	71,6	0,621	65,2	9,0	12,9	30,3	19,7	58,0	85,6	61,7	0,316	
s +/-	18,7	9,6	5,1	13,0	24,3	10,2	9,6	35,7	44,1	0,191	19,3	6,2	8,6	8,9	6,1	17,4	19,8	17,5	0,127	
n	22	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	4	4	4	4	5	5	5	5	
Weichering																				
mean	79,8	60,3	15,0	26,2	32,1	24,0	45,3	67,6	44,2	0,323	71,5	13,5	18,3	30,9	21,9	58,0	80,3	51,6	0,563	
s +/-	30,9	17,8	3,6	8,9	8,8	6,0	18,1	6,5	8,9	0,125	19,2	8,7	9,5	4,9	3,9	14,1	26,3	13,1	0,107	
n	16	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Ofnet-Höhle																				
mean	101,3	85,6	18,0	22,1	30,0	19,8	67,6	79,8	58,2	0,471	99,7	21,8	20,6	24,5	16,6	77,9	81,6	56,7	0,496	
s +/-	25,6	21,0	13,1	15,4	6,7	5,8	24,0	10,6	11,9	0,219	28,7	14,5	10,2	6,1	4,0	20,6	22,4	16,7	0,184	
n	86	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	14	14	14	14	14	14	14	

Anmerkung: Parameter sind Mittelwerte (mean) der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²)

Abkürzungen: N_{total} = Mittlere Anzahl der Merkmale auf allen analysierten Flächen (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; GL = Länge der Gruben; GB = Breite der Gruben;

NK = Dichte der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren; KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Kratzspurenlängen; R = Parameter zur Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector)

Tabelle 31. Statistische Parameter real komplexer dentaler Microwear auf menschlichen mandibularen und maxillaren Molaren (Philips XL 20 Series)

N _{total}	M ² Region Facette 6										M ² Region Facette 9									
	N	NG	% Gruben	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	KL (SD)	R	N	NG	% Gruben	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	KL (SD)	R		
Waging																				
mean	108,3	113,3	22,1	21,3	26,0	18,7	91,2	57,7	40,8	0,432	106,4	20,0	22,5	29,6	20,7	86,4	50,6	32,5	0,361	
s +/-	32,7	28,0	12,9	12,6	6,1	4,4	36,1	15,5	13,8	0,107	49,3	9,5	17,0	9,1	6,4	48,2	8,5	11,6	0,162	
n	66	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
Bittenbrunn																				
mean	91,8	94,6	32,0	34,6	29,4	21,5	76,3	75,6	54,8	0,422	90,4	20,7	22,4	27,9	20,3	69,7	73,4	53,0	0,264	
s +/-	26,7	24,5	6,6	6,9	1,4	1,3	31,6	30,6	24,5	0,136	26,3	9,4	9,9	7,0	3,8	21,7	19,8	14,4	0,149	
n	38	7	4	4	4	4	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
Brombach																				
mean	61,6	54,5	9,0	16,0	27,6	19,2	45,5	86,2	57,0	0,610	66,5	3,5	5,8	25,3	17,5	63,0	106,2	86,7	0,517	
s +/-	18,7	3,5	9,9	17,1	11,5	10,9	6,4	2,2	5,0	0,177	16,3	2,1	4,6	6,2	8,0	18,4	11,1	8,0	0,139	
n	22	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Weichering																				
mean	79,8	124,5	18,0	17,0	17,4	9,8	106,5	54,2	56,6	0,396	86,5	23,0	26,8	31,5	21,0	63,5	54,2	35,7	0,411	
s +/-	30,9	77,1	2,8	8,3	0,7	1,6	74,2	11,4	32,2	0,034	20,5	4,2	1,4	0,6	0,9	16,3	6,3	0,8	0,064	
n	16	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Ofnet-Höhle																				
mean	101,3	95,4	14,8	17,5	26,7	18,0	80,6	81,6	58,9	0,411	113,3	16,8	15,0	29,0	18,1	96,5	71,2	53,4	0,519	
s +/-	25,6	30,9	11,8	15,1	8,4	6,3	34,9	13,6	16,0	0,204	18,9	8,8	7,9	8,4	3,8	19,0	15,3	20,3	0,193	
n	86	15	15	15	15	15	15	15	15	15	18	18	18	18	18	18	18	18	18	

Anmerkung: Parameter sind Mittelwerte (mean) der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²)

Abkürzungen: N_{total} = Mittlere Anzahl der Merkmale auf allen analysierten Flächen (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; GL = Länge der Gruben; GB = Breite der Gruben;

NK = Dichte der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren; KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Kratzspurenlängen; R = Parameter zur Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector)

Tabelle 32. Statistische Parameter real komplexer dentaler Microwear auf menschlichen mandibularen und maxillaren Molaren (Philips XL 20 Series)

	N _{total}	M ₂ Region Facette 5						M ² Region Facette 5											
		N	NG	% Gruben	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	R	N	NG	% Gruben	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	R		
Waging																			
mean	108,3	103,2	18,9	20,4	28,5	18,0	84,3	62,0	43,4	0,342	102,9	9,8	12,0	28,7	19,4	93,8	68,9	52,5	0,458
s +/-	32,7	29,8	10,8	13,2	5,9	4,4	36,0	17,0	18,0	0,193	41,0	4,8	8,5	11,9	9,5	41,7	18,0	15,7	0,188
n	66	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12	12	13	13	13	13
Bittenbrunn																			
mean	91,8	104,2	14,0	12,8	20,4	14,6	90,2	73,8	63,9	0,516	72,3	13,0	13,2	37,1	21,7	66,7	97,3	78,9	0,541
s +/-	26,7	14,4	9,7	7,9	3,2	2,6	8,2	15,0	15,9	0,177	26,2	6,2	4,7	16,5	7,9	19,3	27,1	26,3	0,169
n	38	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7	3	3	3	3	7	7	7	7
Brombach																			
mean	61,6	76,7	1,0	1,4	47,0	36,0	76,3	100,6	89,5	0,642	78,3	4,5	5,9	18,6	12,7	73,8	88,3	67,4	0,498
s +/-	18,7	6,4	.	.	.	.	6,7	29,7	21,8	0,156	12,2	4,0	5,0	3,4	2,1	13,0	25,8	43,4	0,006
n	22	3	1	1	1	1	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Weichering																			
mean	79,8	78,0	10,0	12,8	20,6	13,9	68,0	96,6	77,2	0,399	83,3	18,7	22,2	22,8	13,5	64,7	76,6	59,2	0,433
s +/-	30,9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1,5	16,1	18,7	3,6	2,3	14,6	11,0	7,3	0,299
n	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ofnet-Höhle																			
mean	101,3	95,3	15,0	16,5	21,8	13,1	80,3	83,3	63,4	0,523	112,9	16,6	14,6	30,2	17,6	96,3	76,0	53,8	0,600
s +/-	25,6	22,1	8,1	9,3	4,9	3,8	23,6	17,0	17,6	0,153	22,2	12,5	10,5	15,9	5,6	22,4	16,2	20,2	0,118
n	86	13	13	13	13	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14	14	14

Anmerkung: Parameter sind Mittelwerte (mean) der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²)

Abkürzungen: N_{total} = Mittlere Anzahl der Merkmale auf allen analysierten Flächen (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; GL = Länge der Gruben; GB = Breite der Gruben;

NK = Dichte der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren; KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Kratzspuren; R = Parameter zur Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector)

Tabelle 33. Statistische Parameter real komplexer dentaler Microwear auf menschlichen mandibularen und maxillaren Molaren (LEO 1430 VP)

N _{total}	M ₂ Region Facette 6										M ₂ Region Facette 9									
	N	NG	% Gruben	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	KL (SD)	R	N	NG	% Gruben	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	KL (SD)	R		
Waging																				
mean	184,0	37,1	22,8	30,2	19,2	146,9	34,7	19,7	0,363	158,4	24,1	14,9	26,2	17,3	134,3	46,3	32,8	0,324		
s +/-	79,9	13,3	8,3	5,4	4,6	77,2	7,6	5,9	0,128	40,7	15,2	8,5	4,0	3,0	34,4	14,5	12,1	0,186		
n	44	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7		
Bittenbrunn																				
mean	194,4	16,8	9,1	28,2	19,5	177,7	41,1	29,9	0,412	202,3	23,0	12,7	34,9	18,3	179,3	43,1	34,2	0,256		
s +/-	53,6	15,4	8,5	7,1	7,9	55,0	6,6	8,0	0,161	34,1	25,0	14,3	26,8	4,4	53,0	5,9	8,3	0,094		
n	44	12	12	12	12	12	12	12	12	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
Brombach																				
mean	123,7	88,0	4,6	5,4	32,0	17,8	83,4	74,0	56,8	0,496	126,3	23,0	17,8	34,3	21,9	103,3	53,7	32,7	0,357	
s +/-	39,8	22,8	3,1	3,7	15,1	8,2	22,8	14,7	10,9	0,188	21,2	8,7	5,2	9,2	7,1	15,2	9,9	7,0	0,182	
n	25	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
Weichering																				
mean	122,9	130,7	18,1	15,3	25,3	14,5	112,6	50,4	38,8	0,286	118,8	16,2	14,3	20,5	102,6	61,6	44,8	0,338		
s +/-	29,4	41,0	10,5	9,5	3,8	3,2	44,3	7,2	9,9	0,135	22,3	18,1	16,9	8,4	4,7	30,5	12,8	14,3	0,209	
n	38	9	9	9	9	9	9	9	9	12	12	12	12	12	12	12	12	12		
Ofnet-Höhle																				
mean	143,1	135,4	33,1	26,0	28,6	17,7	102,2	56,4	35,3	0,587	145,7	26,9	19,3	28,3	18,3	118,8	57,2	37,4	0,506	
s +/-	50,5	52,2	20,3	12,7	5,8	3,8	47,9	19,8	18,0	0,146	43,6	13,2	8,0	4,8	2,9	38,9	12,3	11,2	0,166	
n	78	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17		
Kaufertsberg																				
mean	99,2	100,4	17,8	18,3	31,5	17,8	82,6	57,5	43,1	0,613	91,6	23,2	27,2	28,5	16,9	68,4	65,7	51,5	0,447	
s +/-	26,0	23,8	7,9	8,1	7,5	3,1	22,7	4,7	6,0	0,097	20,3	16,3	19,5	5,3	4,8	30,5	4,4	7,0	0,217	
n	39	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5		
Oldoway OH 1																				
mean	120,3	129,4	16,9	13,2	31,4	20,7	112,6	62,1	41,6	0,640	109,3	15,9	15,4	31,7	20,0	93,4	59,9	41,3	0,609	
s +/-	24,5	17,3	6,5	5,2	7,1	5,4	18,5	8,5	6,6	0,086	26,6	5,1	5,8	6,3	5,6	28,1	7,6	9,7	0,062	
n	28	9	9	9	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10		

Anmerkung: Parameter sind Mittelwerte (mean) der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²)

Abkürzungen: N_{total} = Mittlere Anzahl der Merkmale auf allen analysierten Flächen (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; GL = Länge der Gruben; GB = Breite der Gruben;

NK = Dichte der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren; KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Kratzspuren; R = Parameter zur Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector)

Tabelle 34. Statistische Parameter real komplexer dentaler Microwear auf menschlichen mandibularen und maxillaren Molaren (LEO 1430 VP)

N _{total}	M ² Region Facette 6							M ² Region Facette 9									
	N	NG	% Gruben (µm)	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	R	N	NG	% Gruben (µm)	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	R	
Waging																	
mean	144,3	50,6	37,3	29,1	18,8	93,7	37,3	24,8	0,509	198,0	23,6	14,3	29,6	19,0	174,4	31,0	0,378
s +/-	64,7	27,7	16,2	5,0	4,2	50,0	9,9	7,6	0,104	90,0	20,6	12,4	6,9	5,0	95,1	15,6	0,123
n	44	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8
Bittenbrunn																	
mean	177,3	19,3	10,1	26,5	18,3	158,0	51,4	37,0	0,503	143,2	21,8	16,3	41,1	28,7	121,3	41,0	0,489
s +/-	49,1	20,9	10,5	3,9	3,1	37,4	14,2	10,8	0,230	26,6	19,8	15,6	34,9	29,4	38,8	10,3	0,086
n	44	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Brombach																	
mean	123,7	139,3	5,5	3,3	42,8	13,7	135,7	67,2	0,596	175,8	19,3	9,2	24,5	15,9	156,5	65,7	0,442
s +/-	39,8	34,5	6,4	3,4	27,4	2,8	30,1	13,3	0,050	44,2	23,8	9,7	4,5	2,9	23,3	25,7	0,117
n	25	3	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
Weichering																	
mean	122,9	113,0	2,0	1,8	14,6	10,0	111,0	65,4	0,247	117,0	19,0	16,4	27,3	18,5	98,0	50,0	0,489
s +/-	29,4	.	.	.	.	.	.	.	.	7,2	4,4	4,5	3,2	2,9	10,5	2,9	0,047
n	38	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3
Ofnet-Höhle																	
mean	143,1	144,9	22,2	15,7	26,2	16,1	122,7	67,9	0,603	149,7	18,5	15,5	30,5	18,4	131,2	56,9	0,618
s +/-	50,5	35,9	15,2	10,2	4,0	2,5	36,7	22,1	0,128	84,9	5,9	9,2	9,3	5,5	82,4	12,6	0,152
n	78	11	11	11	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10	10	10	10
Kaufertsberg																	
mean	99,2	93,4	23,5	25,6	26,0	17,1	72,6	57,2	0,459	89,6	22,0	26,5	28,3	16,2	67,6	55,4	0,418
s +/-	26,0	25,8	19,0	16,5	8,1	4,9	29,9	11,9	0,115	14,4	12,4	17,8	3,9	2,0	25,0	4,8	0,203
n	39	9	8	8	8	8	9	9	9	5	5	5	5	5	5	5	5
Oldoway OH 1																	
mean	120,3	130,7	13,7	11,1	36,9	22,5	117,0	60,4	0,626	119,5	24,0	19,6	46,0	33,2	95,5	48,4	0,545
s +/-	24,5	46,2	2,9	3,1	7,7	5,7	43,9	8,9	0,075	9,2	17,0	12,7	11,0	10,6	7,8	4,6	0,065
n	28	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2

Anmerkung: Parameter sind Mittelwerte (mean) der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²)

Abkürzungen: N_{total} = Mittlere Anzahl der Merkmale auf allen analysierten Flächen (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; GL = Länge der Gruben; GB = Breite der Gruben;

NK = Dichte der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren; KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Kratzspurenlängen; R = Parameter zur Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector)

Tabelle 35. Statistische Parameter real komplexer dentaler Microwear auf menschlichen mandibularen und maxillaren Molaren (LEO 1430 VP)

	N _{total}	M ₂ Region Facette 5						M ² Region Facette 5											
		N	NG	% Gruben(µm)	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	R	N	NG	% Gruben(µm)	GL (µm)	GB (µm)	NK	KL (µm)	R		
Waging																			
mean	169,9	176,0	10,7	7,8	26,4	14,9	165,3	59,0	43,8	0,512	149,8	38,5	20,5	24,8	18,3	111,3	59,6	47,0	0,541
s +/-	71,2	77,2	6,7	6,9	8,9	5,0	78,8	20,2	14,8	0,148	70,0	35,5	14,6	3,6	5,6	39,0	33,3	26,5	0,172
n	44	9	9	9	9	9	9	9	9	9	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Bittenbrunn																			
mean	182,7	208,4	22,8	15,1	31,2	20,5	185,6	42,0	32,0	0,384	150,2	15,8	10,8	31,9	19,7	134,3	50,6	39,1	0,523
s +/-	49,1	60,2	27,7	20,6	10,2	9,3	84,3	3,7	2,3	0,149	26,5	8,1	6,5	8,3	7,5	27,0	11,0	14,0	0,224
n	44	8	8	8	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Brombach																			
mean	123,7	111,8	24,0	23,2	35,8	20,4	87,8	57,2	40,6	0,356	107,5	2,0	1,5	31,1	21,3	106,5	66,8	44,6	0,653
s +/-	39,8	36,4	14,2	16,9	9,0	2,6	40,7	19,0	14,1	0,060	31,8	.	.	.	.	30,4	14,2	5,4	0,019
n	25	5	5	5	5	5	5	5	5	5	2	1	1	1	1	2	2	2	2
Weichering																			
mean	122,9	124,3	11,3	11,1	30,1	18,6	113,1	58,5	41,7	0,274	115,0	7,0	6,1	26,2	20,0	108,0	83,2	58,2	0,580
s +/-	29,4	33,3	11,3	13,7	8,1	8,1	40,1	16,2	18,8	0,170	.	.	.	.	.	.	.	.	.
n	38	12	12	12	12	12	12	12	12	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ofnet-Höhle																			
mean	143,1	142,4	17,5	14,5	26,3	16,9	126,4	65,8	45,6	0,512	144,0	19,1	15,3	28,4	17,3	124,9	67,3	50,0	0,632
s +/-	50,5	50,7	12,0	10,6	5,0	3,4	56,4	18,3	16,0	0,170	38,0	20,6	18,0	5,7	2,9	48,7	18,9	22,2	0,104
n	78	12	11	11	11	11	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Kaufertsberg																			
mean	99,2	133,5	9,6	7,3	31,0	16,7	125,5	67,3	54,3	0,526	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
s +/-	26,0	29,3	7,7	7,0	7,2	3,9	28,8	10,4	10,9	0,120									
n	39	6	5	5	5	5	6	6	6	6									
Oldoway OH 1																			
mean	120,3	113,5	23,0	20,8	26,2	17,4	90,5	56,5	44,5	0,198	126,5	19,5	16,0	41,7	25,1	107,0	66,5	44,3	0,746
s +/-	24,5	20,5	2,8	6,3	6,1	2,3	23,3	3,0	0,1	0,014	14,8	9,2	9,1	0,3	3,1	24,0	2,4	1,2	0,098
n	28	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Anmerkung: Parameter sind Mittelwerte (mean) der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²)

Abkürzungen: N_{total} = Mittlere Anzahl der Merkmale auf allen analysierten Flächen (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; GL = Länge der Gruben; GB = Breite der Gruben;

NK = Dichte der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren; KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Kratzspuren; R = Parameter zur Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector)

4.4.4 *Multivariate (MANOVA) und univariate (ANOVA) Varianzanalyse*

In einer multivariaten Varianzanalyse (MANOVA) wurde untersucht, ob und auf welchem Facettenareal statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Fundkomplexen zu erwarten waren. Nur vollständige Datenfiles, d.h. Facettenareale, welche Werte aller statistischen Parameter aufwiesen (z.B. fehlten auf vereinzelt Arealen Gruben) gingen in diese Analyse ein. Signifikante Unterschiede konnten am Philips REM für die Facetten 5 und 6 auf den Unterkiefermolaren und für die Facetten 5 und 9 auf den Oberkiefermolaren auf einem Signifikanzniveau von 5 % gefunden werden (Tabelle 36). Statistisch nicht signifikant waren die Ergebnisse auf den Facetten 9 im Unterkiefer und 6 im Oberkiefer. Auf den Facettenarealen des LEO 1430 VP konnten statistisch hochsignifikante Unterschiede (Signifikanzniveau 1 % bzw. 0,1 %) für die Facetten 5, 6 und 9 auf den Unterkiefermolaren und für die Facetten 6 (Signifikanzniveau 0,1 %) und 9 (Signifikanzniveau 5 %) auf den Oberkiefermolaren gefunden werden (Tabelle 39). Unsicher signifikant (Signifikanzniveau 10 %) waren die Ergebnisse auf der Oberkieferfacette 5.

Die ermutigenden Ergebnisse rechtfertigten eine weitergehende Analyse um zu klären, welche dentalen Microwear Parameter informativ waren, d.h. für die signifikanten Unterschiede verantwortlich und damit für eine statistische Unterscheidung von dentaler Microwear von Individuen unterschiedlicher Fundkomplexe geeignet sein können. Eine univariate Varianzanalyse (ANOVA) wurde getrennt für alle Facetten durchgeführt (Philips XL 20 Series Tabellen 37 und 38; LEO 1430 VP Tabellen 40 und 41). Auf den Facetten am Philips XL 20 und am LEO 1430 VP konnten statistisch signifikante Unterschiede dentaler Microwear Parameter mindestens auf einem Signifikanzniveau von 5 % gefunden werden, welche in Tabelle 42 zusammengefasst sind.

In der Praxis bedeutete dies, dass sich mindestens eine Paarung aller untersuchten Fundkomplexe in genau diesem einen Merkmalsparameter signifikant unterschieden. In die univariate Analyse (ANOVA) konnten alle Datenfiles mit einbezogen werden, welche je Fundkomplex mehr als zwei analysierte Areale aufwiesen. Dies erklärt zum Teil Unterschiede in der Signifikanz einzelner Parameter, welche bei der multivariaten Analyse (MANOVA) nicht detektierbar waren.

Tabelle 36. Multivariate Varianzanalyse (MANOVA, alle Gruppen mit $n > 2$, Philips XL 20 Series)

		Wert	F-Wert	df	Fehler df	Signifikanz
M ₂ Facette 5	Pillai-Spur	0,847	2,020	16	44,000	0,033
	Wilks-Lambda	0,322	2,001	16	42,000	0,037
	Hotelling-Spur	1,581	1,976	16	40,000	0,041
M ₂ Facette 6	Pillai-Spur	1,544	2,357	32	120,000	0,000
	Wilks-Lambda	0,094	2,847	32	101,166	0,000
	Hotelling-Spur	4,338	3,456	32	102,000	0,000
M ₂ Facette 9	Pillai-Spur	0,980	1,257	32	124,000	0,188
	Wilks-Lambda	0,315	1,206	32	104,854	0,238
	Hotelling-Spur	1,382	1,145	32	106,000	0,299
M ² Facette 5	Pillai-Spur	1,441	1,901	32	108,000	0,008
	Wilks-Lambda	0,129	2,089	32	90,103	0,004
	Hotelling-Spur	3,191	2,244	32	90,000	0,002
M ² Facette 6	Pillai-Spur	1,223	1,267	32	92,000	0,192
	Wilks-Lambda	0,190	1,338	32	75,352	0,152
	Hotelling-Spur	2,442	1,412	32	74,000	0,113
M ² Facette 9	Pillai-Spur	1,215	1,526	32	112,000	0,055
	Wilks-Lambda	0,198	1,616	32	93,791	0,039
	Hotelling-Spur	2,264	1,662	32	94,000	0,031

Tabelle 37. Univariater F-test auf Gleichheit der Mittelwerte auf den Facetten der Unterkiefermolaren (ANOVA, alle Gruppen mit $n > 2$, Philips XL 20 Series)

M ₂ Facette 5	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	509,994	2	254,997	0,412	0,666
NG	136,819	2	68,409	0,745	0,484
% G	236,274	2	118,137	0,973	0,390
GL	384,607	2	192,304	7,155	0,003
GB	159,319	2	79,659	5,193	0,012
NK	365,210	2	182,605	0,227	0,798
KL	2947,411	2	1473,706	5,257	0,012
KL (SD)	3057,304	2	1528,652	4,959	0,014
R	0,244	2	0,122	3,984	0,030

M ₂ Facette 6	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	25322,107	4	6330,527	12,914	0,000
NG	887,754	4	221,939	1,355	0,270
% G	1556,821	4	389,205	1,548	0,211
GL	2539,586	4	634,896	3,039	0,030
GB	839,479	4	209,870	5,319	0,002
NK	21924,209	4	5481,052	7,880	0,000
KL	7919,377	4	1979,844	6,124	0,001
KL (SD)	4273,727	4	1068,432	2,434	0,066
R	0,232	4	0,058	1,938	0,127

M ₂ Facette 9	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	10129,627	4	2532,407	3,607	0,014
NG	1312,160	4	328,040	1,824	0,146
% G	955,768	4	238,942	1,269	0,301
GL	221,256	4	55,314	1,058	0,392
GB	134,923	4	33,731	1,475	0,231
NK	6045,260	4	1511,315	2,278	0,080
KL	5607,094	4	1401,774	3,251	0,022
KL (SD)	2978,216	4	744,554	2,575	0,054
R	0,397	4	0,099	3,183	0,024

Tabelle 38. Univariater F-test auf Gleichheit der Mittelwerte auf den Facetten der Oberkiefermolaren (ANOVA, alle Gruppen mit $n > 2$, Philips XL 20 Series)

M ² Facette 5	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	10247,352	4	2561,838	2,960	0,033
NG	691,008	4	172,752	1,835	0,147
% G	497,644	4	124,411	1,263	0,305
GL	753,436	4	188,359	1,076	0,385
GB	234,806	4	58,702	1,183	0,338
NK	6850,508	4	1712,627	2,020	0,112
KL	4168,531	4	1042,133	2,691	0,046
KL (SD)	3990,811	4	997,703	1,975	0,119
R	0,168	4	0,042	1,578	0,201

M ² Facette 6	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	7440,657	4	1860,164	1,909	0,135
NG	1228,930	4	307,232	2,344	0,080
% G	996,581	4	249,145	1,353	0,276
GL	201,050	4	50,263	0,955	0,448
GB	188,152	4	47,038	1,520	0,224
NK	4888,302	4	1222,075	0,940	0,454
KL	4319,635	4	1079,909	3,153	0,028
KL (SD)	1936,594	4	484,148	1,492	0,230
R	0,073	4	0,018	0,675	0,615

M ² Facette 9	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	6318,654	4	1579,663	1,813	0,151
NG	577,896	4	144,474	1,858	0,142
% G	908,507	4	227,127	1,967	0,123
GL	50,791	4	12,698	0,193	0,941
GB	59,721	4	14,930	0,697	0,599
NK	5908,129	4	1477,032	1,829	0,148
KL	6116,486	4	1529,122	7,006	0,000
KL (SD)	5815,660	4	1453,915	5,015	0,003
R	0,390	4	0,097	3,193	0,026

Abkürzungen: N = Anzahl der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; % G = % Anteil der Gruben an der Gesamtanzahl; GL = Länge der Gruben (µm); GB = Breite der Gruben; NK = Anzahl der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren (µm); KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Länge der Kratzspuren; R = Maß für die Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector)

Tabelle 39. Multivariate Varianzanalyse (MANOVA, alle Gruppen mit $n > 2$, LEO 1430 VP)

		Wert	F-Wert	df	Fehler df	Signifikanz
M ₂ Facette 5	Pillai-Spur	1,433	1,687	48	258,000	0,006
	Wilks-Lambda	0,155	1,837	48	191,038	0,002
	Hotelling-Spur	2,572	1,947	48	218,000	0,001
M ₂ Facette 6	Pillai-trace	1,941	3,526	48	354,000	0,000
	Wilks-Lambda	,048	4,814	48	269,765	0,000
	Hotelling-traces	5,497	5,994	48	314,000	0,000
M ₂ Facette 9	Pillai-trace	1,669	2,841	48	354,000	0,000
	Wilks-Lambda	,099	3,377	48	269,765	0,000
	Hotelling-traces	3,445	3,756	48	314,000	0,000
M ² Facette 5	Pillai-Spur	1,832	1,301	48	90,000	0,153
	Wilks-Lambda	0,057	1,481	48	63,819	0,079
	Hotelling-Spur	5,092	1,579	48	62,000	0,052
M ² Facette 6	Pillai-Spur	2,297	2,249	48	174,000	0,000
	Wilks-Lambda	0,030	2,663	48	122,152	0,000
	Hotelling-Spur	6,358	2,958	48	134,000	0,000
M ² Facette 9	Pillai-Spur	1,761	1,507	48	174,000	0,030
	Wilks-Lambda	0,092	1,589	48	122,152	0,022
	Hotelling-Spur	3,425	1,594	48	134,000	0,020

Tabelle 40. Univariater F-test auf Gleichheit der Mittelwerte auf den Facetten der Unterkiefermolaren (ANOVA, alle Gruppen mit $n > 2$, LEO 1430 VP)

M ₂ Facette 5	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	53465,834	6	8910,972	3,387	0,007
NG	1534,073	6	255,679	1,194	0,327
% G	1153,244	6	192,207	1,092	0,382
GL	462,559	6	77,093	1,190	0,329
GB	189,523	6	31,587	0,821	0,560
NK	50982,751	6	8497,125	2,445	0,039
KL	3315,310	6	552,552	2,181	0,062
KL (SD)	1876,566	6	312,761	1,493	0,201
R	0,629	6	0,105	4,669	0,001

M ₂ Facette 6	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	82420,508	6	13736,751	6,157	,000
NG	5927,033	6	987,839	4,954	,000
% G	3370,267	6	561,711	6,202	,000
GL	248,490	6	41,415	,850	,536
GB	231,779	6	38,630	1,388	,234
NK	75423,714	6	12570,619	5,869	,000
KL	7698,362	6	1283,060	8,531	,000
KL (SD)	5253,764	6	875,627	6,689	,000
R	,939	6	,156	8,083	,000

M ₂ Facette 9	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	61290,531	6	10215,088	9,988	,000
NG	1269,797	6	211,633	,930	,480
% G	1325,579	6	220,930	1,505	,192
GL	556,219	6	92,703	,967	,455
GB	177,027	6	29,504	1,469	,204
NK	55695,335	6	9282,556	8,179	,000
KL	2597,960	6	432,993	3,790	,003
KL (SD)	2599,628	6	433,271	3,773	,003
R	,815	6	,136	5,102	,000

Tabelle 41. Univariater F-test auf Gleichheit der Mittelwerte auf den Facetten der Oberkiefermolaren (ANOVA, alle Gruppen mit $n > 2$, LEO 1430 VP)

M ² Facette 5	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	1435,693	4	358,923	0,169	0,952
NG	2578,758	4	644,689	1,182	0,349
% G	542,681	4	135,670	0,600	0,667
GL	165,239	4	41,310	1,123	0,374
GB	34,300	4	8,575	0,329	0,855
NK	1874,184	4	468,546	0,268	0,895
KL	1594,621	4	398,655	0,818	0,529
KL (SD)	630,735	4	157,684	0,334	0,852
R	0,065	4	0,016	0,641	0,640

M ² Facette 6	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	28549,173	6	4758,196	2,674	0,032
NG	6549,202	6	1091,534	2,900	0,023
% G	4262,561	6	710,427	4,310	0,003
GL	942,780	6	157,130	2,833	0,026
GB	197,439	6	32,906	2,259	0,063
NK	32061,101	6	5343,517	3,650	0,007
KL	4616,405	6	769,401	3,118	0,016
KL (SD)	4441,418	6	740,236	3,434	0,010
R	0,232	6	0,039	2,073	0,083

M ² Facette 9	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
N	44724,117	6	7454,019	1,752	0,142
NG	169,015	6	28,169	0,111	0,995
% G	779,404	6	129,901	0,838	0,550
GL	1312,106	6	218,684	0,908	0,502
GB	980,555	6	163,426	1,027	0,427
NK	43865,965	6	7310,994	1,662	0,164
KL	2347,347	6	391,224	2,101	0,082
KL (SD)	1584,341	6	264,057	2,156	0,075
R	0,304	6	0,051	2,779	0,028

Abkürzungen: N = Anzahl der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; % G = % Anteil der Gruben an der Gesamtanzahl; GL = Länge der Gruben (µm); GB = Breite der Gruben; NK = Anzahl der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren (µm); KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Länge der Kratzspuren; R = Maß für die Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector)

Tabelle 42. Zusammenfassung der univariaten Varianzanalyse (ANOVA) der statistisch signifikanten Parameter der DMA (Signifikanzniveau ≤ 5 %)

Facette	u5	u6	u9	o5	o6	o9
Philips XL 20 Series	GL, GB, KL, KL (SD), R	N, GL, GB, NK, KL	N, KL, R	N, KL	KL	KL, KL (SD), R
LEO 1430 VP	N, NK, R	N, NG, % G, NK, KL, KL (SD), R	N, NK, KL, KL (SD), R	n.s.	N, NG, %G, GL; NK, KL, KL (SD)	R

Abkürzungen: N = Anzahl der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; % G = % Anteil der Gruben an der Gesamtanzahl; GL = Länge der Gruben (µm); GB = Breite der Gruben; NK = Anzahl der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren (µm); KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Länge der Kratzspuren; R = Maß für die Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector)

Es konnte festgestellt werden, dass nahezu auf allen untersuchten Facetten statistische Unterschiede einzelner Parameter zu beobachten waren. Einige Facetten zeigten solche Unterschiede für mehrere Parameter, wobei die Merkmalsdichte (N), die hiervon abhängige Kratzspurdichte (NK), die Kratzspurlänge (KL) und die Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (R) am häufigsten detektierbar waren.

Im Rahmen der Untersuchungen an fossilen Zahnoberflächen hominider und hominoider Individuen von besonderer Bedeutung sind Veränderungen in der Dichte und dem Anteil der Gruben auf molaren Zahnoberflächen (Grine 1987, Teaford 1991). Unsere Ergebnisse der menschlichen Zahnoberflächen zeigten, dass die mittleren Abweichungen der Grubendichte am Beispiel der Facetten u6 und u9 (Abb. 115) und Spannweiten der Mittelwerte der Grubenanteile (Abb. 116 Facetten u6 und o6, Abb. 117 Facetten u9 und o9) von Waging (mittlere Gesamt-Grubendichte: 11,3 bis 18,1 / mittlerer Grubenanteil: 10,7 bis 50,6 %), Bittenbrunn (15,8 bis 23,0 / 9,1 bis 16,3 %), Brombach (4,6 bis 24,0 / 3,3 bis 23,2 %), Weichering (11,8 bis 18,1 / 13,7 bis 16,4 %) und Ofnet-Höhle (17,5 bis 33,1 / 14,5 bis 26,0 %) unterschiedlich und deutlich ausgeprägt waren. Dies galt ebenfalls für das Individuum vom Kaufertsberg (9,6 bis 23,5 / 7,3 bis 27,2). Die Grubendichte und der -anteil bei dem Hominiden OH1 aus der Oldoway-Schlucht waren etwas homogener (13,7 bis 24,0 / 11,1 bis 20,8) und lagen im Vergleich im unteren Bereich. Statistisch signifikant unterschieden sich die Dichte (NG) und der Anteil der Gruben (% G) auf den Facetten 6 der Ober- und Unterkiefermolaren am LEO 1430 VP, alle anderen Areale wiesen keine statistisch relevanten Unterschiede auf (Tabellen 37, 38, 40, 41, Übersicht Tabelle 42).

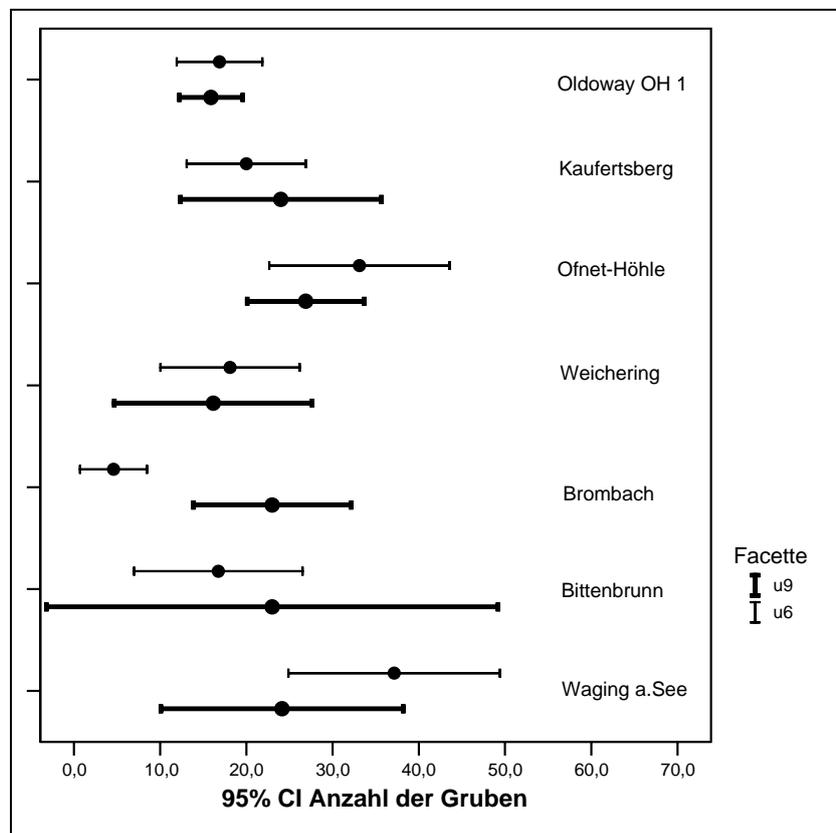


Abb. 115 Mittlere Dichte der Gruben (NG) am Beispiel der Unterkieferfacetten 6 und 9 (LEO 1430 VP)

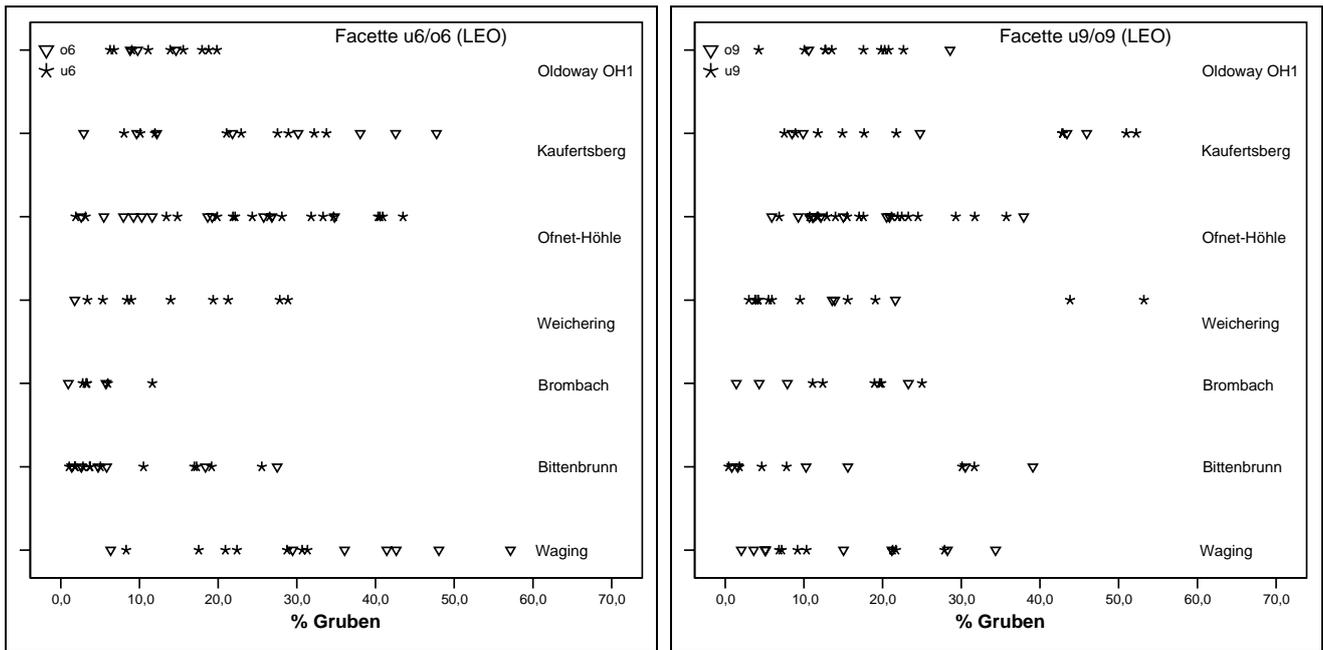


Abb. 116 Beispiel für die Streuung des Anteiles der Gruben an der Merkmalsdichte bei statistischer Signifikanz (links Facetten u6 und o6) und bei fehlender statistischer Signifikanz (rechts Facetten u9 und o9)

Die mittleren Längen und Breiten der Gruben waren nur am Philips-Gerät auf den Facetten u5 und u6 und am LEO-Gerät für die Facette o6 statistisch unterscheidbar. Im Vergleich der Ergebnisse beider Rastergeräte war deutlich der Effekt der unterschiedlichen Auflösung der REM-Aufnahmen darstellbar. Es zeigte sich die abhängig vom Fundort unterschiedlich ausgeprägte Tendenz, dass auf den LEO-Aufnahmen (Abb.117, 118 jeweils rechts) wesentlich häufiger, jedoch im Mittel kürzere Kratzspuren auf allen Facetten auftraten (s.a. Kap. III B 3.3). Hierzu zählten auch Unterbrechungen und Überlagerungen von Kratzspuren, welche bei der Analyse der LEO-Aufnahmen besser zu differenzieren waren. Offensichtlich ermöglichte die feinere Auflösung des LEO 1430 VP die Erkennung von linearen Merkmalen mit deutlich geringeren Abmessungen. Der Grad der Signifikanz bezüglich der Anzahl der Kratzspuren (NK) und der Kratzspurlängen (KL) war stark unterschieden. Während die mittleren Kratzspurlängen beim Philips-Gerät auf allen sechs untersuchten Facetten signifikante Unterschiede erbrachten (Signifikanzniveau $\leq 5\%$), galt dies nur für die Facetten u6 und u9 der Unterkiefermolaren und für die Facette o6 auf den Oberkiefermolaren. Die mittlere Dichte der Microwear-Merkmale (N), welche zu einem Anteil mit der Erkennung von Kratzspuren verbunden ist, zeigten entsprechende Resultate.

Zur Beschreibung der Verteilung der Orientierung der Kratzspuren dient der von Ungar (1994) definierte Parameter R (length of the mean striation vector), als Maß für die Konzentration von Kratzspurorientierungen bzw. die Homogenität der Orientierung der Kratzspuren. Je höher der Wert (max = 1,000), desto stärker ähnelt die Verteilung einer Normalverteilung, je niedriger der Wert, desto zufälliger ist die Orientierung der Kratzspuren auf einer kreisförmigen Skala.

Dieses Maß der Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (R) erscheint in mehrfacher Hinsicht für die Beschreibung der entstandenen Oberflächen interessant (Abb. 119). Einerseits informiert es über die Vielfalt der Orientierung der Kratzspuren, und ermöglicht andererseits daraus die Erfassung einer funktionellen Komponente beim Kauvorgang.

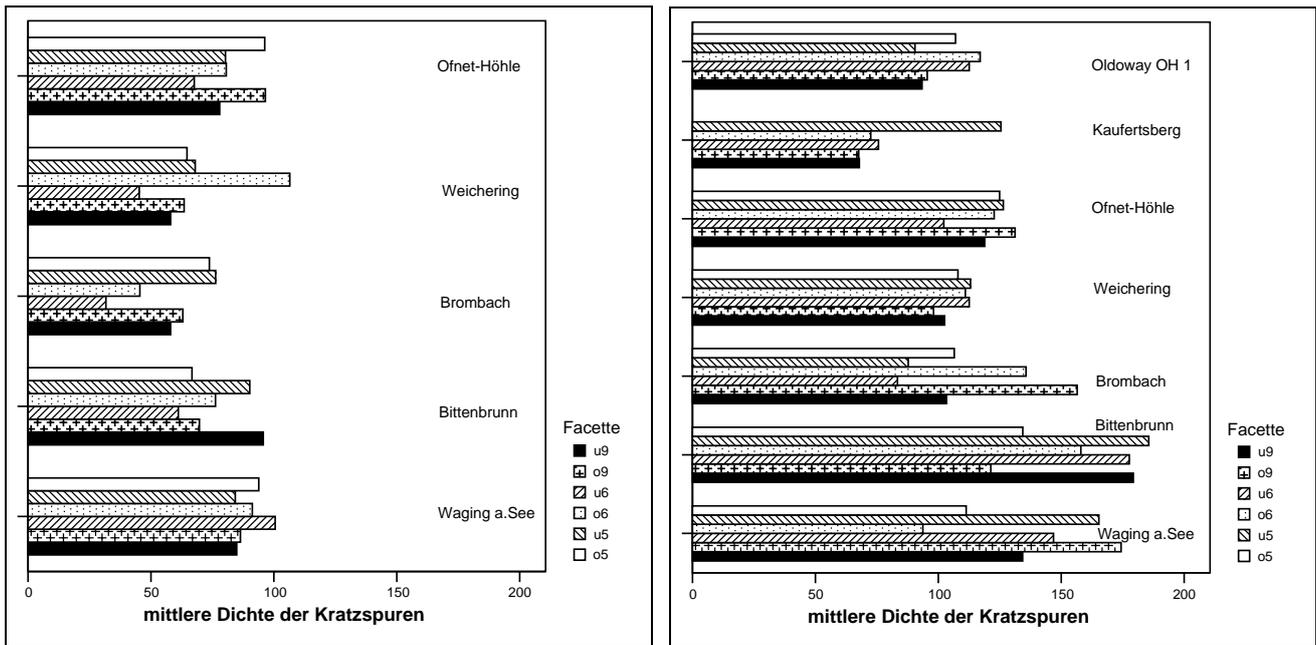


Abb. 117 Mittlere Dichte der Kratzspuren im Vergleich (links Philips XL 20 Series, rechts LEO 1430 VP)

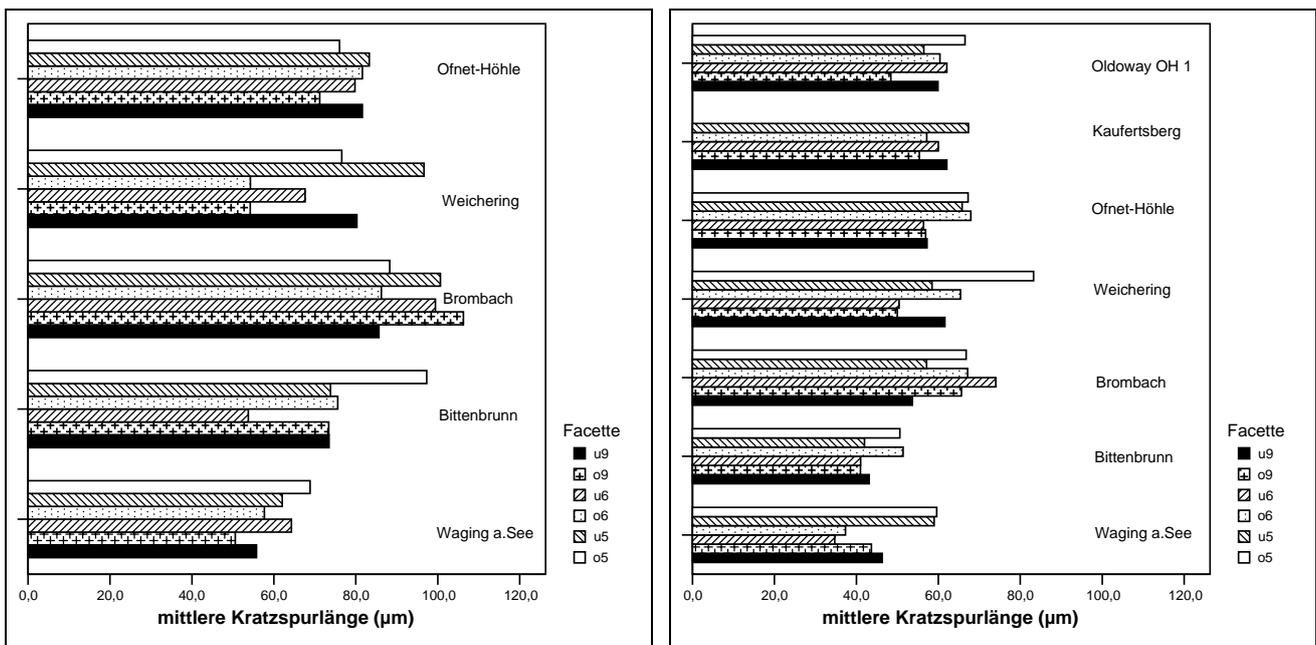


Abb. 118 Mittlere Kratzspurlänge im Vergleich (links Philips XL 20 Series, rechts LEO 1430 VP)

R kann als ein Indikator genutzt werden, mit welchem Hypothesen bezüglich der Intensität und Flexibilität, mit welcher der Unterkiefer, und damit die kauenden Oberflächen der in den Alveolen verankerten Molaren, von der Führung durch das Kronenrelief der Oberkieferzähne beeinflusst wurde, auf ihre Plausibilität hin überprüft werden. Eine getrennte Betrachtung bestimmter Kategorien an Kratzspurlängen, wurde in dieser Untersuchung nicht durchgeführt, würde weitere Aussagen über die Entstehung der Kratzspuren zulassen.

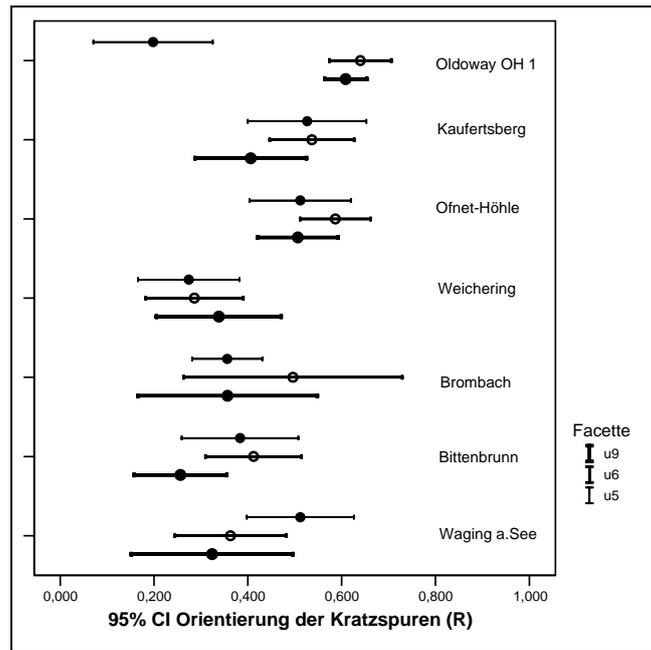


Abb. 119 Verteilung der Orientierung der Kratzspuren am Beispiel der Unterkieferfacetten (LEO 1430 VP)

Für die untersuchten Fundorte ergab der Parameter R relativ homogene, statistisch signifikante Ergebnisse (Abb. 119, Signifikanzniveau 5 %). Ausnahmen der Homogenität zeigte das Individuum der Oldoway-Schlucht (Facette u5). Die ältesten Stichproben (Ofnet-Höhle, Kaufertsberg) zeigten die höchsten Werte.

4.4.5 Paarweiser statistischer Vergleich (Tukey HSD-Test) und kanonische Diskriminanzanalyse

Zu klären war, welche Parameter, bzw. deren Kombinationen geeignete Indikatoren darstellten, die Zahnoberflächen von Individuen zu charakterisieren, zu identifizieren und zu differenzieren, welche zeitlich getrennt in der gleichen Region (diachron) und räumlich getrennt zur gleichen Zeit (synchron) gelebt hatten. Durchgeführt wurde ein paarweiser statistischer Vergleich (Tukey HSD-Test) der im univariaten F-Test ermittelten signifikanten Parameter. Fundortpaare mit signifikanten Unterschieden sind in den Tabellen 43 - 44 (Philips XL 20 Series) und Tabellen 45 – 47 (LEO 1430 VP) dunkel schattiert (Signifikanzniveau $\leq 5\%$). Es konnten signifikante z.T. systematische Unterschiede ($S \leq 0,050$), aber auch große Übereinstimmungen ($S \geq 0,900$) gefunden werden.

Mit dem Ziel, in einer kanonischen Diskriminanzanalyse diejenigen informativen Parameter zu kombinieren, welche zu einer statistisch sicheren Klassifikation dentaler Oberflächen führen könnten, wurden drei Gruppierungen erstellt: Gruppierung I (Gruppe Donauregion: Ofnet-Höhle, Weichering, Bittenbrunn), Gruppierung II Einzelfunde (Gruppierung I mit Integration der Einzelindividuen vom Kaufertsberg und der Oldoway-Schlucht als unbekannt zuzuordnende Fälle) und Gruppierung III (Gruppe frühes Mittelalter: Waging a. See, Bittenbrunn, Brombach). Gruppierung I sollte Indikatoren dentaler Microwear im diachronen Verlauf für Individuen aus einer eng umschriebenen geographischen Region aufzeigen, Gruppierung II Einzelfunde diente zur Klassifizierung der Einzelindividuen und Gruppierung III sollte Indikatoren dentaler Microwear für eine Differenzierung synchron lebender Individuen in unterschiedlichen geographischen Lebensräumen anzeigen.

Tabelle 43. Paarweiser statistischer Vergleich (Tukey HSD) der mittleren Parameter der dentalen Microwear (Philips XL 20 Series)

	N		GL		GB		NK		KL		KL (SD)		R	
	MD	S	MD	S										
M₂ Region Facette 5														
Waging	8,114	0,016	3,447	0,233					-11,799	0,386	-20,504	0,085	-0,175	0,157
Ofnet-Höhle	6,665	0,008	4,885	0,010					-21,274	0,008	-19,975	0,019	-0,181	0,034
Bittenbrunn Ofnet-Höhle	-1,450	0,857	1,438	0,767					-9,475	0,537	0,529	0,998	-0,007	0,997
M₂ Region Facette 6														
Waging	29,652	0,085	4,018	0,981	-0,980	0,998	39,379	0,043	10,527	0,777				
Brombach	75,985	0,000	-19,728	0,077	-13,127	0,002	68,879	0,000	-35,160	0,004				
Weichering	56,568	0,001	1,483	1,000	-4,413	0,750	55,295	0,009	-3,356	0,998				
Ofnet-Höhle	31,235	0,015	3,559	0,976	-0,159	1,000	32,962	0,038	-15,503	0,258				
Bittenbrunn Brombach	46,333	0,008	-23,747	0,054	-12,147	0,016	29,500	0,318	-45,687	0,001				
Weichering	26,917	0,345	-2,535	0,999	-3,433	0,914	15,917	0,881	-13,883	0,754				
Ofnet-Höhle	1,583	1,000	-0,459	1,000	0,822	0,999	-6,417	0,988	-26,030	0,048				
Brombach Weichering	-19,417	0,657	21,212	0,178	8,714	0,224	-13,583	0,929	31,804	0,069				
Ofnet-Höhle	-44,750	0,002	23,288	0,022	12,968	0,002	-35,917	0,071	19,657	0,209				
Weichering Ofnet-Höhle	-25,333	0,296	2,076	0,999	4,254	0,766	-22,333	0,590	-12,148	0,768				
M₂ Region Facette 9														
Waging	2,167	1,000							-17,718	0,443			-0,238	0,074
Brombach	43,967	0,028							-29,867	0,073			0,048	0,986
Weichering	37,667	0,122							-24,508	0,266			-0,199	0,309
Ofnet-Höhle	9,452	0,892							-25,828	0,025			-0,133	0,327
Bittenbrunn Brombach	41,800	0,091							-12,149	0,868			0,286	0,078
Weichering	35,500	0,253							-6,790	0,986			0,039	0,997
Ofnet-Höhle	7,286	0,979							-8,110	0,929			0,105	0,739
Brombach Weichering	-6,300	0,996							5,359	0,995			-0,247	0,249
Ofnet-Höhle	-34,514	0,113							4,039	0,996			-0,181	0,303
Weichering Ofnet-Höhle	-28,214	0,347							-1,320	1,000			0,066	0,964

Abkürzungen: N = Anzahl der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; % G = % Anteil der Gruben an der Gesamtzahl der Merkmale; GL = Länge der Gruben (µm); NK = Anzahl der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren (µm); KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Länge der Kratzspuren; R = Maß für die Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector); Schattierung Signifikanzniveau ≤ 5 %.

Tabelle 44. Paarweiser statistischer Vergleich (Tukey HSD) der mittleren Parameter der dentalen Microwear (Philips XL 20 Series)

	N			KL			KL (SD)			R		
	MD	S		MD	S		MD	S		MD	S	
M² Region Facette 5												
Waging	30,637	0,195	-28,465	0,030								
Brombach	24,673	0,590	-19,432	0,431								
Weichering	19,590	0,835	-7,723	0,972								
Ofnet-Höhle	-10,005	0,901	-7,163	0,877								
Bittenbrunn Brombach	-5,964	0,998	9,033	0,947								
Weichering	-11,048	0,982	20,742	0,552								
Ofnet-Höhle	-40,643	0,038	21,302	0,156								
Brombach Weichering	-5,083	0,999	11,709	0,935								
Ofnet-Höhle	-34,679	0,251	12,269	0,806								
Weichering Ofnet-Höhle	-29,595	0,519	0,560	1,000								
M² Region Facette 6												
Waging												
Bittenbrunn			-17,884	0,330								
Brombach			-28,549	0,303								
Weichering			3,441	0,999								
Ofnet-Höhle			-23,912	0,034								
Bittenbrunn Brombach			-10,665	0,951								
Weichering			21,325	0,609								
Ofnet-Höhle			-6,028	0,952								
Brombach Weichering			31,990	0,433								
Ofnet-Höhle			4,637	0,997								
Weichering Ofnet-Höhle			-27,353	0,308								
M² Region Facette 9												
Waging												
Bittenbrunn			-22,790	0,041	-20,511	0,163	0,097	0,821				
Brombach			-55,666	0,000	-54,170	0,003	-0,156	0,788				
Weichering			-3,636	0,998	-3,162	0,999	-0,050	0,996				
Ofnet-Höhle			-20,600	0,020	-20,887	0,050	-0,158	0,231				
Bittenbrunn Brombach			-32,876	0,065	-33,659	0,124	-0,253	0,388				
Weichering			19,154	0,498	17,349	0,710	-0,147	0,832				
Ofnet-Höhle			2,190	0,997	-0,376	1,000	-0,255	0,020				
Brombach Weichering			52,030	0,011	51,008	0,039	0,107	0,973				
Ofnet-Höhle			35,067	0,025	33,283	0,090	-0,002	1,000				
Weichering Ofnet-Höhle			-16,963	0,545	-17,724	0,634	-0,108	0,918				

Abkürzungen: N = Anzahl der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; % G = % Anteil der Gruben an der Gesamtzahl der Merkmale; GL = Länge der Gruben (µm); NK = Anzahl der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren (µm); KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Länge der Kratzspuren; R = Maß für die Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector); Schattierung Signifikanzniveau ≤ 5 %.

Tabelle 45. Paarweiser statistischer Vergleich (Tukey HSD) der mittleren Parameter der dentalen Microwear (LEO 1430 VP)

	N		NG		% G		NK		KL		KL (SD)		R		
	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	
M₂ Region Facette 6															
Waging	-10,417	0,999	20,393	0,052	13,728	0,052	-30,810	0,800	-6,325	0,930	-10,146	0,511	-0,049	0,989	
Brombach	96,000	0,016	32,543	0,004	17,458	0,040	63,457	0,242	-39,310	0,000	-37,082	0,000	-0,133	0,661	
Weichering	53,333	0,290	19,032	0,123	7,582	0,695	34,302	0,761	-15,677	0,165	-19,102	0,025	0,077	0,928	
Ofnet-Höhle	48,647	0,264	4,025	0,995	-3,113	0,990	44,622	0,339	-21,661	0,004	-15,552	0,053	-0,224	0,012	
Bittenbrunn	106,417	0,001	12,150	0,672	3,730	0,990	94,267	0,005	-32,985	0,000	-26,936	0,001	-0,084	0,915	
Weichering	63,750	0,048	-1,361	1,000	-6,146	0,764	65,111	0,034	-9,352	0,600	-8,956	0,570	0,126	0,395	
Ofnet-Höhle	59,064	0,024	-16,368	0,047	-16,841	0,000	75,431	0,001	-15,336	0,024	-5,407	0,870	-0,174	0,024	
Brombach	42,667	0,670	-13,511	0,609	-9,876	0,514	-29,156	0,916	23,633	0,017	17,980	0,088	0,210	0,115	
Ofnet-Höhle	-47,353	0,443	-28,518	0,003	-20,571	0,001	-18,835	0,984	17,649	0,086	21,530	0,008	-0,090	0,859	
Weichering	Ofnet-Höhle	-4,686	1,000	-15,007	0,151	-10,695	0,109	10,320	0,998	-5,984	0,898	3,549	0,988	-0,300	0,000
M₂ Region Facette 9															
Waging	-43,905	0,189					-45,048	0,215	3,203	0,998	-1,409	1,000	0,068	0,989	
Brombach	32,095	0,551					30,952	0,650	-7,362	0,876	0,097	1,000	-0,033	1,000	
Weichering	39,679	0,141					31,702	0,438	-15,280	0,056	-11,934	0,242	-0,014	1,000	
Ofnet-Höhle	12,723	0,973					15,462	0,947	-10,931	0,272	-4,527	0,964	-0,183	0,180	
Bittenbrunn	76,000	0,002					76,000	0,004	-10,565	0,611	1,506	1,000	-0,101	0,935	
Weichering	83,583	0,000					76,750	0,000	-18,483	0,016	-10,525	0,447	-0,082	0,951	
Ofnet-Höhle	56,627	0,007					60,510	0,006	-14,134	0,095	-3,118	0,996	-0,250	0,031	
Brombach	7,583	0,999					0,750	1,000	-7,918	0,754	-12,031	0,287	0,018	1,000	
Ofnet-Höhle	-19,373	0,860					-15,490	0,959	-3,569	0,992	-4,624	0,970	-0,150	0,467	
Weichering	Ofnet-Höhle	-26,956	0,292				-16,240	0,859	4,348	0,932	7,407	0,531	-0,168	0,107	

Abkürzungen: N = Anzahl der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; % G = % Anteil der Gruben an der Gesamtzahl der Merkmale; GL = Länge der Gruben (µm); NK = Anzahl der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren (µm); KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Länge der Kratzspuren; R = Maß für die Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector); Schattierung Signifikanzniveau ≤ 5 %.

Tabelle 46. Paarweiser statistischer Vergleich (Tukey HSD) der mittleren Parameter der dentalen Microwear (LEO 1430 VP)

M ₂ Region Facette 5	N		NK		R	
	MD	S	MD	S	MD	S
Waging						
Bittenbrunn	-32,375	0,849	-20,292	0,991	0,128	0,578
Brombach	64,200	0,293	77,533	0,239	0,156	0,514
Weichering	51,667	0,273	52,250	0,422	0,238	0,013
Ofnet-Höhle	33,583	0,752	38,917	0,745	0,000	1,000
Bittenbrunn						
Brombach	96,575	0,028	97,825	0,075	0,027	1,000
Weichering	84,042	0,013	72,542	0,122	0,109	0,684
Ofnet-Höhle	65,958	0,093	59,208	0,315	-0,128	0,506
Brombach						
Weichering	-12,533	0,999	-25,283	0,983	0,082	0,945
Ofnet-Höhle	-30,617	0,918	-38,617	0,879	-0,156	0,459
Weichering						
Ofnet-Höhle	-18,083	0,976	-13,333	0,998	-0,238	0,006

Abkürzungen: N = Anzahl der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; % G = % Anteil der Gruben an der Gesamtzahl der Merkmale; GL = Länge der Gruben (µm); NK = Anzahl der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren (µm); KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Länge der Kratzspuren; R = Maß für die Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector); Schattierung Signifikanzniveau ≤ 5 %.

Tabelle 47. Paarweiser statistischer Vergleich (Tukey HSD) der mittleren Parameter der dentalen Microwear (LEO 1430 VP)

		N		NG		% G		GL		NK		KL		KL (SD)		R	
M² Region Facette 5*																	
M² Region Facette 6																	
Waging	Bittenbrunn	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S
		-33,048	0,722	31,238	0,069	27,228	0,007	2,599	0,988	-64,286	0,050	-14,076	0,598	-12,172	0,673		
	Brombach	4,952	1,000	45,071	0,068	33,953	0,027	-13,699	0,227	-41,952	0,611	-29,808	0,092	-32,637	0,031		
	Ofnet-Höhle	-0,623	1,000	28,390	0,051	21,628	0,017	2,838	0,967	-29,013	0,624	-30,571	0,004	-26,732	0,008		
Bittenbrunn	Brombach	38,000	0,797	13,833	0,950	6,725	0,987	-16,298	0,108	22,333	0,961	-15,732	0,717	-20,466	0,380		
	Ofnet-Höhle	32,424	0,658	-2,848	1,000	-5,601	0,953	0,239	1,000	35,273	0,470	-16,495	0,328	-14,560	0,389		
Brombach	Ofnet-Höhle	-5,576	1,000	-16,682	0,870	-12,326	0,809	16,538	0,069	12,939	0,995	-0,763	1,000	5,905	0,989		
M² Region Facette 9																	
Waging	Bittenbrunn	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S	MD	S
																-0,110	0,735
	Brombach															-0,063	0,987
	Weicherung															-0,110	0,885
	Ofnet-Höhle															-0,239	0,012
Bittenbrunn	Brombach															0,047	0,998
	Weicherung															0,000	1,000
	Ofnet-Höhle															-0,129	0,526
Brombach	Weicherung															-0,047	0,999
	Ofnet-Höhle															-0,176	0,322
Weicherung	Ofnet-Höhle															-0,129	0,771

Abkürzungen: N = Anzahl der Microwear-Merkmale auf einer standardisierten Fläche (0,176 mm²); NG = Dichte der Gruben; % G = % Anteil der Gruben an der Gesamtzahl der Merkmale; GL = Länge der Gruben (µm); NK = Anzahl der Kratzspuren; KL = Länge der Kratzspuren (µm); KL (SD) = mittlere Standardabweichung der Länge der Kratzspuren; R = Maß für die Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (mean striation vector). *Anmerkung: M² Region Facette 5 nicht signifikant; Schattierung Signifikanzniveau ≤ 5 %.

Die Parameterkombinationen in Tabelle 48 auf den genannten Facettenregionen waren für eine Klassifizierung der Zahnoberflächen geeignet. Die Diskriminanzanalyse wurde schrittweise unter Einbeziehung aller Parameter durchgeführt, wobei automatisch diejenigen Parameter in die Analyse integriert wurden, welche zu einer verbesserten Trennung der einzelnen Gruppen beitrugen.

Tabelle 48. Parameterkombinationen zur Klassifizierung Muster dentaler Microwear

	Facette	Gruppierung I Donauregion	Facette	Gruppierung III Frühes Mittelalter
Philips XL 20 Series	u6, u9	N, R	u6, u9, o5, o9	N, KL
LEO 1430 VP	u6, u9, u5,	N, R, KL, NG	u6, u9, o6	N, % G, KL

Die Ergebnisse aus der kanonischen Diskriminanzanalyse sind exemplarisch an jeweils einer Facettenregion der Gruppierungen dargestellt.

Beispiel 1: Gruppierung I (Ofnet-Höhle, Weichering, Bittenbrunn)

Die Funktionen 1 und 2 wurden für die Facette u6 (LEO) nach den standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten (Tabelle 49 A) erstellt:

$$\text{Funktion 1} = 0,914 \times \text{GB} + 0,995 \times \text{N} + 0,626 \times \text{R}$$

$$\text{Funktion 2} = 0,356 \times \text{GB} + 0,592 \times \text{N} + 0,780 \times \text{R}$$

Die Anwendung der Funktionen ermöglichte die Klassifizierung der Einzelwerte der Gruppen und die Berechnung der Gruppenmittelwerte (= Gruppen-Zentroide, Tabelle 49 B). Für jede Gruppe wurden die Klassifizierungsfunktionskoeffizienten (Tabelle 49 C) ermittelt.

Tabelle 49. Beispiel einer kanonischen Diskriminanzanalyse (Facette u6)

Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten		
	Funktion	
	1	2
Grubenbreite	,914	,356
N Merkmale	,995	,592
R der Kratzspuren	,626	-,780

A

Funktionen bei den Gruppen-Zentroiden		
kcod	Funktion	
	1	2
31	,958	,874
40	-1,695	,449
50	,221	-,855

Nicht-standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionen, die bezüglich des Gruppen-Mittelwertes bewertet werden

B

Klassifizierungsfunktionskoeffizienten			
	kcod		
	31	40	50
Grubenbreite	1,690	1,208	1,449
N Merkmale	,189	,132	,154
R der Kratzspuren	29,407	20,467	35,379
(Konstant)	-42,022	-21,364	-34,746

Lineare Diskriminanzfunktionen nach Fisher

C

Klassifizierungsergebnisse					
	kcod	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit			Gesamt
		31	40	50	
Anzahl	31	9	1	2	12
	40	0	8	1	9
	50	3	3	11	17
	Ungruppierte Fälle	0	5	4	9
%	31	75,0	8,3	16,7	100,0
	40	,0	88,9	11,1	100,0
	50	17,6	17,6	64,7	100,0
	Ungruppierte Fälle	,0	55,6	44,4	100,0

a. 73,7% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

D

Das Resultat der Klassifizierung gab an, wieviele Fälle absolut und relativ korrekt bzw. nicht korrekt in die vorhergesagte Gruppe zugeordnet bzw. nicht zugeordnet wurden (Tabelle 49 D). Mit den Klassifizierungskoeffizienten wurden die Fälle mit unbekannter Gruppenzugehörigkeit (ungruppiert) der Gruppe zugewiesen, für welchen der größte Diskriminanzwert berechnet wurde.

Unter Berücksichtigung der Parameter Dichte der Microwear-Merkmale (N) und Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (R), einschließlich der Grubenbreite bei der Facette u6 (Tabelle 49) und ohne die Grubenbreite bei der Facette u9 (ohne Tabelle) ließ sich nach der Berechnung der kanonischen Diskriminanz in 73,7 % (u6) bzw. 71,4 % (u9) der Fälle eine korrekte Zuordnung der Individuen zu den Ursprungsfundorten erzielen. Im einzelnen bedeutete dies, dass z.B. bei Facette u6 neun von 12 Fällen korrekt den Zahnschmelzoberflächen von Bittenbrunn, acht von 11 Fällen korrekt jenen von Weichering und 11 von 17 jenen aus der Ofnet-Höhle zugeordnet werden konnten. Insgesamt zehn von 38 konnten nicht richtig zugeordnet werden. Eine Kombination der Diskriminanzanalyse mehrerer informativer Facetten oder die Hinzuziehung weiterer Parameter verbesserten die Richtigkeit der Klassifizierung. Wurden z.B. die Parameter Länge der Kratzspuren (KL) und der Anteil der Gruben (% G) in eine kombinierte Diskriminanzanalyse mit hinzugenommen (Tabelle 50 A und B, Abb. 120, Beispiel Facette u6), konnten Klassifizierungsergebnisse von 100,0 % (u6), 77,1 % (u9) und 80,6 % (u5) erzielt werden. Aufgrund dieser Ergebnisse ist die Parameterkombination N und R für diese Stichprobenkombination geeignet, die Individuen einer der drei kulturgeschichtlichen Epochen zuzuordnen.

Tabelle 50. Beispiel einer Klassifizierung (Facette u6) unter Einbeziehung weiterer Parameter; ungruppierte Fälle (Kaufertsberg)

Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten		
	Funktion	
	1	2
N Merkmale	,608	1,004
% Gruben	1,468	-,016
Länge der Kratzspuren	1,348	-,039
R der Kratzspuren	,348	,592
Grubenbreite	,028	,924

A

Klassifizierungsergebnisse ^a						
		kcod	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit			Gesamt
			31	40	50	
Original	Anzahl	31	12	0	0	12
		40	0	9	0	9
		50	0	0	17	17
	Ungruppierte Fälle		0	3	6	9
	%	31	100,0	,0	,0	100,0
		40	,0	100,0	,0	100,0
		50	,0	,0	100,0	100,0
	Ungruppierte Fälle		,0	33,3	66,7	100,0

a. 100,0% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

B

Bei der Zuordnung des Individuums vom Kaufertsberg mit Hilfe der Diskriminanzanalyse ergab sich kein einheitliches Bild (Tabelle 49 D ungruppierte Fälle). Fünf von neun (u6) und acht von zehn (u6) Ergebnissen der Facettenareale wurden dem Diskriminanzwert von Weichering zugeordnet, jeweils vier (u6) und zwei (u9) Werte dem Diskriminanzwert der Individuen der Ofnet-Höhle. Bei der erweiterten Diskriminanzanalyse aller Facetten wurden die Fälle jedoch in der Mehrzahl der Gruppe (6/9 u6, 4/10 u9, 5/6 u5) der Ofnet-Höhle zugeordnet (z.B. Tabelle 50, Facette u6). Während die niedrige Merkmals-, und Kratzspurdichte den Fund vom Kaufertsberg bei Lierheim näher an die endneolithischen Oberflächen gruppierten, war eine hohe mittlere Länge der Kratzspuren, die im Mittel etwas niedrigere absolute Dichte und vergleichbar relative Häufigkeit der Gruben und insbesondere die tendenziell eher nicht

zufällige Verteilung der Orientierung der Kratzspuren ($R > 0,400$) dem Muster der Zahnoberflächen aus der Ofnet-Höhle vergleichbar. Das Muster der Merkmalskombination trennt diese Oberflächen sowohl von den endneolithischen als auch von den mesolithischen Zahnoberflächen.

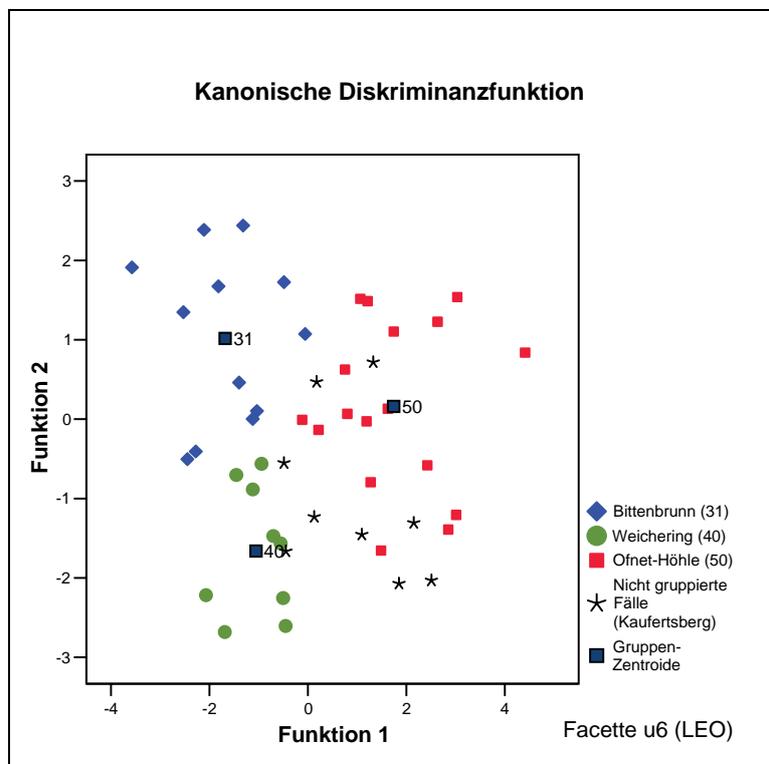


Abb. 120 Steigerung der Diskriminanz von Gruppen durch Hinzufügen weiterer Microwear-Parameter; Nicht gruppierte Fälle: (Kaufertsberg bei Lierheim)

Eine Klassifizierung der Zahnoberflächen des Hominiden Oldoway OH 1 durch eine Diskriminanzanalyse erschien nicht sinnvoll, da dieses Individuum sowohl geographisch als auch kulturgeschichtlich einer andersgearteten Region entstammte. Dennoch waren Gemeinsamkeiten in der Dentalen Microwear mit den älteren Individuen aus dem Süddeutschen Raum zu diagnostizieren. Sowohl die mittlere Dichte der Kratzspuren als auch deren mittlere Länge auf allen Facetten (Abb. 117, 118 rechts) lagen im gleichen Bereich, und waren jeweils unterscheidbar zu den frühmittelalterlichen Individuen. Mit Ausnahme der Facette 5 auf dem Unterkiefermolar zeigte der Hominide eine homogene Verteilung der Kratzspuren in bucco-linguale Orientierung. Die relative (11,1 bis 20,8 %) und absolute (13,7 bis 24,0) Grubendichte auf den Zahnoberflächen lag im Vergleich im unteren Bereich aller untersuchten Oberflächen. Die Homogenität der Microwear-Merkmale auf den Oberflächen des Hominiden Oldoway OH 1 war stärker ausgeprägt als diejenige auf den Oberflächen des Individuums vom Kaufertsberg (Abb. 115, 116, 117), an der geringeren Streuung der Merkmale zu erkennen.

Beispiel 2: Gruppierung III (Waging, Bittenbrunn, Brombach)

Folgende Funktionen wurden mit Hilfe der standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten für die Facette u6 ermittelt:

$$\text{Funktion 1} = 0,244 \times \% G + 0,932 \times \text{KL}$$

$$\text{Funktion 2} = 0,983 \times \% G + 0,398 \times \text{KL}$$

Tabelle 51. Kanonische Diskriminanz dentaler Microwear von Individuen frühmittelalterlicher Fundorte

Klassifizierungsfunktionskoeffizienten			
	Fundkomplex		
	Waging	Bittenbrunn	Brombach
% Gruben	,475	,254	,268
mittlere Länge der Kratzspuren	,499	,547	,961
(Konstante)	-15,183	-13,490	-37,389

Lineare Diskriminanzfunktionen nach Fisher

A

Klassifizierungsergebnisse						
Original	Anzahl	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit			Gesamt	
		Waging	Bittenbrunn	Brombach		
	Waging	6	1	0	7	
	Bittenbrunn	3	9	0	12	
	Brombach	0	1	4	5	
%	Waging	85,7	14,3	,0	100,0	
	Bittenbrunn	25,0	75,0	,0	100,0	
	Brombach	,0	20,0	80,0	100,0	

a. 79,2% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

B

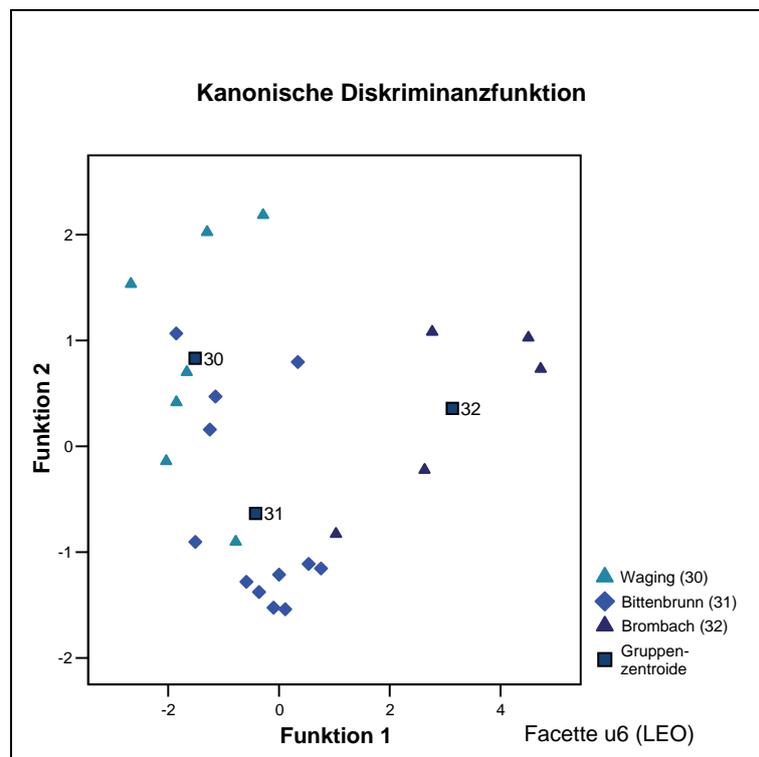


Abb. 121 Diskriminanzfunktionen dentaler Microwear-Parameter synchron lebender Individuen aus dem frühen Mittelalter

Unter Berücksichtigung der Parameter relativer Anteil der Gruben (% G) und mittlere Länge der Kratzspuren (KL)) ließen sich anhand der Berechnung über die Klassifizierungskoeffizienten (Tabelle 51 A, B) in 79,2 % (u6) der Fälle eine korrekte Zuordnung der Individuen zu den Ursprungsfundorten erzielen (Abb. 121). Wurden die weiteren Parameter Dichte der Gruben (NG), Dichte der Kratzspuren (NK), Grubenlänge (GL) und Grubenbreite (GB) hinzugefügt, konnten auch 80,0 % der Fälle auf Facette o6 korrekt klassifiziert werden. Die Diskriminanzanalyse der Philipsaufnahmen erbrachte unter Berücksichtigung der Parameter Merkmalsdichte (N) und mittlere Länge der Kratzspuren (KL) für die Facette u6 in 73,9 % der Fälle eine korrekte Zuordnung. Eine maximale Richtigkeit der Klassifizierung konnte für mehrere Facetten durch das Hinzufügen der Parameter relativer Anteil der Gruben (% G) und Grubenbreite (GB) erzielt werden. Dadurch wurden 82,6 % (u6), 77,3 % (u9), 73,7 % (u5) und 76,5 % (o9) der Fälle korrekt den Ursprungsfundorten zugeordnet. Insbesondere die Fälle aus Brombach wurden

hierbei nahezu zu 100 % korrekt dem Ursprungsfundort zugeordnet, während einzelne Fälle aus Bittenbrunn regelmäßig dem Fundort Waging und einzelne Fälle aus Waging demjenigen aus Bittenbrunn unkorrekt zugeordnet wurden.

Zusammengenommen bedeutete dies, dass die ausgewählten Parameter N, % G und KL als Indikatoren geeignet waren, um die frühmittelalterlichen Individuen mit großer Sicherheit durch die Kombination der Klassifizierung aus mehreren Facetten einer der drei geographischen Regionen - Donauregion (Bittenbrunn), Alpenvorland (Waging am See) und Brombachtal (Brombach) – zuzuordnen.

B 5. Kohlenstoff- und Stickstoffsignatur

Die $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der untersuchten Individuen sind im Anhang 15 wiedergegeben und in Abb. 122 dargestellt.

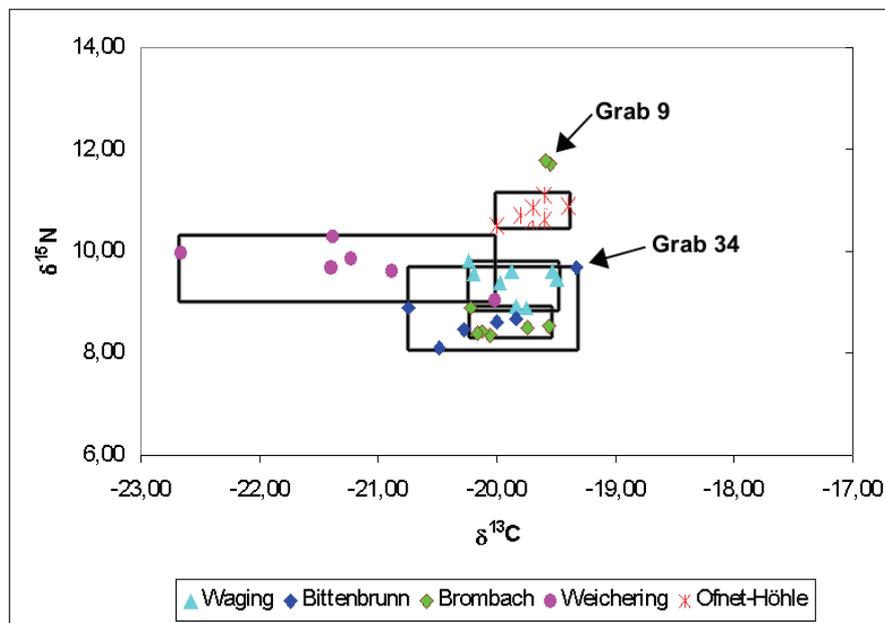


Abb. 122 Kohlenstoff- und Stickstoffisotopen einzelner Individuen, an welchen die DMA durchgeführt wurde.

Die Gruppenmittelwerte der Kohlenstoff- und Stickstoffsignaturen (Tabelle 52) zeigten in mindestens einer von zehn möglichen Kombinationen statistisch hochsignifikante Unterschiede (Tabelle 53). Eine deutlich niedrigere $\delta^{13}\text{C}$ Isotopie ergaben sich bei den vier glockenbecherzeitlichen Individuen aus Weichering. Das eisenzeitliche Individuum aus Weichering, Grab D erbrachte einen $\delta^{13}\text{C}$ -Wert von $-20,02$, welcher wie der dazugehörige $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Bereich der Werte der frühmittelalterlichen Individuen, fundortunabhängig, überlappte. Ausnahmen stellten hierbei das männliche Individuum, Grab 9 aus Brombach dar, welches in das späte Mittelalter datiert wurde und ein weiteres männliches Individuum aus Bittenbrunn, Grab 34, allerdings mit geringerer Deutlichkeit. Deren im Vergleich zu den vorgenannten Individuen deutlich höhere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte bei überlappendem $\delta^{13}\text{C}$ -Wert lag noch über dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Individuen aus der Ofnet-Höhle, welche sich klar von den frühmittelalterlichen $\delta^{15}\text{N}$ -Werten abgrenzten.

Tabelle 52. Kohlenstoff- und Stickstoffsignaturen

Fundort	Datierung ¹		N ²	δ ¹⁵ N (‰)	s ³	δ ¹³ C (‰)	s ³
Waging a.See	spätes 6. - frühes 8. Jhd.	gesamt	6	9,41	0,38	-19,92	0,20
		M	2	9,73	0,15	-19,88	0,49
		W	4	9,19	0,33	-19,94	0,19
Bittenbrunn	6.-Beginn 7. Jhd.	gesamt	5	8,73	0,53	-20,11	0,50
		Grab 34	1	9,67		-19,33	
Brombach	7.-Beginn 8. Jhd.	gesamt	5	8,53	0,21	-19,95	0,29
	spätes Mittelalter	Grab 9	1	11,74		-19,57	
Weichering	Glockenbecher (Endneolithikum)	gesamt	4	9,85	0,29	-21,54	0,77
	Eisenzeit	Grab D	1	9,03		-20,02	
Ofnet-Höhle	Spätmesolithikum (ca. 7550 BP)	gesamt	9	10,77	0,19	-19,67	0,17
		M	3	10,73	0,15	-19,60	0,20
		W	6	10,78	0,22	-19,70	0,15

¹Datierung: Waging (Knöchlein 1995), Bittenbrunn (Christlein 1971, Pohl 1995), Brombach (Siegmond 1983), Weichering (Weinig 1991), Ofnet-Höhle (Housley-Bericht 1988, Kohlenstoff- und Stickstoff-Daten aus Bocherens et al. 1997); ²N (Anzahl der in die Untersuchung aufgenommenen Individuen); ³s (Standardabweichung)

Tabelle 53. Gleichheit der Gruppenmittelwerte

	Wilks-Lambda	F	df1	df2	Signifikanz
δ ¹³ C (‰)	0,255	21,157	4	29	0,000
δ ¹⁵ N (‰)	0,109	59,179	4	29	0,000

Eine kanonische Diskriminanzanalyse wurde durchgeführt und ergab folgende standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionen:

$$\text{Funktion 1} = -0,183 \times \delta^{13}\text{C} (\text{‰}) + 1,014 \times \delta^{15}\text{N} (\text{‰})$$

$$\text{Funktion 2} = 0,998 \times \delta^{13}\text{C} (\text{‰}) + 0,013 \times \delta^{15}\text{N} (\text{‰})$$

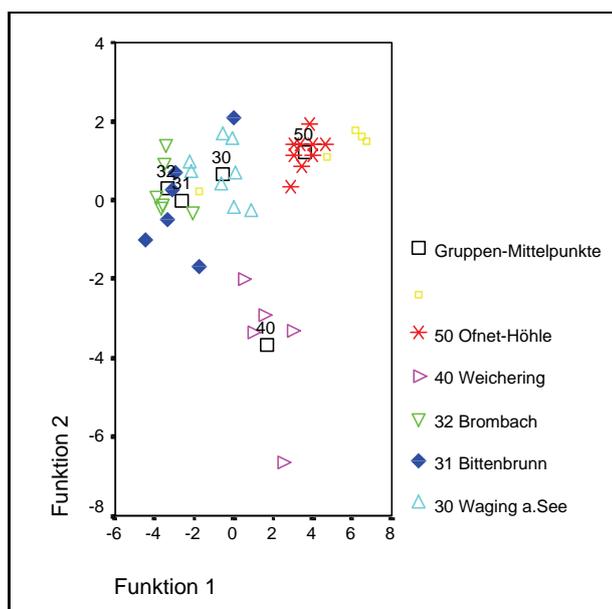


Abb. 123

Das Klassifizierungsergebnis der kanonischen Diskriminanzfunktion ergab eine korrekte Zuordnung der Werte in 82,5 % der Fälle.

Abb. 123 Diskriminanzfunktionen der Stickstoff- und Kohlenstoffisotopien

C. Diskussion

C 1. Methodische Diskussion

Die Methode der Analyse der dentalen Microwear ist sowohl eine morphologisch beschreibende als auch eine morphometrisch statistische Methode, um konservierte Informationen auf historischen Oberflächen zu identifizieren und der Befunderhebung zugänglich zu machen. Um die Methode zu etablieren und die Ergebnisse einem vergleichenden Datenpool verfügbar zu machen, galt es zunächst, den individuellen und systematischen Beobachtungsfehler bei der Anwendung der Technik der Dentalen Microwear Analyse (DMA) zu erfassen.

Die durchgeführte Testserie (B.3.1) erbrachte eine Fehlerrate bei Kratzspuren von ungefähr 5 %, bei Gruben von unter 10 %. Nach langjähriger Anwendung verschiedener Methoden zur Quantifizierung der dentalen Microwear, wurde im Jahr 2002 von Grine, Ungar und Teaford die erste vergleichende Studie publiziert, welche systematisch den individuellen (intraobserver) wie auch den Fehler zwischen verschiedenen Beobachtern (interobserver) dokumentierte. Die Fehlerrate in der vorliegenden Studie lag innerhalb der beschriebenen Fehlerrate (intraobserver: 7 %, interobserver: 9 %; Grine et al. 2002). In keinem Fall unterschieden sich die Ergebnisse verschiedener Beobachter bei der Anwendung der Microwear-Software signifikant. Die Ergebnisse zeigten auch eine zuverlässige Konsistenz in der Rangordnung der Aufnahmen bezüglich der Parameter. Diese Resultate fanden in der vorliegenden Arbeit ebenfalls Bestätigung. Eine Einflussnahme durch technische Details auf mögliche Unterschiede, welche die v.g. Autoren ebenfalls erwähnten, konnte belegt werden. Ein systematischer und signifikanter Unterschied der Parameter dentaler Microwear in Abhängigkeit von den technischen Vorgaben - die Aufnahmen der historischen Zahnoberflächen wurden an zwei verschiedenen Rasterelektronenmikroskopen (Philips XL 20 Series, LEO 1430 VP) erstellt - konnte nachgewiesen werden (B.3.3). Dies führte bedauerlicherweise dazu, dass die Datensätze getrennt analysiert werden mussten, wobei sich naturgemäß die Stichprobenzahl jeweils auf ungefähr die Hälfte reduzierte und die statistische Sicherheit auf einer schmaleren, aber dennoch auf einer parallel geführten Basis beruhte und im positivem Sinne eine gegenseitige Bestätigung der Tendenzen informativer Parameter lieferte. Gleichzeitig bedeutet dies aber auch, dass alle bisher publizierten Ergebnisse bezogen auf die absoluten Werte dentaler Microwear quantitativ nicht untereinander vergleichbar sind. Da jedoch die Vorgehensweise der Wissenschaftler stets den vergleichenden Aspekt und nicht die absoluten Daten in den Vordergrund der Arbeiten stellten, ist die Aussagekraft bezüglich charakteristischer Tendenzen hoch anzusetzen. Dennoch wäre die Einführung einer Standardoberfläche zur Kalibrierung der angewandten technischen Bedingungen bei der Dentalen Microwear Analyse wünschenswert und sinnvoll.

Die Untersuchungen der Zahnoberflächen der historischen Stichproben erforderten teilweise die nicht-invasive Arbeit am hochauflösenden Replikat. Der statistische Vergleich von Original und Replikat ergab, dass sowohl die Streubreite als auch die Mittelwerte ununterscheidbar waren. Nach bisherigen Erfahrungen anderer Autoren (z.B. Beynon 1987, Teaford 1991, Ungar 1996a) ermöglicht die Zeichnungsschärfe der angewandten Abgusstechnik eine Auflösung von 0,1 – 0,2 µm, welche für die DMA zuverlässige Resultate erbringt.

Ein Einfluss der Facettenneigung auf die Gesamtzahl der Microwear-Merkmale kann ebenfalls diskutiert werden. Von Grine durchgeführte Untersuchungen an Molaren des Oberkiefers (Grine 1987; 791ff,

Facette 5, 6, 9) erbrachten in keinem Fall einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Grad der Facettenneigung und der Anzahl der Microwear-Merkmale einer definierten Fläche. Nach Grine bestand auch kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Grad der Oberflächenneigung und dem Grubenanteil innerhalb der Facettenregionen 6 und 9. Lediglich bei unterschiedlichen Facettenneigungen der Facette 05 konnte bei manchen Individuen (am Beispiel Paranthropus) ein solcher Zusammenhang gefunden werden. Um dennoch einen möglichen Einfluss weitestgehend zu minimieren und die Variabilität der Facettenneigungen durch altersbedingte Abtragung möglichst gering zu halten, wurden, mit wenigen Ausnahmen, nur juvenile und adulte Individuen in die Gruppen der Stichproben aufgenommen.

C 2. Inhaltliche Diskussion

2.1 Vergleich der Zahngesundheit und der Parameter Dentaler Macro- und Microwear

Während die frühmittelalterlichen Gruppen ein nahezu ausgewogenes Verhältnis (FZB/SZB ausgewogen $12/20 = 0,60$, Bittenbrunn = 0,62, Brombach = 0,59 und Waging = 0,58) zwischen erhaltenen Zähnen des Front- und des Seitenzahnbereiches (FZB/SZB) zeigten (Tabelle 23), waren die älteren menschlichen Gruppen aus Weichering und der Ofnet-Höhle hiervon abweichend.

Die Individuen der Ofnet-Höhle zeigten einen antemortalen Zahnverlust vorwiegend im FZB (3,6 %) mit einem FZB/SZB von 0,48. Die auffallend starke Abtragung der noch verbliebenen Frontzähne spricht dafür, dass starke Kau- und Gebrauchsbelastungen wirkten. Dies führte offenbar dazu, dass teilweise die Krone durch Überbelastung abbrach oder nur noch Wurzel- und kurze Halsstümpfe im Kiefer nachweisbar waren. Weichering lag mit einem Wert von 0,76 deutlich über dem ausgewogenen Verhältnis von 0,60. Der antemortale Verlust von 13,9 % der Zähne im SZB im Vergleich zu 2,1 % im FZB könnte ein Hinweis dafür sein, dass dies eine Konsequenz des Mahlzahnes oder „grinding tooth“ ist. Der Mahlzahn wird beim Zermahlen der Nahrung abgetragen, wobei er das punktuelle Zerbeißen von Nahrung ersetzt. Die im Altersvergleich ähnlich fortgeschrittene Zahnschmelzabtragung wie bei den Individuen aus Bittenbrunn und Brombach, kann als Indiz für eine hohe Kaubelastung im SZB gewertet werden. Trotz der relativ dicken Zahnschmelzschicht der menschlichen Zähne kann der Zahnschmelz durch das Zermahlen hoch-abrasiver Nahrungsmittel so weit abgetragen werden, dass die Zähne ihre Funktion verlieren (Begg 1954, Newesely 1993). Das betroffene Individuum dürfte dann, ohne unterstützende Hilfe oder besondere Zubereitung der Nahrung, mit großer Sicherheit Probleme bei der Versorgung seines Körpers mit ausreichend Nahrung gehabt haben (s.a. Molleson et al. 1993). Powell (1985) und Rose und Ungar (1998) bemerken jedoch, dass trotz einer extrem starken Abtragung bis zur Gaumenlinie bei einem graduellen Prozess des Zahnschmelzverlustes jedoch ein antemortaler Zahnverlust verhindert werden kann, wenn schützendes sekundäres Dentin eine Eröffnung der Pulpahöhle verhindert. Bei einem progressiven Verlauf spielt deshalb vermutlich die Kariesätiologie eine entscheidende Rolle.

Bei keinem Individuum der Gruppen waren kariöse Läsionen an den vorhandenen Zähnen im FZB nachweisbar. Im SZB konnte jedoch Karies festgestellt werden. Eine hohe Kariesrate war bei den frühmittelalterlichen Individuen aus Bittenbrunn (12 von 15 Individuen) und Brombach (7/10) aber auch bei den Individuen der Ofnet-Höhle (11/14) zu beobachten (Tabelle 24). Meiklejohn et al. (1988) berichtete, dass im skandinavischen Mesolithikum Karies kaum vorhanden war. Für Mitteleuropäische

Bevölkerungen fand er Kariesintensitäten im oberen Bereich von Jäger-Sammler-Populationen, Bevölkerungen im Mediterranem Raum wiesen noch höhere Werte auf. Mit einer Kariesintensität von 12,0 % im SZB lagen die Individuen der Ofnet-Höhle im Bereich derjenigen im Mediterranem Raum (Meiklejohn et al. 1988).

Der Gebrauch der Seitenzähne als Mahlzähne, welche den längsten Kontakt mit dem speichelvermengten, variabel kohlenhydrathaltigen Nahrungsbrei haben, kann als ein Hauptfaktor für die Bildung von kariösen Läsionen angesehen werden. Eine sehr hohe Kariesrate wird auch heutzutage als Indikator für eine reichhaltige Ernährung mit niedermolekularen Kohlenhydraten, Mono- und Disacchariden und geringer hygienischer Vorsorge herangezogen (z.B. Gülzow 1988).

Die Gruppen mit den im Vergleich geringsten Kariesraten (Waging 46,2 %, Weichering 44,4 %) zeigten häufiger Zahnsteinauflagerungen. Zahnstein wird als Hinweis für den Gehalt stärker basisch wirkender Komponenten in der alltäglichen Ernährung gewertet (Herrmann et al. 1990), da im alkalischen Milieu Mineralsalze verstärkt auskristallisieren (Holleman und Wiberg 1985). Zu den basisch wirkenden Nahrungsmitteln gehören Milch und Milchprodukte sowie zahlreiche Gemüse- und Obstsorten. Sowohl die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte als auch die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte, welche keine Unterschiede unter den frühmittelalterlichen Gruppen (Waging am See, Bittenbrunn und Brombach) zeigten, sprechen nicht dafür. Die Nähe von Waging zum See ließe auf einen Verzehr von Süßwasserfisch als eine Proteinquelle in der alltäglichen Ernährung der Waginger Gruppe schließen. Die Untersuchung der Isotopien an Wirbeltieren einschließlich Süßwasserfischen von Asam et al. (2004) erbrachte eine sehr detaillierte Rekonstruktion der Nahrungsnetze in der Donauregion. Es konnte gezeigt werden, dass Süßwasserfisch im Vergleich deutlich geringere $\delta^{13}\text{C}$ Werte erbringt. Dies spiegelte sich nicht an den Individuen aus Waging am See, jedoch an den Individuen aus Weichering, welche als Konsumenten von Süßwasserfisch betrachtet werden, wider. Auch würde Fisch, ähnlich wie Fleisch oder Getreideprodukte, eher die Bildung eines sauren Speichelmilieus im Mundraum verursachen. Für ein vorwiegend basisches Milieu könnten Unterschiede in der prozentualen Zusammensetzung der täglichen Nahrung, insbesondere der Verzehr von heimischem Frischobst gesorgt haben. Der auffallend hohe antemortale Zahnverlust bei den Individuen der Gruppe aus Weichering könnte sowohl auf eine hohe Belastung und Abtragung der Zahnschmelz zurückzuführen sein, als auch auf einen Verlust durch die kariöse Zerstörung des Zahnes. Da meist jedoch noch ein intakter Antagonist vorhanden war, welcher keine oder nur geringfügige kariöse Läsionen aufwies, kann letztere eher als unwahrscheinlich angenommen werden. Ein unterschiedlicher Gehalt an abrasiven Partikeln in der Nahrung, welcher bei der Entwicklung von Karies ebenfalls eine wichtige Rolle spielen kann, dürfte im Fall Weichering eher wahrscheinlich sein. Durch die schleifende Funktion der Putzkörper werden die Oberflächen der Zähne während des Kauens gereinigt und von kariesfördernden Nahrungsresten befreit. Hierbei wird kontinuierlich intakte Zahnschmelz abgetragen. Fand dieser Vorgang direkt während oder nach dem Genuss von sauer wirkenden Nahrungsmitteln statt, wurde in stärkerem Umfang Zahnschmelz abgetragen, als nach dem Genuss basisch wirkender Nahrung, da temporär die Härte des Zahnschmelzes in Abhängigkeit vom Säuregrad oberflächlich unterschiedlich stark reduziert wird (Davis und Winter 1980). Die vom Säure-Base-Milieu abhängige Rückresorption mineralischer Bestandteile aus dem Speichel erhärtet bei neutralem bis alkalischem Milieu erneut den oberflächlichen Zahnschmelz. Welche Faktoren letztlich zum Zahnverlust geführt hatten, kann nicht geklärt werden. Jedoch würde die Tendenz zu einem solchen Nahrungsverhalten nicht nur dazu führen, dass Zahnschmelz kontinuierlich entfernt würde, sondern auch ein permanentes Auslösen bzw.

Abschleifen angeätzter im Vorfeld entstandener Mikroläsionen auf den Oberflächen. Macrowear, d.h. großflächige Läsionen des Zahnschmelzes, welche Nahrungsmitteln eine vergrößerte Oberfläche präsentiert, beschleunigt die Geschwindigkeit des Zahnschmelzverlustes sowohl durch die Säurewirkung, als auch durch die veränderten mechanischen Eigenschaften als Angriffsorte für Abrasiva. Die niedrigen Fallzahlen und der unterschiedliche Erhaltungszustand der fossilen Überreste, insbesondere der Individuen aus Weichering, lassen deshalb nur eine vorläufige Interpretation zu.

Anzeichen von Zahnschmelzhypoplasien treten auf, wenn ernährungs- oder krankheitsbedingter Stress die Zahnkronenbildung beeinflusst. Die Anzahl der beobachteten Fälle lag in allen untersuchten Gruppen deutlich niedriger als für heutige unterentwickelte Länder beschrieben ist (Goodman und Rose 1991).

2.2 *Muster dentaler Abtragung und Microwear*

Die insgesamt geringe Anzahl an vorgefundenen Mikropartikeln spräche für eine weitgehend von Verunreinigungen gereinigte Nahrung oder eine Nahrung, welche keine oder kaum abrasive Partikel beinhaltet. Angesichts der insgesamt fortgeschrittenen Abrasion aller Stichproben ist es jedoch eher wahrscheinlich, dass harte Partikel eine effektive Wirkung sowohl auf den fortlaufenden Prozess der Überschleifung und Überlagerung von Microwear-Läsionen hatten, als auch bei der Elimination von Auf- und Einlagerungen eine wichtige Rolle spielten.

Das Abtragungsmuster der untersuchten menschlichen Gruppen unterschied sich im Neigungswinkel der okklusal abgetragenen Flächen (die Jäger-Sammler entwickelten flachere Winkel als die Ackerbauern, welche steile Neigungen aufzeigten), in der Rate der Zahnabtragung, im Grad der Abtragung vom M_1 zum Zeitpunkt des Durchbruches von M_2 und im Grad der Abtragung von M_2 zum Sättigungswert von M_1 . Musterunterschiede wurden nicht nur im Vergleich der menschlichen Gruppen vom Mesolithikum zum frühen Mittelalter erfasst, sondern auch zwischen den frühmittelalterlichen Gruppen.

Aus Kauexperimenten an Tieren ist bekannt, dass beim Verzehr harter Nahrung ein punktförmiges Zubeißen erhöht werden kann (Hiemae 1976, aus Smith 1984). Beim Menschen reagiert die Mandibula mit einer Änderung der seitlichen Auslenkung auf eine Änderung der Nahrungskonsistenz (Smith 1984). Härtere und faserhaltigere Nahrungsmittel verursachen eine stärkere seitliche Auslenkung als weichere und faserärmere und führte bei den Spätmesolithikern zum Verlust der lateralen Verankerung, sowie zu einem charakteristischen Microwear-Muster. Eine verfeinerte Aufbereitung von Nahrungsmitteln resultiert zusammen mit einem verringerten Kraftaufwand in einer geringeren Abtragung insbesondere der führenden Zahnhöcker, Partikel schleifen kurze Wegstrecken über die Oberflächen. Die in diesem Fall eher flächig wirkenden Kräfte abrasiver Mikropartikel in den Nahrungsmitteln erhalten das Ineinandergreifen der führenden und unterstützenden Oberflächen des Zahnreliefs. Die bei den frühmittelalterlichen Gruppen durch den längerandauernden Erhalt intakter Höcker und Canini vorhandene geleitete und damit eingeschränkte Bewegung des Unterkiefers beim Kauvorgang, verursachte im Verlauf eine am mandibular bukkalen Aspekt eine bukkal geneigte und vorwiegend am maxillar lingualen Aspekt eine lingual geneigte Abtragung der Zahnschmelzoberflächen, welche trotz fortschreitender Abrasion die reduzierte Auslenkung des Unterkiefers aufrechterhielt. Die Änderung des Abtragungswinkels kann deshalb zur Unterscheidung von Gesellschaften mit unterschiedlichen Subsistenzstrategien (z.B. Jäger-Sammler-Gruppen, agrarisch wirtschaftenden Bevölkerungen) herangezogen werden (D'Amico 1961, Powell 1985 309f, Rose und Ungar 1998).

Von zusätzlicher Bedeutung hierbei ist, dass das Abtragungsmuster der Zahnhöcker der frühmittelalterlichen Ackerbauern sich auch deutlich von demjenigen rezent lebender Menschen unterscheidet. Sind bei rezenten Probanden die posterioren Zahnkronen nicht kariös zerstört und mit Füllungen restauriert, weisen sie meist noch bis in das senile Alter ein abgerundet stumpfes, aber vollständiges Kronenrelief auf. Wir dürfen annehmen, dass die Ernährung des frühen Ackerbauern noch deutlich höhere und charakteristische Ansprüche an das Kauen stellte, welche in funktionalen Eigenschaften z.B. der charakteristischen Winkelung der Zahnoberflächen resultierte. Die Konservierung schneidender Kanten und die Entstehung großer Schlißflächen zur Kompensation der beim Nahrungsaufschluss entstehenden Scherkräfte war an allen untersuchten frühmittelalterlichen Molaren nachweisbar. Inwieweit der Gehalt, die Größe und die Form abrasiver Partikel und faseriger Inhaltsstoffe bei der Bruchcharakteristik eine Rolle spielte, welche zu den charakterisierenden Neigungen der Zahnschmelzoberflächen führten, ist noch nicht geklärt. Bei der Aufklärung des Bruchmechanismus könnte die morphologische Charakteristik einzelner Microwear-Merkmale, insbesondere der Gruben und die Ausbildung von Mikrofrakturen wertvolle Informationen liefern. Am Ende des Kapitels soll der Versuch unternommen werden, eine mechanische Erklärung für den Vorgang der Musterbildung unter dem Einfluss der einwirkenden Kräfte und der geleisteten Brucharbeit auf der Ebene der Zahnschmelzprismen zu geben.

2.2.1 Charakteristische Merkmale dentaler Microwear

Eine Problematik liegt in der Unterscheidung antemortal und postmortal entstandener Microwear. Wie frühere Studien zeigen konnten (Grine 1986, Teaford 1988b, King et al. 1999a), ist diese auf Zahnoberflächen unterscheidbar. Postmortale Abtragung erfasst alle Oberflächen, während antemortale Abtragung nur bestimmte Bereiche auf den Zahnoberflächen prägt und dann auf charakteristische Weise. Beispiele hierfür konnten auch auf den in der Arbeit untersuchten Oberflächen gefunden und identifiziert werden. Nach King et al. (1999a) verursacht ein postmortaler Einfluss auf Zahnschmelzoberflächen eher eine Auslöschung von Merkmalen als eine sekundäre Veränderung bereits antemortal entstandener Microwear-Merkmale.

Auf den untersuchten historischen Zahnschmelzoberflächen konnten Artefakte (z.B. Abb. 82 – 84), neben einer Vielfalt von antemortal entstandenen Merkmalen (charakteristische Microwear-Merkmale: Abb. 85 – 100, Facettenregionen der Gruppen: Abb. 101 – 110, Facettenregionen Kaufertsberg und Oldoway OH I: Abb. 111 - 114) aufgefunden und katalogisiert werden. Vorwiegend bei den Individuen der Donauregion, insbesondere bei den Fundorten Weichering und Bittenbrunn konnten kleinere Areale artefizieller Veränderungen des Zahnschmelzes aufgrund der Liegebedingungen, vermehrt inselartige Schmelzabblätterungen, nachgewiesen werden. Die Individuen der Ofnet-Höhle, als älteste Gruppe der Untersuchung, zeigten überraschend wenige Artefakte. Die Zahnoberflächen waren meist sehr gut erhalten, in einzelnen Fällen konnten erosive Veränderungen gefunden werden. Sowohl die Niederlegung der Spätmesolithiker (sog. „Schädelnester“) und die lange Liegezeit, als auch die archäologische Freilegung, Magazinierung und Bearbeitung haben die im Rahmen dieser Untersuchung inspizierten Oberflächen kaum beeinflusst. Bei einzelnen Individuen aus Brombach und Waging konnten Artefakte vermutlich durch Säureätzung oder Erosion nachgewiesen werden. Vereinzelt und über die Fundorte hinweg waren Oberflächenareale von Bakterien kontaminiert.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass der Erhaltungszustand der Zahnoberflächen für die Untersuchungen der Dentalen Microwear ausreichend gut war. Dieser Befund deckt sich mit den Belegen aus Publikationen der vergangenen Jahre, bei welchen die Dentale Microwear auf sehr viel älteren Zahnschmelzoberflächen gut konserviert blieb und für vergleichende Untersuchungen und zur Rekonstruktion der Ernährung nicht-menschlicher Primaten (z.B. Gordon 1982, Teaford und Walker 1983, Teaford und Oyen 1989b, Teaford und Robinson 1989, Ungar 1994, King et al. 1999b), früher Hominiden (z.B. Grine 1981, 1987, Kay und Grine 1987, Ungar und Grine 1991, Lalueza et al. 1993, 1996a) und Menschen (z.B. Gordon 1986, Bullington 1991, Teaford 1991, Pastor 1994, Ungar und Spencer 1999, Schmidt 2001, Gügel 2003) herangezogen werden konnte.

Die mit dem bloßen Auge sichtbare Macrowear, insbesondere großflächige grubenartige Schmelzverluste (Abb. 77), trat bei den Individuen aller Fundorte auf. Eine Häufung von Mikrorissen fand sich bei den Individuen aus Brombach. Bei den Individuen der Fundorte der Donauregion, insbesondere bei Bittenbrunn, traten diese nur vereinzelt auf. Einerseits können Mikrorisse Zeichen der Austrocknung des spröden Zahnschmelzes und damit sekundäre Artefakte darstellen (meist in Verbindung mit Makrorissen und großflächigen Schmelzabsprengungen), andererseits aber auch Spuren antemortal wirkender Belastungen der Oberflächen durch das Knacken von Nüssen oder das Kauen auf Samen (Peters 1982).

Charakterisierend für die Bereiche der dentalen Microwear waren die verschiedenen Stadien der am Abtragungsprozess beteiligten Facettenareale (Abb. 78, 87). Im Bildungsprozess befindliche Merkmale konnten aufgefunden werden (Abb. 85). Auf okklusalen Schmelzoberflächen, wo Prismenstäbe in Abhängigkeit der Facettenneigung mehr oder weniger senkrecht zur Oberfläche ragten, traten Mikrobrüche durch Druckbelastung um interagierende Schmelzstäbe auf und der Bruchweg bestand aus einer Serie von Halbkreisen. Solche Halbkreisförmigen Mikrorisse waren teilweise um Gruben oder breiten Kratzspuren zu finden (Abb. 85 A - D).

Eine Systematisierung der Merkmale im Hinblick auf Merkmalsausprägungen, welche charakteristisch für einzelne Fundorte sein könnten, erwies sich als wenig erfolgversprechend. Die Anzahl der Merkmale mit besonderer Ausprägung, insbesondere von Gruben, stellte nur einen geringen Bruchteil aller Merkmale dar und darf mit einem relativen Anteil von unter 0,2 % aller Merkmale angegeben werden. Es kann aber keineswegs ausgeschlossen werden, dass dies möglich wäre. So konnte z.B. ein Merkmal bei einem Individuum aus Weichering gefunden werden, welches die Form der Schale eines Schneckenhauses (Abb. 94 X) darstellen könnte. Ebenso konnte eine Grube bei einem Individuum aus Brombach gefunden werden (Abb. 94 K), welche simulierten Gruben in Roggen- oder Haferform mit dem typischen zentralen Einschnitt (Gügel et al. 2001, Fig. 8c, e) glich, um zwei Beispiele für die Wiederfindung und eine mögliche Ursachenklärung zu geben.

Einer Systematisierung der Merkmale im Hinblick auf eine besondere Ausprägung unabhängig vom Fundort wurde deshalb der Vorzug gegeben. Der in Kap. III B 4.3 (S. 127 – 147) aufgeführte Katalog rasterelektronenmikroskopisch untersuchter Microwear-Merkmale auf den Zahnschmelzoberflächen wurde nach den Kriterien - besondere Kratzspuren, Gruben, Musterbildungen und Ein- und Auflagerungen - erstellt und dient wie bereits ausgeführt (S. 123), einerseits der Dokumentation und andererseits als Referenz für weitere Untersuchungen.

In diesem Zusammenhang erwähnenswert ist, dass anders als bei der Pilotstudie (Gügel 1998), bei welcher auf den Zahnoberflächen aller untersuchten Individuen (frühes Mittelalter, Gräberfeld bei Wenigumstadt, Aschaffenburg) mehr als ein Opal-Phytolith nachgewiesen werden konnte, ein solcher Befund bei allen frühmittelalterlichen Individuen dieser Untersuchung eher selten auftrat (Abb. 100 z.B E, F, J, K, L, N, Q, R T) und in der Seltenheit sich von den Stichproben aus Weichering (Abb. 100 V) und der Ofnet-Höhle (Abb. 100 W) nicht unterschied. Im Hinblick auf die bereits fortgeschrittene Abrasion der Oberflächen ist dieser Befund durchaus nachvollziehbar und reflektiert ebenfalls die Seltenheit mit welcher diagnostisch wertvolle Partikel auf historischen menschlichen Zahnschmelzoberflächen (Lalueza-Fox et al. 1994, Lalueza-Fox et al. 1996b, Danielson et al. 1998, Gügel et al. 2001) und in Zahnstein (Holt 1993, Middleton 1993) bislang in Publikationen erwähnt wurden.

Neben den Befunden zu charakteristischen Microwear-Merkmalen, welche einen neuen Blickwinkel auf die Entstehung und Vielfalt von Merkmalen und die Mechanismen der Abtragung ermöglichen, ist eine quantitative Analyse der Merkmale definierter Flächen, welche im folgenden diskutiert wird, für die Aufarbeitung der Fragestellung von großer Bedeutung.

2.2.2 *Allgemeines zur Dentalen Microwear-Muster-Bildung*

Aufgrund der Vielfalt der gefundenen und beschriebenen Merkmale und Partikel auf den historischen menschlichen Zahnoberflächen konnten wir lernen, dass die Betrachtung einzelner Merkmale Hinweise über die Art und Beschaffenheit von Verursachern der Microwear auf direkte Weise liefern kann.

Mit Hilfe der systematisch statistischen Untersuchung der definierten Flächen Dentaler Microwear konnten Microwear-Musterbildungen innerhalb kleinräumig begrenzter menschlicher Lebensgemeinschaften dargestellt werden. Konsequenzen aus der Belastung der Zahnoberflächen bei deren Gebrauch stellten sich als charakteristische Parameterkombinationen (Merkmalsdichte von Gruben und Kratzspuren und ihrer relativen Verteilung, Dimensionen der Merkmale und ihre räumliche Ausrichtung) dar.

Der relative Anteil der Gruben im Unterschied zu den Kratzspuren bewegte sich mit abnehmender Tendenz von den ältesten zu den jüngsten menschlichen Gruppen in der Untersuchung zwischen 20 und 10 % (Abb. 124). Eine Ausnahme stellte das Individuum vom Kaufertsberg dar, welches eine deutlich höhere relative Dichte an Gruben aufwies. Harmon und Rose (1988) gaben an, dass saisonales Nahrungsverhalten zu deutlichen Unterschieden in der Anzahl der Gruben führen kann, wobei diese von beiden Autoren als Kompressionsfrakturen bezeichnet wurden, und vermuteten, dass diese gehäuft im Spätherbst und der Winterzeit auftraten. Teaford (1991) konnte ebenfalls eine Abnahme der relativen Grubenfrequenz mit Veränderungen des Nahrungsverhaltens bei menschlichen Gruppen entlang der Küste von Georgia und Florida (400 BC - AD 1702) nachweisen und interpretierte dies als ein Indiz dafür, dass der Mensch gelernt hatte, größere abrasiv wirkende Partikel zu vermeiden oder die Nahrungsmittel davon zu reinigen. Grine (1986) konnte diesen Effekt bereits auf Zahnoberflächen hominider Vorfahren des Menschen beobachten (Abb. 125). Auch wenn er Gruben von Kratzspuren durch ein Verhältnis von 10:1 diskriminierte und es dabei zu einer möglichen Überschätzung des Grubenanteiles (38 – 48 % bei *Paranthropus* und 30 – 10 % bei *Australopithecus*) kam, war die Reduktion des Grubenanteiles auf dem Weg zur menschlichen Entwicklung auf allen drei von ihm untersuchten Facetten (Facette 9, 6 und 5 des zweiten Oberkiefermolaren) deutlich. Insgesamt können wir annehmen, dass die knackende

Kaubewegung, welche bevorzugt zur Bildung von Gruben führt, zugunsten der mahelnden und scherenen Kauverhaltensweise auch im Verlauf der kulturellen Entwicklung des *Homo sapiens sapiens* weiterhin rückläufig war (Abb. 124, 125).

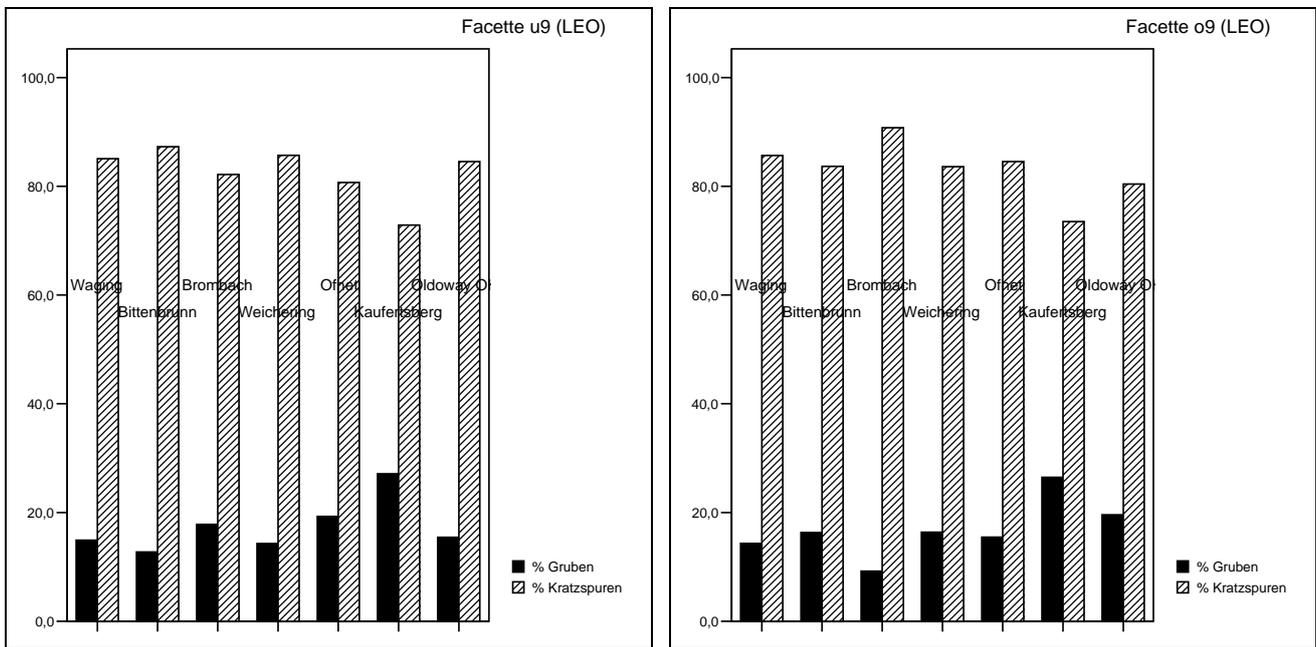


Abb. 124 relativer Anteil der Gruben und Kratzspuren auf dem M2 (Facette 9) des Unterkiefers (li) und des Oberkiefers (re)

Anhand der Ergebnisse einer Studie an Primatenzähnen konnten Teaford und Walker (1984) belegen, dass innerhalb einer Art okklusale Facetten mit gleichen Funktionen vergleichbare, solche mit verschiedenen Funktionen verschiedene Microwear-Muster aufweisen können. Die untersuchten Facetten (scherend: Facette 5 und 6, knackend: Facette 9) könnten eine unterschiedliche Funktionalität widerspiegeln. An zwei Beispielen (Abb. 126 Bittenbrunn und Ofnet-Höhle) wird gezeigt, dass alle Facetten der untersuchten Gruppen eine regelmäßig homogene Dichte, insbesondere der Gruben aufwiesen. Bei den Individuen der Ofnet-Höhle, aber auch aus Weichering war die Dichte der Kratzspuren über alle untersuchten Facetten hinweg homogen. Zum Teil spiegelte dies das Abtragungsmuster der Individuen wider, welche ihr Kronenrelief nahezu abgetragen hatten und eine relativ plan geschliffene homogene Mahl- und Kaufläche nutzten. Eine tendenziell höhere Dichte konnte auf den Facetten der Unterkiefermolaren der Individuen von Waging (Facette 5, 6) und Bittenbrunn, eine niedrigere bei denjenigen von Brombach gefunden werden (Abb. 126 s.a. Abb. 117, 118). Die insgesamt größere Homogenität der Ergebnisse bei älteren und mit großer Wahrscheinlichkeit kleineren Gruppen könnte zum Teil auch damit erklärt werden, dass andere, stärker auf die Gemeinschaft ausgerichtete, Formen der Verfügbarkeit und Verteilung der Nahrung vorlagen als bei jüngeren und größeren menschlichen Gruppen.

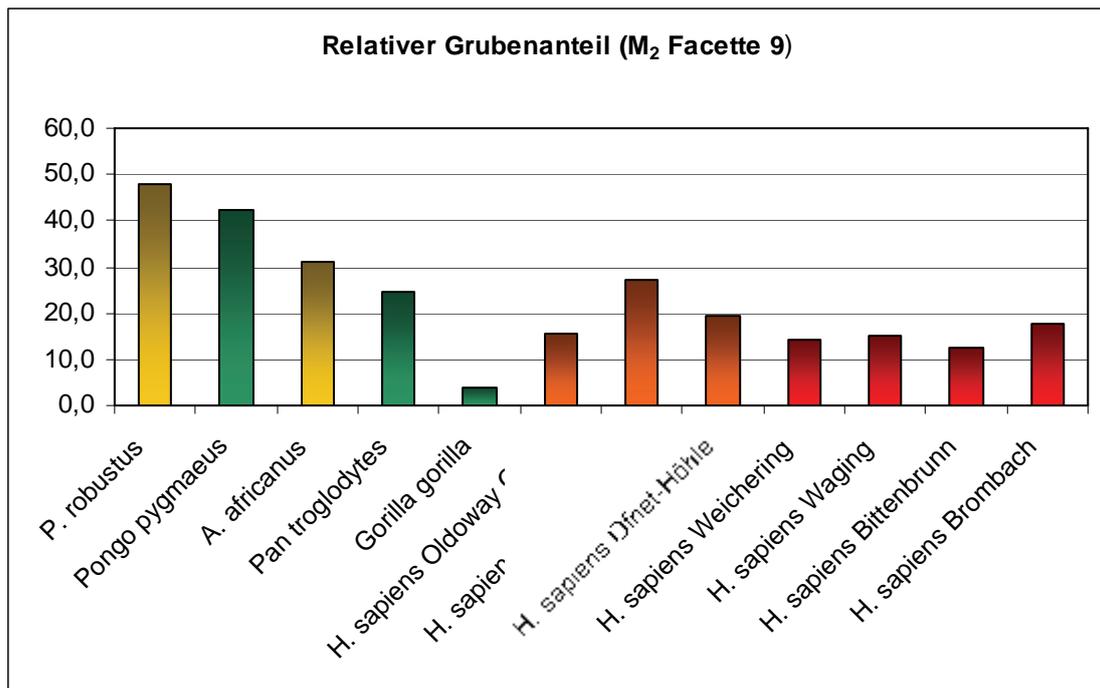


Abb. 125 Molare Microwear: Daten aus Grine (1987), Gügel (2003 und Tab. 33), Teaford (1988a)

Die Untersuchung funktionaler Zusammenhänge einzelner Facetten anhand der Dentalen Microwear ist aufgrund individueller Neigungscharakteristika der kauenden Oberflächen auf der Gruppenebene nicht zu empfehlen. Für diesbezügliche Fragestellungen ist eine auf das Individuum fokussierte Detailanalyse notwendig, welche im Rahmen dieser Untersuchung nicht durchgeführt wurde.

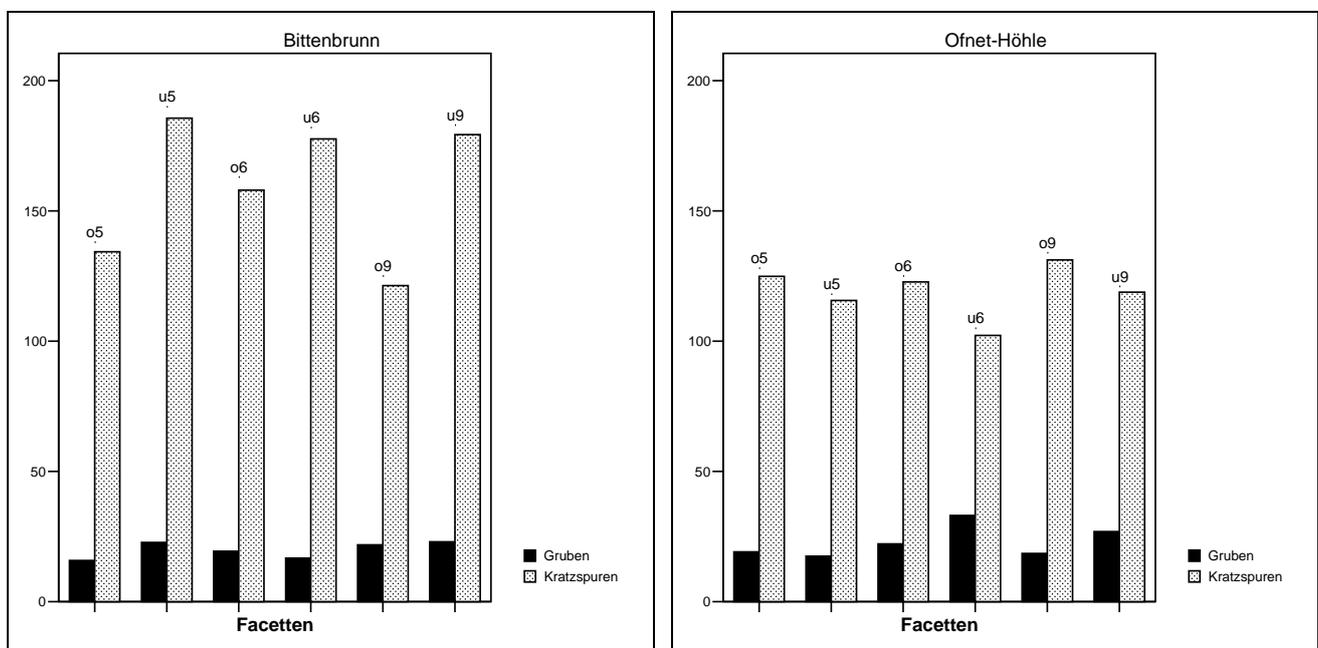


Abb. 126 Verteilung der Dichte von Gruben und Kratzspuren in Abhängigkeit von der Facettenregion am Beispiel

Inwiefern Ernährungsunterschiede innerhalb einer Art nicht-menschlicher Primaten darstellbar sind, ist noch nicht vollständig geklärt. Geringe Unterschiede im saisonalen Ernährungsverhalten waren bei Sammlungsproben von Cebiden (*C. apella*, *C. nigrivittatus*) (Teaford 1989) darstellbar. Unterschiede in der Dentalen Microwear von menschlichen Gruppen mit unterschiedlichen Subsistenzstrategien und

kultureller Eingliederung sind von einigen Autoren publiziert (Bullington 1991, Molleson et al. 1993, Pérez-Pérez et al. 1994, Lalueza et al. 1996a, Muendel und Marks 1997, Teaford et al. 2000, Schmidt 2001, Gügel 2003, Pérez-Pérez et al. 2003). Hierbei wurden sowohl bukkale als auch okklusale Oberflächen berücksichtigt. Sowohl in Abhängigkeit von der kulturellen Periode, als auch der geographischen Lage konnten aus den Ergebnissen der vorliegenden Dentalen Microwear Analyse statistisch signifikante Unterschiede ermittelt werden. Es konnten getrennt nach Facettenarealen sehr einheitliche Trends in der Ausprägung der Microwear-Muster, insbesondere der mittleren Dichte der Gruben und Kratzspuren dokumentiert werden (Tabelle 54).

Die Transformation der relativ abstrakten Resultate der Diskriminanzanalyse zur differenziell entstandenen Microwear in die Dimensionen der absoluten Merkmalsausprägung (Tabelle 54) innerhalb der Gruppierungen (Abb. 127 Mesolithikum bis frühes Mittelalter Beispiel Facette u9; Abb. 129 frühes Mittelalter Facetten u6/o6) ermöglichte nicht nur Aussagen über die Musterbildung dentaler Microwear, sie lieferte auch ein Werkzeug zur Aufklärung der Verursacher von dentalen Mikroläsionen.

Tabelle 54. Tendenzen der Merkmalsausprägung dentaler Microwear

	Gruppierung I	Gruppierung II Einzelfunde	Gruppierung III
	Mesolithikum (O)– Endneolithikum (C)– frühes Mittelalter (B)	Paläolithikum (Old) – Mesolithikum (O) – vermutlich Mesolithikum (Kf)	Frühes Mittelalter Waging a. See (A) – Bittenbrunn (B) – Brombach (D)
Merkmalsdichte (N)	B > O > C	O > Old > Kf	B > A > D
Grubendichte (NG)	O > B > C	O, Old > Kf	A > B > D
Relativer Grubenanteil (%G)	O > B, C	Kf > Old, O	A > B, D
Grubenlänge (GL)	n	Old > Kf > O	D > A, B
Grubenbreite (GB)	n	Old > O, Kf	D > A, B
Kratzspurdichte (NK)	B > O > C	O > Old > Kf	B > A > D
Kratzspurlänge (KL)	O ≥ C > B	O, Kf, Old	D > B, A
Streuung der Kratzspurlänge (KLS)	O > C > B	Kf > Old, O	D > B, A
Verteilung der Orientierung der Kratzspuren (R)	O > B, C	Old > O, Kf	D > B, A

Anmerkung: Schattierung der Kombinationen, welche in mindestens einer Kombination auf mindestens zwei Facetten signifikant waren.

2.2.3 Diachroner Vergleich Dentaler Microwear vom späten Mesolithikum (Ofnet-Höhle), Endneolithikum (Weichering) zum Frühen Mittelalter (Bittenbrunn) einer eng umschriebenen geographischen Region (Donaugebiet im Zentrum von Süddeutschland)

Es konnte festgestellt werden, dass die frühmittelalterlichen Individuen (Bittenbrunn) eine höhere Dichte an Merkmalen aufwiesen als die mesolithischen (Ofnet-Höhle) und insbesondere die endneolithischen (Weichering). Die Orientierung der Kratzspuren war bei den frühmittelalterlichen Individuen eher zufällig in allen Richtungen zu finden ($R < 0,400$), bei den endneolithischen sehr variabel, während die Kratzspuren der Mesolithiker eher zu einer statistischen Verteilung tendierten ($R > 0,500$), mit einer Häufung der Kratzspurausrichtung parallel zur bucco-lingualen Achse der Zahnoberfläche (Gügel 2003). In Abb. 127 sind diese Trends am Beispiel der Facette u9 zu erkennen. Alle Facetten (Abb. 128) zeigten im Trend längere Kratzspuren auf den mesolithischen und endneolithischen Oberflächen, jedoch eine geringere Dichte, ähnlich der gesamten Merkmalsdichte (N), als auf den frühmittelalterlichen.

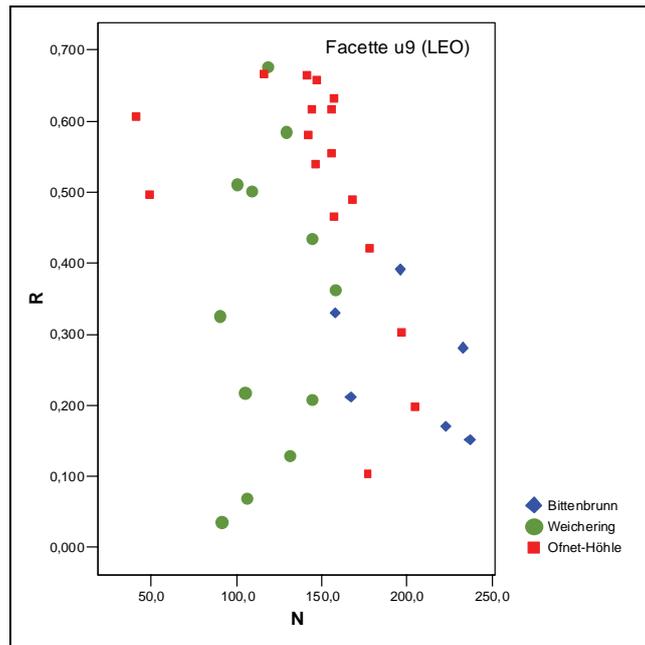


Abb. 127 Diachrone Veränderung von Parametern Dentaler Microwear vom Mesolithikum bis in das frühe Mittelalter in der Donauregion (N = Dichte der Microwear-Merkmale R = Verteilung der Orientierung der Kratzspuren)

Das Kauen von pflanzlichen oder tierischen Fasern verursacht vor allem bei kristallinen Gewebeeinschlüssen oder Kontaminationen mit kleinen harten Partikeln, wie Schmutz oder kleinen Steinchen, Kompressionsgruben, aber auch Kratzspuren. Da Kaubewegungen unbewusst und regelmäßig durchgeführt werden (Kay und Hiiemae 1974), spiegeln lange und vereinzelte Kratzspuren diese Bewegungen wider (Ryan 1979b, Gordon 1984). In Abhängigkeit vom Gehalt und der Größe abrasiver Partikel in der Nahrung werden diese unterschiedlich wahrgenommen. Sind solche Partikel zwischen den Zähnen spürbar (stechender Schmerz beim kraftvollen Zubeißen), wird der Kauvorgang reflektorisch gestört und der Nahrungsbolus entfernt. Werden diese durch Knirschen beim Kauen wahrgenommen, wird der Nahrungsbolus entweder vorzeitig geschluckt oder aus der Mundhöhle entfernt. Dass diese unangenehmen Erfahrungen beim Kauen zu einer verbesserten Aufbereitung (z.B. Waschen der Nahrung, Schälen mit Werkzeugen) führte, kann für alle menschlichen Individuen angenommen werden. Kleinere Partikel in einer Größenordnung von ungefähr 50 µm und kleiner werden nicht mehr wahrgenommen. Sie haben die Eigenschaften wie Schmirgelpapier unterschiedlicher Körnung, indem sie die Zahnoberflächen beim Kauen durch fortlaufendes Überschleifen und Polieren verändern. In Abhängigkeit von der Art der zubereiteten Nahrung wirken diese Partikel unterschiedlich gerichtet. Je zäher und grober die Konsistenz der Nahrung, desto deutlicher wird die Ausrichtung des Kauvorganges an der Orientierung der Kratzspuren ablesbar sein. Je größer der Zubereitungsgrad der Nahrung ist, desto stärker „umspülen“ die abrasiv wirkenden Partikel unter Kompressionsdruck die Oberflächen. Dabei entstehen nach dem Zufallsprinzip zahlreiche Kratzspuren unterschiedlichster Ausprägung mit vielfältigen Überlagerungen. Ein solcher Trend in der Bildung Dentaler Microwear konnte im Verlauf für die Individuen aus den kulturellen Perioden in der Donauregion zentral in Süddeutschland dargestellt werden (Abb. 127 am Beispiel Facette u9).

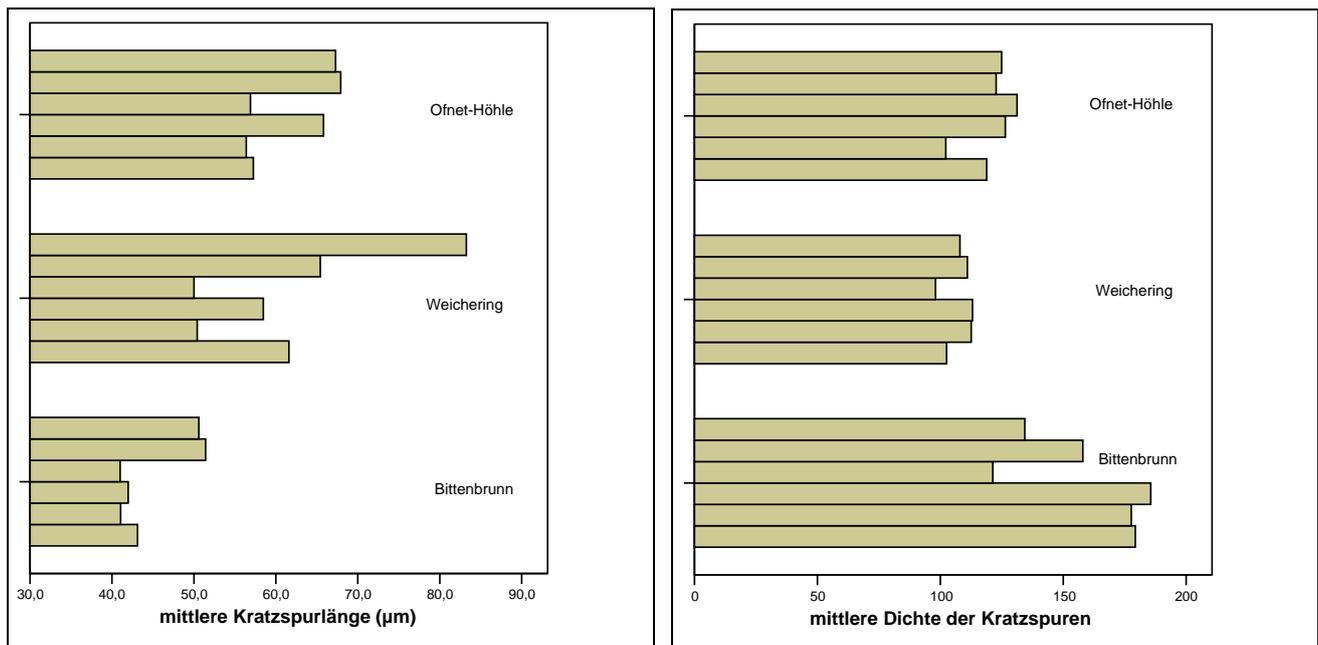


Abb. 124 Kratzspurlänge (links) und –dichte (rechts) im diachronen Vergleich; Balken repräsentieren die Facetten 9, 6, 5 des M₂ im Unterkiefer und des M² im Oberkiefer (LEO 1430 VP) von unten nach oben.

Die Untersuchungen von Lalueza et al. (1993) an bukkalen molaren Oberflächen von sechs modernen menschlichen Gruppen, welche sowohl Ackerbauern als auch Jäger-Sammler einschlossen (unterteilt in drei Kategorien) ließen den Schluss zu, dass eher carnivor sich ernährende Jäger-Sammler weniger Kratzspuren aufwiesen, welche dann eher vertikal und länger waren, als sich vegetarisch oder gemischt ernährende Gruppen. Die in dieser Untersuchung auf okklusalen Zahnschmelzoberflächen gefundenen und beschriebenen Microwear-Muster unterstützen diese Ergebnisse. Da Fleisch keine endogenen abrasiven Partikel enthält, würde eine Zunahme der Merkmalsdichte und der Variabilität der Orientierung der Kratzspuren den Anteil der gesammelten Wildpflanzen an der alltäglichen Ernährung anzeigen. Bei einem allmählichen Übergang zu unterschiedlichen Ernährungspräferenzen treten Unterschiede in den Kaubelastungen auf. Der Übergang von einer eher fleischhaltigen zu einer von Pflanzen dominierten Ernährung impliziert niedrigere Kaubelastungen, aber einen höheren Gehalt an abrasiv wirkenden Partikeln, welche sowohl exogenen Ursprunges, durch anhaftende Erde, oder endogenen, durch kieselensäurehaltige Einschlüsse in pflanzlichen Kompartimenten (Opal-Phytolithe), sind. Diese Partikel verursachen kleine Gruben, eine höhere Dichte an Merkmalen, insbesondere Kratzspuren, welche tendenziell kurz erscheinen oder mehrfach unterbrochen wurden (Lucas und Teaford 1995, Ungar et al. 1995, Gügel 2001). Als Konsequenz einer hohen Abtragsrate, erfahren die Merkmale eine fortlaufende Veränderung. Man spricht von einem “turnover” während des Kauens (Teaford und Oyen 1989a, Teaford und Lytle 1996, Friedel 2000). Dieser hinterlässt unterbrochene und verkürzte ältere Kratzspuren, weniger häufig abgeflachte Gruben, sowie kleinere, neu gebildete Merkmale. Dieser Übergang ist als Gradient deutlich von den Individuen der Ofnet-Höhle (spätes Mesolithikum), über jenen aus Weichering (Endneolithikum, Glockenbecher) bis hin zu jenen aus dem frühen Mittelalter mit ackerbauerlicher Kultur zu beobachten.

2.1.1 Synchroner Vergleich Dentaler Microwear Muster im Frühen Mittelalter (Waging am See, Bittenbrunn, Brombach) im Süddeutschen Raum

Übereinstimmend mit Untersuchungen an frühmittelalterlichen bukkalen Zahnschmelzoberflächen (Lalueza et al. 1993, Pérez-Pérez et al. 1994) zeigten die okklusalen Bereiche der Individuen von Bittenbrunn und Waging ähnlich hohe Merkmalsdichten, insbesondere der Kratzspuren, und etwas unterschiedlich kurze Kratzspuren. Brombach, die jüngste frühmittelalterliche Gruppe im Rahmen der Untersuchung, wich hiervon deutlich ab (Abb. 129 links). Der ermittelte Quotient (N/KL) zeigt diesen Trend nochmals deutlich für alle Oberflächen (Abb. 129 rechts).

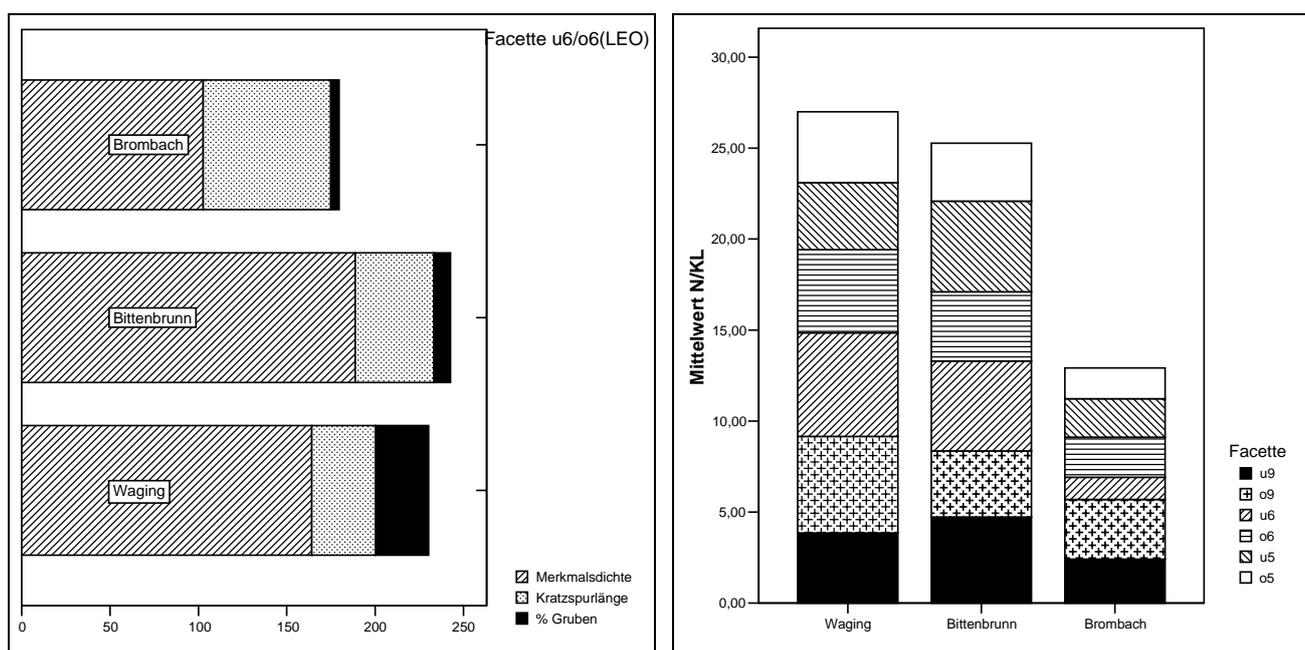


Abb. 125 Trend charakteristischer dentaler Microwear-Parameter bei drei frühmittelalterlichen menschlichen Gruppen im Süddeutschen Raum;

Bei allen drei Gruppen konnten vereinzelt Opal-Phytolithe im Zahnschmelz als Beleg für den Verzehr von Getreide und Getreideprodukten aufgefunden werden. Die Typen und ihre Häufigkeit ließen jedoch im Rahmen dieser Untersuchung keinen Schluss auf die Art und die relative Häufigkeit des verzehrten Getreides zu. Bei den Individuen von Bittenbrunn wies jedoch das Muster einer raschen dentalen Abtragung und die Ergebnisse der dentalen Microwear, insbesondere der Befund der höchsten Dichte an Merkmalen auf eine Nahrung mit einem hohen Gehalt an abrasiv wirkenden Partikeln einschließlich von Getreidephytolithen hin. Archäologische Befunde (Christlein 1971) deuten an, dass die Bevölkerung des frühmittelalterlichen Bittenbrunn, insbesondere aufgrund der Funde aus den Gräbern der Individuen gegen Ende der Belegungszeit, sehr arm gewesen sein dürfte. Im Unterschied dazu wurde die Bevölkerung von Waging am See als wirtschaftlich ausgeglichen beschrieben (Knöchlein 1995). Vermutlich ernährte sich die am See lebende Bevölkerung auch von Süßwasserfischen, welche sie täglich, möglicherweise über das gesamte Jahr hinweg, aus dem heute noch fischreichen See angeln konnten, aber dies stellte eher einen kleinen Anteil an der Ernährung dar. Die Unterschiede im Trend der Kratzspurdichte, Waging lag etwas niedriger als Bittenbrunn, könnten eher ein Hinweis dafür sein, dass

die Möglichkeiten der Reinigung und der Zubereitung der Nahrungsmittel im Vergleich für Waging besser gewesen sein könnten, als für Bittenbrunn.

Das Muster der Individuen aus dem frühmittelalterlichen Brombachtal zeigte eine im Vergleich deutlich niedrigere Merkmals- und Grubendichte, verbunden mit sehr langen Kratzspuren und einer überzufällig gleichmäßigen Orientierung der Kratzspuren. Das Muster ähnelt demjenigen der Individuen aus der Ofnet-Höhle und lässt vermuten, dass die Bevölkerung einen hohen Faseranteil (tierisch und pflanzlich) in ihrer Nahrung hatte. Historische Quellen geben jedoch Hinweise dafür, dass diese Gruppe eine für Ackerbauern sehr gut entwickelte und für das Mittelalter charakteristische Praxis vorzuweisen hatte (Wurm 1982). Dazu zählt eine lokal fortentwickelte Mühlentechnologie entlang des ursprünglichen Brombachflusses, welche für die Zeit kurz nach der Belegung der Gräberansammlung archäologisch und durch Zeichnungen belegt ist (Lidl und Hahn 1989). Die Menschen, welche dort gelebt hatten, ernährten sich sehr wahrscheinlich zu einem großen Anteil von Getreideprodukten, aber auch und zu einem nicht unerheblichen Anteil von Gemüse der Bauerngärten und dem Fleisch heimischer Wildtiere. Sie bereiteten ihre pflanzlichen und tierischen Rohstoffe sorgfältig auf. Besonders das Korn des Getreides wurde sorgfältig entspelzt und die in den Spelzen enthaltenen Opal-Phytolithe aus amorphem Silikat weitestgehend entfernt. Ein großer Anteil abrasiver Komponenten aus der als gemischt beschriebenen Nahrung wurde dabei eliminiert. Die Ähnlichkeit des Microwear-Musters mit dem Muster der Individuen aus der Ofnet-Höhle ist daher durchaus plausibel, und ist in Kombination mit der als eher gering einzustufenden Abtragungsrate ein weiteres Indiz für den Fortschritt in der Wirtschaftsweise der Ackerbauern.

Mit den Ergebnissen aus der Analyse im diachronen als auch im synchronen Vergleich konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der Dentalen Microwear Analyse Zahnoberflächen von Menschen aus Gruppen unterscheidbar sein können, wenn Menschen unterschiedliche Nahrungsgrundlagen nutzten oder das Nahrungsverhalten der Menschen auf unterschiedlichen Techniken bei der Aufbereitung der Rohstoffe beruhte. Auch sind regionale Unterschiede in der Zusammensetzung der Nahrung auf den historischen Zahnoberflächen nachweisbar.

2.1.2 Muster dentaler Abtragung und Microwear des Individuums vom Kaufertsberg bei Lierheim und des ersten Hominiden aus der Oldoway Schlucht OH 1

Das Microwear-Muster des Individuums vom Kaufertsberg zeigte sowohl Übereinstimmungen mit dem Muster von Menschen im süddeutschen Endneolithikum (Weichering) als auch mit demjenigen von Vertretern aus dem späten Mesolithikum (Ofnet-Höhle) (Abb. 130). Unter Berücksichtigung des sehr flachen und fortgeschrittenen Abtragungsmusters des frühadulten Individuums (s. Abb. 66) stützen die Ergebnisse der Dentalen Microwear jedoch stärker die Hypothese der Anthropologen, dass der Schädel vom Kaufertsberg zu der Serie der Kopfbestattungen aus dem Mesolithikum hinzuzuzählen ist (Schröter 1983).

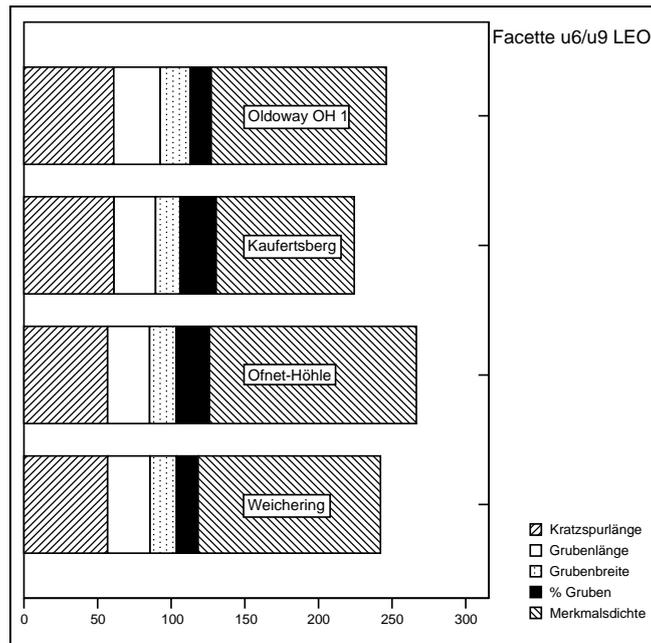


Abb. 126 Muster dentaler Microwear von Individuen des Endneolithikums, späten Mesolithikums und Paläolithikums

Der Hominide OH 1 aus der Oldoway Schlucht in Tanzania wurde in das Paläolithikum datiert (Oakley et al. 1977). Das molare Microwear-Muster stellt sich dar als dasjenige, welches durch eine ähnliche Kost wie bei den Individuen der Ofnet-Höhle entstanden war, ebenfalls mit einem Vorzug für tierische und pflanzliche Fasern, mit einer niedrigen Merkmalsdichte und geringfügig längeren Kratzspuren. Die gleichzeitig auftretenden etwas größeren Gruben sprechen dafür, dass er vermehrt pflanzliche Nahrung mit harten Schalen z.B. Nüsse aber auch gesammelte Samen zu seiner Nahrung zählte. Eine im Vergleich stärkere Verunreinigung der Nahrung mit größeren abrasiv wirkenden Partikeln ist aufgrund der niedrigen Merkmalsdichte eher auszuschließen. Die im Frontzahnbereich des Unterkiefers antemortal bis zum Dentin auffallende Zahnschmelzabtragung (Schneidezähne im Oberkiefer fehlen) des als erwachsen bestimmten männlichen Individuums lässt auf einen massiven Gebrauch der Zähne als Werkzeug schließen. Unterschiede in der Kraft und dem Drehmoment der mandibularen Bewegung während des Kauens von hartschaligen und zähen Nahrungskomponenten kann eine Ursache für die Gebrauchsspuren und die unterschiedlichen, aber dennoch sehr langen und deutlich in einer Vorzugsrichtung orientierten Kratzspuren sein. Stark schwankende Amplituden der Kaukräfte und des Drehmomentes sind sicher mit den Variationen in der Länge der Kratzspuren und in der bevorzugten Orientierung dieser bei einer Ernährung mit geringen Mengen an Abrasivpartikeln in Zusammenhang zu bringen. Da es sich bei dem Schädel um ein Fossil aus einer Region handelt, mit klimatisch und im Bezug auf die Tier- und Pflanzenwelt von den übrigen Individuen sehr verschiedenen Lebensbedingungen, wurde der Beschreibung vor einem statistischen Vergleich der Vorzug gegeben.

2.2 Interpretation der Kohlenstoff- und Stickstoffsignaturwerte

Für den entsprechenden Lebensraum der in der Arbeit untersuchten menschlichen Bevölkerungen im Süddeutschen Raum liegt der größte Fraktionierungsfaktor für die ^{13}C -Isotopien auf der Ebene der grünen Pflanzen in Abhängigkeit ihres vorwiegenden Photosynthesemechanismus (C_3 -Pflanzen) mit der Präferenz für ^{12}C , dem leichten Kohlenstoffisotop. Mit einem relativ konstanten Fraktionierungsfaktor von + 5‰ wird die pflanzliche Nahrung verstoffwechselt. Dadurch weist das Knochenkollagen von

Konsumenten einer solchen Nahrung $\delta^{13}\text{C}$ - Werte von - 21 ‰ auf. Mehrere Autoren haben darauf hingewiesen, die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte um + 1,5‰ nach oben hin zu korrigieren, um den sog. „fossil fuel effect“ (Eintrag von fossilem Kohlenstoff in die Atmosphäre durch die Industrialisierung) beim diachronen Vergleich von Individuen zu berücksichtigen. Auch dürfte sowohl der sog. „Baldachineffekt“, d.h. ein weiteres Absinken der Kohlenstoffisotopien durch das Recycling von CO_2 aus verrottendem Substrat der Waldböden in Bayern, wie auch Unterschiede der ^{13}C -Werte in terrestrischen Nahrungsquellen und solchen aus den Binnengewässern in dem vorliegenden Untersuchungsgut eine Rolle spielen.

Ein signifikanter Trophiestufeneffekt der Stickstoffisotopien durch eine Anreicherung des schweren Isotopes ^{15}N im Gewebe verursacht im Mittel eine Zunahme von ca. 3 - 4 ‰ der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Kollagen des Konsumenten im Vergleich zur konsumierten Nahrung (Schurr 1997). Der Fraktionierungsprozess ist abhängig von den standortbedingten klimatischen Bedingungen, sodass Rekonstruktionen über den Verzehr von stickstoffhaltiger Nahrung innerhalb eines definierten Standortes durchgeführt werden müssen. Eine Zunahme der ^{15}N Werte tritt auf bei gesügten Individuen (Trophiestufeneffekt im mütterlichen Organismus), und in aufsteigender Reihe vom Pflanzen- über den Allesfresser zum primären und sekundären Fleischfresser (Grupe 1999).

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Isotopien der Individuen aus der Glockenbecherzeit (Weichering) liegen mit einem mittleren Wert von -21,54 +/- 0,77 (‰) leicht niedriger als die Werte der frühmittelalterlichen Stichproben (Bittenbrunn -20,11 +/- 0,50, n=5, Brombach -19,95 +/- 0,29, n=5, Waging -19,92 +/- 0,20, n=6) und der spätmesolithischen Proben der Ofnet-Höhle ($\delta^{13}\text{C}$ - 19,67 +/- 0,17) (Ofnet-Höhle: Isotopiewerte aus Bocherens et al. 1997), wobei Bittenbrunn eine Zwischenstellung einnimmt. Eine niedrige $\delta^{13}\text{C}$ -Isotopie könnte einen größeren Anteil an C_3 -Pflanzen, ein höherer (weniger negativer Wert) eine Zunahme an C_4 -Pflanzen in der Ernährung anzeigen. Da C_4 -Pflanzen z.B. Hirse und Mais, ursprünglich in Süddeutschland nicht heimisch waren, dürfte es sich bei dem niedrigeren Signal der Individuen aus Weichering sehr viel wahrscheinlicher um Unterschiede im Anteil an verzehrtem Fisch oder herbivoren Wasservögeln in der alltäglich konsumierten Nahrung handeln. Asam et al. (2004) konnten in einer detaillierten Analyse des Nahrungsnetzes von Wirbeltieren aus dem bayerischen Neolithikum zeigen, dass Süßwasserfisch durch eine allgemein höhere $\delta^{15}\text{N}$ -Isotopie und deutlich niedrigere $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ -Isotopien von den terrestrisch lebenden Wirbeltierarten getrennt werden kann. Sie belegen auch niedrigere $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ -Isotopien in herbivoren Wasservögeln, d.h. bei Gänsen und Enten. Entsprechend niedrigere $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ -Isotopien auf der Trophiestufe der nachfolgenden Konsumenten signalisiert einen höheren Anteil an der Ernährung.

Die Individuen aus der Ofnet-Höhle (Isotopiewerte aus Bocherens et al. 1997) zeigten eine N-Isotopie mit einem Durchschnittswert $\delta^{15}\text{N}$ von 10,77 +/- 0,19 ‰ (n=9). Die Werte für die untersuchten weiblichen Individuen (n=6, $\delta^{15}\text{N}$ mean +/- s 10,78 +/- 0,22 ‰) sind von den Werten der männlichen Individuen (n=3, $\delta^{15}\text{N}$ mean +/- 10,73 +/- 0,15 ‰) nicht zu unterscheiden. Es kann angenommen werden, dass der Anteil an pflanzlichem oder tierischem Protein in der Ernährung relativ hoch und unter den Geschlechtern ausgeglichen gewesen sein dürfte. Sowohl ein deutlicher Anteil an gejagtem Wild in der Ernährung als auch Wurzeln und Pflanzenknollen können dafür verantwortlich sein. Die noch als Wildbeuter lebenden Menschen im ausgehenden Mesolithikum ernährten sich, wie die Funde einer erheblichen Zahl an

Hirschzähnen als Beigaben zu den „Schädelnestern“ belegen können, auch von einem hohen Anteil an Hirschfleisch (Weissmüller 1986).

Die mittleren $\delta^{15}\text{N}$ – Werte von Weichering (9,85 +/- 0,29 ‰, n=4, nur männliche Individuen) lagen mit den Werten der männlichen Individuen der frühmittelalterlichen Gräber Bittenbrunn 34 (M), Waging 115 und 155 auf gleicher Höhe, während die $\delta^{15}\text{N}$ – Werte der Individuen aus der Ofnet-Höhle um ca. 0,90 höher lagen. Das weibliche Individuum aus Weichering, Grab D, welches vermutlich der eisenzeitlichen Periode zuzurechnen ist, zeigte einen Wert von 9,03 und lag damit im Bereich der Werte der weiblichen Individuen von Waging, Gräber 5, 59, 141 und 152 ($\delta^{15}\text{N}$ im Mittel: 9,19 +/- 0,33 ‰), während die Stichproben von Brombach und Bittenbrunn unabhängig vom Geschlecht mit $\delta^{15}\text{N}$ -Werten von 8,53 +/- 0,21 (n=5) bzw. 8,55 +/- 0,34 (n=4) ‰ deutlich niedriger lagen. Der Anteil an tierischem Eiweiß in der Ernährung der Frauen dürfte in Weichering und Waging eine größere Bedeutung gehabt haben, als bei den männlichen und weiblichen Individuen von Bittenbrunn und Brombach. Eine mögliche Ausnahme stellt der Mann aus dem Grab 34 von Bittenbrunn mit einem $\delta^{15}\text{N}$ –Wert von 9,67 ‰ dar, welcher mit den Werten von zwei männlichen Individuen aus Waging, Grab 155 (9,62) und Grab 115 (9,83) übereinstimmte. Das von den Archäologen als sicher beigabenlos befundete Grab 34 vermutlich aus der Mitte des 6. Jahrhunderts, aus welchem ansonsten eine reichhaltige Beigabenpraxis auch für dieses Gräberfeld belegt ist, lässt annehmen, dass ein erhöhter Verzehr von Fleisch ursächlich für den tendenziell als carnivor zu bewertenden Stickstoffwert sein könnte. Der Verzehr von Hülsenfrüchten als Proteinquelle spielte vermutlich eher eine geringfügige Rolle. Der Mann aus Brombach, Grab 9, zeigte eine $\delta^{15}\text{N}$ -Isotopie von 11,71 ‰. Der Wert lag um fast 1,0 ‰ höher als die Werte der Individuen aus der Ofnet-Höhle. Zusammen mit den übereinstimmenden Mustern der Dentalen Microwear von Brombach und der Ofnet-Höhle liegen starke Hinweise vor, dass der tierische Faser- und Proteinanteil in der alltäglichen Ernährung bei beiden Gruppen eine mengenbezogen unterschiedliche aber nachweisbare Rolle gespielt haben dürfte.

Die epochal punktuellen Befunde führen zu der Annahme, dass der Proteingehalt in der Ernährung von den älteren Gruppen im späten Mesolithikum zu den jüngeren menschlichen Gruppen im frühen Mittelalter abgenommen hat. Bei den Ausnahmen, bei denen die $\delta^{15}\text{N}$ -Isotopien höher lagen, handelt es sich ausschließlich um männliche Individuen.

Die Unterschiede in den $\delta^{15}\text{N}$ -Isotopien reflektieren sich auch im Muster der Dentalen Microwear. Je höher der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert lag, desto niedriger war die Merkmalsdichte und desto länger waren die Kratzspuren, mit Ausnahme der Gruppe aus Brombach.

Das intermediäre Muster der Dentalen Microwear der Individuen aus Weichering im Vergleich zu Bittenbrunn und der Ofnet-Höhle spiegelt sich in den Isotopie-Werten wider. Die niedrigeren Merkmalsdichten verstärken die Plausibilität der Annahme, dass ein höherer Anteil von Fisch aus den umliegenden Gewässern verzehrt wurde, welcher zu niedrigeren $\delta^{13}\text{C}$ -Werten der untersuchten Organismen führte (Asam et al. 2004) und im Unterschied zu terrestrischer Nahrung keine Staubkontamination und damit kaum abrasive Partikel beinhaltete. Der Befund von Brombach, ausgenommen das Individuum aus Grab 9 (spätes Mittelalter), weist in Übereinstimmung mit dem Microwear-Muster auf eine frühmittelalterliche Mischkost hin, welche sich im Bezug auf den Gehalt an Protein sogar noch geringfügig unterhalb des Anteiles der Gruppen aus Bittenbrunn und stärker noch aus Waging befindet.

Zumindest für die Menschen aus dem frühmittelalterlichen Brombachtal können wir annehmen, dass die Wahrnehmung der sukzessiven Veränderungen der kauenden Oberflächen, das Bewusstsein für den Erhalt der Fähigkeit zum Kauen und das persönliche Interesse am Einfluss von Nahrungsmitteln auf die Zähne eine nicht unerhebliche Rolle bei der Entwicklung von effektiveren Reinigungs- und Aufbereitungsverfahren der Nahrungsmittel spielten.

IV. Zusammenfassende Diskussion zum Muster-Bildungs- und Auslöschungsprozess simulierter und real komplexer Microwear

Unter Anwendung von Methoden aus der experimentellen Zahnmedizin und der Dentalanthropologie erfolgte die Bearbeitung der gestellten Aufgabe. Diese bestand darin, das Fortschreiten und die Musterbildung dentaler Zahnschmelzabtragung und Mikroläsionen (Dentale Microwear) zu analysieren und zu beschreiben. Die Vorgehensweise stellt eine Innovation im Bezug auf eine Synthese der Dynamik der Zahnschmelzabtragung mit dem Entstehungsprozess und den Ursachen Dentaler Microwear und ihrer Muster dar.

Tribologische Standardkonzepte zur Prüfung zahnmedizinischer Werkstoffe wurden anhand von Erfahrungen aus Pilotstudien modifiziert (ACTA, Kaukraftsimulator MUC III), sodass der simulierte Kauvorgang auf natürlichem menschlichem Zahnschmelz erfolgen konnte. Unter Standardbedingungen wurde die Zahnschmelzabtragung durch das „Kauen“ von Getreidebrei simuliert. Der Verlauf des Abtragungsvorganges wurde durch mehrere Parameter, die Abtragungsgeschwindigkeit, die absolute Abtragung, der Entstehungsprozess und die Musterbildung dentaler Microwear, dokumentiert.

Mit dem experimentellen Teil der Arbeit wurde ein weiterer Schritt in die Nahrungsrekonstruktion begonnen. Mit der beschriebenen Vorgehensweise wird das methodische Feld zur Erschließung direkter Beobachtungsmöglichkeiten für kausale Zusammenhänge bei der Entstehung dentaler Macro- und Microwear deutlich erweitert. Eine direkte Nachweisführung für die Ursache von Zahnschmelzläsionen konnte in einzelnen Fällen erfolgen.

Für die moderne zahnmedizinische Forschung, insbesondere auf dem Gebiet der Zahnerhaltung, als auch für den innovativen Forschungszweig moderner Nahrungsmittel-Herstellung und -Zubereitung hat der diagnostische Zugang zu einer direkten Wirkung von Nahrungsmitteln und deren Aufbereitung für den Verzehr auf natürliche Zahnschmelzsubstanzen eine große Bedeutung.

Die Resultate aus der Analyse real komplexer Microwear lieferten überzeugende Belege dafür, dass einerseits dentale Zahnabtragungs- und Microwear-Muster von menschlichen Gruppen aus dem süddeutschen Raum vom Mesolithikum bis in das frühe Mittelalter darstellbar und differenzierbar sind. Der Vorgang der Entstehung und Veränderung konnte an Zahnschmelzoberflächen dargestellt, beschrieben und untereinander verglichen werden. Andererseits können die in der Form eines Kataloges abgebildeten Einzelmerkmale und Muster der Microwear-Merkmale als Referenz dienen, um sie den simulierten Mustern, welche durch das Kauen von „Standardkost“ entstanden sind, gegenüberzustellen. Der Anfang einer Katalogisierung historischer Oberflächen ist vollzogen. Sowohl Merkmale historischer als auch rezenter Oberflächen können jederzeit hinzugefügt werden und als vergleichende Bild-Datenbank für die zukünftigen Forschungen erstellt werden. Die bisher erzielten Ergebnisse leisten damit

einen wertvollen Beitrag zur Aufklärung der Microwear-Formations-Prozesse und geben Einblick in das Potential der Methode für kleinräumige Gebiete, ihre Grenzen und ihre Interpretationsmöglichkeiten.

Das in das Mesolithikum datierte Individuum vom Kaufertsberg/Lierheim und der in das Jungpaläolithikum datierte erste Hominide aus der Oldoway Schlucht OH 1 konnten als besondere Fallbeispiele in die Untersuchung aufgenommen werden. Als Einzelfälle konnten diese aufgrund ihres charakteristischen morphologischen und morphometrischen Dentalen Microwear-Musters in die Chronologie der menschlichen kulturellen Epochen eingeordnet werden, sie zeigten aber auch deutlich divergierende Eigenschaften. Insbesondere für das Individuum vom Kaufertsberg konnte durch das charakteristische Microwear-Parameter-Muster ein weiteres Indiz erbracht werden, welches belegt, dass der Schädel der Serie der Kopfbestattungen aus dem Spätmesolithikum zuzurechnen ist.

Zusammenfassung der Simulation dentaler Microwear und der Analyse dentaler real komplexer Microwear

Die Kausimulationen sind aufgrund ihrer unterschiedlichen Anordnung (ACTA: pin-on-disk; Kausimulator MUC III: pin-on-block) in ihrer Verschleißmechanik zu unterscheiden. Unterschiede wurden deutlich in der Abtragungscharakteristik und in der Höhe des absoluten Verschleißes. In beiden Anordnungen konnten Abtragungsfacetten simuliert werden. An Zahnproben in der ACTA-Anordnung konnten am ursprünglich intakten Schmelzhöcker nach kurzer Simulationsdauer vorwiegend im okklusalen Bereich abtragungs- und ermüdungsbedingte Gruben und großflächige Prismenfreilegungen festgestellt werden (Funktion: „crushing“ oder „knackende“ Facette). Diese wurden im Verlauf der Simulation sukzessive überschliffen und tendenziell zu einer ebenen Oberfläche abgetragen (Funktion: „shearing and grinding“ oder „scherende und mahlende“ Facette). In der Simulation konnte auch die enge Korrelation des Höhenverlustes von Zahnschmelz mit der Größe der Fläche, auf welche die Kräfte einwirkten, ähnlich dem Abrieb an natürlichen Zahnhöckern, dargestellt werden.

Zahnproben aus dem Kaukraftsimulator zeigten ebenfalls deutliche Abtragungsfacetten, an welchen sowohl an den Facettenrändern als auch auf der Abtragungsfläche zahlreiche großflächige Zahnschmelzverluste (Macrowear) auffindbar waren. Das Ausmaß des absoluten Zahnschmelzverlustes lag um einen Faktor von 3 –4 fach höher als bei der ACTA-Simulation. Eine der Physiologie angenäherte Kompensation überbelastender Kräfte, welche dem elastischen Moment einer Abfederung bei der hydraulischen Bremswirkung beim „natürlichen Kauen“ entspräche, konnte offensichtlich besser bei der ACTA-Simulation als bei der Kaukraftsimulation am MUC III erreicht werden. Die morphologische Charakteristik der simulierten dentalen Macrowear war in beiden experimentellen Anordnungen derjenigen real dentaler Macrowear im oberen Bereich von Schmelzhöckern und am Rand von Facetten vergleichbar.

Sowohl bei der ACTA- als auch der Kaukraftsimulation MUC III entstanden auf den Zahnschmelzproben Gruben, deren metrische Dimensionen im Rahmen der Gruben real komplexer Microwear vergleichbar waren. Es konnten auch in einzelnen Fällen charakteristische Gruben übereinstimmend in Abhängigkeit vom „gekauten“ Getreidebrei gefunden werden (Abb. 46 – 51, Tabelle 15, S. 76 – 78). Es konnte eine vergleichbare Grube in der sog. „Roggen- oder Haferform“ auf einer Zahnoberfläche wiedergefunden werden (Abb. 94 K), ein Beleg der einerseits sehr selten ist, aber andererseits keine Ausschließlichkeit in der Ursache dokumentiert d.h. das Merkmal könnte auch durch ein anderes Partikel entstanden sein.

Mit zunehmender Abtragung nahm die Anzahl von Gruben bei Zahnproben unter standardisierten Bedingungen im Kaukraftsimulator MUC III ab. Bei der Untersuchung real komplexer Microwear konnte festgestellt werden, dass die Dichte der Gruben auf den verschiedenen Facetten nahezu gleich war. Eine Tendenz zu einer geringfügig größeren Grubendichte auf mandibularen Oberflächen war nicht signifikant. Eine altersabhängige Entwicklung dentaler Microwear-Muster wurde im Rahmen dieser Untersuchung nicht durchgeführt. Aus älteren Studien ist jedoch bekannt, dass bei juvenilen Individuen die Anzahl der Gruben mit dem Alter zunimmt, dann relativ stabil bleibt und im maturaen Alter wieder abnimmt.

Kratzspuren, welche bei der ACTA-Simulation auf den Zahnproben entstanden, zeigten vorwiegend die Richtung der Rotationsbewegung der Drehräder. Eine systematische Analyse der Kratzspuren auf den simulierten Oberflächen im Kaukraftsimulator konnte entgegen der Erwartungen ebenfalls nicht durchgeführt werden. Die wenigen Kratzspuren, welche aufzufinden waren, verliefen in der Regel über den gesamten Verschleißbereich, ebenfalls parallel zur Simulationsrichtung ausgerichtet. Ihre Ausprägung war sehr schwach und nur schemenhaft erkennbar. Bei höheren Vergrößerungen waren zarte Spuren zu erkennen, welche durch einen Schmierfilm überlagert schienen. Die Kratzspuren auf den historischen Zahnschmelzoberflächen waren dagegen deutlich abgrenzbar.

Die Komplexität des natürlichen Kauvorganges und die Bildung komplexer Microwear-Muster waren nicht mit den beschriebenen Simulationsmethoden zu erreichen. Einzelne Aspekte dieser Komplexität konnten durch die technischen Anordnungen in der Simulation nicht realisiert werden. Die Bildung von Mikroläsionen aufgrund harter oder abrasiv wirkender Inhaltsstoffe kann daher sehr stark beeinflusst werden. Insbesondere die wirkenden Kräfte, mit welcher diese entstehen, sowie ihre räumliche Ausdehnung, lassen sich nur modellhaft festlegen. Einen wichtigen Faktor hierbei stellten die Unterschiede in der elastischen Abfederung und unterstützenden Kraftkompensation durch den Kauapparat beim natürlichen Kauvorgang dar, sowie die fortlaufende Erneuerung des Nahrungsbolus beim Verzehr von Nahrung. Am Beispiel der Orientierung von Kratzspuren, welche einen sehr wichtigen Parameter bei der Analyse dentaler Microwear darstellt, wird der Modellcharakter einer Simulation deutlich. Während im Bereich von 180° mit differenzieller Präferenz die Orientierungen der Merkmale real komplexer Microwear zu detektieren sind, erscheinen insbesondere die Kratzspuren auf den simulierten Zahnproben nahezu parallel, als Artefakt einer monotonen Bewegung. Ein weiteres Beispiel ist die Bildung dentaler Macrowear, welche deutlich bei der Simulation im Kaukraftsimulator hervortrat. Das Fehlen der im natürlichen Kiefer vorhandenen abfedernden und unterstützenden Komponenten (Abb. 5, S. 16/17) verursachte insbesondere bei dieser Simulationsmethode eine starke Materialermüdung, welche zu einer deutlichen Überschreitung der mechanischen Materialeigenschaften des anisotropen Zahnschmelzes und damit zu großflächigen und in die Tiefe wirkenden Schmelzverlusten führte.

Zusammenfassung des Formations- und Bildungsprozesses dentaler Microwear

Die Ergebnisse aus den Simulationen zeigten, dass die Zahnschmelzabtragung und Bildung dentaler Microwear einerseits abhängig von der Härte und Beschaffenheit der verzehrten Nahrung und deren Inhaltsstoffe und andererseits, wie Xu et al. (1998) ebenfalls zeigen konnten, von der Beschaffenheit des Zahnschmelzes und der mikrostrukturellen Orientierung der Zahnschmelzprismen im Bezug auf die Oberfläche, auf welche die Kräfte ausgeübt wurden.

Mikrohärteteste (Craig und Peyton 1958, Meredith et al. 1996) und Kompressionsteste (Craig et al. 1961) hatten gezeigt, dass das E-modul und die Härte für Höcker- oder Oberflächenschmelz größer waren, als für seitlichen Schmelz oder Zahnschmelz in tiefer gelegenen Schichten. Um die wirkenden Kräfte in der ACTA-Kausimulation den physiologischen Bedingungen zu entsprechen, wurde der Zahnschmelz für die Zahnproben so präpariert, dass die mechanischen Eigenschaften einer natürlichen Höckerstellung vergleichbar waren. Das Verhalten auf den „bekauten“ Zahnoberflächen entsprach einem Verhalten beim Aufbeißen auf intakten Zahnhöckern, welche im Verlauf des Abtragungsgeschehens zu Scherfacetten ummodelliert wurden.

Durch eine möglichst standardisierte Auswahl, Präparation und Anordnung der Zahnproben zur Kausimulation wurde eine von Hassan et al. (1981) beschriebene hohe Variation der Bruchbeständigkeit zwischen dem Schmelz verschiedener Zähne und zwischen verschiedenen Bereichen des gleichen Zahnes möglichst auf ein Minimum reduziert. Dennoch zeigten Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an den „bekauten“ Zahnproben im Kaukraftsimulator Aussprengungen, multiple Risse und mikroskopische Oberflächenunregelmäßigkeiten, die von Rasmussen et al. (1976) als kontrolliertes Frakturverhalten gedeutet wurden. Im Vergleich zu den ACTA-Proben wie auch den historischen Zahnoberflächen trat dieses Frakturverhalten bei der Kaukraftsimulation deutlich vermehrt auf.

Wie im Abschnitt C.2.2. angedeutet, könnten bei der Aufklärung des Bruchmechanismus und der entstehenden verschieden geneigten Abtragungsfacetten die morphologische Charakteristik einzelner Microwear-Merkmale, insbesondere die Ausbildung von Mikrofrakturen und Gruben wertvolle Informationen liefern. Die am Abtragungsprozess beteiligten Facettenareale zeigten verschiedene Stadien dentaler Microwear-Muster, aber auch verschiedene Neigungen, welche in der Arbeit nicht quantifiziert wurden.

Auf solchen Arealen konnten auch Merkmale aufgefunden werden, welche sich im Bildungsprozess (Abb. 85) befanden. Es traten Mikrobrüche durch Druckbelastung um interagierende Schmelzstäbe auf und der Bruchweg bestand aus einer Serie von halbkreisförmigen Mikrorissen um Gruben oder breiten Kratzspuren (Abb. 85 A - D). Im intakten Zahnschmelz verlaufen die Prismenstäbe in Abhängigkeit von der Lokalisierung auf dem Kronenrelief mehr oder weniger stark in senkrechter Orientierung zur Oberfläche. Im Verlauf der Evolution des menschlichen Zahnschmelzes konnte sich ein effektiver Bruchstoppmechanismus entwickeln, welcher sich in einem anisotropen Verhalten der Prismenstäbe zeigt. Unter physiologischen Belastungen von 2 – 50 N konnte im Experiment nachgewiesen werden, dass die Art und Ausbreitung von Rissen parallel zu den Schmelzstäben wesentlich stärker ist, als im rechten Winkel zu diesen (Spears 1997, Xu et al. 1998), d.h. das schwache Grenzen zwischen den Schmelzstäben existieren. Drei Beobachtungen führen die Autoren als Beleg dafür an. Auf der okklusalen Schmelzoberfläche traten Brüche durch Eindellung um interagierende Schmelzstäbe auf und der Bruchweg bestand aus einer Serie von Halbkreisen. Bei Eindellungen im axialen Schmelzschnitt bilden sich Mikrobrüche um die Schmelzstäbe und zeigen damit die Schwäche der Stabgrenzen an. Induzierte Brüche im axialen Schnitt durch Eindellung waren länger in der Richtung parallel zu den Schmelzstäben als in der rechtwinkligen Richtung, welche dann gebogen waren um sich mit den Achsen der Stäbe auszurichten. D.h. es scheint schwieriger für Brüche zu sein durch die Schmelzstäbe durchzuschneiden als den Stabgrenzen zu folgen, womit die Beobachtung von Staines et al. (1981) (die Zahnschmelzhärte ist größer bei rechtwinkeligem Eindringen, kleiner bei paralleler) bestätigt wurde. Abhängig von der

Anordnung der Schmelzprismen relativ zur Orientierung des Risses kann sich die Bruchfestigkeit von Zahnschmelz bis zu einem Faktor von drei unterscheiden (Xu et al. 1998). Bei Annäherung oder Überschreitung des Betrages der kritischen Zugspannung (σ) treten Materialfehler in Form scharfer Risse auf, abhängig von der Geometrie des Objektes und den Beladungsbedingungen.

Als Konsequenz aus den vorgenannten Überlegungen entwickelt eine plastische Deformation der Oberfläche bei Überschreitung der kritischen Druck- und Zugbelastung, entsprechend der Neigung der Prismenstäbe zur Oberfläche ein individuell charakteristisches Mikrofrakturgeschehen. Der wirkende Kraftvektor spielt vermutlich eine entscheidende Rolle dabei, ob sich eine symmetrische oder eine graduell asymmetrische dreidimensionale Mikrofraktur entwickelt. Im Verlauf des Kauvorganges wird das nur noch locker eingebundene Hydroxylapatit herausgelöst und zusammen mit der Nahrung von der Zahnoberfläche entfernt. Ein eher symmetrisches Mikrofrakturgeschehen wird zu dreidimensional symmetrischen Microwear-Merkmalen führen und ein kontinuierlich stattfindender Abtragungsprozess dann zu einem Abtragungsmuster, welches eine gleichmäßige und plane Oberfläche aufweist. Im Unterschied dazu wird ein graduell asymmetrisches Mikrofrakturgeschehen in asymmetrisch ausgeprägten Microwear-Merkmalen resultieren, und der asymmetrische Materialverlust bei kontinuierlicher Abtragung eine entsprechend geneigte Oberfläche entwickeln. Die räumliche Ausdehnung der individuellen dentalen Microwear-Merkmale sollte deshalb eine Funktion sowohl der Form und Härte der Nahrungskomponenten, als auch der Richtung und Stärke der einwirkenden Kaukräfte auf die lokalen Eigenschaften des Zahnschmelzes darstellen. Eine Abnahme der Mikrohärtigkeit mit zunehmendem Abstand zur Schmelzoberfläche wurden von Meredith et al. (1996) beobachtet. Änderungen in der Mikrohärtigkeit und den Brucheigenschaften des Zahnschmelzes sind sowohl mit dem Grad der Schmelzprismenanordnung (Cuy et al. 2002) und als auch mit der lokalen chemischen Zusammensetzung (P_2O_5 , CaO, Na_2O , MgO), insbesondere mit dem Grad der Calcifizierung (Kodaka et al. 1992, Cuy et al. 2002) stark korreliert. Zahnschmelz wird jedoch auch ohne Riss- und Bruchbildung kontinuierlich abgetragen und trägt damit einen wichtigen Beitrag bei der Bildung neuer Oberflächen bei. Bezirke, die arm an Calcium und Phosphat waren, zeigten zudem eine geringere Säureresistenz und größere Kariesanfälligkeit. Inwiefern sich diese Veränderungen des Zahnschmelzes durch die kontinuierliche Abtragung auf die räumliche Ausdehnung neu entstehender dentaler Microwear auswirkt, ist noch nicht geklärt. Die Untersuchung des individuellen Musters dentaler Microwear stellt eine Momentaufnahme in diesem kontinuierlich stattfindendem Prozess dar. Wir können aber vermuten, dass sich mit zunehmender Abtragung des Zahnschmelzes ein individuelles Gleichgewicht zwischen Bildung und Auslöschung dentaler Microwear entwickelt, welches die stabilen Verhaltensformen bei der Nahrungsaufnahme widerspiegeln wird.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass die mikrostrukturellen Eigenschaften von Zähnen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften menschlicher Zähne in mikroskopischen Dimensionen besitzen.

Das Abtragungsgeschehens und die Bildung Dentaler Microwear weist im natürlichen Vorgang des Kauens eine enorme Komplexität auf. Daher ist der Durchführung von *in-vivo* Simulationen in der Zukunft - sofern möglich - stets der Vorzug vor *in-vitro*-Simulationen zu geben. Jedoch bietet die Möglichkeit der *in-vitro*-Simulation ein hervorragend geeignetes Modell, um einzelne Faktoren der mikrostrukturellen Eigenschaften von biologischem und für den Zahnerhalt synthetisch entwickeltem Hydroxylapatit zu testen und aufzuklären.

Bedeutung und Nutzen der dentalen Microwear-Analyse bei der Rekonstruktion historischen Ernährungsverhaltens und der Nahrungsmittelzubereitung

Die Dentale Microwear Analyse (DMA) ist heute neben der Bestimmung der stabilen Isotope und ihrer Fraktionierungen ein häufig genutzter Ansatz, die Ernährungsweise ausgestorbener Tierarten und der Vorfahren des Menschen zu rekonstruieren. Der allgemeine Fortgang schließt die bildhafte Darstellung der Zahnschmelzoberfläche durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen ein. Die Oberfläche wird im Hinblick auf alle vorhandenen Merkmale durchmustert und die einzelnen Merkmale morphometrisch quantifiziert. Vergleichende Untersuchungen an lebenden Tieren, vereinzelte *in-vivo*-Studien an Menschen und unter Simulationsbedingungen spüren Zusammenhänge zwischen der verzehrten Nahrung und dem Dentalen Microwear-Muster auf.

Die mikromorphologische Analyse der Zahnschmelzareale (DMA) birgt in mehrfacher Hinsicht ein großes Potential als analytisches Werkzeug. Einerseits liegt dieses Potential in vergleichenden Untersuchungen zur Wiederfindung charakteristischer Merkmale und in Untersuchungen zur Erstellung eines umfassenden Kataloges mechanisch entstandener Spuren durch die individuelle Ernährung. Die ermittelten Daten erlauben eine sehr differenzierte Interpretation auf der Gruppen- und mit Hilfe weiterer Bemühungen auf diesem Gebiet auch auf der Individualebene.

Andererseits könnte dieses Werkzeug, welches retrospektiv zur Analyse der Formations-Prozesse Dentaler Microwear geeignet ist, auch bei der Aufklärung der Entstehungsgeschichte funktionaler Geometrien des kristallinen und anisotropen Zahnschmelzgefüges beitragen.

Die Nützlichkeit und Anwendbarkeit der Methode der DMA unterliegt allerdings klaren Einschränkungen, die von verschiedenen Faktoren abhängen. Einwirkungen durch die Bodenlagerung und die limitierte Anzahl an meist fragmentierten Überresten von Individuen erschweren sowohl die Möglichkeit, zuverlässige Daten zu ermitteln, als auch die Interpretation der Ergebnisse oder lassen solche gar nicht zu. Eine weitere Einschränkung der Anwendungsökonomie der Methode ist der hohe Zeitaufwand, der bislang nötig ist, um zuverlässige Daten zur statistischen Aufarbeitung der Microwear zu erzielen und diese durch angemessene Wiederholung zu verifizieren. Eine erst vor kurzem von Ungar et al. (2003) entwickelte Methode zur dreidimensionalen Erfassung der Zahnschmelzoberflächen in hoher Auflösung mit anschließender automatischer Berechnung der Oberflächenbeschaffenheit durch mathematische Triangulation wird in aller Voraussicht diese nicht unerhebliche Einschränkung auf ein Minimum reduzieren und einen Zugang in die räumliche Auswertung Dentaler Microwear ermöglichen. Durch die objektive Charakterisierung der Oberflächen werden die Hauptfehlerquellen beseitigt und die Auflösungskraft der Merkmale zur Differenzierung zwischen Arten erhöht (Ungar et al. 2003).

Werden weitere Methoden zur Diagnostik des Abtragungs- und Zahngebrauchsgeschehens in die Untersuchungen von historischem Zahn- und Skelettmaterial herangezogen, kann ein mehr-dimensionaler Ansatz ein komplexes Bild über die Ernährungsstrategien und Versorgungslage ermöglichen (Grace 1990, Gügel 2003, Ungar et al. 2002).

Die erste Ebene stellt die morphologische Charakteristik des Kiefers, die Ermittlung des Zahnstatus und mögliche pathologische Erscheinungen am dentalen Komplex dar. Die zweite Ebene liegt im makroskopischen Abtragungsmuster und in der individuellen Facettenausprägung einschließlich der Entfernung von für den entsprechenden Zahn charakteristischen Oberflächenstrukturen wie Höcker,

Fissuren, Faltungen und Perikymatien. Die dritte Ebene bezieht sich auf die mikroskopisch hochauflösende Darstellung der Zahnoberflächen, im besonderen der Art der Abgrenzung einzelner Zahnkontaktbereiche, der Art und Zusammensetzung spezifischer oder unspezifischer Auflagerungen, dem Ausmaß der Exposition prismatischer Hydroxylapatit-Strukturen aufgrund von erosiven oder artefiziellen Prozessen und, diagnostisch im besonderem bedeutsam, dem Mikroläsions- oder auch Mikropoliermuster, d.h. dem charakteristischen Muster von Microwear-Merkmalen und möglichen Einlagerungen.

Unter Berücksichtigung der Bedeutung der Ernährung und der Energiebilanzen für die Evolution des modernen Menschen (Wood and Brooks 1999) sollte der analytische Prozess so gestaltet sein, dass unter selektiv und ausgewogen ökonomischer Nutzung aller möglichen der Archäologie und Anthropologie zur Verfügung stehenden Ressourcen ein möglichst umfassendes detailliertes Bild des Nahrungsverhaltens sowohl auf der individuellen Ebene als auch auf der Gruppen- oder Populationsebene entwickelt werden kann. Für vergangene Bevölkerungen existieren naturgemäß nur indirekte und fragmentarische Belege. Es ist deshalb unvermeidbar, dass widersprüchliche Erklärungen auftreten können, die eine Revision aufgrund neuerer Erkenntnisse und Informationsquellen notwendig machen.

Eine besondere Bedeutung hat die Analyse der DM in der Rekonstruktion der Ernährungsweise von zahlreichen fossilen Säugetierarten auch im Vergleich mit deren rezenten Nachfahren. Sowohl Prozesse der Diversifikation durch das Erschließen unterschiedlicher Nahrungsnischen als auch Prozesse der Domestikation können an differenziellem Microwear-Muster nachvollzogen werden. Neuere Arbeiten zeigten, dass Veränderungen von Lebensumwelten durch Wanderungsverhalten (Merceron et al. 2004a) oder Klimaveränderungen (Merceron et al. 2004a, b, 2005) ebenfalls mit Hilfe der DMA rekonstruiert werden können.

Fragestellungen im Bezug auf die Bruchcharakteristik des anisotropen Zahnschmelzgefüges können durch die Verknüpfung von Daten aus simulierter und real komplexer Microwear in der Zukunft bearbeitet werden. Erzielte Erkenntnisse über das Abtragungsgeschehen können die Grundlage bilden für den Einsatz künstlich erzeugter Apatitkristallisationen an Kollagenfasern als Zahnersatzmaterial der Zukunft, welche dem Werkstoff Zahnschmelz an physikalisch und chemischen Eigenschaften stark ähneln.

Um den Bestrebungen in der modernen Dentalmedizin gerecht zu werden, dem Menschen eine zahnerhaltende und gesundheitsfördernde Ernährung zu ermöglichen und diese zu unterstützen, könnten in Zukunft *in-vivo*-Untersuchungen und -Simulationen dentaler Makro- und Mikroläsionen bei der Entwicklung neuer, moderner Lebensmittel (z.B. Müsliriegel, Snacks) ein wichtiges Element werden.

V. Literatur

- Aaronson S. (1989):** Fungal parasites of grasses and cereals: Their role as food or medicine, now and then. *Antiquity*, 63, S. 247-257.
- Ahlgren J. (1976):** Masticatory movements in man.- In: Anderson D.J., Matthews B.: *Mastication*. John Wright and Sons, Bristol, England.
- Aiello L.C., Wheeler P. (1995):** The expensive tissue hypothesis: The brain and the digestive system in human and primate evolution. *Cur Anthropol*, 36, S. 199-221.
- Ambrose S.H. (1993):** Isotopic analysis of paleodiets: methodological and interpretative considerations.- In: Sandford M.K.: *Investigations of ancient human tissue*. Gordon and Breach Science Publishers, S. 59-129.
- Ammermann A.J. (1989):** On the neolithic transition in europe: a comment on Zvelebil and Zvelebil. *Antiquity*, 63, S. 162-165.
- Ammermann A.J., Cavalli-Sforza L.L. (1973):** A Population model for the diffusion of early farming in europe.- In: Renfrew C.: *The explanation of culture change*. Duckworth, London, S. 343-357.
- Andrews P. Martin L.(1991):** Hominoid dietary evolution. *Phil Trans R Soc Lond B*, 334, S. 199-209.
- Ankel-Simons F. (2000):** Teeth.- *Primate Anatomy*. Academic Press, S. 195-248.
- Asam T. Bösl C. Grupe G. Lösch S. Manhart H. Mekota A.-M., Peters J. (2004, in press):** Paläoecosystem reconstruction and the Neolithic Transition in temperate climates. *Documenta Archaeobiologiae*.
- Aufderheide A., Rodriguez-Martin C. (1998):** *The cambridge encyclopedia of human paleopathology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Baker G., Jones L.H.P., Wardrop I.D. (1959):** Cause of wear in sheeps` teeth. *Nature*, 184, S. 1583-1584.
- Bargel H.-J., Schulze G. (1978):** - In: Bargel Hans-Jürgen, Schulze Günter.: *Schroedel*.
- Bates J.F., Stafford G.D., Harrison A. (1975):** Masticatory function - a review of the literature. *J Oral Rehabilitation*, 2, S. 349-361.
- Bauer C.M., Kunzelmann K.-H., Hickel R. (1995):** Simulierter Nahrungsabrieb von Kompositen und Ormoceren. *Dtsch Zahnärztl Z*, 50, S. 635-638.
- Baum N. (1991):** Sammler/Jäger oder Ackerbauern? Eine paläodontologische Untersuchung zur kulturhistorischen Stellung der Kopfbestattungen aus der grossen Ofnet-Höhle in Schwaben. *Arch Korrespondenzblatt*, 21, S. 469-474.
- Baume L.J., Horowitz H.S., Summers C.J., Backer D. O., Brown W.A.B., Carlos J.P., Chen L.K., Freer T.J., Harvold E.P., Moorrees C.F.A., Salzmann J.A., Schmutz G., Solow B., Taatz H. (1973):** Eine Methode für die Messtechnische Erfassung der Okklusionsmerkmale. *Int Dent J*, 23, S. 546-554.
- Bedal H. (1990):** Kleine Geschichte des Hausgartens und seiner Nutzpflanzen. *Informationsblätter des Fränkischen Freilandmuseums Bad Windsheim*.
- Begg P.R. (1954):** Stone Age Man`s dentition. *Amer J Orthodont*, 40, S. 298-312, 373-383, 462-475, 517-531.
- Behre K.-E. (1993):** Die Ernährung im Mittelalter.- In: Herrmann B.: *Mensch und Umwelt im Mittelalter*. Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main, S. 74-87.

- Benecke N. (1994):** Der Mensch und seine Haustiere. Die Geschichte einer Jahrtausende alten Beziehung. Theiss, Stuttgart.
- Benfer R.A., Edwards D.S. (1991):** The principal axis method for measuring rate and amount of dental attrition: Estimating juvenile or adult tooth wear from unaged adult teeth.- In: Kelley Marc A., Larsen C.S.: Advances in dental Anthropology, 18. Wiley-Liss, Inc, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, S. 325-340.
- Beranová M. (1991):** Archäologie und Botanik aus der Sicht des Archäologen (Anbau von Kulturpflanzen).- In: Archaeological Institute of the Slovak academy of sciences, Nitra: Acta interdisciplinaria archaeologica Tomus VII, S. 37-50.
- Berryman H.E., Owsley D.W., Henderson A.M. (1979):** Noncarious interproximal grooves in Arikara Indian dentitions. Amer J Phys Anthropol, 50, S. 209-212.
- Beynon A.D. (1987):** Replication technique for studying microstructure in fossil enamel. Scanning Microscopy, 1, S. 663-669.
- Beynon A.D., Wood B.A. (1986):** Variations in enamel thickness and structure in East African hominids. Amer J Phys Anthropol, 70, S. 177-193.
- Bocherens H., Grupe G., Mariotti A., Turban-Just S. (1997):** Molecular preservation and isotopy of Mesolithic human finds from the Ofnet cave (Bavaria, Germany). Anthropol Anz, 55, S. 121-129.
- Borgognini Tarli S.M., Della Santina D., Francalacci P., Repetto E. (1989):** Reconstruction of mesolithic diet using dental microwear and trace element analysis. The case of Grotta Dell'Uzzo (Sicily).- In: Hershkovitz Israel: People and Culture in Change. BAR International Series 508 (ii), S. 283-320.
- Boyde A., Fortelius M. (1991):** New confocal LM method for studying local relative microrelief with special reference to wear studies. Scanning, 13, S. 429-430.
- Brace C.L. (1962):** Cultural factors in the evolution of the human dentition.- In: Montagu MFA: Culture and the evolution of man. Oxford University Press, New York, S. 343-354.
- Brace C.L., Ryan A.S., Smith B.H. (1981):** Comment to Puech P.-F. (1981). Cur Anthropol, 22, S. 426-429.
- Brown D.A. (1984):** Prospects and limits of a phytolith key for grasses in the central United States. J Arch Sci, 11, S. 345-368.
- Bullington J. (1991):** Deciduous dental microwear of prehistoric juveniles from the lower Illinois River Valley. Amer J Phys Anthropol, 84, S. 59-73.
- Buxton L.H.D. (1920):** The teeth and jaws of savage man. Transact Brit Soc Stud Orthodont, 1916-1920, S. 79-88.
- Campbell T.D. (1925):** Dentition and palate of the Australian Aboriginal. Hassell Press, Adelaide.
- Childe V.G. (1936):** Man makes himself. Watts, London.
- Christlein R. (1971):** Ausgrabung eines Gräberfeldes des 5. - 7. Jhds bei Bittenbrunn, Ldkr. Neuburg a.d.Donau.- In: Selbstverlag des Bayrischen Landesamtes für Denkmalpflege: Jahresbericht der Bayerischen Bodendenkmalpflege, 1967/68. Rudolf Habelt, Bonn, S. 87-103.
- Ciochon R.L., Piperno D.R., Thompson R.G. (1990):** Opal phytoliths found on the teeth of the extinct ape *Gigantopithecus blacki*: Implications for paleodietary studies. Proc Natl Acad Sci, 87, S. 8120-8124.
- Coffey J.P., Goodkind R.J., DeLong R., Douglas W.H. (1985):** In vitro study of the wear characteristics of natural and artificial teeth. J Prosthet Dent, 54, S. 273-280.

- Cohen M.N. (1989):** Changes in Human diet.- In: Cohen Mark Nathan: Health and the Rise of Civilisation. Yale University Press, New Haven, London, S. 55-74.
- Cohen M.N., Armelagos G.J. (1984):** Paleopathology at the origins of agriculture. Academic Press, Inc, Orlando, San Diego, New York, London, Toronto, Motreal, Sydney, Tokyo.
- Condon J.R., Ferracane J.L. (1996):** Evaluation of composite wear with a new multi-mode oral wear simulator. Dent Mater, 12, S. 218-226.
- Condon J.R., Ferracane J.L. (1997):** In vitro wear of composite with varied cure, filler level, and filler treatment. J Dent Res, 76, S. 1405-1411.
- Conklin-Brittain N.L., Wrangham R.W., Smith C.C. (2002):** A Two-stage Model of increased dietary quality in early hominid evolution: the role of fiber.- In: Ungar P.S., Teaford M.F.: Human diet. Bergin and Garvey, Westport, Connecticut, London, S. 61-76.
- Conroy G.C. (1990):** Primate evolution. W.W.Norton and Company, Nex York, S. 361, 390.
- Cordain L., Eaton S.B. Miller J.B., Mann N., Hill K. (2002):** The paradoxical nature of hunter-gatherer diets: meat-based, yet non-atherogenic. Eur J Clin Nutr, 56 Suppl 1, S. 42-52.
- Covert H.H., Kay R.F. (1981):** Dental Microwear and diet: implications for determining the feeding behaviors of extinct primates, with a comment on the dietary pattern of *Sivapithecus*. Amer J Phys Anthropol, 55, S. 331-336.
- Craig R.G., Peyton F.A. (1958):** The microhardness of enamel and dentin. J Dent Res, 37, S. 661-668.
- Craig R.G., Peyton F.A., Johnson D.W. (1961):** Compressive properties of enamel, dental cements, and gold. J Dent Res, 40, S. 936-945.
- Cross J. F., Kerr N. W., Bruce M. F. (1986):** An evaluation of Scott`s method for scoring dental wear.- In: Cruwys E., Foley R. A.: Teeth and Anthropology. BAR International, Oxford, S. 101-108.
- Crothers A.J.R. (1992):** Tooth wear and facial morphology. J Dent, 20, S. 333-341.
- Cuy J.L., Mann A.B., Livi K.J., Teaford M.F., Weihs T.P. (2002):** Nanoindentation mapping of the mechanical properties of human molar tooth enamel. Archs oral Biology, 47, S. 281-291.
- D`Amico A. (1961):** Functional occlusion of the natural teeth of man. J Pros Dent, 11, S. 899-915.
- Dahlberg A.A., Kinzey W. (1962):** Étude microscopique de l`abrasion et de l`attrition sur la surface des dents. Bull Group Int Rech Sc Stomat, 5, S. 242-251.
- Danielson D.R., Reinhard K.J. (1998):** Human dental microwear caused by Calcium Oxalate phytoliths in prehistoric diet of Lower Pecos Region, Texas. Amer J Phys Anthropol, 107, S. 297-304.
- Davis W.B., Winter P.J. (1980):** The effect of abrasion on enamel and dentine after exposure to dietary acid. Brit dent J, 148, S. 253-256.
- De Gee A.J., Pallav P. (1994):** Occlusal wear simulation with the ACTA wear machine. J Dent, 22(Suppl), S. 21-27.
- De Gee A.J., Pallav P., Davidson C.L. (1986):** Effect of abrasion medium on wear of stress-bearing composites and amalgam in vitro. J Dent Res, 65, S. 654-658.
- Dehn W., Sangmeister E. (1954):** Die Steinzeit im Ries.- In: Krämer Werner: Materialhefte zur Bayerischen Vorgeschichte, Heft 3. Michael Lassleben Kallmünz/Opf., S. 14.

- DeLong R., Douglas W.H. (1983):** Development of an artificial oral environment for the testing of dental restoratives: bi-axial force and movement control. *J Dent Res*, 62, S. 32-36.
- Demes B., Creel N. (1988):** Bite force, diet, and cranial morphology of fossil hominids. *J Hum Evol*, 17, S. 657-670.
- Djermal S., Darbar U.R., Hemmings K.W. (1998):** Case report: tooth wear associated with an unusual habit. *Eur J Prosthodont Rest Dent*, 6, S. 29-32.
- Domett K., Tayles N., Nelsen K. (2000):** Agriculture and dental caries? The case rice in prehistoric Southeast Asia. *Amer J Phys Anthropol*, Suppl 30, S. 141.
- Dumont E.R. (1999):** Crenulated molar enamel in primates: a functional model. *Amer J Phys Anthropol*, Suppl 28, S. 122.
- Eaton S.B., Eaton III S.B., Cordain L. (2002):** Evolution, diet, and health.- In: Ungar P.S., Teaford M.F.: *Human diet*. Bergin and Garvey, Westport, Connecticut, London, S. 7-17.
- Eaton S.B., Eaton III S.B. (2000):** Palaeolithic vs. modern diets - selected pathophysiological implications. *Eur J Nutr*, 39, S. 67-70.
- Eichner K. (1963):** Messung der Kräfte bei Kauvorgängen. *Dtsche Zahnärztliche Z*, 18, S. 915-924.
- Ferracane J.L., Mitchem J.C., Condon J.R., Todd R. (1997):** Wear and marginal breakdown of composites with various degrees of cure. *J Dent Res*, 76, S. 1508-1516.
- Friedel S. (2000):** Die Entwicklung einer Kausimulation zur experimentellen Erzeugung dentaler Microwear. Ludwig-Maximilians-Universität München, Diplomarbeit.
- Friedrich K. (1986):** Friction and wear of polymer composites. Elsevier, Amsterdam.
- Gieseler W., Mollison T. (1929):** Untersuchungen über den Oldoway Fund. *Verhandlungen der Gesellschaft für physische Anthropologie*, 3, S. 50-67.
- Gilbert R.I. jr., Mielke J.H. (1985):** The analysis of prehistoric diets. Academic Press, Inc., Orlando, San Diego, New York, London, Toronto, Montreal, Sydney, Tokyo.
- Glowatzki G., Protsch R. (1973):** Das absolute Alter der Kopfbestattungen in der Großen Ofnet-Höhle bei Nördlingen in Bayern. *Homo*, 24, S. 1-6.
- Goodman A.H., Rose J.C. (1990):** Assessment of systemic physiological perturbations from dental enamel hypoplasias and associated histological structures. *Yb phys Anthropol*, 33, S. 59-110.
- Goodman A.H., Rose J.C. (1991):** Dental enamel hypoplasias as indicators of nutritional status.- In: Kelley M.A., Larsen C.S.: *Advances in Dental Anthropology*. Wiley-Liss, New York, S. 279-293.
- Gordon K.D. (1982):** A study of microwear on chimpanzee molars: implications for dental microwear analysis. *Amer J Phys Anthropol*, 59, S. 195-215.
- Gordon K.D. (1984):** The assessment of jaw movement direction from dental microwear. *Amer J Phys Anthropol*, 63, S. 77-84.
- Gordon K.D. (1986):** Dental microwear analysis to detect human diet. *Amer J Phys Anthropol*, 69, S. 206-207.
- Gordon K.D. (1987):** Evolutionary perspectives on human diet.- In: Johnston F.E.: *Nutritional Anthropology*. Alan R. Liss, Inc., New York, S. 3-39.

- Gordon K.D. (1988):** A review of methodology and quantification in dental microwear analysis. *Scanning Microscopy*, 2(2), S. 1139-1147.
- Grace R. (1990):** The limitations and applications of use wear analysis.- In: Proceedings of the international conference on lithic use-wear analysis, 1989, Uppsala, Sweden: The interpretative possibilities of microwear studies. *Societas Archaeologica Upsaliensis*, Uppsala, Sweden, S. 9-14.
- Grine F.E. (1981):** Trophic differences between "Gracile" and "Robust" Australopithecines: a scanning electron microscope analysis of occlusal events. *South African Journal of Science*, 77, S. 203-230.
- Grine F.E. (1984):** Deciduous molar microwear of south african Australopithecines.- In: Chivers D.J., Wood B.A., Bilsborough A.: *Food Acquisition and Processing in Primates*. Plenum Press, New York, London, S. 525-534.
- Grine F.E. (1986):** Dental evidence for dietary differences in *Australopithecus* and *Paranthropus*: a quantitative analysis of permanent molar microwear. *J Hum Evol*, 15, S. 783-822.
- Grine F.E. (1987):** Quantitative analysis of occlusal microwear in *Australopithecus* and *Paranthropus*. *Scanning Microscopy*, 1 (2), S. 647-656.
- Grine F.E., Kay R.F. (1988):** Early hominid diets from quantitative image analysis of dental microwear. *Nature*, 333, S. 765-768.
- Grine F.E., Ungar P. S., Teaford M. F. (2002):** Error rates in dental microwear quantification using scanning electron microscopy. *Scanning*, 24, S. 144-153.
- Grupe G. (1986):** Multielementanalyse: ein neuer Weg für die Palaeodemographie. Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung: Materialien zur Bevölkerungswissenschaft, Sonderheft 7.
- Grupe G. (1999):** Umweltnutzung im Mittelalter. Vorträge Heidelberg: Historische Umweltforschung.
- Grupe G., Gügel I.L., Strott N. (2003):** Life-histories in human teeth on the microstructural, ultrastructural and molecular level. 72th Annual Meeting AAPA. Tempe, Arizona.
- Grupe G., Mikić Ž., Peters J., Manhart H. (2003):** Vertebrate food webs and subsistence strategies of Meso- and Neolithic populations of central Europe.- In: Grupe G., Peters J.: *Documenta Archaeobiologiae*. Marie Leidorf GmbH, Rahden/Westfalen, S. 193-213.
- Gügel I.L. (1998):** Simulationsversuch von Microwear mit Merkmalsvergleich an frühmittelalterlichen Molaren. Ludwig-Maximilians-Universität München, Diplomarbeit.
- Gügel I.L. (2001):** Microwear und Abrasion: Untersuchungen an Zahnschmelz historischer Populationen und von Simulationsexperimenten.- In: Schultz M., Atzwanger K., Bräuer G., Christiansen K., Forster J., Greil H., Henke W., Jäger U., Niemitz C., Scheffler C., Schiefenhövel W., Schröder I., Wiechmann I.: *HOMO - Unsere Herkunft und Zukunft*. Cuvillier, Göttingen, S. 384-390.
- Gügel I.L. (2003):** Variations in dental microwear and abrasion in ancient human groups of southern Germany: 7500 BP to the Early Middle Ages.- In: Grupe G., Peters J.: *Documenta Archaeobiologiae*. Marie Leidorf GmbH, Rahden/Westfalen, S. 227-246.
- Gügel I.L., Grupe G., Kunzelmann K.-H. (2001):** Simulation of dental microwear: characteristic traces by opal phytoliths give clues to ancient human dietary behavior. *Amer J Phys Anthropol*, 114, S. 124-138.
- Gügel I.L., Kunzelmann K.-H. (2002):** Simulation and 3D-Laser-Scanning of dental abrasion.- In: Mafart B., Delingette H.: *Three-dimensional imaging in palaeoanthropology and prehistoric archaeology*. Archaeopress Oxford, S. 83-88.

- Gülzow H.-J. (1988):** Das Kariesproblem in Deutschland.- In: Wolfram G., Schlierf G.: Ernährung und Gesundheit. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart, S. 105-111.
- Haidle M.N. (1997):** Mangel - Krisen - Hungersnöte? Ernährungszustände in Süddeutschland und der Nordschweiz vom Neolithikum bis ins 19. Jahrhundert.- In: Conard Nicholas J.: Urgeschichtliche Materialhefte. Mo Vince, Tübingen.
- Hamilton W.J. (1987):** Omnivorous primate diets and human overconsumption of meat.- In: Harris M., Ross E.B.: Food and Evolution. Temple University Press Philadelphia, S. 117-132.
- Harmon A.M., Rose J.C. (1988):** The role of dental microwear analysis in the reconstruction of prehistoric diet.- In: Kennedy B.V., LeMoine G.M.: Diet and subsistence: current archaeological perspectives. The University of Calgary Archaeological Association, S. 267-272.
- Harris D.R. (1989):** An evolutionary continuum of people-plant interaction.- In: Harris D.R., Hillman G.C.: Foraging and Farming - The Evolution of Plant Exploitation. One World Archaeology, Unwin Hyman, S. 11-26.
- Hartman S.E. (1988):** A cladistic analysis of homioid molars. J Hum Evol, 17, S. 489-502.
- Hassan R., Caputo A.A., Bunshah R.F. (1981):** Fracture Toughness of Human Enamel. J Dent Res, 60, S. 820-827.
- Hedges R.E.M., Housley R.A., Law I.A., Bronk C.R. (1989):** Radiocarbon Dates from the Oxford AMS system: Archaeometry datelist 9. Archaeometry, 31, S. 207-234.
- Heidrich H., Kohlberger A. (1998):** Kartoffel in der Früh - Ein kulturgeschichtliches Koch- und Lesebuch. Fränkisches Freilandmuseum, Bad Windsheim.
- Helbaek H. (1961):** Studying the diet of ancient man. Archaeology, 14, S. 95-101.
- Henke W., Rothe H. (1994):** Paläoanthropologie. Springer Berlin, Heidelberg, NewYork, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest.
- Hennig E. (1966):** Beobachtungen zum Mahlvorgang an ur- und frühgeschichtlichen Getreidemöhlen. Ethnogr Archöol Z, 7, S. 71-87.
- Herrmann B., Grupe G., Hummel S., Piepenbrink H., Schutkowski H. (1990):** Prähistorische Anthropologie. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hickel R. (1987):** Zahnabration und beruflich bedingte Einflüsse bei Steinbrucharbeitern. Ludwig-Maximilians-Universität München, Habilitationsschrift.
- Hillman G.C., Colledge S.M., Harris D.R. (1989):** Plant-food economy during the Epipalaeolithic period at Tell Abu Hureyra, Syria: dietary diversity, seasonality, and modes of exploitation.- In: Harris D.R., Hillman G.C.: Foraging and Farming - The Evolution of Plant Exploitation. One World Archaeology, Unwin Hyman, S. 240-268.
- Hoefs J. (1997):** Stable Isotope Geochemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, NewYork.
- Hohenberger E. (1988):** Der Bauerngarten im Wandel der Zeiten. Bayerischer Landesverband für Gartenbau und Landespflege, München.
- Holleman A.F., Wiberg E. (1985):** Lehrbuch der anorganischen Chemie. Walter de Gruyter, Berlin, New York, S. 760.
- Holt B. (1993):** Phytoliths from dental calculus: direct evidence of prehistoric diet.- In: Abstracts of the 58th Ann Meeting of the Soc Amer Arch: Phytolitharian Newsletter, 7, S. 8.
- Housley R.A. (1988):** Datenreihe. Oxford University.

- Janssen W. (1993):** Mittelalterliche Gartenkultur.- In: Hermann B.: Mensch und Umwelt im Mittelalter. Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main, S. 224-243.
- Kaidonis J.A., Richards L.C., Townsend G.C., Tansley G.D. (1998):** Wear of human enamel: a quantitative in vitro assessment. *J Dent Res*, 77, S. 1983-1990.
- Kaplan L., Smith M.B., Sneddon L.A. (1992):** Cereal grain phytoliths of southwest asia and europe.- In: Rapp George jr., Mulholland S.C.: Phytolith systematics. Plenum Press, New York, London, S. 149-174.
- Kay R.F. (1981):** The nut-crackers: a new theory of the adaptation of the Ramapithecinae. *Amer J Phys Anthropol*, 45, S. 141-152.
- Kay R.F. (1987):** Analysis of primate dental microwear using image processing techniques. *Scanning Microscopy*, 1, S. 657-662.
- Kay R.F., Covert H.H. (1983):** True grit: A microwear experiment. *Amer J Phys Anthropol*, 61, S. 33-38.
- Kay R.F., Grine F.E. (1987):** Tooth morphology, wear and diet in *Australopithecus* and *Paranthropus* from Southern Africa.- In: Grine F.E.: Evolutionary history of the "Robust" Australopithecines. Aldine de Gruyter, New York, S. 427-447.
- Kay R.F., Hiiemae K.M. (1974):** Jaw movement and tooth use in recent and fossil primates. *Amer J Phys Anthropol*, 40, S. 227-256.
- Kelleher M., Bishop K. (1999):** Tooth surface loss: an overview. *Br Dent J*, 186, S. 61-66.
- Khera S.C., Carpenter C.W., Vetter J.D., Staley R.N. (1990):** Anatomy of cusps of posterior teeth and their fracture potential. *J Prosthet Dent*, 64, S. 139-147.
- King T., Aiello L.C., Andrews P. (1999b):** Dental microwear of *Griphopithecus alpani*. *J Hum Evol*, 36, S. 3-31.
- King T., Andrews P., Boz B. (1999a):** Effect of taphonomic processes in dental microwear. *Amer J Phys Anthropol*, 108, S. 359-373.
- Knöchlein R. (1995):** - In: Schriftenreihe des Bajuwaren museums Nr. 1: Das Reihengräberfeld von Waging am See. Liliom Verlag, Waging a. See.
- Knoop F., Peters G.C., Emerson W.N. (1939):** A sensitive pyramidal tool for indentation measurements. *J Res natn Bur Stand*, 23, S. 39-61.
- Kodaka T., Debari K., Yamada M., Kuroiwa M. (1992):** Correlation between microhardness and mineral content in sound human enamel. *Caries Res*, 26, S. 139-141.
- Koolstra J.H., van Eijden T.M.G.J. (1995):** Biomechanical analysis of jaw-closing movements. *J Dent Res*, 74, S. 1564-1570.
- Körber-Grohne U. (1990):** Gramineen und Grünlandvegetationen vom Neolithikum bis zum Mittelalter.- In: Nägele, Obermüller: Mittelalter in Mitteleuropa. Schweizerbart'sche Verlagsgesellschaft, Stuttgart.
- Krejci I., Albert P., Lutz F. (1999):** The Influence of antagonist standardization on wear. *J Dent Res*, 78, S. 713-719.
- Krejci I., Heinzmann J.-L., Lutz F. (1990a):** Verschleiss von Schmelz, Amalgam und ihrer Schmelzantagonisten im Computergesteuerten Kausimulator. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 100, S. 1285-1291.
- Krejci I., Reich T., Lutz F., Albertoni M. (1990b):** In-vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 100, S. 953-960.

- Krengel R. (1994):** - In: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung: Beiträge zur Strukturforchung. Duncker und Humblot, Berlin.
- Kunzelmann K.-H. (1997):** Verschleißanalyse und -quantifizierung von Füllungsmaterialien in vivo und in vitro. Ludwig-Maximilians-Universität München, Habilitationsschrift.
- Küster H.J. (1989):** Pollen analytical evidence for the beginning of agriculture in south central europe.- In: Milles Annie, Williams Diane, Gardner Neville: The Beginning of Agriculture. BAR International Series 496, S. 137-147.
- Küster H.J. (1990):** Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen am Waginger See. Heimatbuch des Landkreises Traunstein Bd. 5, S. 21ff.
- Küster H.J. (1995):** Postglaziale Vegetationsgeschichte Südbayerns. Akademie Verlag.
- Lalueza C., Pérez-Pérez A., Turbón D. (1993):** Microscopic study of the Banyoles mandible (Girona, Spain): diet, cultural activity and toothpick use. *J Hum Evol*, 24, S. 281-300.
- Lalueza C., Pérez-Pérez A., Turbón D. (1996a):** Dietary inferences through buccal microwear analysis of middle and upper pleistocene human fossils. *Amer J Phys Anthropol*, 100, S. 367-387.
- Lalueza Fox C., Juan J., Albert R. M. (1996b):** Phytolith analysis on dental calculus, enamel surface, and burial soil: Information about diet and palaeoenvironment. *Amer J Phys Anthropol*, 101, S. 101-113.
- Lalueza Fox C., Pérez-Pérez A., Juan J. (1994):** Dietary information through the examination of plant phytoliths on the enamel surface of human dentition. *J Arch Sci*, 21, S. 29-34.
- Lambrecht J.R. (1965):** The influence of occlusal contact area on chewing performance. *J Prosthet Dent*, 15, S. 444-450.
- Lange R.H., Blödorn J. (1981):** Das Elektronenmikroskop TEM und REM. Thieme, Stuttgart.
- Larsen C.S. (1995):** Biological changes in human populations with agriculture. *Ann Rev Anthropol*, 24, S. 185-213.
- Larsen C.S. (1997):** Bioarchaeology: interpreting behavior from the human skeleton.- In: Larsen C.S.: Cambridge University Press, Cambridge.
- Larsen C.S. (2002):** Post-Pleistocene Human Evolution: Bioarcheology of the agricultural transition.- In: Ungar P.S., Teaford M.F.: Human diet.. Bergin & Garvey, Westport, Connecticut, London, S. 19-35.
- Larsen C.S., Shavit R., Griffin M.C. (1991):** Dental caries evidence of dietary change: an archeological context.- In: Kelley Marc A., Larsen C.S.: Advances in dental Anthropology. Wiley-Liss, Inc, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, S. 179-202.
- Leakey M.D., Hay R.L., Thurber D.L., Protsch R., Berger R. (1972):** Stratigraphy, archaeology, and age of the Ndutu and Naisiusiu Beds, Olduvai Gorge, Tanzania. *World Archaeology*, 3, S. 328-341.
- Leek F. (1972):** Teeth and bread in ancient egypt. *J Egyptian Arch*, 58, S. 126-132.
- Lentfer C.J., Boyd W.E. (1998):** A comparison of three methods for the extraction of phytoliths from sediments. *J Arch Sci*, 25, S. 1159-1183.
- Lentfer C.J., Boyd W.E. (1999):** An assessment of techniques for the deflocculation and removal of clays from sediments used in phytolith analysis. *J Arch Sci*, 26, S. 31-44.
- Lidl J., Hahn W. (1989):** An der Mühlstrasse: Mit dem Zeichenstift durchs Brombachtal. Zweckverband Brombachsee, Pleinfeld, Walter E. Keller, Treuchtlingen.

- Lucas P.W., Corlett R.T. (1991):** Quantitative aspects of the relationship between dentitions and diets.- In: Vincent J. F. V., Lillford P. J.: Feeding and the texture of food. Cambridge University Press, Cambridge, S. 93-122.
- Lucas P.W., Corlett R.T., Luke D.A. (1985):** Plio-pleistocene hominid diets: an approach combining masticatory and ecological analysis. *J Hum Evol*, 14, S. 187-202.
- Lucas P.W., Luke D.A. (1984):** Chewing it over: Basic principles of food breakdown.- In: Chivers D.J., Wood B.A., Bilsborough A.: Food Acquisition and Processing in Primates. Plenum Press, New York, London, S. 283-301.
- Lucas P.W., Luke D.A. (1983a):** Methods for analysing the breakdown of food in human mastication. *Archs oral Biol*, 28, S. 813-819.
- Lucas P.W., Teaford M.F. (1995):** Significance of silica in leaves to long-tailed Macaques (*Macaca fascicularis*). *Folia Primatol*, 64, S. 30-36.
- Lumsden A. G. S., Osborn J. W. (1977):** The evolution of chewing: a dentist's view of palaeontology. *J Dent*, 5, S. 269-287.
- Maas M.C. (1991):** Enamel structure and microwear: An experimental study of the response of enamel to shearing force. *Amer J Phys Anthropol*, 85, S. 31-49.
- Maas M.C. (1994):** A scanning electron-microscopic study of in vitro abrasion of mammalian tooth enamel under compressive loads. *Archs oral Biol*, 39, S. 1-11.
- Maier W., Schneck G. (1981):** Konstruktionsmorphologische Untersuchungen am Gebiß der hominoiden Primaten. *Z Morph Anthropol*, 72, S. 127-169.
- Mair L.H. (2000):** Vergleich zahnfarbener plastischer Restaurationsmaterialien im Zwei- und Drei-Körper-Verschleißtest. Ludwig-Maximilians-Universität München, Dissertation.
- Mair L.H., Stolarski T.A., Vowles R.W., Lloyd C.H. (1996):** Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop. *J Dent*, 24, S. 141-148.
- Mann N. (2000):** Dietary lean red meat and human evolution. *Eur J Nutr*, 39, S. 71-79.
- Martin L. (1985):** Significance of enamel thickness in hominoid evolution. *Nature*, 314, S. 260-263.
- Mays S. (2002):** The relationship between molar wear and age in the early 19th century AD archaeological human skeletal series of documented age at death. *J Arch Sci*, 29, S. 861-871.
- Mehl A., Gloger W., Kunzelmann K.-H., Hickel R. (1997):** A new optical 3-D device for the detection of wear. *J dent Res*, 76 (11), S. 1799-1807.
- Mehl A., Hauptmann J., Gloger W., Kunzelmann K.-H., Hickel R. (1996a):** Generation of CAD-tooth restorations by automatically combining different 2.5D-views of an optical sensor into a real 3D-image. *J dent Res (IADR Abstracts)*, 75 (2941), S. 385.
- Mehl A., Kunzelmann K.-H., Petschelt A., Hickel R. (1993):** Highly accurate 3D-data acquisition with a light sectioning laser sensor. *J dent Res (IADR Abstracts)*, 72 (1926), S. 344.
- Meiklejohn C., Baldwin J.H., Schentag C.T. (1988):** Caries as a probable dietary marker in the western european mesolithic.- In: Kennedy B.V., LeMoine G.M.: Diet and subsistence: current archaeological perspectives. The University of Calgary Archaeological Association, S. 273-279.
- Mellars P., Stringer C. (1989):** The Human Revolution. Edinburgh Univ Press, Edinburgh.

- Merceron G., Blondel C., Brunet M., Sen S., Solounias N., Viriot L., Heintz E. (2004a):** The Late Miocene paleoenvironment of Afghanistan as inferred from dental microwear in artiodactyls. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 207, S. 143-163.
- Merceron G., de Bonis L., Viriot L., Blondel C. (2005):** Dental microwear of fossil bovids from northern Greece: paleoenvironmental conditions in the eastern Mediterranean during the Messinian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 217, S. 173-185.
- Merceron G., Viriot L., Blondel C. (2004b):** Tooth microwear pattern in roe deer (*Capreolus capreolus L.*) from Chizé (Western France) and relation to food composition. *Small Ruminant Research*, 53, S. 125-132.
- Meredith N., Sherriff M., Setchell D.J., Swanson S.A.V. (1996):** Measurement of the microhardness and Young's modulus of human enamel and dentine using an indentation technique. *Archs Oral Biol*, 41, S. 539-545.
- Middleton W. (1993):** The identification of pre-Hispanic coca consumption through opal phytolith analysis of dental calculus.- In: Abstracts of the 58th Ann Meeting of the Soc Amer Arch: Phytolitharian Newsletter, 7, S. 8.
- Miller R.A. (1993):** Phytolith evidence for early cereal exploitation in the Levant.- In: Pearsall D.M., Piperno D.R.: Current Research in phytolith analysis: applications in archaeology and paleoecology. University of Pennsylvania, Philadelphia, S. 161-174.
- Milton K. (2002):** Hunter-Gatherer diets: wild foods signal relief from diseases of affluence.- In: Ungar P.S., Teaford M.F.: Human diet. Bergin and Garvey, Westport, Connecticut, London, S. 111-122.
- Milton K., Demment M.W. (1988):** Digestion and passage kinetics of chimpanzees fed high and low fiber diets and comparison with human data. *J Nutr*, 118, S. 1082-1088.
- Molleson T., Jones K., Jones S. (1993):** Dietary change and the effects of food preparation on microwear patterns in the Late Neolithic of Abu Hureyra, northern Syria. *J Hum Evol*, 24, S. 455-468.
- Mollison T. (1936):** Zeichen gewaltsamer Verletzungen an den Ofnet-Schädeln. *Anthrop Anz*, 13, S. 79-88.
- Molnar S. (1971):** Human tooth wear, tooth function and cultural variability. *Amer J Phys Anthropol*, 34, S. 175-190.
- Molnar S. (1972):** Tooth wear and culture: A survey of tooth functions among some prehistoric populations. *Cur Anthropol*, 13, S. 511-515.
- Moodie R.L. (1929):** Studies in paleodontology, XI: Dental attrition and its results among certain ancient Indians from southern California. *Pacific dent Gazette*, 37, S. 217-227.
- Muendel M.G., Marks M.K. (1997):** Enamel microwear in a southeastern Mississippian sample. *Amer J Phys Anthropol*, Suppl 26, S. 167.
- Müller-Karpe H. (1998):** Grundzüge früher Menschheitsgeschichte. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Murphy T.R. (1959):** The changing pattern of dentine exposure in human tooth attrition. *Amer J Phys Anthropol*, 17, S. 167-178.
- Mutschler E. (1986):** Arzneimittelwirkungen. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart.
- Naber F.B. (1974):** Das Ende des Ofnet-Problems? *Quartär*, 25, S. 73-84.
- Newesely H. (1993):** Abrasion as an intrinsic factor in palaeodiet.- In: Lambert J.B., Grupe G.: Prehistoric Human Bone - Archaeology at the Molecular Level. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 293-308.

- Oakley K.P., Campbell B.G., Molleson T.I. (1977):** Catalogue of fossil Hominids. Trustees of The British Museum (Natural History) London.
- Orschiedt J. (1998):** Ergebnisse einer neuen Untersuchung der spätmesolithischen Kopfbestattungen aus Süddeutschland. Urgeschichtliche Materialhefte, 12, S. 147-160.
- Osborn J.W., Lumsden A.G.S. (1978):** An alternative to "theogosis" and re-examination of the ways in which mammalian molars work. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen, 156, S. 371-392.
- Pallav P. (1996):** Thesis Publishers: Occlusal wear in dentistry. Amsterdam.
- Pastor R.F. (1994):** A multivariate dental microwear analysis of prehistoric groups from the Indian subcontinent. Amer J Phys Anthropol, Suppl 18, S. 158-159.
- Pelka M., Frankenberger R., Sindlinger R., Petschelt A., (1998):** Verschleißsimulation natürlicher Zahnhartsubstanzen im abrasiven Kontakt. Deutsche Zahnärztl Z, 53, S. 61-64.
- Pérez-Pérez A., Espurz V., Bermúdez de Castro J.M., de Lumley M.A., Turbón D. (2003):** Non-occlusal dental microwear variability in a sample of Middle and Late Pleistocene human populations from Europe and the Near East. J Hum Evol, 44, S. 497-513.
- Pérez-Pérez A., Lalueza C., Turbón D. (1994):** Intraindividual and intragroup variability of buccal tooth striation pattern. Amer J Phys Anthropol, 94, S. 175-187.
- Peters C.R. (1982):** Electron-optical microscopic study of incipient dental microdamage from experimental seed and bone crushing. Amer J Phys Anthropol, 57, S. 283-301.
- Pfretschner H.U. (1988):** Structural reinforcement and crack propagation in enamel.- In: Russell D.E., Santoro, J.-P., Sigogneau-Russell, D.: Teeth Revisited: Proceedings of the VIIth International Symposium on Dental Morphology, sèrie C, 53. Mem. Mus. Hist. nat., Paris, S. 133-144.
- Pfretschner H.U. (1994):** Biomechanik der Schmelzmikrostruktur in den Backenzähnen von Grosssäugern. Palaeontographica Abt., A. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 1-88.
- Pilbeam D.R. (1972):** The Ascent of man: an introduction to human evolution. Macmillan, New York.
- Piperno D. (1988):** Phytolith analysis - an archaeological and geological perspective. Academic Press, Inc, Orlando, San Diego, New York, London, Toronto, Montreal, Sydney, Tokyo.
- Piperno D., Ciochon R. (1990):** Scratching the surface of evolution. New Scientist, 10, S. 47-49.
- Pohl E. (1995):** Das frühmittelalterliche Gräberfeld von Bittenbrunn, Lkr. Neuburg-Schrobenhausen. Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn, Philosophische Fakultät, Dissertation.
- Poinar H.N., Kuch M., Sobolik K.D., Barnes I., Stankiewicz A.B., Kuder T., Spaulding G.W., Bryant V.M., Cooper A., Pääbo S. (2001):** A molecular analysis of dietary diversity for three archaic Native Americans. PNAS, 98, S. 4317-4322.
- Powell M.L (1985):** The analysis of dental wear and caries for dietary reconstruction.- In: Gilbert R.I. jr., Mielke J.H.: The analysis of prehistoric diets. Academic Press, Inc., Orlando, San Diego, New York, London, Toronto, Montreal, Sydney, Tokyo, S. 307-338.
- Precht M., Kraft R. (1993):** Biostatistik II. Oldenbourg Verlag, München, Wien 5. Aufl, S. 144.
- Probst E. (1991):** Deutschland in der Steinzeit. Bertelsmann Verlag GmbH München.
- Prossinger H., Willms C. (1998):** Diet and Nutrition in Prehistoric Central Europe.- In: Alt K.W, Rösing F.W., Teschler-Nicola M.: Dental Anthropology. Springer Wien, New York, S. 315-336.

- Puech P.-F. (1981):** Tooth wear in La Ferrassie man. *Cur Anthropol*, 22, S. 424-430.
- Puech P.-F. (1983):** Tooth wear, diets, and the artifacts of Java man. *Cur Anthropol*, 24, S. 381-382.
- Puech P.-F. (1979):** The diet of early man: evidence from abrasion of teeth and tools. *Cur Anthropol*, 20, S. 590-592.
- Puech P.-F., Albertini H., Serratrice C. (1983):** Tooth microwear and dietary patterns in early hominids from Laetoli, Hadar and Olduvai. *J Hum Evol*, 12, S. 721-729.
- Puech P.-F., Prone A., Albertini H. (1981):** Paléontologie humaine - Reproduction expérimentale des processus d'altération de la surface dentaire par friction non abrasive et non adhesive: application à l'étude de l'alimentation de Homme fossile. *Comptes rendus Acad Sc Paris 293 Serie II*, S. 729-734.
- Puech P.-F., Prone A., Kraatz R. (1980):** Paléontologie humaine - Microscopie de l'usure dentaire chez l'Homme fossile: bol alimentaire et environnement. *Comptes rendus Acad Sc Paris 290 Serie D, Serie D*, S. 1413-1416.
- Radlanski R.J. (1998):** Micromorphological Features of Human Dental Enamel.- In: Alt K.W, Rösing F.W., Teschler-Nicola M.: *Dental Anthropology*. Springer Wien, NewYork, S. 129-145.
- Rafferty K.L., Teaford M.F., Jungers W.L. (2002):** Molar microwear of subfossil lemurs: improving the resolution of dietary inferences. *J Hum Evol*, 43, S. 645-657.
- Rasmussen S.T., Patchin R.E., Scott D.B., Heuer A.H. (1976):** Fracture Properties of Human Enamel and Dentin. *J Dent Res*, 55, S. 154-164.
- Reck H. (1914):** Erste vorläufige Mitteilungen über den Fund eines fossilen Menschenskeletts aus Zentralafrika. *Mammalia*, 555, S. 85-92.
- Reich S., Sindel J., Morneburt T. (1998):** In-vitro-Verschleißverhalten von Verblendkunststoffen bei der Nahrungszerkleinerung. *Deutsche Zahnärztl Z*, 53, S. 448-453.
- Rensberger J.M. (1978):** Scanning electron microscopy of wear and occlusal events in small herbivores.- In: Butler P.M., Joysey K.A.: *Development, Function and Evolution of teeth*. Academic Press, New York, S. 415-438.
- Rensberger J.M. (1997):** Mechanical adaptation of enamel.- In: Koenigswald von W., Sander P.M.: *Tooth enamel microstructure*. Balkema, Rotterdam, S. 237-257.
- Rensberger J.M. (2000):** Pathways to functional differentiation in mammalian enamel.- In: Teaford M.F., Smith M.M., Ferguson M.W.J.: *Development, Function and Evolution of teeth*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 252-268.
- Renson C.E., Braden M. (1971):** The experimental deformation of human dentine by indentors. *Archs oral Biol*, 16, S. 563-572.
- Richards M.P. (2002):** A brief review of the archaeological evidence for Palaeolithic and Neolithic subsistence. *Eur J Clin Nutr*, 56, S. 16.
- Robinson J.T. (1956):** *The Dentition of the Australopithecinae*. Transvaal Museum, Pretoria.
- Romer A.S., Parsons T.S. (1991):** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere*. Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- Rose J.J. (1983):** A replication technique for scanning electron microscopy: application for anthropologists. *Amer J Phys Anthropol*, 62, S. 255-261.

- Rose J.J., Marks M.K., Kiddick E.B. (1983):** Bioarchaeology of the Bug Hill site.- In: Altschul J.H.: Bug Hill: Excavation of a multicomponent midden mound in the Jackfork Valley, South-East Oklahoma. New World Research, Pollock, Louisiana.
- Rose J.C., Harmon A. (1986):** Enamel microwear and prehistoric North American diets. *Amer J Phys Anthropol*, 69, S. 257.
- Rose J.C., Ungar P.S. (1998):** Gross Dental Wear and Dental Microwear in Historical Perspective.- In: Alt K.W., Rösing F.W., Teschler-Nicola M.: *Dental Anthropology*. Springer Wien, New York, S. 349-386.
- Rovner I. (1971):** Potential of opal phytoliths for use in paleoecological reconstruction. *Quat Res*, 1, S. 343-359.
- Rovner I. (1983):** Plant opal phytolith analysis: major advances in archaeobotanical research.- In: Schiffer Michael B.: *Advances in archaeological method and theory*. Academic Press, Inc, Orlando, San Diego, New York, London, Toronto, Montreal, Sydney, Tokyo, S. 225-266.
- Ryan A.S. (1979a):** Wear striation direction on primate teeth: A scanning electron microscope examination. *Amer J Phys Anthropol*, 50, S. 155-168.
- Ryan A.S. (1979b):** A preliminary scanning electron microscope examination of wear striation direction on primate teeth. *J dent Res*, 58, S. 525-530.
- Ryge G., Foley D.E., Fairhurst C.W. (1961):** Microindentation hardness. *J dent Res*, 40, S. 1116-1126.
- Scheidt W. (1923):** Die eiszeitlichen Schädelknochen aus der Großen Ofnet-Höhle und vom Kaufertsberg bei Nördlingen. J.F. Lehmanns, München.
- Schepartz L.A. (1989):** Modelling the effects of subsistence pattern change on prehistoric populations.- In: Hershkovitz I., Arensburg B., Bar-Y.O., Smith P.: *People and Culture in Change*. BAR International Series 508, S. 199-219.
- Schmidt C.W. (2001):** Dental microwear evidence for a dietary shift between two nonmaize-reliant prehistoric human populations from Indiana. *Amer J Phys Anthropol*, 114, S. 139-145.
- Schmidt R.R. (1913):** Die altsteinzeitlichen Schädelgräber der Ofnet und der Bestattungsritus der Diluvialzeit. E. Schweizerbart'sche Verlagsgesellschaft, Stuttgart.
- Schnabel C., Kunzelmann K.-H., Hickel R. (1995):** The influence of abrasion media on three-body-wear of composites. *J Dent Res AADR Abstracts*, 74, S. 90.
- Schoeninger M.J., van der Merwe N.J., Moore K., Lee-Thorp J., Larsen C.S. (1990):** Decrease in diet quality between the prehistoric and the contact periods.- In: Larsen C.S.: *The archaeology of mission Santa Catalina de Guale: 2. Biocultural interpretations of a population in transition*. American Museum of Natural History, S. 78-93.
- Schroeder H.E. (1987):** *Orale Strukturbiologie*. Georg Thieme, Stuttgart, New York.
- Schroeder H.E. (1992):** Entwicklung und Struktur des Zahnhalteapparates.- In: Schroeder H.E.: *Orale Strukturbiologie*. Georg Thieme, Stuttgart, New York, S. 187-229.
- Schröter P. (1983):** Zum Schädel vom Kaufertsberg bei Lierheim (Gem. Appethshofen, Lkr. Donau-Ries). *Quartär*, 33./34., S. 99-107.
- Schröter P. (1997):** Gräber der späten Glockenbecherkultur von Offingen, Lkr. Günzburg. *Documenta naturae*, 114, S. 1-53.
- Schulte im Walde T., Freundlich J.C., Schwabedissen H., Taute W. (1986):** Radiocarbon Dates III. *Radiocarbon*, 28/1, S. 134-140.

- Schulz P.D. (1977):** Task activity and anterior tooth grooving in prehistoric California Indians. *Amer J Phys Anthropol*, 63, S. 39-56.
- Schumacher G.-H., Schmidt H., Börnig H., Richter W. (1990):** Anatomie und Biochemie der Zähne. Gustav Fischer Stuttgart, New York.
- Schutkowski H. (1994):** Analyse stabiler Isotope.- In: Herrmann B.: Archäometrie, Teil B. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, S. 19-28.
- Scott E.C. (1979a):** Principal axis analysis of dental attrition data. *Amer J Phys Anthropol*, 51, S. 203-212.
- Scott E.C. (1979b):** Dental wear scoring technique. *Amer J Phys Anthropol*, 51, S. 213-218.
- Sengupta A., Whittaker, D.K, Barber G., Togers J., Musgrave J.H. (1999):** The effects of dental wear on third molar eruption and on the curve of Spee in human archaeological dentitions. *Archs oral Biology*, 44, S. 925-934.
- Shkurkin G.V., Almquist A.J., Pfeihofer A.A., Stoddard E.L. (1975):** Scanning Electron Microscopy of Dentition: Methodology and Ultrastructural Morphology of tooth wear. *J Dent Res*, 54, S. 402-406.
- Siegmund Barbara (1983):** Die frühmittelalterlichen Gräber von Brombach/Mittelfranken - eine anthropologische Untersuchung. Ludwig-Maximilians-Universität München, Dissertation.
- Sillen A., Smith P. (1984):** Weaning patterns are reflected in Strontium-Calcium ratios of juvenile skeletons. *J Arch Sci*, 11, S. 237-245.
- Skinner M.F., Goodman A.H. (1992):** Anthropological uses of developmental defects of enamel.- In: Saunders S.R., Katzenberg M.A.: Skeletal biology of past peoples: research methods. Wiley-Liss, New York, S. 153-174.
- Smith B.H. (1984):** Patterns of molar wear in hunter-gatherers and agriculturalists. *Amer J Phys Anthropol*, 63, S. 39-56.
- Smith B.G.N. (1975):** Dental erosion, attrition and abrasion. *The Practitioner*, 214, S. 347-355.
- Smith P. (1972):** Diet and attrition in the Natufians. *Amer J Phys Anthropol*, 37, S. 233-238.
- Smith P. (1976):** Dental pathology in fossil hominids: What did Neanderthals do with their teeth? *Cur Anthropol*, 17, S. 149-151.
- Sokal R.R., Rohlf J.F. (1969):** Principal axis and confidence regions.- In: Sokal R.R., Rohlf J.F.: Biometry: The principles and practice of statistics in biological research. Freeman and Company, San Francisco, S. 526-532.
- Southgate D. A. T. (1992):** Nature and variability of human food consumption.- In: Whiten A., Widdowson E. M.: Foraging strategies and natural diet of monkeys, apes and humans. Clarendon press, Oxford, S. 121-128.
- Spears I. R. (1997):** A three-dimensional finite element model of prismatic enamel: a re-appraisal of the data on the Young's modulus of enamel. *J Dent Res*, 76, S. 1690-1697.
- Spears I.R., Crompton R.H. (1996):** The mechanical significance of the occlusal geometry of great ape molars in food breakdown. *J Hum Evol*, 31, S. 517-535.
- Spears I.R., Macho G.A. (1998):** Biomechanical behaviour of modern human molars: implications for interpreting the fossil record. *Amer J Phys Anthropol*, 106, S. 467-482.
- Spears I.R., van Noort R., Crompton R.H., Cardew G.E., Howard I.C. (1993):** The effects of enamel anisotropy on the distribution of stress in a tooth. *J Dent Res*, 72, S. 1526-1531.
- Spencer M.A. (1998):** Force production in the primate masticatory system: electromyographic tests of biomechanical hypotheses. *J Hum Evol*, 34, S. 25-54.

- Stahl A.B. (1989):** Plant-food processing: implications for dietary quality.- In: Harris D.R., Hillman G.C.: Foraging and Farming - The Evolution of Plant Exploitation. One World Archaeology, Unwin Hyman, S. 171-194.
- Staines, M., Robinson, W.H.; Hood, J.A.A., (1981):** Spherical indentation of tooth enamel. J Mater Sci, 16, S. 2551-2556.
- Strait S.G. (1997):** Tooth use and the physical properties of food. Evol Anthropol, 5, S. 199-211.
- Strait S.G., Overdorff D.J. (1994):** A preliminary examination of molar microwear in strepsirhine primates. Amer J Phys Anthropol, Suppl 18, S. 190.
- Suzuki S., Leinfelder K.F. (1993):** Wear of enamel cusps opposed by posterior resin. Quintessence International, 24, S. 885-890.
- Taute W. (1978):** Einleitung.- In: Müller-Beck H., Taute W., Tomschy J., Kerpmann H.-P.: Das Mesolithikum in Süddeutschland. Archaeologica Venatoria, S. 7-10.
- Taylor R.M.S. (1963):** Cause and effect of wear of teeth: further non-metrical studies of the teeth and palate in Moriori and Maori skulls. Acta Anat (Basel), 53, S. 97-157.
- Teaford M.F. (1986):** Dental microwear and diet in two species of Colobus.- In: Else J.G., Lee P.C.: Primate ecology and conservation. Cambridge University Press, S. 63-66.
- Teaford M.F. (1991):** Dental microwear: What can it tell us about diet and dental function?.- In: Kelley M.A., Larsen C.S.: Advances in dental Anthropology. Wiley-Liss, Inc, S. 341-356.
- Teaford M.F. (1988a):** A review of dental microwear and diet in modern mammals. Scanning Microscopy, 2, S. 1149-1166.
- Teaford M.F. (1988b):** Scanning electron microscope diagnosis of wear patterns versus artifacts on fossil teeth. Scanning Microscopy, 2, S. 1167-1175.
- Teaford M.F., Glander K.E. (1991):** Dental microwear in live, wild-trapped *Alouatta palliata* from Costa Rica. Amer J Phys Anthropol, 85, S. 313-319.
- Teaford M.F., Lytle J.D. (1996):** Brief communication: Diet-induced changes in rates of human tooth microwear: a case study involving stone-ground maize. Amer J Phys Anthropol, 100, S. 143-147.
- Teaford M.F., Oyen O.J. (1989a):** *In vivo* and *in vitro* turnover in Dental Microwear. Amer J Phys Anthropol, 80, S. 447-460.
- Teaford M.F., Oyen O.J. (1989b):** Live primates and dental replication: new problems and new techniques. Amer J Phys Anthropol, 80, S. 73-81.
- Teaford M.F., Robinson J.G. (1989):** Seasonal or ecological differences in diet and molar microwear in *Cebus nigrivittatus*. Amer J Phys Anthropol, 80, S. 391-401.
- Teaford M.F., Ungar P.S. (2000):** Diet and the evolution of the earliest human ancestors. PNAS, 97, S. 13506-13511.
- Teaford M.F., Walker A. (1983):** Dental microwear in adult and still-born guinea pigs (*Cavia porcellus*). Archs oral Biol, 28, S. 1077-1081.
- Teaford M.F., Walker A. (1984):** Quantitative differences in dental microwear between primate species with different diets and a comment on the presumed diet of *Sivapithecus*. Amer J Phys Anthropol, 64, S. 191-200.
- Teaford M.F., Runestad J.A. (1992):** Dental Microwear and diet in Venezuelan primates. Amer J Phys Anthropol, 88, S. 347-364.

- Teuteberg H.J. (1992a):** Agenda for a comparative history of diet.- In: Teuteberg Hans J.: European food history. Leicester University Press, London, New York, S. 1-18.
- Teuteberg H.J. (1992b):** The diet as an object of historical analysis in Germany.- In: Teuteberg H.J.: European food history. Leicester University Press, London, New York, S. 109-128.
- Theuns H.M., Van Dijk J.W.E., Jongbloed W.L., Groeneveld A. (1983):** The mineral content of human enamel studied by polarizing microscopy, microradiography and scanning electron microscopy. *Archs oral Biology*, 28, S. 797-803.
- Turner A. (1984):** Hominids and fellow travellers: Human migration into high latitudes as part of a large mammal community.- In: Foley R.: Hominid Evolution and Community ecology. Academic Press, New York, S. 193-217.
- Turner C.G., Cadien J.D. (1969):** Dental chipping in Aleuts, Eskimos and Indians. *Amer J Phys Anthropol*, 31, S. 303-310.
- Twiss P.C. (1992):** Predicted world distribution of C3 and C4 grass phytoliths.- In: Rapp G. jr., Mulholland S.C.: Phytolith systematics. Plenum Press, New York, London, S. 113-128.
- Ubelaker D.H., Phenice T.W., Bass W.M. (1969):** Artificial interproximal grooving of the teeth in American Indians. *Amer J Phys Anthropol*, 30, S. 145-150.
- Ulijaszek S.J. (1991):** Human dietary change. *Phil Trans R Soc Lond B*, 334, S. 271-279.
- Ungar P.S., Dennis J., Kirera F., Wilson J., Grine F. (2002):** Quantification of tooth crown shape by dental topographic analysis. *Amer J Phys Anthropol*, Suppl 34.
- Ungar P.S. (1995):** A semiautomated image analysis procedure for the quantification of dental microwear. *Scanning*, 17, S. 57-59.
- Ungar P.S. (1994a):** Incisor Microwear of Sumatran Anthropoid Primates. *Amer J Phys Anthropol*, 94, S. 339-363.
- Ungar P.S. (1996a):** Dental microwear of European Miocene catarrhines: evidence for diets and tooth use. *J Hum Evol*, 31, S. 335-366.
- Ungar P.S., Brown C.A., Bergstrom T.S., Walker A. (2003):** Quantification of dental microwear by Tandem Scanning confocal microscopy and scale-sensitive Fractal Analyses. *Scanning*, 25, S. 185-193.
- Ungar P.S., Grine F.E. (1991):** Incisor size and wear in *Australopithecus africanus* and *Paranthropus robustus*. *J Hum Evol*, 20, S. 313-340.
- Ungar P.S., Kay R.F., Teaford M.F., Walker A. (1996):** Dental evidence for diet in Miocene apes. *Amer J Phys Anthropol*, Suppl 22, S. 232-233.
- Ungar P.S., Simon J.-C., Cooper J.W. (1991):** A semiautomated image analysis procedure for the quantification of dental microwear. *Scanning*, 13, S. 31-36.
- Ungar P.S., Spencer M.A. (1997):** Incisor microwear and anterior tooth use in three Native American populations. *Amer J Phys Anthropol*, Suppl 26, S. 222.
- Ungar P.S., Teaford M.F. (1996):** Preliminary examination of non-occlusal dental microwear in anthropoids: Implications for the study of fossil primates. *Amer J Phys Anthropol*, 100, S. 101-113.
- Ungar P.S., Teaford M.F. (2002):** Perspectives on the Evolution of human diet.- In: Ungar P.S., Teaford M.F.: Human diet. Bergin and Garvey, Westport, Connecticut, London, S. 1-6.

- Walker A., Teaford M. F., Ungar P. S. (1994):** Enamel microwear differences between species of Proconsul from the Early Miocene of Kenya. *Amer J Phys Anthropol*, Suppl 18, S. 202.
- Walker A. (1981):** Diet and Teeth: Dietary hypotheses and Human Evolution. *Phil Trans R Soc Lond B*, 292, S. 57-64.
- Walker A., Hoeck H.N., Perez L. (1978):** Microwear of mammalian teeth as an indicator of diet. *Science*, 201, S. 908-910.
- Walker P.L., Bernstein S.A., Gordon K.D. (1987):** An image processing system for the quantitative analysis of dental microwear. *Amer J Phys Anthropol*, 72, S. 267.
- Walker P.L. (1976):** Wear striations on the incisors of cercopithecoid monkeys as an index of diet and habitat preference. *Amer J Phys Anthropol*, 45, S. 299-308.
- Wallace J.A. (1974):** Approximal grooving of teeth. *Amer J Phys Anthropol*, 40, S. 385-390.
- Waugh L.M. (1933):** Influence of diet upon the jaws and face of the American Eskimo. *J dent Res*, 13, S. 149-151.
- Weinig J. (1991):** Ein neues Gräberfeld der Kupfer- und Frühbronzezeit bei Weichering. *Das archäologische Jahr in Bayern*, 12, S. 64-67.
- Weissmüller W. (1986):** Postmesolithische Funde aus Höhlen und Abris am Beispiel des südlichen Riesrandgebiets.- In: Hands A.R., Walker M.A.: *BAR International Series*, 279. Centremead, Oxford England.
- Weltbevölkerungsbericht (2002):** Wege aus der Armut: Menschen, Chancen und Entwicklung. Balance Verlag, Stuttgart.
- Whiten A., Widdowson E. M. (1992):** Foraging strategies and natural diet of monkeys, apes and humans. *Proceedings of a Royal Society Discussion Meeting*. Oxford University Press.
- Widdowson E.M. (1992):** Contemporary human diets and their relation to health and growth: overview and conclusions.- In: Whiten A., Widdowson E. M.: *Foraging strategies and natural diet of monkeys, apes and humans*. Clarendon press, Oxford, S. 129-135.
- Wiechmann I., Brandt E., Grupe G. (1999):** State of preservation of polymorphic plasma proteins recovered from ancient human bones. *Int J Osteoarchaeol*, 9, S. 383-394.
- Wilding R.J.C. (1993):** The assoziation between chewing efficiency and occlusal contact area in man. *Archs oral Biol*, 38, S. 589-596.
- Willems G., Lambrechts P., Braem M., Vanherle G. (1993):** Three-year follow-up of five posterior composites: *in vivo* wear. *J Dent*, 21, S. 74-78.
- Willerding U. (1987):** Landwirtschaftliche Produktionsstrukturen im Mittelalter.- In: Herrmann B.: *Mensch und Umwelt im Mittelalter*. Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart, S. 244-256.
- Willerding U. (1988):** Zur Entwicklung von Ackerunkrautgesellschaften im Zeitraum vom Neolithikum bis in die Neuzeit.- In: *Festschrift für Udelgard Körber-Grohne: Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg*. Kommissionsverlag Konrad Theiss, Stuttgart, S. 31-41.
- Wilson E.O. (1998):** *Consilience. The Unity of Knowledge*. Knopf, New York.
- Wisker E., Maltz A., Feldheim W. (1988):** Metabolizable Energy of diets low or high in dietary fiber from cereals when eaten by humans. *J Nutr*, 118, S. 945-952.
- Wood B., Brooks A. (1999):** We are what we ate. *Nature*, 400, S. 219-220.

Wurm H. (1982): Über die Schwankungen der durchschnittlichen Körperhöhe im Verlauf der deutschen Geschichte und die Einflüsse des Eiweißanteiles der Kost. *Homo*, 33, S. 21-42.

Xu H.H.K., Smith D.T., Jahanmir S., Romberg E., Kelly J.R., Thompson V.P., Rekow E.D. (1998): Indentation damage and mechanical properties of human enamel and dentin. *J Dent Res*, 77, S. 472-480.

Yen D. E. (1989): The domestication of environment.- In: Harris D.R., Hillman G.C.: *Foraging and Farming - The Evolution of Plant Exploitation*. One World Archaeology, Unwin Hyman, S. 55-75.

Yiu S. H. (1989): Cereal structure and its relationship to nutritional quality. *Food microstructure*, 8, S. 99-113.

Zohary D., Hopf M. (1993): *Domestication of plants in the Old World*. Clarendon press, Oxford, 2. Aufl.

Zum Gahr K.-H. (1987): *Microstructure and wear of materials*. Elsevier, Amsterdam.

VI. Anhang

Anhang 1

Härte- und Elastizitäts(E)modulwerte an verschiedener Zahnschmelzregionen

Quelle	Technik	Lokalität	Härte H (+/- s) GPa	E-modul E (+/- s) GPa
Craig and Peyton (1958)	Knoop Mikrohärtete	k.A.	3,43	nb
Craig et al. (1961)	Kompressionstest	Höcker	nb	84,1
Rasmussen et al. (1976)	Brucharbeit	parallel zur Prismenorientierung am niedrigsten	3,38	20 - 90
Staines et al. (1981)	sphärisch	Im Winkel von 90° zur Prismenorientierung	höher als coaxial	nb
Staines et al. (1981)	sphärisch	coaxial	niedriger als im re. Winkel	nb
Hassan et al. (1981)	Mod. Mikrohärtetest nach Vickers	bukkale polierte Schmelzoberflächen (300 - 500 g Last)	variable Region 0,68 - 1,27	nb
Willems et al (1993)	Nanohärtetest	Zahnschmelz nicht ortsspezifisch	3,39 (+/- 0,18)	90,59 +/- 16,13
Meredith et al. (1996)	Knoop Mikrohärtete	ca. 300 µm entfernt von der Oberfläche	2,87 (+/- 0,10)	nb
Spears (1997)		parallel zur Prismenorientierung	nb	93 bis 113
Spears (1997)		Im Winkel von 90° zur Prismenorientierung	nb	19 bis 91
Xu et al. (1998)	Mod. Mikrohärtetest nach Vickers	Zahnschmelz okklusal	3,47 (+/-0,18) - 3,79 (+/-0,18)	90 (+/-6) – 98 (+/-4)
Xu et al. (1998)	Mod. Mikrohärtetest nach Vickers	Zahnschmelz axial	3,26 (+/-0,21) - 3,50 (+/-0,12)	78 (+/-1) – 86 (+/-3)
Xu et al. (1998)	Mod. Mikrohärtetest nach Vickers	Dentin	0,53 (+/-0,02) - 0,60 (+/-0,02)	18 (+/-0) – 22 (+/-1)
Cuy et al. (2002)	Nanohärtetest	Schmelzoberfläche (SOF)	4,6 +/- 0,2 - 0,3	91,1 (+/- 2-5)
Cuy et al. (2002)	Nanohärtetest	Schmelz-Dentin-Grenze (EDJ)	3,4 (+/- 0,2 - 0,3)	66,2 (+/- 2-5)
Cuy et al. (2002)	Nanohärtetest	Variation von SOF zur EDJ	Max 6,4 - Min 2,7	120 - 47
Cuy et al. (2002)	Nanohärtetest	lingualer Höcker	Max > 6	> 110
Cuy et al. (2002)	Nanohärtetest	bukkaler Höcker	4,6	93

Anmerkung: k.A. keine Angaben; nb nicht bestimmt

Anhang 2

Bestimmungsschlüssel zur Zahnschmelzabtragung an Prämolaren und Molaren Attritions-Scoring-Technik (Scott 1979b)

Score Beschreibung

- 0 keine Information erhältlich (Zahn nicht in Okklusion, nicht eruptiert, ante- oder postmortaler Verlust, etc.)
- 1 Abtragungsfacetten nicht sichtbar oder sehr klein
- 2 Abtragungsfacetten groß, aber große Höcker noch vorhanden und Oberflächenmerkmale nachweisbar (knötchenförmige Hervorhebungen, nichtkariöse Grübchen). Möglich, daß punktchenartige Dentin-Expositionen oder dots vorhanden sind, die ignoriert werden können. Quadrant mit viel Schmelz.
- 3 Jeder Höcker in der Quadrantenregion ist eher gerundet als klar definiert wie in 2. Der Höcker wird abgetragen, ist aber noch nicht flach abgetragen.
- 4 Quadrantenregion flach abgetragen (horizontal), aber es gibt keine Dentin-Exposition außer den möglichen punktchenartigen Mulden.
- 5 Quadrant flach, Dentin-Exposition $\frac{1}{4}$ des Quadranten oder weniger.
(Vorsicht! Nicht-kariöse pits-Konfusion mit Dentin-Exposition)
- 
- 6 Dentin-Exposition größer: $> \frac{1}{4}$ der Quadrantenregion involviert, noch viel Schmelz präsent. Dentinbereich noch an allen Seiten mit Schmelzring umgeben.
- 
- 7 Schmelz nur noch an 2 Seiten des Quadranten.
- 
- 8 Schmelz nur noch an 1 Seite des Quadranten, gewöhnlich der äußere Bereich, Schmelz dick bis mittel an dieser Ecke
- 
- 9 Schmelz nur an 1 Seite wie bei 8, aber Schmelz ist sehr dünn - nur ein Streifen. Teile der Kante können an einer oder mehreren Stellen durchgetragen sein.
- 
- 10 kein Schmelz auf irgendeinem Teil des Quadranten - Dentin-Exposition vollständig. Abtragung geht bis unter die Cervico-Schmelz-Verbindung in die Wurzel.
- 

Anhang 3

Befundbogen

Okklusionsmerkmale / Attrition und Abrasion / Karies

Datum

Fundkomplex ASS-Nr.
 Grab Nr. Alter
 Befund Nr. Geschlecht

A Bestimmung an Zähnen (n. Baume 1973, Scott 1979)

Oberkiefer		links (2)								rechts (1)							
Besonderheiten (Elongation, Zahnstein, Parodontopathien, Schmelzhypoplasie)																	
Karies																	
Abrasion / Attrition Quadrant																	
Ok-Lokalisation																	
Uk-Lokalisation																	
Abrasion / Attrition Quadrant																	
Karies																	
Besonderheiten																	
Unterkiefer		links (3)								rechts (4)							

Legende:
 Entwicklung: Aplasie = C; Überzählig = S, Mißgebildet = M; Impaktiert = I; Transponiert = T;
 X = Fehlend infolge Exzaktion, Trauma
 ++ = sonstig in vivo verlorengegangener Zahn (Alveolaratrophie) R = persistenter Milchzahn
 + = in vivo Verlust mit noch nicht vollständigem Alveolarschluß -- = postmortal verlorengegangener Zahn
 √ = Zahnwurzelrest iD = Zahn im Durchbruch
 Z = vorhandener Zahn, dessen Alveole erodiert ist, keine Lagerekonstruktion möglich

Messtechnische Erfassung der Okklusionsmerkmale (Formular 2)

B Messungen innerhalb des Zahnbogens

		links seitlich	inzisal	rechts seitlich		
1) Engstand	C					
2) Lückenstand	S					
Normalstand	N					
	A					
3) Anteriore Irregularitäten		2	1	1	2	Gesamt Differenz
4) Oberes medianes Diastema	OA	[mm]				

C Bestimmung der Antagonistenbeziehung

1) Seitliches Segment

Codes	Links					Rechts				
	37	36	35	34	33	43	44	45	46	47
a) Anteroposterior - Molarenbeziehung	D+, D, N, M, M+									
b) Vertikal - seitlich offener Biß	N O									
c) Transversal - seitlicher Kreuzbiß	N B L									
	A									

Anmerkung: Alle Untersuchungen werden am ersten Molaren bei zentrischer Okklusion in horizontaler Okklusionsebene durchgeführt. Fehlen die ersten Molaren, dann wird der erste Prämolare herangezogen.

2) Inziales Segment

		Links		Rechts		
		2	1	1	2	
a) Anteroposterior - Frontale Stufe	+/- mm					auch negative Stufe möglich!
b) Vertikal - Überbiß	+/- mm					Überlappung, Bleistiftmarke
c) Transversal - Mittellinienabweichung	+/- mm, Seite					Abweichung der unteren Zahnbogenmitte nach R / L
Zahn fehlend, keine Befundung möglich	A					

D Bestimmung des Abtragungswinkels der Okklusionsebene

	Links	Rechts
Talonid-Einskg der Ok-M		
Trigon des Uk-Molaren		

bukkale Neigungen positiv, linguale negativ

E Einschätzung der Dentineintiefung

	Links	Rechts
Oberkiefer		
Unterkiefer		

Anhang 4

Individuenliste der Skelettserien für die Dentale Microwear Analyse (DMA)

	Individuum bzw. Grab Nr.	Alter	Geschlecht	C/N- Isotopie	M ₂ Facette			M ² Facette		
					5	6	9	5	6	9
Frühes Mittelalter										
Waging										
	5	a	eW	x	x2	x2	x2	x3	x1	x3
	35	fa	W		z2	z3	z3	z2	z2	z3
	52	juv	eW		z2	za2	z2	z2	z2	z3
	59	a	W	x	x2	x2	x2	x1		
	92	a	M	x	x2	x2	x2	x2	x3	x1
	104	sjuv	W		x1	x2	x3	x2	nv	x3
	115	a	arW	x	z2	z2	z2	z1	z2	z2
	136	fa	M		x3	x2	x3	x3	x2	x3
	141	fjuv	W	x	x3	x3	x2	x2	x2	x3
	152	fjuv	eW	x	x3	x2	x2	x2	x4	x2
	163				z3	z2	za2			
	1A							z1	z1	za4
Bittenbrunn										
	5	a	eW	x	x2	x1	xa	x1	x2	x2
	7	fa	M		z2	z2	z1			
	13	a	eM		z2	z3	z1	z2	z2	z2
	17	juv	eM	x	x2	x2	x3	x2	x2	x3
	34	a	M	x	x3	x3	x3	x2	x3	x2
	37	a	W					x2	x3	x2
	42	fa	eM	x	x1	x1	x2			x1
	51	fa	W		za2	z2	z2	x2	x3	x2
	59	a	W	x				xe	xe	xe
	62	a	W		z2	z2	z2	z2	z2	z2
	73	a	W		z2	z2	za2	z2	z2	z2
Brombach										
	7	juv	eM	x	x1	x1	x1	x2	x2	x2
	9	a	M	x	x2	x1	x2	x2	x2	x2
	13	sm - s	W	x					z1	z2
	35	a-m	eM	x	z2	z2	z2	x3	x1	x2
	36	inf II	eM	x	z3	z3	z4			
	39	sjuv	W	x	x1	x3	x3	x2	x2	x2
	16a	juv	eW		x2	x3	x2			
	S5	a	W					z2	z2	z2
Endneolithikum										
Weichering										
	2	juv	eM	x		x1	x2	x3	x2	x2
	3	juv-fa	eM	x		x2	x2			
	5	fjuv	eM	x	z2	z3	z4	z1	z1	z2 (z6 Serie)
	10	a	eM		z2/z1	z2/z3	z2/z3			
	14	juv-fa	W					za	za	za
	16	a	eW		z3	z2	z2			
	17	a	M	x	x3	x3	x1	x2	x2	x2
	A	sm	W		z3	za2	za2			
	D	sa	W	x	z2	z2	z2	xa	xa	x2

Mesolithikum										
'Ofnet-Höhle	3	fa	eW	x	x2	x1	x4	x2	x2	x4
	4	a	W		x2	x6 Serie	x2	x2	x2	x2
	8	a	eW	x	z2	z2	z3	x2	x2	x2
	11	fa	eM	x	x2	x3	x3	x2	x2	x3
	13	a	eM	x	z2	z2	z3	z1	z2	z2
	14	a	nd		z1	z3	z2	z2	z1	za3
	15	a	eW	x	z1/x3	z3/x2	z2/x3	z2	z2	z3
	18	a	eW	x	z3	z2	z3	x2	x3	x3
	21	a	M	x	z2/x2	z3	z2	x2	x2	x2
	25	a	eW	x				z2	z2	za
	29	a	eW		a	a	a	z2	z2	z2
	32	a	eW	x	z2/x2	z2/x1	z2/x2	z2/x2	z2/x2	z3/x2
Kaufertsberg	li (2 R)	fa	M		2z2/3z2	2z3/3z2	2z3/3z3	2z2/3z2		2z2
	re (2 R)	f			2z1/3z1	2z2/3z2	2z2/3z2	2z2/3z3		2z2/3z2
Paläolithikum										
Oldoway OH 1	li	a	eM		za2	z7 Serie	z7 Serie			
	re				z2	z3	z3	z2	z3	z2

Anmerkung: x (Philips XL 20 Series), z (LEO 1430 VP); Zahl nach x bzw. z = Anzahl der Bilder (200x)/Facette; Kaufertsberg zwei Abgüsse (R = 2, 3) / Zahn, a Artefakte; e Erosion; C/N-Isotopie Mesolithikum: Quelle: Bocherens et al. (1997)

Anhang 5

Bestimmung der Verhältnisse der stabilen Isotope von Kohlenstoff und Stickstoff aus gereinigtem Knochenkollagen

Laborprotokoll zur Kollagen-Gelatine-Extraktion

(aus: Schutkowski 1994 modifizierte Methode nach Schoeninger und DeNiro 1984)

Vorbereitung

Knochen (Fragmente von Rippen, Clavicula, Fibula oder Zehen) wurden mechanisch mit Leitungswasser und Bürste gereinigt.

Eine Nachreinigung im Ultraschallbad erfolgte bis zur Klärung des Leitungswassers.

Nach vollständiger Lufttrocknung der Proben wurden diese in einer Schwingmühle homogenisiert.

Extraktion

- 1) Entfernung der mineralischen Phase und der postmortalen Carbonatanlagerung
Mind. 250 – 300 mg Knochenmehl in 1M HCl, 20 min mischen. Sediment durch mehrmaliges Waschen reinigen und in die Neutralität überführen
- 2) Alkalischer Aufschluss des demineralisierten Sedimentes entfernt verbleibende Lipide und Huminsäuren
In 10 ml 0,125 M NaOH resuspendieren, 20 h inkubieren, Sediment durch mehrmaliges Waschen reinigen und in die Neutralität überführen
- 3) Gelatinisierung von Kollagen
erfolgt durch leicht sauren Hitzaufschluss (pH 3, 90°C, 10 – 17h),
Anschließende Filtration, Lyophilisation des Überstandes; Bestimmung der Menge

Die massenspektrometrische Darstellung der stabilen Isotope und der δ Werte aus den gereinigten Gasen erfolgte im Fremdlabor.

Anhang 6

Molare Abtragungsparameter der Individuen

Fundkomplex	Ind	Alter	Abrasions-		
			grad 36/46	grad 37/47	winkel 37/47
Bittenbrunn	17	juv	4,3	2,3	-14,5
	7	fa	5,8	3,6	-7
	42	fa	4,3	3,4	-5,5
	51	fa	5,0	2,1	-13,5
	5	a	5,5	4,3	-3,5
	13	a	5,5	5,0	1,25
	30	a	4,8	3,0	-5
	34	a	5,0	3,4	-8
	59	erw	5,5	3,8	-11,5
	62	a	5,3	3,8	7,5
	73	a	5,4	3,3	-11
Brombach	16a	juv	2,6	1,3	
	39	sjuv	7,3	4,1	-3,5
Waging	141	fjuv	2,8	2,1	-12,5
	152	juv/fjuv	3,5	2,5	-9,5
	52	juv	3,5	2,1	-22
	104	juv/sjuv	4,0	3,5	-9
	35	fa	4,5	3,8	11,5
	136	fa	4,3	3,5	0,5
	5	a	6,5	4,8	3,5
	59	a	5,8	5,0	-5
115	a	5,3	3,8	-3	
Weichering	5	fjuv	3,8	2,3	-16
	1	erw	6,0	5,3	0
	17	a	5,5	4,3	-1
Ofnet-Höhle	3	fa	4,8	2,9	-6,5
	8	fa	4,5	3,0	
	11	fa	3,4	2,0	-6
	13	fa	4,3	4,0	1
	14	fa	4,0	3,4	-10,5
	25	fa	4,6	2,8	-6
	29	fa	5,3	3,6	-1,5
	4	a	7,5	3,5	-4,5
	15	a	6,4	4,5	-3,5
	18	a	6,4	3,9	-3,5
	2	sa	5,9	4,4	
	24	sa	8,3		11

Anhang 7

Beispiel der Berechnung einer Hauptachsengleichung (Principal axis analysis)

Ofnet Grabnr	Ok		Uk	
2			18	23
3	9	16	12	20
4				
8			13	18
11	8	12	10	15
13	7	17	16	17
14	10	13	13	16
15	16	25	17	25
18	15	21	16	26
21	10	15		
24	13	20		
25	6	17	12	18
29	10	18	14	23
32	11	16	13	20
	16	24	17	24
	11	17	11	18
Korrelation M1 Ok zu M1 Uk 0,895153				
Korrelation M2 Ok zu M2 Uk 0,679896				
	6	12	6	12
	6	14		
	11	16	14	16
	15	25	19	26
	16	21	15	25
	12	16	10	19
	14	16	15	19
	12	16	12	16
	Y2	Y1	Y2	Y1
MITTELWERT	11,1	17,5	13,5	19,7
s	3,38	3,87	3,11	3,99
VAR	11,4	15	9,66	15,9
N	21	21	21	21
r (Korr)	0,78		0,78	
Regressionsk	0,68		0,61	
KOVAR	9,74		9,24	
D	19,8		19,5	
lambda 1	23,1		22,5	
lambda 2	3,29		3,03	
b1	1,198		1,394	
Konstante	4,13		0,87	
H	0,04		0,03	
A	0,19		0,18	
L1	0,818		0,963	
L2	1,804		2,123	

Anhang 8

Statistik zur Testserie zur Identifikation der Dimensionen charakteristischer Microwear Merkmale

Test 1		Länge MW			Breite MW		
09.01.2002	MM-Nr.	(µm)	S +/-	VK %	(µm)	S +/-	Vk %
9.00h n 0 B	1	34,4	0,8	2,3	20,4	1,0	5,1
	2	29,6	1,2	3,9	25,9	1,4	5,5
	3	61,5	0,7	1,2	1,6	0,8	
	4	96,7	1,5	1,5	1,0	0,4	
	5	22,1	1,0	4,7	1,3	0,4	
12.00h n 8 B	1	34,9	0,7	1,9	21,4	1,4	6,8
	2	30,7	1,2	4,0	26,6	1,7	6,5
	3	61,6	0,8	1,2	1,6	0,7	
	4	96,6	1,9	1,9	1,1	0,7	
	5	22,1	0,7	3,3	1,4	0,3	
'24.00 n 16 B	1	33,2	3,1	9,4	20,4	0,6	2,8
	2	28,9	1,7	5,8	23,2	1,9	8,2
	3	60,4	1,0	1,7	1,3	0,6	
	4	97,9	2,2	2,2	1,1	0,6	
	5	21,8	1,1	4,9	1,2	0,6	

Test 2		Länge MW			Breite MW		
15.02.2002	MM-Nr.	(µm)	S +/-	VK %	(µm)	S +/-	Vk %
9.00h n 0 B	1	34,2	1,3	3,9	20,5	1,4	6,6
	2	29,9	1,4	4,8	25,8	1,5	5,6
	3	61,4	0,9	1,4	1,4	0,6	
	4	97,7	0,8	0,8	1,2	0,7	
	5	22,2	0,8	3,8	1,2	0,7	
12.00h n 8 B	1	34,9	0,7	1,9	21,4	1,4	6,8
	2	30,7	1,2	4,0	26,6	1,7	6,5
	3	61,6	0,8	1,2	1,6	0,7	
	4	96,6	1,9	1,9	1,1	0,7	
	5	22,1	0,7	3,3	1,4	0,3	
'16.00 n 16 B	1	34,4	0,8	2,3	20,4	1,0	5,1
	2	29,6	1,2	3,9	25,9	1,4	5,5
	3	61,5	0,7	1,2	1,6	0,8	
	4	96,7	1,5	1,5	1,0	0,4	
	5	22,1	1,0	4,7	1,3	0,4	

Test 3		Länge MW			Breite MW		
17.04.2002	MM-Nr.	(µm)	S +/-	VK %	(µm)	S +/-	Vk %
9.00h n 0 B	1	33,4	1,1	3,2	19,8	1,4	7,0
	2	28,1	1,4	4,8	25,2	1,8	7,3
	3	61,8	1,3	2,1	1,2	0,3	
	4	96,5	2,7	2,8	1,3	0,4	
	5	22,3	0,8	3,7	1,0	0,4	
18.00h n 8 B	1	34,4	1,0	2,8	20,6	1,3	6,2
	2	29,7	1,0	3,4	25,3	1,4	5,4
	3	61,8	0,8	1,2	1,5	0,4	
	4	95,5	1,5	1,6	1,1	0,4	
	5	22,5	1,3	5,9	1,4	0,3	

Test 4		Länge MW			Breite MW		
14.05.2002	MM-Nr.	(µm)	S +/-	VK %	(µm)	S +/-	Vk %
9.00h n 0 B	1	33,4	1,0	2,9	20,5	0,7	2,9
	2	25,0	2,1	8,3	23,2	2,0	8,3
	3	60,2	0,6	1,0	1,4	0,5	
	4	92,0	1,2	1,3	1,0	0,5	
	5	21,9	0,6	2,6	1,1	0,6	
12.00h n 8 B	1	32,9	2,3	7,0	20,3	0,9	7,0
	2	26,0	1,9	7,5	23,4	1,3	7,5
	3	60,5	0,7	1,1	1,3	0,5	
	4	93,9	1,8	1,9	1,5	0,7	
	5	22,1	0,7	3,3	1,0	0,5	
'16.00 n 16 B	1	33,9	1,0	2,9	20,7	1,8	2,9
	2	25,0	1,7	6,8	23,2	0,8	6,8
	3	60,9	0,6	1,0	0,9	0,3	
	4	95,7	2,0	2,0	1,0	0,6	
	5	22,2	0,9	4,1	1,1	0,5	

Test 5		Länge MW			Breite MW		
28.05.2002	MM-Nr.	(µm)	S +/-	VK %	(µm)	S +/-	Vk %
9.00h n 0 B	1	34,1	0,5	1,6	20,4	1,1	1,6
	2	29,0	1,0	3,5	24,7	2,0	3,5
	3	60,3	0,6	1,0	1,2	0,4	
	4	92,6	1,2	1,3	0,8	0,3	
	5	21,3	0,9	4,0	1,0	0,5	
12.00h n 8 B	1	33,8	0,8	2,4	20,1	1,0	2,4
	2	28,4	0,8	2,9	24,0	1,6	2,9
	3	60,1	0,9	1,4	1,5	0,5	
	4	93,8	1,1	1,2	1,0	0,5	
	5	21,0	0,6	2,7	1,1	0,2	
'16.00 n 16 B	1	33,9	0,9	2,8	20,1	1,1	2,8
	2	28,8	1,2	4,0	23,9	1,2	4,0
	3	59,9	0,2	0,4	1,4	0,3	
	4	95,3	2,0	2,1	1,4	0,6	
	5	21,1	0,8	3,7	1,0	0,3	

	MM-Nr.	Länge MW			Breite MW		
		(µm)	S +/-	VK %	(µm)	S +/-	Vk %
Test Gesamt	1	34,0	1,4	4,1	20,5	1,2	5,9
	2	28,5	2,3	8,0	24,8	2,0	7,9
	3	61,0	1,0	1,7	1,4	0,6	
	4	95,5	2,4	2,5	1,1	0,5	
	5	21,9	1,0	4,4	1,2	0,5	

Anmerkung: MW Mittelwert, s Standardabweichung, VK = Variationskoeffizient $s/\text{mean} \times 100$ (Streumaß in %), Die Merkmale waren zwei Gruben unterschiedlicher Größe (1,2) und drei Kratzspuren von unterschiedlicher Länge, lang (4), mittel (3) und kurz (5).

Multivariate Tests (MANOVA) zur Untersuchung der Einflussfaktoren (Hauptachse und Ratio) auf die Metrik der Einzelmerkmale

Effekt	MM = 1				MM = 2				MM = 3							
	Wert	F	df	Fehler df	P	Wert	F	df	Fehler df	P	Wert	F	df	Fehler df	P	
Zp	Pillai-Spur	0,044	1,426	4	252	0,226	0,148	5,046	4	252	0,001	0,047	1,502	4	252	0,202
	Wilks-Lambda	0,956	1,430	4	250	0,224	0,855	5,103	4	250	0,001	0,953	1,507	4	250	0,201
	Hotelling-Spur	0,046	1,434	4	248	0,223	0,166	5,159	4	248	0,001	0,049	1,511	4	248	0,200
TestNr	Pillai-Spur	0,128	2,158	8	252	0,031	0,724	17,883	8	252	0,000	0,404	7,972	8	252	0,000
	Wilks-Lambda	0,875	2,164	8	250	0,031	0,324	23,663	8	250	0,000	0,602	9,014	8	250	0,000
	Hotelling-Spur	0,140	2,168	8	248	0,030	1,939	30,057	8	248	0,000	0,650	10,070	8	248	0,000
Zp * TestNr	Pillai-Spur	0,146	1,419	14	252	0,144	0,209	2,098	14	252	0,012	0,201	2,012	14	252	0,017
	Wilks-Lambda	0,856	1,443	14	250	0,134	0,799	2,119	14	250	0,011	0,808	2,007	14	250	0,018
	Hotelling-Spur	0,166	1,467	14	248	0,124	0,242	2,139	14	248	0,011	0,226	2,002	14	248	0,018
Zp	MM = 4															
	Wert	F	df	Fehler df	P	Wert	F	df	Fehler df	P						
	0,134	4,528	4	252	0,002	0,046	1,485	4	252	0,207						
TestNr	MM = 5															
	Wert	F	df	Fehler df	P	Wert	F	df	Fehler df	P						
	0,866	4,660	4	250	0,001	0,954	1,491	4	250	0,205						
Zp * TestNr	MM = 5															
	Wert	F	df	Fehler df	P	Wert	F	df	Fehler df	P						
	0,154	4,789	4	248	0,001	0,048	1,496	4	248	0,204						
Zp	Pillai-Spur	0,488	10,153	8	252	0,000	0,308	5,737	8	252	0,000					
	Wilks-Lambda	0,526	11,854	8	250	0,000	0,709	5,859	8	250	0,000					
	Hotelling-Spur	0,878	13,602	8	248	0,000	0,386	5,978	8	248	0,000					
Zp * TestNr	Pillai-Spur	0,236	2,410	14	252	0,004	0,080	0,750	14	252	0,723					
	Wilks-Lambda	0,774	2,440	14	250	0,003	0,921	0,748	14	250	0,724					
	Hotelling-Spur	0,279	2,469	14	248	0,003	0,084	0,747	14	248	0,726					

Zp Zeitpunkt der Auswertung nach 0, 8 oder 16 Bildern; MM Merkmal; P Signifikanzniveau

Untersuchte Merkmale 1 – 5: zwei Gruben unterschiedlicher Größe (1,2); drei Kratzspuren von unterschiedlicher Länge, lang (4), mittel (3) und kurz (5).

Anhang 10

Statistisches Testverfahren bei einer Bilderserie (Weichering Ind 5 (o9))

Test der Homogenität der Varianzen

	Kratzspuren			Gruben			
	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz	df1	df2	Signifikanz
Länge der Hauptachse (μm)	0,392	5	553	0,854	5	120	0,278
ln(Hauptachse)	0,867	5	553	0,503	5	120	0,974

ANOVA (Varianzanalyse für jede Variable)

	Kratzspuren					Gruben					
	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz	
Länge der Hauptachse (μm)	Zwischen den Gruppen	3826,0	5	765,2	0,645	0,665	916,4	5	183,3	1,506	0,193
	Innerhalb der Gruppen	656113,8	553	1186,5		14606,0	120	121,7			
	Gesamt	659939,8	558			15522,4	125				
ln(Hauptachse)	Zwischen den Gruppen	2,8	5	0,6	1,659	0,143	568,8	5	113,8	1,901	0,099
	Innerhalb der Gruppen	184,8	553	0,3		7179,8	120	59,8			
	Gesamt	187,6	558			7748,6	125				

Anhang 11

Lagemaße der Kratzspuren auf den Facetten von Ind 32 der Ofnet-Höhle

Oberkiefer			Facette o9		Facette o6		Facette o5		
			ln (Haupt- achse)	Länge der Hauptachse (μm)	ln (Haupt- achse)	Länge der Hauptachse (μm)	ln (Haupt- achse)	Länge der Hauptachse (μm)	
Philips XL 20	Bild a	N	89	89	45	45	65	65	
		Mittelwert	4,18	73,6	4,11	73,1	3,72	46,3	
		Perzentile	5	3,29	26,7	3,14	23,3	3,01	20,2
			10	3,40	29,8	3,38	29,5	3,20	24,6
			90	4,82	123,6	4,78	118,7	4,33	76,2
	95	5,08	161,0	5,05	158,3	4,47	87,6		
	Bild b	N	100	100	75	75	77	77	
		Mittelwert	3,97	61,7	4,23	80,3	3,79	49,9	
		Perzentile	5	3,04	20,9	3,19	24,3	3,07	21,5
			10	3,24	25,6	3,46	31,8	3,14	23,1
			90	4,74	114,6	4,86	128,6	4,49	89,2
	95	4,92	137,0	5,24	189,4	4,69	109,2		
	LEO 1430 VP	Bild a	N	234	234	135	135	175	175
			Mittelwert	3,62	44,1	3,67	46,2	4,13	76,1
Perzentile			5	2,81	16,5	2,77	16,0	3,06	21,3
			10	2,88	17,8	2,96	19,4	3,28	26,6
			90	4,42	82,7	4,48	88,3	4,98	145,0
95		4,61	100,8	4,66	105,5	5,18	177,6		
Bild b		N	224	224	118	118	140	140	
		Mittelwert	3,55	42,3	3,65	45,2	3,89	60,2	
		Perzentile	5	2,63	13,9	2,85	17,3	2,88	17,8
			10	2,82	16,8	2,91	18,4	3,07	21,5
			90	4,46	86,2	4,40	81,3	4,82	123,9
95		4,67	107,1	4,69	109,2	5,04	153,8		
Bild c		N	271	271					
		Mittelwert	3,72	48,1					
		Perzentile	5	2,83	17,0				
			10	3,00	20,1				
			90	4,45	85,6				
95		4,60	99,6						

Unterkiefer			Facette u9		Facette u6		Facette u5		
Philips XL 20	Bild a	N	107	107			119	119	
		Mittelwert	4,19	77,0			4,16	77,4	
		Perzentile	5	3,34	28,2			3,08	21,8
			10	3,44	31,2			3,35	28,6
			90	4,92	137,1			5,11	165,2
	95	5,19	179,7			5,24	188,6		
	Bild b	N	113	113	48	48	99	99	
		Mittelwert	4,20	78,7	4,20	83,7	4,28	84,4	
		Perzentile	5	3,31	27,4	3,16	23,7	3,13	22,8
			10	3,51	33,3	3,36	28,7	3,35	28,4
			90	4,95	141,9	5,12	167,6	4,97	144,4
	95	5,31	202,9	5,47	242,0	5,20	181,1		
	LEO 1430 VP	Bild a	N	135	135	122	122	207	207
			Mittelwert	3,91	58,4	3,71	48,5	3,74	51,6
Perzentile			5	2,92	18,5	2,73	15,3	2,72	15,3
			10	3,17	23,8	3,00	20,2	2,89	18,1
			90	4,60	99,8	4,46	86,6	4,55	94,7
95		4,91	135,5	4,63	102,7	4,80	121,8		
Bild b		N	89	89	112	112	245	245	
		Mittelwert	3,88	59,7	3,78	51,5	3,84	57,3	
		Perzentile	5	2,90	18,3	2,81	16,6	2,72	15,2
			10	3,06	21,4	2,97	19,4	2,97	19,4
			90	4,83	125,0	4,54	93,4	4,64	103,2
95		5,04	154,0	4,74	114,6	4,81	123,3		

N Anzahl der untersuchten Merkmale; ln natürlicher Logarithmus

Vergleich der Bilddateien von Original und Replikat

A Statistische Mittelwertparameter

Bildbewertung	REM	Bilddatei	Hauptachse (µm)	Nebenachse (µm)	Merkmal gesamt (N)	Grubendichte (N _G)	Grubenlänge (µm)	s +/-	Kratzspurdichte (N _k)	Kratzspurlänge (µm)	s +/-	Orientierung	Scratch R
oB	Philips	k3o51a	45,9	7,3	70	17	28,3	16,6	53,0	51,5	34,9	82,1	0,245
oB	Philips	ak3o51a	43,5	7,9	73	20	34,6	21,0	53,0	46,9	36,9	59,4	0,659
oB	Philips	k3o91a	47,2	4,3	80	18	21,5	13,1	62,0	54,7	33,2	135,6	0,228
leicht gedreht,													
kleine Blase	Philips	ak3o91a	47,1	6,6	51	15	27,6	18,4	36,0	55,2	29,8	106,4	0,45
oB	Philips	k4o61a	78,0	3,7	44	8	14,5	2,7	36,0	92,1	84,4	132,4	0,358
oB	Philips	ak4o61a	79,5	3,4	41	8	14,7	3,3	33,0	95,2	104,7	126,1	0,389
oB	Philips	k4o91a	73,4	15,4	30	16	42,4	26,6	14,0	108,8	86,6	43,6	0,838
oB	Philips	ak4o91a	73,3	13,7	28	14	38,4	24,0	14,0	108,3	86,0	40,7	0,834
oB	LEO1430VP	k7o61a	54,8	1,9	93	7	16,5	7,6	86,0	57,9	40,9	17,9	0,356
oB	LEO1430VP	ak7o61a	64,2	1,6	88	5	25,1	13,6	83,0	66,6	49,4	176,0	0,353

B Test auf Normalverteilung der Dimensionen der Einzelmerkmale

Datenfile	df	Hauptachse		Shapiro-Wilk		ln (Hauptachse)		Shapiro-Wilk		Längen/Breitenverhältnis			
		Kolmogorov-Smirnov(a)	Signifikanz	Statistik	Signifikanz	Kolmogorov-Smirnov(a)	Signifikanz	Statistik	Signifikanz	Kolmogorov-Smirnov(a)	Signifikanz		
k3/ak3 o51a	143	0,217	0,000	0,792	0,000	0,103	0,001	0,977	0,015	0,229	0,000	0,697	0,000
k3/ak3 o91a	131	0,117	0,000	0,890	0,000	0,063	0,200	0,985	0,151	0,160	0,000	0,875	0,000
k4/ak4 o61a	85	0,216	0,000	0,737	0,000	0,137	0,000	0,940	0,001	0,246	0,000	0,688	0,000
k4/ak4 o91a	58	0,249	0,000	0,757	0,000	0,087	0,200	0,962	0,070	0,271	0,000	0,656	0,000
k7/ak7 o61a	181	0,161	0,000	0,865	0,000	0,061	0,095	0,980	0,010	0,174	0,000	0,841	0,000

C Paarweiser statistischer Vergleich der Dimensionen der Einzelmerkmale

Hauptachse Ratio	Homogenität der Varianzen			Gleichheit der Mittelwerte (Welch-Test)			Homogenität der Varianzen			Gleichheit der Mittelwerte (Welch-Test)			
	Levene-Statistik	Signifikanz	Statistik(a)	Levene-Statistik	Signifikanz	Statistik(a)	Levene-Statistik	Signifikanz	Statistik(a)	Levene-Statistik	Signifikanz	Statistik(a)	
k3/ak3 o51a	0,013	0,911	0,175	0,676	k4/ak4 o91a	0,001	0,970	0,000	0,998	0,056	0,814	0,020	0,888
	0,035	0,852	0,346	0,557		0,012	0,914	0,000	1,000	0,012	0,914	0,000	1,000
	0,296	0,587	0,506	0,478		1,200	0,275	1,985	0,161	1,200	0,275	1,985	0,161
k3/ak3 o91a	0,406	0,525	0,001	0,974	k7/ak7 o61a	1,867	0,174	3,047	0,083	1,867	0,174	3,047	0,083
	0,324	0,570	0,112	0,739		0,681	0,410	1,288	0,258	0,681	0,410	1,288	0,258
	0,238	0,627	0,533	0,467									
k4/ak4 o61a	0,665	0,417	0,006	0,941									
	0,159	0,691	0,231	0,632									
	0,011	0,918	0,187	0,666									

Anmerkung: a asymptotisch F-verteilt

Anhang 13

Metrischer und statistischer Vergleich von ausgewählten Einzelmerkmalen auf Original und Replikat

Hauptachse (µm)		k4/ak4061a				k7/ak7091b				k3/ak3051a				ANOVA	
Merkmal		Original	Replikat	Gesamt	ANOVA Signifikanz	Original	Replikat	Gesamt	ANOVA Signifikanz	Original	Replikat	Gesamt	ANOVA Signifikanz		
1	Mittelwert	108,5	109,0	108,8	0,692	44,1	43,6	43,9	0,034	52,0	60,2	56,1	0,000		
	N	5	5	10		5	5	10		5	5	10			
	s +/-	0,8	2,7	1,9		0,6	0,4	0,5		1,1	1,7	4,5			
2	Mittelwert	244,0	260,7	252,4	0,003	39,0	35,5	37,3	0,067	44,3	44,8	44,5	0,548		
	N	5	5	10		5	5	10		5	5	10			
	s +/-	5,8	6,9	10,7		1,5	1,1	2,2		1,1	1,1	1,1			
3	Mittelwert	93,1	86,6	89,8	0,105	32,3	32,1	32,2	0,292	93,1	82,8	87,9	0,002		
	N	5	5	10		5	5	10		5	5	10			
	s +/-	7,5	2,5	6,3		1,4	1,0	1,2		4,4	2,2	6,3			
4	Mittelwert	344,0	282,1	313,1	0,000	37,4	38,2	37,8	0,004	83,1	91,3	87,2	0,004		
	N	5	5	10		5	5	10		5	5	10			
	s +/-	5,6	3,6	32,9		0,8	1,3	1,1		1,6	4,2	5,2			
5	Mittelwert	111,0	106,0	108,5	0,007	86,1	74,5	80,3	0,889	48,9	45,4	47,1	0,000		
	N	5	5	10		5	5	10		5	5	10			
	s +/-	1,9	2,4	3,4		2,2	1,7	6,4		0,9	1,0	2,1			
6	Mittelwert	30,2	34,0	32,1	0,069					77,6	72,9	75,3	0,000		
	N	5	5	10						5	5	10			
	s +/-	3,5	2,1	3,4						1,0	1,1	2,7			
7	Mittelwert	73,0	61,3	67,1	0,000										
	N	5	5	10											
	s +/-	1,7	1,8	6,4											
8	Mittelwert	212,5	211,0	211,7	0,287										
	N	5	5	10											
	s +/-	0,9	2,8	2,1											

Originaldaten der halbautomatischen Bildanalyse dentaler Microwear [Software Microware 3.0 (Ungar 1994)]

Die Abkürzungen der Spaltenüberschriften bedeuten:

FK	Fundkomplex
REM	LEO 1430 VP oder Philips XL 20 Series
Ind	Individuum (Codierung nach Fundkomplex und Grabnummer)
Fac	Facette (Codierung u6, u9, o6, o9, u5, o5)
Bild-File	Codierung (Fundkomplex, Grabnummer, Facette, Vergrößerung, Facettenregion)
N	Merkmalsdichte (gesamt)
NG	Merkmalsdichte der Gruben
GL	mittlere Länge der Gruben (µm)
GL (sd)	Standardabweichung der mittleren Grubenlänge (µm)
GB	mittlere Breite der Gruben (µm)
GB (sd)	Standardabweichung der mittleren Grubenbreite (µm)
NK	Merkmalsdichte der Kratzspuren
KL	mittlere Länge der Kratzspuren (µm)
KL (sd)	Standardabweichung der mittleren Kratzspurlänge (µm)
KB	mittlere Breite der Kratzspuren (µm)
KB (sd)	Standardabweichung der mittleren Kratzspurbreite (µm)
K Orient	mittlere Orientierung der Kratzspuren (0 - 180 °)
K Orient (sd)	Standardabweichung der mittleren Orientierung der Kratzspuren
R	Verteilung der Orientierung der Kratzspuren („mean striation vector length)
% G	relativer Anteil der Gruben an der Merkmalsdichte (gesamt)
% K	relativer Anteil der Gruben an der Merkmalsdichte (gesamt)

Datenliste Philips XL 20 Series

FK REM	Ind	Fac	Bild-File	N	NG	GL (µm)	GL (sd)	GB (µm)	GB (sd)	NK	KL (µm)	KL (sd)	KB (µm)	KB (sd)	K Orient (sd)	R	% G	% K	
A	Philips a141	u6	a141u61a	127	12	17,8	6,0	14,2	4,7	115	76,7	58,3	1,7	1,3	164,5	39,0	0,396	9,4	90,6
A	Philips a141	u6	a141u61b	148	24	22,8	13,2	15,2	8,4	124	54,6	52,1	2,0	2,4	9,3	33,7	0,500	16,2	83,8
A	Philips a141	u6	a141u61c	141	15	40,3	28,8	25,5	18,4	126	66,5	47,6	2,1	1,8	3,3	32,8	0,518	10,6	89,4
A	Philips a152	u6	a152u61b	96	55	33,0	10,6	23,4	7,4	41	43,1	17,9	2,2	2,0	162,9	45,1	0,289	57,3	42,7
A	Philips a152	u6	a152u61a	87	32	30,2	14,2	19,7	7,8	55	52,3	28,8	1,7	2,2	143,4	31,9	0,538	36,8	63,2
A	Philips a5	u6	a5u61b	117	13	25,3	9,9	16,2	6,2	104	61,2	53,2	2,3	1,9	10,9	32,3	0,529	11,1	88,9
A	Philips a5	u6	a5u61a	118	14	27,2	15,6	19,2	12,3	104	63,8	52,7	2,3	2,2	20,2	31,4	0,548	11,9	88,1
A	Philips a59	u6	a59u61a	107	3	30,5	9,7	19,9	2,0	104	71,1	48,9	1,4	1,4	7,5	40,0	0,377	2,8	97,2
A	Philips a59	u6	a59u61b	81	1	85,3		30,1		80	82,9	64,5	1,2	1,6	172,5	33,8	0,497	1,2	98,8
A	Philips a92	u6	a92u61b	130	3	27,4	22,0	14,5	9,4	127	61,1	39,9	1,5	2,4	19,4	42,4	0,334	2,3	97,7
A	Philips a92	u6	a92u61a	133	7	30,0	20,1	18,0	7,7	126	73,7	53,6	1,5	2,6	9,4	24,7	0,690	5,3	94,7
B	Philips b17	u6	b17u61b	112	44	25,3	12,2	16,9	9,4	68	58,8	42,8	2,4	2,0	12,5	33,8	0,497	39,3	60,7
B	Philips b17	u6	b17u61a	124	23	32,1	21,8	23,5	18,7	101	53,9	53,8	2,3	4,9	9,7	33,8	0,498	18,5	81,5
B	Philips b34	u6	b34u61c	59	30	30,0	15,0	23,2	12,1	29	44,6	16,6	2,6	2,7	10,2	44,5	0,299	50,8	49,2
B	Philips b34	u6	b34u61a	74	36	30,0	16,9	21,3	12,1	38	36,9	35,7	2,9	4,1	118,2	49,7	0,221	48,6	51,4
B	Philips b34	u6	b34u61b	42	20	38,4	26,2	25,0	13,3	22	38,7	22,7	2,7	3,3	99,4	38,9	0,397	47,6	52,4
B	Philips b42	u6	b42u6x1a	112	3	21,8	2,7	13,6	4,3	109	89,7	62,7	0,9	0,5	173,3	25,6	0,671	2,7	97,3
D	Philips d16a	u6	d16au61c	42	12	35,7	13,2	26,0	8,8	30	79,5	42,5	3,0	6,9	5,3	46,1	0,273	28,6	71,4
D	Philips d16a	u6	d16au61a	29	12	55,1	27,0	38,8	18,5	17	55,1	26,2	1,5	1,5	10,6	27,6	0,629	41,4	58,6
D	Philips d16a	u6	d16au61b	33	8	98,9	78,2	50,9	46,7	25	71,2	29,2	1,3	1,6	178,7	17,6	0,827	24,2	75,8
D	Philips d39	u6	d39u6x1c	39	3	38,0	7,1	28,3	3,3	36	143,0	127,5	1,3	1,3	17,2	21,4	0,755	7,7	92,3
D	Philips d39	u6	d39u6x1a	56	16	35,7	14,5	26,1	5,6	40	131,8	97,8	1,5	2,1	18,5	27,0	0,641	28,6	71,4
D	Philips d39	u6	d39u6x1b	46	4	56,6	21,6	26,3	10,3	42	115,9	106,6	1,5	1,6	19,3	29,0	0,598	8,7	91,3
C	Philips c17	u6	c17u61a	52	20	37,8	19,1	27,4	14,5	32	62,4	38,0	1,5	0,7	12,4	46,4	0,270	38,5	61,5
C	Philips c17	u6	c17u61b	51	12	36,9	21,4	25,8	15,9	39	67,7	52,0	2,4	2,2	6,4	35,2	0,470	23,5	76,5
C	Philips c3	u6	c3u61a	87	15	19,1	4,1	15,1	3,9	72	63,6	35,2	1,8	1,6	28,6	40,4	0,369	17,2	82,8
C	Philips c3	u6	c3u61b	51	13	34,8	10,1	27,8	10,2	38	76,8	51,5	2,2	1,7	18,0	52,9	0,181	25,5	74,5
O	Philips o11	u6	o11u61b	63	11	39,9	19,1	27,3	15,3	52	89,8	67,7	2,2	2,2	145,2	29,9	0,580	17,5	82,5
O	Philips o11	u6	o11u61c	82	5	29,5	19,2	16,2	5,6	77	89,8	71,4	1,9	1,4	139,2	41,4	0,351	6,1	93,9
O	Philips o15	u6	o15u61b	69	35	22,2	7,7	14,8	5,3	34	71,6	52,0	3,1	2,1	0,1	68,1	0,059	50,7	49,3
O	Philips o15	u6	o15u61a	107	41	22,2	9,6	15,9	6,6	66	55,6	33,0	3,1	3,1	36,3	26,2	0,657	38,3	61,7
O	Philips o3	u6	o3u61b	99	36	28,9	14,7	18,8	10,7	63	68,3	51,8	2,9	4,4	12,6	22,4	0,737	36,4	63,6

O	Philips o32	u6	o32u61b	73	25	28,5	20,4	17,9	9,1	48	83,7	62,8	1,0	1,1	93,1	53,9	0,170	34,2	65,8
O	Philips o4	u6	o4u61c	92	14	31,9	19,3	22,6	15,1	78	79,2	63,3	1,0	0,6	16,8	36,4	0,446	15,2	84,8
O	Philips o4	u6	o4u61d	78	10	40,3	20,1	28,6	18,8	68	74,7	55,3	1,2	1,2	17,8	28,4	0,611	12,8	87,2
O	Philips o4	u6	o4u61e	46	14	40,2	38,2	30,0	35,4	32	83,9	49,9	1,0	0,6	11,3	40,1	0,375	30,4	69,6
O	Philips o4	u6	o4u61f	97	14	24,3	7,6	14,8	5,2	83	85,1	63,2	1,3	2,0	16,3	43,5	0,315	14,4	85,6
O	Philips o4	u6	o4u61b	121	10	26,3	13,7	14,4	5,6	111	84,3	50,2	1,0	1,4	14,4	25,3	0,677	8,3	91,7
O	Philips o4	u6	o4u61a	100	1	26,7		16,2		99	91,5	77,3	1,0	1,2	13,1	25,6	0,670	1,0	99,0
A	Philips a136	u9	a136u91b	92	30	21,4	7,9	13,3	6,9	62	28,3	19,2	2,1	1,7	11,7	44,0	0,307	32,6	67,4
A	Philips a136	u9	a136u91a	133	19	20,2	12,0	13,3	10,2	114	38,4	28,7	2,1	1,6	140,8	42,8	0,327	14,3	85,7
A	Philips a141	u9	a141u91b	150	32	23,0	9,5	16,5	7,3	118	56,2	36,1	2,2	1,6	162,6	35,2	0,470	21,3	78,7
A	Philips a141	u9	a141u91a	136	23	24,1	18,3	18,3	12,6	113	69,1	53,9	2,2	2,5	169,5	30,7	0,562	16,9	83,1
A	Philips a152	u9	a152u91c	91	49	35,0	12,3	23,9	11,1	42	46,2	21,8	2,5	3,0	48,1	44,7	0,296	53,8	46,2
A	Philips a152	u9	a152u91b	78	55	31,9	17,1	23,9	13,9	23	47,5	20,1	2,2	3,2	55,1	33,0	0,514	70,5	29,5
A	Philips a5	u9	a5u91b	98	34	26,7	12,3	19,8	10,3	64	42,8	24,9	2,1	1,2	155,7	62,2	0,094	34,7	65,3
A	Philips a5	u9	a5u91a	96	10	36,3	18,6	31,5	16,5	86	49,0	42,1	2,4	2,8	24,5	48,8	0,234	10,4	89,6
A	Philips a59	u9	a59u91b	75	10	32,4	10,3	20,2	9,2	65	90,0	72,7	1,9	2,9	179,3	31,2	0,553	13,3	86,7
A	Philips a59	u9	a59u91a	80	4	39,5	16,0	22,7	9,1	76	80,7	48,7	1,9	2,3	3,5	25,2	0,679	5,0	95,0
A	Philips a92	u9	a92u91c	133	22	27,8	8,5	19,5	6,9	111	52,2	31,1	1,8	2,9	11,5	57,1	0,137	16,5	83,5
A	Philips a92	u9	a92u91b	148	3	20,1	12,3	13,4	8,5	145	68,7	63,3	1,5	1,8	162,0	52,5	0,186	2,0	98,0
B	Philips b17	u9	b17u91a	150	17	18,6	6,1	11,1	7,5	133	76,0	56,8	2,0	1,8	163,2	35,1	0,472	11,3	88,7
B	Philips b17	u9	b17u91b	121	12	19,5	6,3	14,7	3,6	109	63,5	42,4	1,8	1,5	0,6	26,6	0,650	9,9	90,1
B	Philips b17	u9	b17u91c	87	1	13,0		12,0		86	110,4	89,6	1,5	1,3	0,8	18,9	0,804	1,1	98,9
B	Philips b34	u9	b34u91a	92	16	28,4	14,5	21,3	10,7	76	63,2	45,3	1,5	1,7	150,2	18,2	0,816	17,4	82,6
B	Philips b42	u9	b42u9x1b	89	12	35,3	13,2	22,0	8,9	77	65,2	50,3	1,5	1,8	5,2	30,8	0,562	13,5	86,5
B	Philips b42	u9	b42u9x1a	103	10	39,5	19,0	19,9	8,5	93	62,6	44,5	1,3	1,9	161,4	44,0	0,306	9,7	90,3
D	Philips d16a	u9	d16au91b	73	17	30,2	15,3	21,9	9,0	56	63,8	42,3	1,5	1,8	154,0	35,3	0,469	23,3	76,7
D	Philips d16a	u9	d16au91a	82	9	39,6	20,8	23,0	12,0	73	75,4	58,6	1,5	1,8	161,6	40,0	0,377	11,0	89,0
D	Philips d39	u9	d39u9x1a	80	2	18,3	0,4	10,7	4,2	78	79,5	56,8	1,9	1,9	176,8	42,2	0,338	2,5	97,5
D	Philips d39	u9	d39u9x1b	54	8	33,0	10,4	23,3	9,3	46	94,3	60,6	2,0	2,7	168,3	46,9	0,261	14,8	85,2
D	Philips d39	u9	d39u9x1c	37	0					37	115,1	90,3	1,8	1,3	22,2	57,5	0,133	0,0	100,0
C	Philips c2	u9	c2u91b	60	8	30,4	15,4	19,3	8,1	52	88,8	56,3	2,8	3,9	44,8	27,9	0,621	13,3	86,7
C	Philips c2	u9	c2u91a	66	5	36,6	24,8	27,1	14,3	61	113,7	67,2	2,6	2,8	26,4	25,1	0,680	7,6	92,4
C	Philips c3	u9	c3u91b	60	17	24,8	9,1	18,4	8,9	43	60,3	36,8	2,0	1,0	0,7	36,4	0,445	28,3	71,7
C	Philips c3	u9	c3u91a	100	24	31,9	14,5	22,7	10,5	76	58,3	46,2	1,6	1,2	5,6	33,5	0,504	24,0	76,0

O	Philips	o11	u9	o11u91a	85	11	24,1	9,3	17,3	8,5	74	71,7	60,7	2,2	2,5	122,4	30,8	0,561	12,9	87,1
O	Philips	o11	u9	o11u91b	92	24	27,0	12,9	20,9	11,5	68	73,5	49,5	1,9	2,9	134,3	33,6	0,502	26,1	73,9
O	Philips	o11	u9	o11u91c	51	5	21,0	13,1	15,4	5,6	46	80,9	46,8	3,0	2,8	124,7	40,2	0,374	9,8	90,2
O	Philips	o15	u9	o15ur91a	69	4	23,0	10,2	15,5	7,1	65	142,2	90,0	2,6	2,6	59,0	55,3	0,155	5,8	94,2
O	Philips	o15	u9	o15ur91b	62	18	28,5	10,5	20,6	7,9	44	52,9	30,8	3,2	2,2	114,9	36,8	0,438	29,0	71,0
O	Philips	o15	u9	o15ur91c	93	19	28,3	12,4	19,8	8,4	74	81,5	59,5	3,8	2,1	94,9	48,0	0,245	20,4	79,6
O	Philips	o3	u9	o3u91a	115	30	15,4	5,6	12,2	5,3	85	93,4	62,0	2,1	2,1	137,5	25,4	0,675	26,1	73,9
O	Philips	o3	u9	o3u91b	145	59	14,7	7,0	10,9	5,8	86	55,8	50,3	2,5	2,8	138,5	21,3	0,759	40,7	59,3
O	Philips	o3	u9	o3u91d	110	32	23,1	9,3	15,2	8,4	78	86,8	60,0	2,0	1,7	134,4	28,5	0,608	29,1	70,9
O	Philips	o3	u9	o3u91c	99	30	18,7	10,8	10,2	4,5	69	100,3	86,1	2,8	3,3	132,4	26,8	0,645	30,3	69,7
O	Philips	o32	u9	o32u91a	122	15	29,4	10,5	19,2	7,7	107	77,0	43,8	1,1	1,6	136,0	29,4	0,589	12,3	87,7
O	Philips	o32	u9	o32u91b	132	19	23,9	12,8	15,2	4,2	113	78,7	51,5	1,7	2,7	127,5	25,2	0,678	14,4	85,6
O	Philips	o4	u9	o4u91c	138	32	27,0	12,2	16,0	7,8	106	57,4	36,4	1,1	1,2	159,1	47,5	0,252	23,2	76,8
O	Philips	o4	u9	o4u91b	83	7	38,3	15,8	24,2	12,4	76	90,2	66,9	1,5	2,8	2,4	35,2	0,469	8,4	91,6
A	Philips	a141	o6	a141o61a	170	6	16,5	6,2	12,5	7,0	164	62,3	46,2	1,6	1,5	6,2	35,4	0,466	3,5	96,5
A	Philips	a141	o6	a141o61b	149	7	18,7	6,5	11,9	5,9	142	63,0	56,3	1,6	1,8	2,4	36,5	0,444	4,7	95,3
A	Philips	a152	o6	a152o61b	103	32	25,8	10,8	20,6	9,0	71	47,1	30,2	2,4	2,3	160,8	41,4	0,351	31,1	68,9
A	Philips	a152	o6	a152o61c	121	43	23,5	7,6	18,7	6,6	78	42,4	28,7	2,5	1,8	163,9	40,3	0,372	35,5	64,5
A	Philips	a152	o6	a152o61a	93	29	32,0	17,0	22,9	10,5	64	38,2	19,9	1,9	2,2	1,5	44,1	0,306	31,2	68,8
A	Philips	a152	o6	a152o61d	97	33	30,0	18,0	18,7	10,9	64	45,3	30,7	2,1	1,4	148,3	42,3	0,335	34,0	66,0
A	Philips	a92	o6	a92o61b	94	21	28,5	7,8	19,6	6,6	73	64,3	58,0	1,1	1,2	2,5	37,1	0,432	22,3	77,7
A	Philips	a92	o6	a92o61a	97	17	23,9	5,4	17,7	6,5	80	70,9	44,8	2,9	4,7	175,9	31,1	0,555	17,5	82,5
A	Philips	a92	o6	a92o61c	96	11	35,4	10,7	25,6	8,1	85	85,7	52,5	1,6	1,6	157,4	27,5	0,630	11,5	88,5
B	Philips	b17	o6	b17o61a	93	41	30,5	17,0	20,5	12,1	52	73,0	52,8	2,4	3,3	16,5	40,2	0,374	44,1	55,9
B	Philips	b34	o6	b34o61c	90	25	27,4	10,5	20,4	7,9	65	74,6	64,4	2,6	2,7	22,7	29,4	0,589	27,8	72,2
B	Philips	b34	o6	b34o61b	97	31	30,2	12,2	22,1	9,5	66	42,2	23,8	2,3	2,1	178,6	49,5	0,224	32,0	68,0
B	Philips	b37	o6	b37o61a	138	0					138	67,9	54,1	1,6	3,1	125,3	42,1	0,339	0,0	100,0
B	Philips	b37	o6	b37o61b	100	0					100	105,7	73,6	0,9	0,5	146,0	38,4	0,408	0,0	100,0
B	Philips	b37	o6	b37o61c	54	0					54	124,1	90,4	0,9	0,5	159,0	38,1	0,413	0,0	100,0
B	Philips	b51	o6	b51o61a	90	31	29,4	13,9	23,1	11,3	59	41,5	24,6	1,4	1,5	24,1	28,7	0,606	34,4	65,6
D	Philips	d39	o6	d39o61b	52	2	19,4	0,0	11,5	6,1	50	84,7	53,5	1,1	0,8	8,8	22,5	0,735	3,8	96,2
D	Philips	d39	o6	d39o61a	57	16	35,7	13,3	26,9	9,8	41	87,8	60,5	1,5	1,1	28,5	34,4	0,485	28,1	71,9
C	Philips	c2	o6	c2o61a	70	16	17,0	8,4	8,7	3,5	54	62,3	79,4	2,0	2,6	40,9	37,7	0,420	22,9	77,1
C	Philips	c2	o6	c2o61b	179	20	17,9	9,0	10,9	6,5	159	46,2	33,8	1,9	1,6	54,5	40,2	0,372	11,2	88,8

O	Philips o11	o6	o11o61a	62	2	14,1	1,5	10,5	3,6	60	98,9	72,7	1,4	0,8	20,4	20,8	0,768	3,2	96,8
O	Philips o11	o6	o11o61b	95	2	26,9	19,7	16,2	11,6	93	104,7	75,1	1,4	0,9	6,1	31,6	0,544	2,1	97,9
O	Philips o18	o6	o18o61b	128	22	23,6	8,7	15,4	7,9	106	69,1	39,2	1,5	1,9	153,8	32,8	0,518	17,2	82,8
O	Philips o18	o6	o18o61a	130	19	24,8	10,0	17,4	6,1	111	66,3	39,8	1,1	1,0	153,4	33,1	0,512	14,6	85,4
O	Philips o18	o6	o18o61c	141	10	23,4	17,2	13,3	10,6	131	70,0	52,5	1,0	1,3	145,7	31,4	0,548	7,1	92,9
O	Philips o21	o6	o21o61a	64	17	22,9	13,1	16,1	8,3	47	100,8	67,9	3,1	2,9	174,9	28,2	0,615	26,6	73,4
O	Philips o21	o6	o21o61b	104	20	32,3	20,6	20,8	10,1	84	83,8	55,7	2,1	1,2	167,5	56,5	0,142	19,2	80,8
O	Philips o3	o6	o3o61b	87	20	20,9	8,3	14,8	7,0	67	78,9	81,8	2,4	1,2	64,2	54,6	0,163	23,0	77,0
O	Philips o3	o6	o3o61a	71	13	38,8	19,9	26,8	16,8	58	87,5	81,2	2,7	2,1	101,8	55,9	0,148	18,3	81,7
O	Philips o32	o6	o32o61a	59	14	27,5	10,8	13,7	6,4	45	73,1	56,8	2,2	3,6	160,3	64,8	0,077	23,7	76,3
O	Philips o32	o6	o32o61b	81	6	32,3	17,2	26,3	14,2	75	80,3	45,8	1,0	1,3	137,8	29,6	0,586	7,4	92,6
O	Philips o4	o6	o4o61b	150	2	15,6	2,7	12,9	1,0	148	93,1	70,4	1,1	1,0	129,3	42,9	0,325	1,3	98,7
O	Philips o4	o6	o4o61a	114	4	27,3	10,7	15,5	13,2	110	86,8	66,8	1,0	0,9	140,9	38,6	0,403	3,5	96,5
O	Philips o8	o6	o8o61b	85	47	23,6	9,1	17,4	8,9	38	59,7	42,5	1,9	1,7	151,5	38,9	0,398	55,3	44,7
O	Philips o8	o6	o8o61a	60	24	46,9	36,0	33,7	27,0	36	71,1	35,0	1,1	1,2	92,0	38,1	0,412	40,0	60,0
A	Philips a136	o9	o136o91b	75	16	28,3	10,9	19,4	11,6	59	37,8	15,9	2,0	1,9	151,2	48,4	0,240	21,3	78,7
A	Philips a136	o9	a136o91c	105	13	23,1	12,0	16,1	8,4	92	48,2	43,5	2,7	3,1	45,6	55,2	0,155	12,4	87,6
A	Philips a136	o9	a136o91a	97	11	46,9	28,4	31,4	24,8	86	46,3	29,2	2,0	2,9	98,3	59,1	0,119	11,3	88,7
A	Philips a141	o9	a141o91c	202	23	18,5	11,1	11,3	7,7	179	57,8	41,3	1,4	1,0	83,3	32,6	0,522	11,4	88,6
A	Philips a152	o9	a152o91a	138	37	24,1	15,0	18,0	8,3	101	43,4	21,8	2,1	1,4	24,5	35,9	0,455	26,8	73,2
A	Philips a5	o9	a5o91c	59	13	25,5	11,7	19,8	11,4	46	64,6	49,3	2,3	2,5	7,2	34,5	0,484	22,0	78,0
A	Philips a5	o9	a5o91b	50	31	35,0	15,6	28,0	13,6	19	54,4	25,2	3,0	2,2	7,1	36,1	0,452	62,0	38,0
A	Philips a92	o9	a92o91b	125	16	35,3	22,8	21,6	13,6	109	52,1	34,1	1,2	1,0	172,9	35,8	0,458	12,8	87,2
B	Philips b17	o9	b17o91a	112	26	29,0	12,2	22,5	9,3	86	49,1	33,7	2,5	3,2	76,0	52,1	0,191	23,2	76,8
B	Philips b17	o9	b17o91b	117	30	22,6	15,6	17,4	15,5	87	60,1	50,8	2,0	1,7	48,7	62,1	0,095	25,6	74,4
B	Philips b34	o9	b34o91b	91	21	28,8	9,1	19,3	8,2	70	83,9	65,5	1,8	1,9	116,0	50,9	0,205	23,1	76,9
B	Philips b34	o9	b34o91a	114	15	27,0	12,3	21,3	9,6	99	75,9	58,7	1,5	1,6	30,1	57,5	0,133	13,2	86,8
B	Philips b37	o9	b37o91a	45	3	21,8	4,0	15,8	9,4	42	101,7	59,2	1,5	1,8	166,7	33,1	0,513	6,7	93,3
B	Philips b42	o9	b42o91a	76	21	42,2	22,3	27,0	14,4	55	53,4	33,8	1,5	3,3	155,4	42,3	0,336	27,6	72,4
B	Philips b51	o9	b51o91b	78	29	23,6	14,0	18,3	10,8	49	89,5	69,7	1,6	2,2	50,2	40,1	0,375	37,2	62,8
D	Philips d39	o9	d39o91a	78	2	20,9	10,2	11,9	2,6	76	98,4	81,1	1,2	1,3	152,0	28,2	0,615	2,6	97,4
D	Philips d39	o9	d39o91b	55	5	29,6	16,2	23,1	15,4	50	114,1	92,3	1,0	0,4	144,1	37,8	0,419	9,1	90,9
C	Philips cd	o9	cdo91b	72	20	31,1	12,0	21,6	11,2	52	58,7	36,3	2,2	2,9	17,5	40,7	0,365	27,8	72,2
C	Philips cd	o9	cdo91a	101	26	31,9	13,1	20,4	7,9	75	49,8	35,1	2,3	3,2	8,4	35,9	0,456	25,7	74,3
O	Philips o11	o9	o11o91b	116	11	21,9	10,5	18,0	8,1	105	69,5	64,5	1,7	1,7	41,2	37,3	0,427	9,5	90,5

O	Philips o11	o9	o11o91c	103	4	24,7	15,5	18,3	9,7	99	102,6	78,9	1,6	1,6	35,1	34,9	0,476	3,9	96,1
O	Philips o11	o9	o11o91a	116	17	30,3	19,8	16,4	6,8	99	72,6	56,4	1,3	1,2	46,9	33,8	0,498	14,7	85,3
O	Philips o18	o9	o18o91c	123	12	24,3	5,4	17,4	5,2	111	59,3	37,2	1,0	1,1	36,6	24,6	0,691	9,8	90,2
O	Philips o18	o9	o18o91b	157	20	23,1	7,8	14,3	5,1	137	50,1	25,1	1,0	1,3	37,4	24,5	0,693	12,7	87,3
O	Philips o18	o9	o18o91a	139	15	34,0	13,0	17,5	11,0	124	54,5	31,0	1,2	2,2	39,6	38,3	0,408	10,8	89,2
O	Philips o21	o9	o21o91c	90	28	25,0	15,0	16,7	9,1	62	67,0	57,1	2,6	2,0	43,5	52,2	0,190	31,1	68,9
O	Philips o21	o9	o21o91a	104	9	56,5	42,5	29,6	12,4	95	61,7	49,4	3,1	5,1	51,7	40,4	0,369	8,7	91,3
O	Philips o3	o9	o3o91b	126	11	18,9	6,8	13,3	4,9	115	78,9	61,7	2,0	1,5	167,4	47,7	0,250	8,7	91,3
O	Philips o3	o9	o3o91e	76	13	36,1	11,5	25,1	13,0	63	89,0	92,8	3,2	4,7	29,6	20,4	0,776	17,1	82,9
O	Philips o3	o9	o3o91c	116	33	24,7	15,7	15,9	8,1	83	84,2	88,5	2,7	2,4	26,6	30,5	0,567	28,4	71,6
O	Philips o3	o9	o3o91a	94	7	35,0	19,2	17,2	7,2	87	102,5	77,6	2,4	3,0	8,1	43,1	0,322	7,4	92,6
O	Philips o32	o9	o32o91a	104	15	31,4	13,4	19,5	10,0	89	73,6	37,8	1,2	1,8	22,7	16,3	0,851	14,4	85,6
O	Philips o32	o9	o32o91b	124	24	27,9	16,7	15,4	5,0	100	61,7	36,0	1,3	2,1	21,5	15,6	0,861	19,4	80,6
O	Philips o4	o9	o4o91b	100	11	30,1	15,2	17,1	6,3	89	70,1	46,3	1,3	1,7	34,5	38,1	0,413	11,0	89,0
O	Philips o4	o9	o4o91a	104	24	25,2	12,3	17,6	7,5	80	64,9	46,9	1,0	0,6	32,8	34,4	0,486	23,1	76,9
O	Philips o8	o9	o8o91a	121	14	30,7	12,9	20,1	7,3	107	65,4	41,7	1,2	1,7	54,9	30,4	0,569	11,6	88,4
O	Philips o8	o9	o8o91b	127	35	21,9	7,4	16,3	6,1	92	53,7	32,7	1,2	1,3	60,3	34,0	0,494	27,6	72,4
A	Philips a136	u5	a136u51b	71	18	39,4	18,0	25,8	15,9	53	50,1	31,9	2,4	3,4	104,8	59,4	0,116	25,4	74,6
A	Philips a136	u5	a136u51a	102	16	31,7	18,5	20,1	15,7	86	40,6	35,0	1,9	1,4	127,7	44,1	0,305	15,7	84,3
A	Philips a136	u5	a136u51c	86	35	33,4	22,7	20,1	9,6	51	41,3	20,0	3,3	3,1	47,3	55,9	0,148	40,7	59,3
A	Philips a141	u5	a141u51b	94	25	25,6	12,6	17,6	7,0	69	72,7	61,9	1,9	1,3	169,1	41,1	0,357	26,6	73,4
A	Philips a152	u5	a152u51b	79	33	35,1	13,1	24,1	10,1	46	43,6	24,6	2,5	5,4	75,6	60,0	0,111	41,8	58,2
A	Philips a152	u5	a152u51a	113	31	31,6	14,6	19,1	9,2	82	46,1	29,8	1,8	2,3	12,4	57,9	0,129	27,4	72,6
A	Philips a152	u5	a152u51c	90	29	32,5	18,2	21,3	10,1	61	58,2	33,7	2,4	4,1	129,1	38,5	0,405	32,2	67,8
A	Philips a5	u5	a5u51b	86	15	22,3	6,8	16,1	6,1	71	82,5	72,9	1,8	1,2	27,8	38,1	0,412	17,4	82,6
A	Philips a5	u5	a5u51a	104	17	21,9	15,7	13,9	8,5	87	73,4	46,8	2,3	3,1	17,6	33,5	0,504	16,3	83,7
A	Philips a59	u5	a59u51b	96	2	21,9	8,7	10,4	2,5	94	93,5	77,7	1,3	1,7	174,7	28,0	0,619	2,1	97,9
A	Philips a59	u5	a59u51c	97	11	29,8	10,0	17,8	5,9	86	66,0	37,6	1,9	2,8	4,2	23,2	0,720	11,3	88,7
A	Philips a92	u5	a92u51b	185	8	22,0	6,8	13,2	5,0	177	63,2	40,3	1,3	1,2	12,4	41,6	0,347	4,3	95,7
A	Philips a92	u5	a92u51a	139	6	23,8	7,8	14,9	8,0	133	75,2	51,8	1,3	1,6	174,9	46,5	0,268	4,3	95,7
B	Philips b17	u5	b17u51a	125	26	17,9	8,2	11,8	5,3	99	70,6	67,7	1,8	1,4	7,8	40,8	0,362	20,8	79,2
B	Philips b17	u5	b17u51b	102	19	18,3	8,9	11,7	5,3	83	64,1	69,1	2,0	1,5	14,7	44,3	0,301	18,6	81,4
B	Philips b34	u5	b34u51b	88	8	21,1	4,4	15,6	5,9	80	74,0	66,1	1,3	1,2	164,3	26,7	0,646	9,1	90,9
B	Philips b34	u5	b34u51c	95	1	19,0		17,0		94	99,1	79,6	1,3	1,3	5,3	30,5	0,567	1,1	98,9
B	Philips b42	u5	b42u51a	111	16	25,7	7,2	16,8	4,7	95	61,3	37,0	1,1	1,0	1,7	23,9	0,706	14,4	85,6

D	Philips d16a	u5	d16au51b	73	1	47,0	36,0	72	100,2	87,1	1,1	0,7	13,7	32,1	0,533	1,4	98,6
D	Philips d39	u5	d39u5x1a	73	0			73	130,6	112,5	1,0	0,5	11,5	18,0	0,821	0,0	100,0
D	Philips d9	u5	d9u51a	84	0			84	71,1	69,0	2,2	2,6	5,7	30,2	0,572	0,0	100,0
C	Philips c17	u5	c17u51c	78	10	20,6	16,4	13,9	7,1	77,2	2,1	3,0	9,8	38,8	0,399	12,8	87,2
O	Philips o11	u5	o11u51b	92	8	15,9	2,6	10,8	4,3	84,0	1,7	1,5	0,5	30,9	0,558	8,7	91,3
O	Philips o11	u5	o11u51a	86	7	19,4	6,8	11,0	2,5	60,7	2,1	2,5	177,8	35,0	0,474	8,1	91,9
O	Philips o15	u5	o15u51c	74	16	21,8	4,8	14,2	6,7	57,6	3,0	2,0	11,1	39,2	0,391	21,6	78,4
O	Philips o15	u5	o15u51b	83	20	25,7	12,1	13,7	5,3	77,1	2,3	1,4	178,6	57,4	0,133	24,1	75,9
O	Philips o15	u5	o15u51a	81	30	30,9	29,2	20,6	17,4	64,2	3,2	3,1	173,7	37,8	0,418	37,0	63,0
O	Philips o21	u5	o21u51b	102	15	14,9	5,2	8,8	4,4	65,0	2,5	1,8	67,8	25,8	0,667	14,7	85,3
O	Philips o21	u5	o21u51a	123	24	16,1	9,5	9,9	4,8	55,9	4,3	1,5	66,7	30,9	0,559	19,5	80,5
O	Philips o3	u5	o3u51b	67	14	19,3	7,6	10,9	5,0	93,0	2,2	1,8	5,6	32,2	0,531	20,9	79,1
O	Philips o3	u5	o3u51a	104	26	25,4	20,3	13,3	8,9	46,1	1,9	2,3	8,0	21,9	0,747	25,0	75,0
O	Philips o32	u5	o32u51b	112	13	21,4	7,6	13,3	3,8	47,8	1,1	1,7	10,8	26,3	0,655	11,6	88,4
O	Philips o32	u5	o32u51a	132	12	20,5	10,5	15,1	9,4	50,3	1,2	1,5	13,6	32,1	0,533	9,1	90,9
O	Philips o4	u5	o4u51a	63	7	28,3	6,4	20,2	2,4	89,4	1,1	1,7	14,3	28,6	0,606	11,1	88,9
O	Philips o4	u5	o4u51b	120	3	24,6	7,5	9,0	2,2	64,8	1,0	1,1	18,3	32,4	0,527	2,5	97,5
A	Philips a136	o5	a136o51c	130	9	19,0	10,2	14,0	6,6	43,9	1,8	1,5	151,6	48,1	0,243	6,9	93,1
A	Philips a136	o5	a136o51a	162	11	24,0	17,8	15,3	16,7	23,6	1,9	1,5	151,9	56,2	0,146	6,8	93,2
A	Philips a136	o5	a136o51b	126	8	35,0	34,1	18,6	6,9	31,0	1,9	1,4	170,3	51,4	0,200	6,3	93,7
A	Philips a141	o5	a141o51a	145	6	14,7	3,0	9,7	4,7	46,4	1,4	0,8	18,8	40,0	0,376	4,1	95,9
A	Philips a141	o5	a141o51c	153	15	14,3	7,7	10,2	7,4	54,4	1,4	0,8	0,3	38,0	0,415	9,8	90,2
A	Philips a152	o5	a152o51b	114	5	18,7	1,9	15,9	2,8	50,5	1,4	0,9	174,8	28,8	0,602	4,4	95,6
A	Philips a152	o5	a152o51a	89	0					69,0	1,4	1,3	178,1	28,7	0,604	0,0	100,0
A	Philips a5	o5	a5o51a	45	12	20,5	8,2	14,9	6,7	67,7	3,6	3,2	5,4	28,0	0,620	26,7	73,3
A	Philips a5	o5	a5o51c	47	10	42,6	23,1	23,0	10,6	54,5	3,2	2,2	8,7	33,2	0,511	21,3	78,7
A	Philips a5	o5	a5o51b	44	8	41,0	23,9	20,0	10,3	80,5	3,0	3,6	2,6	18,7	0,808	18,2	81,8
A	Philips a59	o5	a59o51a	114	1	48,4		45,0		63,2	2,0	3,5	4,0	39,0	0,396	0,9	99,1
A	Philips a92	o5	a92o51a	79	14	38,1	16,5	27,3	14,3	41,4	1,4	1,0	163,0	31,3	0,549	17,7	82,3
A	Philips a92	o5	a92o51b	90	19	27,6	8,4	18,8	6,2	56,3	1,3	1,6	174,9	34,5	0,485	21,1	78,9
B	Philips b17	o5	b17o51a	116	15	27,1	18,9	18,2	13,1	48,3	2,0	2,2	3,0	34,1	0,492	12,9	87,1
B	Philips b17	o5	b17o51b	100	18	28,1	20,9	16,2	8,9	37,3	1,4	1,0	176,4	35,0	0,474	18,0	82,0
B	Philips b34	o5	b34o51a	69	6	56,1	40,0	30,7	24,2	100,6	1,6	1,1	169,2	27,1	0,639	8,7	91,3
B	Philips b37	o5	b37o51a	68	0					77,9	1,5	2,8	162,8	40,8	0,361	0,0	100,0
B	Philips b37	o5	b37o51b	57	0					97,2	1,5	1,8	102,8	42,1	0,340	0,0	100,0

B	Philips b51	o5	b51o51a	50	0	18,3	6,6	15,1	5,1	82	129,4	103,2	1,4	1,8	15,4	20,7	0,771	0,0	100,0
B	Philips b51	o5	b51o51b	46	0					46	111,9	88,1	1,0	0,6	10,6	23,6	0,713	0,0	100,0
D	Philips d35	o5	d35o51a	84	2	21,5	8,8	12,7	6,3	48	70,2	67,4	2,1	1,5	9,7	23,7	0,711	43,5	56,5
D	Philips d35	o5	d35o51b	85	10	19,9	8,9	11,7	2,4	75	89,3	57,1	2,3	2,5	12,7	35,1	0,472	8,5	91,5
D	Philips d35	o5	d35o51a	84	1	26,8	14,5	16,1	6,9	71	70,3	53,3	3,0	3,6	175,4	59,4	0,116	14,5	85,5
D	Philips d39	o5	d39o51b	60	5	22,9	9,7	16,1	6,6	90	83,7	71,5	1,9	2,1	24,1	25,1	0,682	6,3	93,8
C	Philips c2	o5	c2o51c	85	37	26,8	12,9	16,5	5,3	100	88,7	62,6	1,8	1,4	21,4	27,6	0,628	3,8	96,2
C	Philips c2	o5	c2o51b	82	7	22,4	10,1	16,0	9,0	87	73,4	50,4	0,9	0,6	149,6	24,8	0,687	13,9	86,1
C	Philips c2	o5	c2o51a	83	12	25,1	15,6	15,6	8,9	91	60,6	38,0	1,5	2,4	155,4	24,0	0,703	32,1	67,9
O	Philips o11	o5	o11o51a	96	6	23,8	12,8	12,5	4,6	127	79,2	61,7	1,8	1,3	178,7	29,6	0,585	8,6	91,4
O	Philips o11	o5	o11o51b	104	4	50,5	35,7	25,6	11,5	69	90,1	56,8	2,2	0,9	168,3	30,2	0,573	8,0	92,0
O	Philips o18	o5	o18o51a	101	14	20,3	5,9	13,9	4,8	91	91,2	64,9	1,9	1,1	176,0	23,1	0,722	4,2	95,8
O	Philips o18	o5	o18o51b	134	43	18,7	7,2	12,0	3,9	93	102,3	101,6	2,5	1,9	175,5	26,1	0,660	19,1	80,9
O	Philips o21	o5	o21o51b	139	12	24,8	9,7	17,1	7,8	77	49,9	27,2	1,5	1,9	6,5	25,4	0,674	26,7	73,3
O	Philips o21	o5	o21o51a	75	6	26,5	11,3	17,0	7,1	65	46,3	24,7	1,3	1,7	3,2	30,4	0,569	35,6	64,4
O	Philips o3	o5	o3o51b	95	4	21,2	7,6	14,7	6,2	103	87,4	60,0	1,0	1,0	159,8	46,0	0,275	19,5	80,5
O	Philips o3	o5	o3o51a	115	22	23,9	10,0	14,5	5,5	132	74,8	57,6	1,2	1,6	147,6	36,3	0,448	10,8	89,2
O	Philips o32	o5	o32o51b	105	28	39,4	31,6	22,3	20,1	84	67,4	31,5	1,8	3,0	177,2	30,3	0,570	11,6	88,4
O	Philips o32	o5	o32o51a	101	36	77,0	32,1	32,3	9,4	139	69,3	44,5	0,9	1,2	168,7	27,5	0,630	4,1	95,9
O	Philips o4	o5	o4o51a	128	25														
O	Philips o4	o5	o4o51b	148	16														
O	Philips o8	o5	o8o51b	95	11														
O	Philips o8	o5	o8o51a	145	6														

Datenliste LEO 1430 VP

FK	REM	Ind	Fac	Bild-File	N	NG	GL (µm)	GL (sd)	GB (µm)	GB (sd)	NK	KL (µm)	KL (sd)	KB (µm)	KB (sd)	K Orient (sd)	R	% G	% K
A	LEO	a115	u6	a115u61b	87	25	34,5	15,1	22,2	12,5	62	48,3	25,4	1,6	2,8	38,3	0,244	28,7	71,3
A	LEO	a115	u6	a115u61a	75	23	38,1	21,4	26,7	16,9	52	39,2	22,9	1,8	3,7	59,9	0,475	30,7	69,3
A	LEO	a163	u6	a163u61b	196	41	22,2	8,5	13,9	6,7	155	30,9	16,7	1,5	1,6	156,8	0,188	20,9	79,1
A	LEO	a163	u6	a163u61a	210	47	26,5	10,1	16,1	5,6	163	33,1	18,0	1,3	1,2	2,3	0,447	22,4	77,6
A	LEO	a35	u6	a35u61c	301	25	26,6	9,9	14,4	8,0	276	37,4	27,8	1,5	1,3	14,3	0,451	8,3	91,7
A	LEO	a35	u6	a35u61a	234	41	31,1	16,8	20,8	11,6	193	28,1	16,1	1,3	1,1	176,8	0,253	17,5	82,5
A	LEO	a35	u6	a35u61b	185	58	32,6	17,2	20,3	12,0	127	26,2	11,1	2,0	1,7	11,7	0,483	31,4	68,6
B	LEO	b13	u6	b13u61b	142	4	40,0	15,9	30,4	12,2	138	48,3	29,7	1,3	0,7	140,7	0,546	2,8	97,2
B	LEO	b13	u6	b13u61aa	190	2	20,3	18,8	9,4	10,5	188	43,8	40,2	1,4	1,3	143,2	0,489	1,1	98,9
B	LEO	b13	u6	b13u61c	137	5	38,9	28,4	35,6	29,6	132	40,0	24,4	1,3	1,0	123,1	0,224	3,6	96,4
B	LEO	b51	u6	b51u61b	184	47	29,4	11,6	21,8	8,8	137	32,3	18,4	1,3	1,2	28,8	0,136	25,5	74,5
B	LEO	b51	u6	b51u61a	295	31	22,4	12,1	16,8	10,6	264	31,0	20,7	1,0	0,7	27,4	0,379	10,5	89,5
B	LEO	b62	u6	b62u61a	277	5	23,4	7,1	15,7	7,0	272	41,9	28,0	0,9	0,7	1,9	0,325	1,8	98,2
B	LEO	b62	u6	b62u61b	218	4	24,9	12,4	12,0	4,4	214	50,2	40,5	1,0	0,9	4,7	0,483	1,8	98,2
B	LEO	b7	u6	b7u61a	215	8	22,6	12,6	11,9	3,1	207	43,5	31,3	1,1	1,6	5,1	0,284	3,7	96,3
B	LEO	b7	u6	b7u61b	199	10	32,4	18,5	21,7	20,5	189	38,2	25,7	1,4	1,1	176,5	0,373	5,0	95,0
B	LEO	b73	u6	b73u61a	197	34	19,4	9,1	13,6	6,4	163	35,6	26,2	1,2	0,9	2,9	0,399	17,3	82,7
B	LEO	b73	u6	b73u61c	167	32	32,0	16,6	21,7	13,6	135	37,1	29,1	1,4	1,7	158,9	0,633	19,2	80,8
B	LEO	b73	u6	b73u61b	112	19	32,8	19,3	23,5	16,3	93	50,8	44,2	1,2	0,9	163,8	0,675	17,0	83,0
D	LEO	d35	u6	d35u61a	67	4	47,2	16,0	20,9	8,3	63	87,4	67,8	1,5	2,1	5,4	0,363	6,0	94,0
D	LEO	d35	u6	d35u61b	86	10	50,0	29,1	28,6	12,5	76	72,4	47,2	2,2	3,7	11,3	0,255	11,6	88,4
D	LEO	d36	u6	d36u61a	90	3	20,3	4,0	6,8	0,9	87	53,2	57,9	1,2	1,5	2,2	0,612	3,3	96,7
D	LEO	d36	u6	d36u61b	72	2	20,6	6,2	19,3	5,9	70	68,4	44,2	0,9	0,7	16,1	0,53	2,8	97,2
D	LEO	d36	u6	d36u61c	125	4	22,1	3,8	13,4	3,0	121	88,7	66,9	1,1	0,8	178,4	0,721	3,2	96,8
C	LEO	c10	u6	c10u61c	97	28	28,0	15,6	19,0	9,2	69	40,3	28,2	1,0	0,9	8,1	0,282	28,9	71,1
C	LEO	c10	u6	c10ur61b	206	11	21,2	6,4	9,1	2,7	195	48,8	41,1	1,3	1,5	30,1	0,378	5,3	94,7
C	LEO	c10	u6	c10ur61c	179	16	23,6	12,1	12,3	8,6	163	51,6	47,1	1,4	1,5	35,7	0,334	8,9	91,1
C	LEO	c10	u6	c10ur61a	148	5	31,2	17,6	12,7	3,5	143	59,9	35,2	1,4	1,1	8,5	0,556	3,4	96,6
C	LEO	c5	u6	c5u61a	127	27	23,6	8,0	15,8	5,8	100	45,7	34,3	1,8	1,9	12,8	0,295	21,3	78,7
C	LEO	c5	u6	c5u61c	133	37	19,9	8,0	12,9	5,1	96	40,2	23,8	1,7	1,6	11,1	0,194	27,8	72,2
C	LEO	c5	u6	c5u61b	93	18	23,7	8,0	14,7	6,3	75	57,0	56,1	1,6	2,1	32,4	0,232	19,4	80,6

C	LEO	cd	u6	cdu61a	107	9	27,0	10,2	15,0	3,1	98	53,6	38,8	1,5	1,9	161,3	48,3	0,241	8,4	91,6
C	LEO	cd	u6	cdu61b	86	12	29,2	14,2	18,9	8,0	74	56,5	44,8	1,2	1,1	172,6	67,0	0,065	14,0	86,0
O	LEO	o13	u6	o13u61b	150	52	27,3	11,2	18,0	6,6	98	46,9	29,2	1,7	2,2	3,2	20,9	0,766	34,7	65,3
O	LEO	o13	u6	o13u61a	160	35	30,8	15,9	18,8	7,3	125	57,4	31,3	1,7	1,6	6,0	26,4	0,654	21,9	78,1
O	LEO	o14	u6	o14u61a	92	40	23,7	12,8	14,3	6,5	52	36,5	16,4	1,4	1,1	47,4	34,2	0,49	43,5	56,5
O	LEO	o14	u6	o14u61b	124	50	28,4	14,2	17,6	8,0	74	31,2	14,2	1,3	1,0	49,6	29,4	0,59	40,3	59,7
O	LEO	o14	u6	o14u61c	143	58	30,1	14,4	17,1	7,3	85	33,9	16,6	1,5	1,2	33,1	30,9	0,558	40,6	59,4
O	LEO	o15	u6	o15u61a	44	14	26,0	10,3	15,0	5,9	30	67,2	50,1	3,5	4,0	11,2	17,5	0,83	31,8	68,2
O	LEO	o15	u6	o15u61c	57	19	29,2	10,7	18,2	6,7	38	67,7	39,4	2,1	1,9	176,1	29,9	0,579	33,3	66,7
O	LEO	o15	u6	o15u61b	49	13	46,9	17,9	28,9	11,9	36	90,8	82,9	2,5	2,8	10,1	22,9	0,727	26,5	73,5
O	LEO	o18	u6	o18u61b	81	12	32,6	15,6	22,9	9,8	69	59,4	32,0	1,4	2,0	19,7	29,4	0,589	14,8	85,2
O	LEO	o18	u6	o18u61a	166	33	28,8	15,9	18,0	6,8	133	52,0	29,8	0,9	0,9	13,8	32,0	0,535	19,9	80,1
O	LEO	o21	u6	o21u61a	176	72	27,3	9,1	18,0	8,1	104	40,3	24,0	1,5	1,7	19,6	23,7	0,71	40,9	59,1
O	LEO	o21	u6	o21u61d	194	26	22,9	9,2	14,2	5,2	168	55,2	31,0	0,9	1,0	20,4	20,1	0,781	13,4	86,6
O	LEO	o21	u6	o21u61b	210	59	27,6	12,6	16,0	5,6	151	37,7	20,5	1,1	1,0	20,8	28,4	0,61	28,1	71,9
O	LEO	o32	u6	o32u61a	158	35	31,2	16,8	18,4	9,7	123	48,3	34,6	1,9	2,9	9,0	40,8	0,363	22,2	77,8
O	LEO	o32	u6	o32u61b	148	36	30,7	15,9	19,8	9,2	112	51,5	31,4	1,6	2,9	9,5	38,5	0,405	24,3	75,7
O	LEO	o8	u6	o8u61b	190	6	23,7	6,8	12,6	3,9	184	95,3	60,8	1,2	1,2	154,8	40,6	0,366	3,2	96,8
O	LEO	o8	u6	o8u61a	159	3	19,8	5,2	13,6	6,8	156	87,5	55,4	1,1	0,8	152,0	37,7	0,42	1,9	98,1
Kf	LEO	kf2	u6	kf2ru61a	96	22	27,7	10,8	15,1	7,6	74	49,9	36,8	2,6	3,0	92,2	31,6	0,544	22,9	77,1
Kf	LEO	kf2	u6	kf2ru61b	69	19	28,2	10,2	18,6	8,7	50	58,4	33,7	2,7	4,9	131,4	34,7	0,479	27,5	72,5
Kf	LEO	kf2	u6	kf2lu61b	112	9	27,1	11,9	14,2	5,1	103	59,7	40,6	1,4	1,7	126,9	25,5	0,672	8,0	92,0
Kf	LEO	kf2	u6	kf2lu61a	133	28	29,7	21,8	19,4	10,1	105	57,4	38,5	1,3	1,5	130,1	25,9	0,663	21,1	78,9
Kf	LEO	kf2	u6	kf2lu61c	92	11	44,7	26,5	21,7	12,2	81	62,3	43,5	1,2	1,3	119,0	23,9	0,706	12,0	88,0
Kf	LEO	kf3	u6	kf3ru61a	80	27	25,4	11,1	14,4	6,2	53	56,9	47,5	2,7	3,3	100,8	36,1	0,452	33,8	66,3
Kf	LEO	kf3	u6	kf3lu61b	99	10	29,6	12,2	13,3	5,6	89	63,0	47,9	1,1	1,3	139,3	33,6	0,503	10,1	89,9
Kf	LEO	kf3	u6	kf3lu61a	121	35	27,3	13,6	15,6	7,1	86	63,3	51,3	1,4	1,4	139,0	39,3	0,39	28,9	71,1
Kf	LEO	kf3	u6	kf3ru61b	59	19	27,5	15,5	17,9	8,2	40	69,4	47,8	3,2	5,3	126,3	37,7	0,42	32,2	67,8
Old	LEO	old2	u6	old2lu61a	151	21	25,3	8,4	16,5	5,4	130	53,7	37,8	0,8	0,9	3,6	21,3	0,757	13,9	86,1
Old	LEO	old2	u6	old2lu61c	133	25	26,1	9,7	15,7	6,6	108	53,8	36,9	1,4	2,1	13,4	31,4	0,548	18,8	81,2
Old	LEO	old2	u6	old2lu61b	122	11	32,3	16,9	18,8	9,0	111	48,5	37,3	1,5	1,9	13,2	24,9	0,686	9,0	91,0
Old	LEO	oldli	u6	oldliu61g	148	10	21,7	9,6	15,1	7,4	138	69,2	54,2	1,7	1,7	171,1	21,0	0,763	6,8	93,2
Old	LEO	oldli	u6	oldliu61b	117	21	32,2	11,1	22,6	9,0	96	69,7	42,6	1,6	1,8	5,7	25,1	0,681	17,9	82,1
Old	LEO	oldli	u6	oldliu61d	135	21	32,9	11,2	19,0	9,2	114	67,2	41,0	2,0	2,1	2,4	28,4	0,61	15,6	84,4
Old	LEO	oldli	u6	oldliu61f	144	9	30,8	14,8	23,7	14,6	135	66,0	46,7	1,7	1,6	177,0	28,4	0,612	6,3	93,8

Old LEO	oldli	u6	oldlu6tc	116	23	35,1	15,7	22,4	10,6	93	71,8	45,7	1,7	2,4	1,8	30,7	0,562	19,8	80,2
Old LEO	oldli	u6	oldlu6ta	99	11	46,6	30,5	32,5	24,6	88	58,8	32,1	1,1	1,3	5,7	31,8	0,54	11,1	88,9
A LEO	a115	u9	a115u91b	109	10	26,2	13,7	15,7	10,0	99	67,6	43,1	0,8	1,3	143,1	50,3	0,213	9,2	90,8
A LEO	a115	u9	a115u91a	117	8	21,9	7,0	18,3	7,7	109	66,5	53,9	1,1	1,9	140,3	48,6	0,236	6,8	93,2
A LEO	a35	u9	a35u91b	181	13	25,2	7,0	18,5	7,9	168	41,3	28,1	1,6	2,2	151,9	53,2	0,177	7,2	92,8
A LEO	a35	u9	a35u91a	207	44	22,1	10,4	13,6	5,6	163	35,0	24,2	1,7	1,6	16,6	58,3	0,125	21,3	78,7
A LEO	a35	u9	a35u91c	184	19	27,2	11,5	14,1	8,8	165	39,2	34,4	1,4	1,4	160,5	40,0	0,377	10,3	89,7
A LEO	a52	u9	a52u91a	189	41	26,9	9,1	19,0	8,0	148	33,6	18,9	2,1	2,7	136,0	32,3	0,528	21,7	78,3
A LEO	a52	u9	a52u91d	122	34	33,9	14,3	22,0	9,8	88	41,1	27,3	1,4	1,1	144,6	28,4	0,611	27,9	72,1
B LEO	b13	u9	b13u91a	167	13	30,1	13,0	19,8	9,7	154	40,5	25,8	1,4	1,1	30,7	50,4	0,212	7,8	92,2
B LEO	b51	u9	b51u91b	196	59	20,7	11,7	13,3	7,1	137	38,0	33,7	2,2	2,3	24,9	39,2	0,391	30,1	69,9
B LEO	b51	u9	b51u91a	158	50	27,7	17,1	20,2	13,2	108	40,4	31,3	1,6	1,3	24,1	42,7	0,33	31,6	68,4
B LEO	b62	u9	b62u91b	223	4	17,4	5,1	13,9	5,4	219	50,3	43,2	0,8	0,7	168,9	53,8	0,171	1,8	98,2
B LEO	b62	u9	b62u91c	237	11	24,9	10,7	17,4	9,8	226	38,4	26,4	0,9	0,7	167,8	55,6	0,152	4,6	95,4
B LEO	b7	u9	b7u91b	233	1	88,8		25,1		232	51,1	45,1	1,1	0,7	148,0	45,6	0,281	0,4	99,6
D LEO	d35	u9	d35u91b	163	32	43,4	19,6	29,8	15,0	131	61,6	33,0	2,1	2,2	172,9	35,9	0,455	19,6	80,4
D LEO	d35	u9	d35u91a	131	26	45,2	25,3	30,2	20,3	105	59,4	38,3	2,8	3,6	172,6	31,5	0,546	19,8	80,2
D LEO	d36	u9	d36u91d	128	32	22,0	8,9	14,0	5,0	96	53,5	41,0	1,7	2,5	8,6	45,7	0,279	25,0	75,0
D LEO	d36	u9	d36u91a	121	15	26,5	17,0	17,3	8,8	106	44,1	23,4	1,0	0,7	159,0	38,6	0,403	12,4	87,6
D LEO	d36	u9	d36u91b	116	22	32,4	17,6	24,1	17,2	94	39,5	25,6	1,4	3,1	165,1	37,3	0,428	19,0	81,0
D LEO	d36	u9	d36u91c	99	11	36,4	24,9	16,0	5,7	88	63,9	35,2	1,7	1,9	88,9	76,2	0,029	11,1	88,9
C LEO	c10	u9	c10ur91c	100	3	12,5	1,2	11,3	0,9	97	68,5	54,4	1,3	1,0	163,0	33,2	0,511	3,0	97,0
C LEO	c10	u9	c10ur91b	129	5	23,2	10,3	17,8	10,2	124	66,5	54,7	1,4	1,8	153,1	29,6	0,585	3,9	96,1
C LEO	c10	u9	c10ul91a	144	6	35,5	11,5	21,6	11,2	138	66,3	48,3	1,3	1,5	54,3	36,9	0,435	4,2	95,8
C LEO	c10	u9	c10ul91b	158	15	36,3	18,1	24,0	14,7	143	56,7	38,2	1,4	1,6	54,3	40,8	0,363	9,5	90,5
C LEO	c10	u9	c10ur91a	118	7	33,6	23,6	17,8	9,8	111	72,8	69,4	1,6	1,3	166,9	25,3	0,677	5,9	94,1
C LEO	c16	u9	c16u91b	106	4	42,5	12,8	25,6	11,1	102	75,6	51,3	1,4	1,0	24,8	66,1	0,069	3,8	96,2
C LEO	c16	u9	c16u91a	91	5	35,9	14,0	21,8	17,9	86	78,8	56,8	1,3	1,3	129,4	73,6	0,036	5,5	94,5
C LEO	c5	u9	c5u91a	105	46	32,5	12,8	21,8	10,8	59	55,1	34,2	1,8	1,2	32,2	50,0	0,218	43,8	56,2
C LEO	c5	u9	c5u91c	144	6	25,0	13,9	15,1	8,3	138	62,2	46,4	1,6	1,4	108,6	50,7	0,208	4,2	95,8
C LEO	c5	u9	c5u91d	131	25	39,4	20,2	26,6	14,9	106	56,7	40,0	1,9	2,4	18,9	58,0	0,129	19,1	80,9
C LEO	cd	u9	cd u91b	109	58	25,6	9,6	17,6	7,4	51	34,8	19,3	1,9	2,2	165,8	33,6	0,502	53,2	46,8
C LEO	cd	u9	cd u91a	90	14	35,6	21,2	25,6	19,0	76	45,2	24,3	0,8	0,6	1,0	42,9	0,326	15,6	84,4
O LEO	o13	u9	o13u91b	142	22	20,9	8,0	15,1	5,7	120	55,1	35,2	1,6	2,1	146,1	29,9	0,58	15,5	84,5

O	LEO	o13	u9	o13u91a	156	33	26,2	12,3	18,5	9,6	123	62,6	40,7	1,8	2,6	147,9	28,1	0,617	21,2	78,8
O	LEO	o13	u9	o13u91c	141	24	34,1	22,9	16,9	6,4	117	60,0	40,5	2,1	3,0	141,6	25,9	0,664	17,0	83,0
O	LEO	o14	u9	o14u91b	205	36	22,1	9,0	14,7	6,3	169	53,4	31,1	1,5	2,1	74,2	51,5	0,198	17,6	82,4
O	LEO	o14	u9	o14u91a	177	19	23,9	13,5	13,3	5,9	158	55,4	37,3	1,3	1,0	62,8	60,9	0,104	10,7	89,3
O	LEO	o15	u9	o15u91b	49	12	29,3	9,7	20,6	6,9	37	72,7	51,3	2,3	2,2	163,6	33,9	0,496	24,5	75,5
O	LEO	o15	u9	o15u91a	41	13	37,6	17,9	22,0	8,2	28	57,6	23,5	2,6	2,5	152,9	28,7	0,606	31,7	68,3
O	LEO	o18	u9	o18u91b	144	17	30,4	11,1	20,4	9,3	127	50,2	25,6	1,4	1,5	134,4	28,2	0,616	11,8	88,2
O	LEO	o18	u9	o18u91a	147	19	30,7	19,3	19,3	7,7	128	50,5	32,1	1,2	2,2	133,0	26,2	0,658	12,9	87,1
O	LEO	o18	u9	o18u91c	146	10	20,7	7,9	13,9	7,6	136	46,6	32,7	1,5	1,7	132,7	31,8	0,539	6,8	93,2
O	LEO	o21	u9	o21u91a	168	60	27,9	10,8	19,3	7,8	108	38,4	25,1	1,7	2,1	131,6	34,2	0,489	35,7	64,3
O	LEO	o21	u9	o21u91b	157	46	31,1	14,7	20,0	8,6	111	36,7	25,6	1,6	2,0	164,9	35,4	0,466	29,3	70,7
O	LEO	o32	u9	o32u91a	157	22	28,4	9,2	17,2	6,9	135	58,4	35,9	1,3	1,7	148,3	27,4	0,632	14,0	86,0
O	LEO	o32	u9	o32u91b	116	27	28,9	10,4	19,5	8,7	89	59,8	39,9	1,5	2,0	151,3	25,8	0,667	23,3	76,7
O	LEO	o8	u9	o8u91c	156	35	24,8	8,5	17,8	9,5	121	53,9	37,6	1,2	1,3	125,0	31,1	0,555	22,4	77,6
O	LEO	o8	u9	o8u91b	178	39	34,8	15,0	23,9	8,0	139	83,4	61,2	1,7	2,0	145,8	37,6	0,421	21,9	78,1
O	LEO	o8	u9	o8u91a	197	23	30,0	16,9	18,2	6,7	174	78,6	60,0	1,4	1,3	140,0	44,3	0,302	11,7	88,3
Kf	LEO	kf2	u9	kf2ru91b	90	47	21,0	9,0	12,3	4,1	43	71,1	46,1	2,6	4,0	70,5	47,1	0,258	52,2	47,8
Kf	LEO	kf2	u9	kf2ru91a	77	33	26,3	14,2	15,1	8,2	44	65,2	39,9	2,2	3,1	1,8	48,9	0,233	42,9	57,1
Kf	LEO	kf2	u9	kf2lu91c	102	12	28,3	8,2	17,0	6,1	90	59,1	55,2	1,3	1,6	152,5	37,4	0,427	11,8	88,2
Kf	LEO	kf2	u9	kf2lu91d	69	15	34,2	15,5	25,0	15,3	54	67,5	54,4	1,2	1,4	162,7	21,8	0,749	21,7	78,3
Kf	LEO	kf2	u9	kf2lu91b	120	9	32,7	32,4	15,3	5,9	111	65,5	61,7	1,2	2,4	101,2	30,4	0,568	7,5	92,5
Kf	LEO	kf3	u9	kf3ru91b	104	53	18,7	10,9	11,1	4,0	51	55,5	59,6	2,0	3,5	69,9	52,5	0,186	51,0	49,0
Kf	LEO	kf3	u9	kf3ru91a	77	33	23,7	14,3	14,4	9,4	44	59,8	44,4	1,9	2,6	142,1	39,8	0,381	42,9	57,1
Kf	LEO	kf3	u9	kf3lu91c	94	14	25,3	9,0	16,6	10,6	80	51,5	48,4	0,9	0,8	0,6	37,9	0,417	14,9	85,1
Kf	LEO	kf3	u9	kf3lu91b	101	9	26,0	10,1	16,4	6,0	92	63,0	55,7	1,5	3,2	106,5	36,2	0,45	8,9	91,1
Kf	LEO	kf3	u9	kf3lu91d	85	15	32,8	22,2	22,9	17,3	70	62,5	49,3	0,9	0,8	5,1	39,1	0,393	17,6	82,4
Old	LEO	old2	u9	od2lu91b	74	13	37,2	9,7	26,0	6,4	61	59,0	41,7	1,1	1,5	176,1	23,5	0,713	17,6	82,4
Old	LEO	old2	u9	od2lu91a	96	13	26,9	8,6	21,7	7,2	83	73,9	56,2	1,0	0,8	169,3	31,5	0,545	13,5	86,5
Old	LEO	old2	u9	od2lu91c	118	15	28,7	9,4	19,6	10,0	103	63,8	41,1	1,3	3,0	3,8	28,4	0,612	12,7	87,3
Old	LEO	oldli	u9	oldolu91f	141	6	23,4	7,1	11,6	3,1	135	62,6	41,9	1,5	1,8	6,6	24,5	0,693	4,3	95,7
Old	LEO	oldli	u9	oldolu91c	118	15	30,0	10,2	18,2	6,7	103	55,0	37,4	1,7	2,2	177,2	27,5	0,631	12,7	87,3
Old	LEO	oldli	u9	oldolu91d	106	22	29,8	11,9	17,2	9,2	84	54,4	36,9	2,0	2,4	179,7	30,0	0,578	20,8	79,2
Old	LEO	oldli	u9	oldolu91e	159	16	30,2	12,1	15,1	6,5	143	69,1	54,3	1,7	2,0	1,1	29,1	0,597	10,1	89,9
Old	LEO	oldli	u9	oldolu91b	106	24	27,3	13,4	15,5	8,2	82	48,5	22,1	2,1	2,8	2,9	31,2	0,552	22,6	77,4
Old	LEO	oldli	u9	oldolu91g	101	20	41,9	21,7	26,1	15,9	81	55,3	36,2	1,6	1,8	171,7	32,6	0,524	19,8	80,2
Old	LEO	oldli	u9	oldolu91a	74	15	41,5	31,4	28,9	27,3	59	57,7	45,6	2,1	2,1	177,3	26,9	0,642	20,3	79,7

A	LEO	a115	o6	a115o61a	77	44	29,6	15,2	19,2	8,1	33	44,4	35,0	1,0	1,4	155,0	43,4	0,317	57,1	42,9
A	LEO	a115	o6	a115o61b	77	37	30,6	15,3	19,7	8,9	40	38,9	21,2	2,2	2,9	151,3	30,9	0,559	48,1	51,9
A	LEO	a1a	o6	a1ao61a	142	9	24,4	12,3	12,8	4,9	133	51,4	28,4	1,2	0,8	27,6	36,4	0,446	6,3	93,7
A	LEO	a35	o6	a35o61b	239	99	24,0	10,5	15,4	8,5	140	22,1	11,6	1,5	1,3	157,5	32,5	0,524	41,4	58,6
A	LEO	a35	o6	a35o61a	224	66	26,9	11,1	17,9	7,5	158	27,4	21,8	1,7	2,0	173,4	28,9	0,6	29,5	70,5
A	LEO	a52	o6	a52o61b	129	55	29,1	11,9	19,9	8,9	74	37,7	24,9	1,5	1,0	172,1	27,9	0,621	42,6	57,4
A	LEO	a52	o6	a52o61a	122	44	38,9	20,5	26,3	12,7	78	39,4	30,9	1,6	1,4	0,3	33,9	0,496	36,1	63,9
B	LEO	b13	o6	b13o61b	232	11	24,3	8,1	17,7	9,0	221	43,8	30,0	1,2	0,9	152,7	53,2	0,178	4,7	95,3
B	LEO	b13	o6	b13o61a	189	11	31,5	18,3	18,6	7,2	178	52,7	41,1	1,5	2,4	0,2	39,0	0,395	5,8	94,2
B	LEO	b62	o6	b62o61b	143	2	20,8	10,0	14,0	1,1	141	66,1	47,2	1,1	0,7	166,3	24,1	0,701	1,4	98,6
B	LEO	b62	o6	b62o61a	115	3	25,3	12,9	22,8	11,6	112	70,5	50,1	1,8	2,2	167,9	18,0	0,821	2,6	97,4
B	LEO	b73	o6	b73o61b	200	55	30,1	18,3	16,3	10,5	145	38,8	31,0	1,4	1,4	172,3	33,5	0,504	27,5	72,5
B	LEO	b73	o6	b73o61a	185	34	27,0	23,7	20,2	18,7	151	36,6	22,7	1,0	0,7	165,1	37,8	0,419	18,4	81,6
D	LEO	d13	o6	d13o61a	174	10	23,4	8,4	11,7	4,5	164	54,3	47,2	0,9	1,2	21,6	30,7	0,563	5,7	94,3
D	LEO	ds5	o6	ds5o61b	105	1	62,1		15,6		104	80,8	71,7	1,2	1,2	176,5	26,4	0,654	1,0	99,0
D	LEO	ds5	o6	ds5o61a	139	0					139	66,4	53,5	1,0	1,0	175,2	30,3	0,571	0,0	100,0
C	LEO	c5	o6	c5o61b	113	2	14,6	1,2	10,0	2,4	111	65,4	64,0	1,4	1,2	102,7	47,9	0,247	1,8	98,2
O	LEO	o13	o6	o13o61a	107	11	27,5	12,7	14,6	7,8	96	100,6	75,8	1,5	1,4	164,0	25,7	0,667	10,3	89,7
O	LEO	o13	o6	o13o61b	128	7	35,5	17,1	17,3	4,9	121	82,5	59,6	1,7	2,2	165,2	28,8	0,603	5,5	94,5
O	LEO	o14	o6	o14o61a	115	40	24,5	11,9	17,3	9,9	75	51,1	44,3	1,7	2,1	158,2	26,4	0,654	34,8	65,2
O	LEO	o15	o6	o15o61a	112	13	30,2	8,1	21,7	8,3	99	101,8	80,9	1,7	2,3	168,6	24,3	0,698	11,6	88,4
O	LEO	o15	o6	o15o61b	104	20	26,8	8,8	18,3	7,5	84	86,8	66,0	2,1	2,4	167,3	27,8	0,624	19,2	80,8
O	LEO	o25	o6	o25o61a	193	5	22,7	5,3	16,1	6,1	188	70,7	61,6	1,0	0,9	9,3	39,5	0,386	2,6	97,4
O	LEO	o25	o6	o25o61b	201	16	21,3	8,3	14,9	5,1	185	65,0	55,5	0,9	0,8	6,5	39,6	0,385	8,0	92,0
O	LEO	o29	o6	o29o61a	179	48	22,8	7,3	14,5	6,3	131	42,0	22,4	1,7	2,1	152,5	32,5	0,525	26,8	73,2
O	LEO	o29	o6	o29o61b	130	12	27,8	12,7	13,3	4,8	118	55,2	41,8	1,7	1,5	148,7	29,6	0,585	9,2	90,8
O	LEO	o32	o6	o32o61b	159	41	24,2	13,4	13,5	5,2	118	45,2	29,1	1,4	1,6	139,4	23,5	0,713	25,8	74,2
O	LEO	o32	o6	o32o61a	166	31	25,3	14,5	15,6	8,4	135	46,2	30,3	1,9	2,5	143,9	19,5	0,792	18,7	81,3
Kf	LEO	kf2	o6	kf2o61b	83	8	21,5	8,0	12,8	5,4	75	69,3	64,8	1,1	1,3	147,9	38,9	0,397	9,6	90,4
Kf	LEO	kf2	o6	kf2o61b	94	40	22,2	12,0	13,8	8,7	54	47,2	30,8	2,0	2,3	155,9	44,0	0,306	42,6	57,4
Kf	LEO	kf2	o6	kf2o61a	55	12	39,1	24,7	27,3	22,6	43	47,1	28,2	2,3	2,2	119,9	33,6	0,503	21,8	78,2
Kf	LEO	kf2	o6	kf2o61a	111	53	22,7	9,0	16,1	6,2	58	51,7	37,8	1,2	1,2	167,8	33,3	0,508	47,7	52,3
Kf	LEO	kf3	o6	kf3o61a	63	19	38,4	26,1	21,0	18,7	44	50,1	39,8	2,0	2,0	113,8	31,7	0,541	30,2	69,8

Kf	LEO	kf3	o6	kf3lo61b	82	10	17,8	7,6	13,4	4,4	72	72,2	65,6	1,5	1,6	136,7	38,8	0,4	12,2	87,8
Kf	LEO	kf3	o6	kf3ro61c	103	3	21,2	8,8	17,3	5,9	100	75,7	62,4	0,8	1,2	169,6	24,6	0,692	2,9	97,1
Kf	LEO	kf3	o6	kf3ro61b	113	43	24,7	10,7	15,4	7,3	70	46,0	31,1	1,3	1,7	148,5	38,3	0,408	38,1	61,9
Kf	LEO	kf3	o6	kf3ro61a	137	0					137	55,3	47,4	0,8	0,6	157,0	40,2	0,374	0,0	100,0
Old	LEO	old2	o6	old2o61c	174	17	28,5	13,6	18,7	9,9	157	50,2	33,9	0,9	1,3	162,1	31,8	0,54	9,8	90,2
Old	LEO	old2	o6	old2o61a	82	12	43,6	24,1	29,1	20,1	70	64,1	42,4	0,8	0,9	23,7	25,8	0,667	14,6	85,4
Old	LEO	old2	o6	old2o61b	136	12	38,6	30,4	19,8	13,5	124	66,9	53,1	0,9	0,9	9,8	25,6	0,671	8,8	91,2
A	LEO	a115	o9	a115o91a	79	4	29,2	7,2	19,8	6,5	75	75,3	42,8	1,3	2,3	177,5	34,4	0,486	5,1	94,9
A	LEO	a115	o9	a115o91b	85	24	34,8	13,5	27,4	12,6	61	59,5	42,8	1,1	2,9	3,9	36,4	0,446	28,2	71,8
A	LEO	a35	o9	a35o91c	294	6	17,0	5,6	10,1	5,1	288	35,6	28,0	0,9	0,9	55,3	60,2	0,11	2,0	98,0
A	LEO	a35	o9	a35o91b	312	16	26,5	10,9	14,6	7,3	296	37,6	33,3	1,2	1,3	8,1	38,1	0,413	5,1	94,9
A	LEO	a35	o9	a35o91a	276	10	41,3	26,3	19,3	8,7	266	36,7	24,7	1,1	1,4	28,5	42,7	0,328	3,6	96,4
A	LEO	a52	o9	a52o91a	170	36	28,4	9,2	19,6	9,3	134	38,1	27,2	1,8	2,3	17,6	41,7	0,347	21,2	78,8
A	LEO	a52	o9	a52o91c	195	67	29,3	9,9	20,7	8,4	128	28,3	17,2	1,8	1,8	24,6	38,2	0,411	34,4	65,6
A	LEO	a52	o9	a52o91b	173	26	30,1	14,6	20,7	9,0	147	38,3	32,3	1,9	2,4	32,5	34,4	0,485	15,0	85,0
B	LEO	b13	o9	b13o91a	189	3	16,2	4,5	4,4	0,9	186	51,1	39,4	1,2	0,9	31,2	38,1	0,412	1,6	98,4
B	LEO	b13	o9	b13o91b	119	1	111,1		87,0		118	54,6	45,5	1,5	1,0	3,6	31,0	0,557	0,8	99,2
B	LEO	b62	o9	b62o91b	154	24	23,4	10,4	16,3	8,2	130	33,4	24,6	1,3	2,0	170,7	39,2	0,392	15,6	84,4
B	LEO	b62	o9	b62o91a	146	15	34,2	23,1	23,0	12,6	131	43,7	28,7	1,4	1,9	162,0	36,5	0,443	10,3	89,7
B	LEO	b73	o9	b73o91a	118	36	28,8	15,4	17,9	9,1	82	30,9	17,6	1,4	1,6	27,1	28,5	0,608	30,5	69,5
B	LEO	b73	o9	b73o91b	133	52	32,9	18,4	23,6	14,5	81	32,3	17,1	1,5	1,5	18,7	32,8	0,519	39,1	60,9
D	LEO	d13	o9	d13o91a	142	2	20,7	1,4	17,2	3,4	140	82,8	69,1	1,8	2,5	179,5	44,3	0,302	1,4	98,6
D	LEO	d13	o9	d13o91b	139	6	31,0	17,8	19,5	9,7	133	92,0	75,5	1,6	2,5	0,7	38,9	0,397	4,3	95,7
D	LEO	ds5	o9	ds5o91a	232	54	23,0	9,8	13,5	7,6	178	38,4	26,9	1,6	1,7	172,0	30,4	0,569	23,3	76,7
D	LEO	ds5	o9	ds5o91b	190	15	23,3	9,9	13,5	6,1	175	49,5	36,8	1,5	2,1	170,2	33,8	0,498	7,9	92,1
C	LEO	c5	o9	c5o91c	125	17	25,7	9,2	16,9	6,4	108	46,9	33,5	1,8	1,9	125,0	34,9	0,476	13,6	86,4
C	LEO	c5	o9	c5o91d	115	16	30,9	11,9	21,8	7,1	99	50,5	32,9	1,6	2,1	127,8	36,2	0,449	13,9	86,1
C	LEO	c5	o9	c5o91f	111	24	25,2	8,2	16,8	7,4	87	52,7	38,9	1,6	2,2	132,4	31,8	0,541	21,6	78,4
O	LEO	o13	o9	o13o91a	117	24	33,8	14,2	22,3	9,7	93	60,7	31,2	1,3	1,0	4,5	37,4	0,427	20,5	79,5
O	LEO	o13	o9	o13o91b	91	19	45,8	44,3	20,7	11,0	72	80,8	49,3	3,0	5,4	33,8	29,8	0,581	20,9	79,1
O	LEO	o15	o9	o15o91a	108	12	23,9	8,5	17,3	5,5	96	70,4	42,6	1,5	1,7	15,7	31,1	0,555	11,1	88,9
O	LEO	o15	o9	o15o91c	140	17	23,6	9,7	16,2	7,5	123	55,4	40,8	1,3	1,5	23,4	32,6	0,524	12,1	87,9
O	LEO	o15	o9	o15o91b	125	14	24,2	13,2	19,1	8,6	111	66,9	47,1	1,5	2,1	18,1	33,4	0,507	11,2	88,8

O	LEO	o29	o9	o29o91b	60	9	26,2	11,1	14,1	6,9	51	53,3	30,3	1,9	2,1	18,2	36,2	0,449	15,0	85,0
O	LEO	o29	o9	o29o91a	58	22	47,7	21,2	30,9	15,2	36	47,1	25,3	2,4	5,4	59,0	21,1	0,763	37,9	62,1
O	LEO	o32	o9	o32o91a	262	28	23,6	9,7	11,9	4,6	234	44,2	28,8	1,4	1,4	19,0	16,1	0,853	10,7	89,3
O	LEO	o32	o9	o32o91b	248	23	24,7	15,5	13,1	4,7	225	42,3	29,6	1,2	1,4	19,3	20,0	0,782	9,3	90,7
O	LEO	o32	o9	o32o91c	288	17	31,9	23,2	18,1	8,8	271	48,1	27,5	0,9	0,8	17,5	22,5	0,734	5,9	94,1
Kf	LEO	kf2	o9	kf2ro91b	76	33	25,6	10,9	13,8	5,7	43	52,9	30,3	2,1	2,8	174,5	31,2	0,552	43,4	56,6
Kf	LEO	kf2	o9	kf2ro91a	101	25	30,0	13,8	14,9	5,6	76	50,8	32,9	2,2	2,9	168,0	35,5	0,463	24,8	75,2
Kf	LEO	kf2	o9	kf2lo91a	106	9	34,5	15,3	15,5	2,8	97	56,9	43,8	1,2	2,0	175,8	27,4	0,632	8,5	91,5
Kf	LEO	kf3	o9	kf3ro91a	91	9	25,5	12,6	18,6	10,8	82	53,2	31,4	1,8	2,2	4,5	59,2	0,118	9,9	90,1
Kf	LEO	kf3	o9	kf3ro91b	74	34	25,9	5,9	17,9	6,4	40	63,1	41,1	2,7	3,7	127,4	42,9	0,326	45,9	54,1
Old	LEO	old2	o9	old2o91a	126	36	38,2	20,2	25,7	13,9	90	45,2	27,4	0,8	0,6	19,4	33,7	0,499	28,6	71,4
Old	LEO	old2	o9	old2o91b	113	12	53,8	44,4	40,7	38,4	101	51,6	31,8	1,0	1,2	7,1	29,4	0,591	10,6	89,4
A	LEO	a115	u5	a115u51b	131	7	24,6	6,9	14,2	3,9	124	73,4	45,0	0,7	1,0	0,5	27,7	0,625	5,3	94,7
A	LEO	a115	u5	a115u51a	131	1	44,4		12,8		130	95,7	63,5	0,7	1,0	175,6	22,4	0,736	0,8	99,2
A	LEO	a163	u5	a163u51b	115	13	28,1	12,4	23,1	13,4	102	74,6	67,7	1,4	1,7	2,8	31,4	0,549	11,3	88,7
A	LEO	a163	u5	a163u51a	88	17	31,9	15,7	18,5	8,9	71	66,1	45,5	1,8	2,7	10,9	32,3	0,529	19,3	80,7
A	LEO	a163	u5	a163u51c	96	17	29,1	18,4	20,0	15,3	79	57,0	45,8	1,6	1,7	166,0	29,5	0,587	17,7	82,3
A	LEO	a35	u5	a35u51c	247	2	13,6	1,2	6,6	4,5	245	37,6	30,8	1,2	1,6	164,6	45,0	0,291	0,8	99,2
A	LEO	a35	u5	a35u51b	268	10	17,2	8,2	10,5	4,1	258	33,8	21,3	1,1	1,2	173,9	46,0	0,275	3,7	96,3
A	LEO	a52	u5	a52u51c	246	20	27,1	12,8	15,3	7,9	226	45,6	34,5	1,5	1,6	21,6	32,6	0,523	8,1	91,9
A	LEO	a52	u5	a52u51b	262	9	21,5	15,5	13,2	5,9	253	47,2	40,4	1,6	1,8	20,0	34,1	0,492	3,4	96,6
B	LEO	b13	u5	b13u51b	178	19	39,7	21,6	28,5	15,5	159	41,1	31,9	1,7	2,3	150,1	37,9	0,416	10,7	89,3
B	LEO	b13	u5	b13u51a	298	1	50,0		39,0		297	40,1	34,8	1,5	1,2	139,2	51,0	0,204	0,3	99,7
B	LEO	b62	u5	b62u51b	258	3	18,3	4,1	10,8	5,3	255	41,4	30,9	1,0	0,5	179,7	35,9	0,455	1,2	98,8
B	LEO	b62	u5	b62u51a	267	6	30,7	9,5	16,5	8,1	261	43,6	34,0	1,0	0,7	171,4	37,7	0,42	2,2	97,8
B	LEO	b7	u5	b7u51a	195	7	31,4	16,7	15,3	6,7	188	48,7	33,7	1,0	0,6	4,4	35,0	0,473	3,6	96,4
B	LEO	b7	u5	b7u51b	197	15	34,0	17,8	23,2	16,1	182	42,2	32,8	1,0	0,8	11,0	28,9	0,6	7,6	92,4
B	LEO	b73	u5	b73u51a	132	54	22,8	11,3	15,2	7,9	78	43,1	29,4	1,6	2,2	66,8	40,9	0,361	40,9	59,1
B	LEO	b73	u5	b73u51b	142	77	23,2	11,4	15,6	8,0	65	35,6	28,4	1,8	2,3	46,7	56,8	0,139	54,2	45,8
D	LEO	d35	u5	d35u51a	168	15	26,5	8,6	16,0	6,2	153	69,9	49,6	2,0	2,8	23,2	38,2	0,41	8,9	91,1
D	LEO	d35	u5	d35u51b	79	7	50,5	22,2	22,8	12,5	72	83,8	61,0	2,2	4,2	7,0	38,3	0,409	8,9	91,1
D	LEO	d36	u5	d36u51a	83	41	31,1	13,7	20,5	9,7	42	50,0	32,9	2,3	3,5	9,3	40,6	0,366	49,4	50,6
D	LEO	d36	u5	d36u51c	104	21	36,1	13,8	21,7	12,3	83	40,0	28,9	2,2	2,4	29,8	46,5	0,267	20,2	79,8
D	LEO	d36	u5	d36u51b	125	36	34,9	24,7	20,8	11,5	89	42,2	30,7	2,0	2,9	38,7	42,7	0,329	28,8	71,2

C	LEO	c10	u5	c10u51b	150	10	18,9	8,0	10,9	4,6	140	46,6	30,5	1,4	1,7	170,3	42,4	0,334	6,7	93,3
C	LEO	c10	u5	c10ur51b	159	3	26,3	9,7	10,8	6,8	156	61,3	56,3	1,0	0,9	65,6	50,2	0,215	1,9	98,1
C	LEO	c10	u5	c10u51a	161	9	30,3	19,4	16,4	7,4	152	52,4	38,5	1,2	1,1	175,3	36,3	0,448	5,6	94,4
C	LEO	c16	u5	c16u51b	94	6	36,2	13,0	21,3	11,5	88	75,1	40,2	2,5	3,6	36,2	63,8	0,084	6,4	93,6
C	LEO	c16	u5	c16u51a	100	1	45,0		38,0		99	85,2	59,0	1,4	2,0	158,3	62,6	0,091	1,0	99,0
C	LEO	c5	u5	c5u51c	87	40	34,2	19,9	21,5	11,9	47	41,0	23,3	2,3	2,5	47,8	69,8	0,051	46,0	54,0
C	LEO	c5	u5	c5u51b	154	15	32,8	25,7	18,1	10,0	139	50,3	31,8	1,3	1,3	73,1	46,3	0,27	9,7	90,3
C	LEO	ca	u5	cau51b	164	4	26,9	4,6	18,1	9,3	160	60,3	41,2	1,2	1,7	14,2	34,2	0,49	2,4	97,6
C	LEO	ca	u5	cau51a	116	4	17,4	5,8	11,9	1,8	112	78,9	61,1	1,6	1,6	177,2	33,5	0,504	3,4	96,6
C	LEO	ca	u5	cau51c	140	3	32,8	22,7	13,8	6,5	137	71,7	79,2	1,3	1,9	176,5	35,2	0,47	2,1	97,9
C	LEO	cd	u5	cdu51a	86	17	22,8	10,4	13,8	5,1	69	38,2	19,4	1,1	1,3	179,4	55,3	0,155	19,8	80,2
C	LEO	cd	u5	cdu51b	81	23	37,9	14,9	29,0	12,3	58	40,6	19,4	1,3	1,5	162,8	53,2	0,178	28,4	71,6
O	LEO	o13	u5	o13u51b	108	13	25,9	8,7	20,0	9,0	95	85,7	61,3	1,2	1,0	25,9	34,7	0,481	12,0	88,0
O	LEO	o13	u5	o13u51a	95	17	28,3	13,6	19,8	5,8	78	86,5	57,0	1,6	2,2	15,1	33,5	0,504	17,9	82,1
O	LEO	o15	u5	o15u51a	84	19	27,1	5,4	17,2	5,8	65	61,6	51,1	2,7	5,1	176,0	18,2	0,817	22,6	77,4
O	LEO	o18	u5	o18u51b	111	37	23,1	9,3	15,6	6,2	74	43,0	24,8	1,3	1,5	177,1	32,0	0,536	33,3	66,7
O	LEO	o18	u5	o18u51a	114	31	33,2	11,0	23,5	8,9	83	48,5	28,8	1,2	1,5	0,5	30,7	0,563	27,2	72,8
O	LEO	o18	u5	o18u51c	162	34	29,4	13,2	17,9	5,8	128	41,0	24,2	1,5	2,0	7,5	29,4	0,59	21,0	79,0
O	LEO	o21	u5	o21u51b	152	2	14,2	2,0	12,8	0,6	150	75,3	50,1	1,2	1,9	146,0	52,1	0,191	1,3	98,7
O	LEO	o21	u5	o21u51a	171	4	31,1	12,7	18,4	4,5	167	64,5	46,4	0,8	0,7	169,4	48,0	0,245	2,3	97,7
O	LEO	o32	u5	o32u51a	225	18	28,1	9,9	13,6	5,8	207	51,6	36,3	0,9	1,0	11,7	25,9	0,664	8,0	92,0
O	LEO	o32	u5	o32u51b	245	0					245	57,4	40,3	0,7	0,4	25,8	28,0	0,619	0,0	100,0
O	LEO	o8	u5	o8u51a	114	8	24,4	5,4	12,7	4,3	106	94,9	78,7	2,1	2,2	172,6	37,1	0,432	7,0	93,0
O	LEO	o8	u5	o8u51b	128	9	24,0	7,9	15,0	5,7	119	79,8	47,9	1,6	1,2	163,4	33,8	0,499	7,0	93,0
Kf	LEO	kf2	u5	kf2ru51a	110	21	24,9	10,6	14,0	8,7	89	54,1	43,7	1,5	1,7	168,4	37,3	0,428	19,1	80,9
Kf	LEO	kf2	u5	kf2lu51b	156	7	25,6	13,6	15,5	10,9	149	73,9	59,3	0,8	1,0	168,4	37,9	0,416	4,5	95,5
Kf	LEO	kf2	u5	kf2lu51a	182	13	27,0	16,2	15,5	15,3	169	62,6	56,2	0,8	1,0	174,8	34,3	0,488	7,1	92,9
Kf	LEO	kf3	u5	kf3lu51a	125	6	36,6	21,1	23,6	18,6	119	78,2	69,7	1,1	1,4	9,3	29,6	0,585	4,8	95,2
Kf	LEO	kf3	u5	kf3lu51b	119	1	40,8		14,9		118	77,2	56,9	1,0	0,7	9,1	33,6	0,502	0,8	99,2
Kf	LEO	kf3	u5	kf3ru51a	109	0					109	58,1	39,8	0,9	1,0	133,5	22,2	0,739	0,0	100,0
Old	LEO	old2	u5	od2lu51a	99	25	21,9	7,7	15,7	8,5	74	58,6	44,4	2,3	4,3	12,2	50,7	0,208	25,3	74,7
Old	LEO	old2	u5	od2lu51x	128	21	30,5	13,5	19,0	9,7	107	54,4	44,6	1,4	3,5	168,0	52,3	0,188	16,4	83,6
A	LEO	a115	o5	a155o51b	42	1	27,5		27,2		41	117,4	86,0	0,9	1,0	179,3	27,6	0,628	2,4	97,6
A	LEO	a1a	o5	a1ao51b	119	8	17,9	6,7	10,4	5,1	111	57,0	41,8	1,2	0,8	23,5	38,1	0,413	6,7	93,3

A	LEO	a35	o5	a35o51a	203	80	27,0	9,5	20,1	8,4	123	27,1	17,5	1,1	1,2	149,0	34,3	0,487	39,4	60,6
A	LEO	a35	o5	a35o51b	245	84	24,3	10,3	18,1	8,7	161	27,6	23,0	1,2	1,3	156,0	44,9	0,292	34,3	65,7
A	LEO	a52	o5	a52o51b	142	28	24,9	9,0	14,7	5,7	114	57,7	43,8	1,9	1,7	4,6	23,4	0,716	19,7	80,3
A	LEO	a52	o5	a52o51a	148	30	27,2	17,1	19,4	14,6	118	70,9	69,7	2,2	2,8	179,9	23,7	0,711	20,3	79,7
B	LEO	b13	o5	b13o51a	182	20	31,1	19,0	18,5	14,3	162	39,1	31,3	1,3	1,1	21,6	41,3	0,353	11,0	89,0
B	LEO	b13	o5	b13o51b	180	16	30,5	26,5	13,8	8,2	164	36,7	24,0	1,3	1,0	35,0	49,9	0,219	8,9	91,1
B	LEO	b62	o5	b62o51b	129	5	35,2	9,4	24,4	10,0	124	62,7	40,3	1,1	1,3	156,9	23,1	0,721	3,9	96,1
B	LEO	b62	o5	b62o51a	157	13	46,3	29,9	32,4	18,1	144	58,6	47,4	1,2	1,0	161,6	23,8	0,707	8,3	91,7
B	LEO	b73	o5	b73o51a	125	29	26,1	15,7	16,6	7,9	96	48,1	29,4	1,3	1,7	8,3	38,4	0,406	23,2	76,8
B	LEO	b73	o5	b73o51b	128	12	22,5	16,7	12,4	7,6	116	58,5	62,2	1,2	1,3	16,9	22,7	0,73	9,4	90,6
D	LEO	ds5	o5	ds5o51b	130	2	31,1	9,3	21,3	3,0	128	56,7	40,8	0,7	0,5	172,2	25,8	0,666	1,5	98,5
D	LEO	ds5	o5	ds5o51a2	85	0					85	76,9	48,5	0,7	0,6	163,3	27,1	0,639	0,0	100,0
C	LEO	c5	o5	c5o51b	115	7	26,2	8,4	20,0	5,7	108	83,2	58,2	1,4	0,9	169,9	29,9	0,58	6,1	93,9
O	LEO	o13	o5	o13o51b	90	19	36,5	16,8	21,1	8,0	71	72,9	42,6	1,9	2,2	0,5	25,6	0,67	21,1	78,9
O	LEO	o14	o5	o14o51a	103	55	27,0	10,7	17,9	7,1	48	42,1	26,2	2,2	2,8	18,1	20,1	0,781	53,4	46,6
O	LEO	o14	o5	o14o51b	136	63	25,5	11,6	16,6	8,4	73	49,1	28,3	2,1	2,4	11,3	24,2	0,699	46,3	53,7
O	LEO	o15	o5	o15o51a	117	2	39,2	5,6	22,8	5,4	115	112,8	107,6	1,4	1,8	169,5	26,2	0,658	1,7	98,3
O	LEO	o15	o5	o15o51b	113	11	32,7	12,6	17,0	4,2	102	81,9	67,0	1,5	1,6	168,4	28,2	0,615	9,7	90,3
O	LEO	o25	o5	o25o51a	201	7	25,1	13,1	16,6	12,7	194	64,5	54,1	1,5	2,3	18,0	36,6	0,442	3,5	96,5
O	LEO	o25	o5	o25o51b	171	7	31,3	19,6	16,9	3,4	164	61,9	49,9	1,2	1,3	10,0	34,3	0,487	4,1	95,9
O	LEO	o29	o5	o29o51b	196	21	23,2	8,7	12,8	5,4	175	56,9	42,8	1,0	0,9	145,6	28,3	0,614	10,7	89,3
O	LEO	o29	o5	o29o51a	129	12	26,6	15,8	18,4	13,0	117	61,5	42,1	1,1	0,9	142,7	29,0	0,599	9,3	90,7
O	LEO	o32	o5	o32o51a	178	3	22,3	8,0	16,2	7,6	175	76,1	49,1	1,2	1,0	153,6	28,7	0,606	1,7	98,3
O	LEO	o32	o5	o32o51b	150	10	22,9	10,0	13,8	3,0	140	60,2	39,9	1,4	1,9	148,3	20,4	0,776	6,7	93,3
Old	LEO	old2	o5	old2o51b	116	26	41,5	22,5	23,0	15,7	90	68,2	43,4	1,0	2,4	8,9	18,3	0,815	22,4	77,6
Old	LEO	old2	o5	old2o51a	137	13	41,9	28,6	27,3	15,8	124	64,8	45,2	0,9	1,5	3,4	25,3	0,676	9,5	90,5

Individualdaten der C/N-Isotopenbestimmung

Probe				Kollagen										
Ort	Datierung ¹	Probennummer	Spezies	Skelettlelement	Alter	Geschlecht	Einwaage Lyophilisat (mg)	Ausbeute Lyophilisat (mg)	% der Einwaage	%C	%N	C/N (molar)	d13C	d15N
Waging	spätes 6 bis frühes 8 Jhdt	Grab 141	Homo	Rippe	fjuv	w	250,9	11,9	4,74	42,6	16,1	3,1	-19,84	8,92
Waging	spätes 6 bis frühes 8 Jhdt	Grab 5	Homo	Rippe	a	w?	250,8	8,9	3,55	39,8	14,8	3,1	-20,19	9,56
Waging	spätes 6 bis frühes 8 Jhdt	Grab 152	Homo	Rippe	juv	w?	255,7	3,6	1,41	29,1	11,1	3,1	-19,75	8,91
Waging	spätes 6 bis frühes 8 Jhdt	Grab 59	Homo	Rippe	a	w	249,5	4,6	1,84	35,0	12,9	3,2	-19,97	9,38
Waging	spätes 6 bis frühes 8 Jhdt	Grab 155*	Homo	Rippe	erw	m	250,1	6,8	2,72	42,9	16,4	3,1	-19,53	9,62
Waging	spätes 6 bis frühes 8 Jhdt	Grab 155*	Homo	Rippe	erw	m	250,1	6,8	2,72	41,9	15,8	3,1	-19,87	9,62
Waging	spätes 6 bis frühes 8 Jhdt	Grab 92	Homo	Clavicula/Fibula	a	m	250,4	17,7	7,07	29,2	17,8	1,9	-19,49	9,48
Waging	spätes 6 bis frühes 8 Jhdt	Grab 115	Homo	Rippe	a	m?	252,0	7,4	2,94	44,4	17,1	3,0	-20,23	9,83
Bittenbrunn	Mitte 6 Jhdt	Grab 5	Homo	Rippe	a	w?	252,0	8,4	3,33	36,9	11,6	3,7	-19,84	8,67
Bittenbrunn	6 Jhdt	Grab 17*	Homo	Rippe	juv	m?	249,0	4,3	1,73	34,8	11,0	3,7	-20,28	8,46
Bittenbrunn	6 Jhdt	Grab 17*	Homo	Rippe	juv	m?	249,0	4,3	1,73	38,2	11,8	3,8	-20,48	8,09
Bittenbrunn	Mitte 6 Jhdt	Grab 34	Homo	Rippe	a	m	278,4	1,6	0,57	35,2	11,8	3,5	-19,33	9,67
Bittenbrunn	? Beginn 7 Jhdt	Grab 42	Homo	Rippe	fa	m?	277,5	5,1	1,82	47,5	15,8	3,5	-20,00	8,60
Bittenbrunn	Beginn bis Mitte 7 Jhdt	Grab 59	Homo	Rippe	erw	w	273,1	2,3	0,86	34,4	11,0	3,6	-20,74	8,91
Brombach	Ende 7 bis Beginn 8 Jhdt	Grab 39	Homo	Rippe	sjuv	w	263,1	3,7	1,41	38,2	13,4	3,3	-19,74	8,50
Brombach	Ende 7 bis Beginn 8 Jhdt	Grab 13*	Homo	Rippe	sm-s	w	259,5	9,0	3,47	50,8	17,7	3,4	-20,05	8,34
Brombach	Ende 7 bis Beginn 8 Jhdt	Grab 13*	Homo	Rippe	sm-s	w	259,5	9,0	3,47	45,8	16,3	3,3	-20,13	8,42
Brombach	Ende 7 bis Beginn 8 Jhdt	Grab 7	Homo	Rippe	juv	m?	273,7	4,4	1,61	45,1	15,8	3,3	-20,22	8,88
Brombach	spätes Mittelalter	Grab 9*	Homo	Rippe	a	m	269,0	7,7	2,86	40,1	13,5	3,5	-19,54	11,71
Brombach	spätes Mittelalter	Grab 9*	Homo	Rippe	a	m	269,0	7,7	2,86	52,0	17,5	3,5	-19,59	11,77
Brombach	Ende 7 bis Beginn 8 Jhdt	Grab 35	Homo	Rippe	a-m	m?	268,9	4,3	1,6	43,2	16,5	3,1	-20,17	8,39
Brombach	Ende 7 bis Beginn 8 Jhdt	Grab 36	Homo	Rippe	infil	m?	276,4	5,1	1,85	44,8	14,9	3,5	-19,56	8,55
Weicheering	Glockenbecher (Endneolithikum)	Grab 2	Homo	Rippe	juv	m?	250,8	7,7	3,07	30,3	9,4	3,8	-21,23	9,87
Weicheering	Glockenbecher (Endneolithikum)	Grab 3*	Homo	Rippe/Zehe	juv-fa	m?	250,7	9,1	3,63	34,0	10,0	4,0	-21,38	10,30
Weicheering	Glockenbecher (Endneolithikum)	Grab 3*	Homo	Rippe/Zehe	juv-fa	m?	250,7	9,1	3,63	30,6	9,0	4,0	-21,39	9,67
Weicheering	Glockenbecher (Endneolithikum)	Grab 5	Homo	Rippe	fjuv	m?	251,0	5,3	2,11	27,1	8,0	4,0	-22,65	9,95
Weicheering	Glockenbecher (Endneolithikum)	Grab 17	Homo	Zehe	a	m	249,7	3,4	1,36	42,5	13,6	3,6	-20,88	9,60
Weicheering	Eisenzeit	Grab D	Homo	Zehe	sa	w	251,4	5,3	2,11	36,3	13,9	3,1	-20,02	9,03

Ort	Datierung ¹	Probennummer	Spezies	Skelettelement	Alter	Geschlecht	Einwaage Lyophilisat (mg)	Ausbeute Lyophilisat (mg)	% der Einwaage	%C	%N	C/N (molar)	d13C	d15N
Ofnet-Höhle ²	7520 +/- 80 BP	2476 - 3	Homo	KF	erw	eW	ca 200	127,0		41,2	14,9	3,2	-19,6	10,7
Ofnet-Höhle ²	7360 +/- 80 BP	2481 - 8	Homo	KF	erw	eW	ca 200	97,0		40,9	14,8	3,2	-19,6	10,9
Ofnet-Höhle ²		2484 - 11	Homo	KF	erw	eM	ca 200	94,5		39,7	14,3	3,2	-19,4	10,9
Ofnet-Höhle ²		2486 - 13	Homo	KF	erw	eM	ca 200	81,7		39,9	14,4	3,2	-19,8	10,7
Ofnet-Höhle ²		2488 - 15	Homo	KF	erw	eW	ca 200	68,8		40,1	14,6	3,2	-19,7	10,6
Ofnet-Höhle ²		2490 - 18	Homo	KF	erw	eW	ca 200	26,0		40,3	14,3	3,3	-20,0	10,5
Ofnet-Höhle ²		2493 - 21	Homo	KF	erw	M	ca 200	56,4		41,3	14,8	3,3	-19,6	10,6
Ofnet-Höhle ²		2497 - 25	Homo	KF	erw	eW	ca 200	66,3		40,7	14,8	3,2	-19,6	11,1
Ofnet-Höhle ²	7560 +/- 110 BP	2504 - 32	Homo	KF	erw	eW	ca 200	51,9		41,6	14,8	3,3	-19,7	10,9

Anmerkungen: KF Knochenfragment

¹ Datierung: Waging (Knöchlein 1995), Bittenbrunn (Christlein 1971, Pohl 1995), Brombach (Siegmond 1983), Weichering (Weinig 1991), Ofnet-Höhle (Housley-Bericht 1988);

² Isotopenwerte aus: Bocherens et al. 1997;

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei Allen, welche auf irgendeine Weise zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben, an dieser Stelle ganz herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Gisela Grupe. Sie hat mir nicht nur dieses sehr spannende und fordernde Dissertationsthema zur Verfügung gestellt, sondern mich in jeder Form, sei es in fachlicher als auch in logistischer Weise zu jeder Zeit unterstützt. Besonders bedanken möchte ich mich bei Ihr dafür, dass Sie das Vertrauen bewahrt hat und die Geduld aufbringen konnte, um mich über diese lange Zeit bis zur Fertigstellung dieser Arbeit, und in meiner Selbständigkeit, zu fördern und mir Mut zu machen.

Ein Dank geht auch an Prof. Dr. K.-H. Kunzelmann, der mir zahlreiche fachliche Anregungen, insbesondere auf dem Gebiet der Zahnmedizin gab, und mir jederzeit den Zugang zu allen technischen Optionen in seinem Hause ermöglicht hat.

Dank auch an Herrn Prof. Dr. G. Wanner für seine Bereitschaft, sich die Zeit zu nehmen, diese Arbeit als Zweitgutachter wissenschaftlich zu beurteilen.

An dieser Stelle bedanke ich mich ganz besonders bei meiner Tochter Jasmin und meinem Gatten Ewald für die familiäre Begleitung dieser langen Phase, für die zahlreichen Inspirationen, die mich über den oft rein technischen Aspekt der Thematik zu neuen Gedanken geführt haben.

Herrn Prof. Dr. Peter Ungar möchte ich ganz besonders danken für die zahlreichen Anregungen auf dem Gebiet der logistischen Handhabung der Daten zur Dentalen Microwear. Auch für seine Freude am wissenschaftlichen Austausch und seinen humorvollen zwischenmenschlichen Umgang möchte ich an dieser Stelle danken.

Bei der Fa. Coltene Whaledent, Schweiz möchte ich ganz herzlich bedanken für die Überlassung der Abgussmaterialien und des dazu notwendigen Instrumentariums.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen in der Arbeitsgruppe möchte ich mich bedanken. Über die Jahre hinweg waren die gemeinsamen Stunden am Institut sehr selten, sowohl aufgrund der wechselnden Örtlichkeit, um die Fragestellung dieser Arbeit zu bearbeiten, als auch aus privaten Gründen. Für die Zeit, welche zur Verfügung stand und welche mit anregenden Diskussionen und Gesprächen gefüllt war, sowie für die freundschaftliche und hilfsbereite Atmosphäre möchte ich mich ganz besonders bei allen, die kamen, blieben und gingen, bedanken.

Namentlich ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Frau Sybille Warmuth (vormals Friedel) für ihre aufgeschlossene und kreative Art mit dem Thema der Simulation umzugehen. Besonders in der Endphase dieser Arbeit war sie mir eine wertvolle Begleiterin, sowohl in der fachlichen Auseinandersetzung, als auch in der Unterstützung als Freundin.

Namentlich danken möchte ich auch Herrn Alois Gröbmeyer (Dipl. Statistiker), der mich auf sehr freundschaftliche und anregende Weise in die statistische Aufarbeitung der Daten eingeführt hat. Herrn Dr. Peter Schröter aus der Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie sei an dieser Stelle gedankt für seine kritische und aber auch aufmunternde Betrachtungsweise eigener Interpretationen und seine überspringende Liebe am historischen Bodendenkmal. An dieser Stelle möchte ich mich auch an den verstorbenen Herrn Dr. Franz Parsche erinnern, der in seinen Seminaren dem wissenschaftlichen Nachwuchs mit großem Einsatz und Herz das Objekt der Anthropologie, den Menschen in seiner körperlichen und kulturellen Vielfalt veranschaulicht hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei Frau Michaela Svihla für die sorgfältige Bearbeitung der Proben zur Isotopen-Analyse, sowie ihr Engagement bei der kreativen Gestaltung wissenschaftlicher Poster.

Für die Einarbeitung der zahnmedizinischen Instrumente und Geräte möchte ich mich ganz herzlich bei Frau Eva Köbele in der Zahnmedizin bedanken.

Einen besonderen Dank möchte ich an Frau Prof. Dr. Elisabeth Weiß und Frau Prof. Dr. Ulla Mitzdorf richten, die sich mit großem Engagement dafür einsetzen, dass es Frauen in Familie und Wissenschaft, erleichtert wird, ihre wissenschaftliche Arbeit neben der familiären Verantwortung fortsetzen zu können.

Lebenslauf

Name, Vorname: Gügel, Irene Luise

Anschrift: Götzstr. 1 / II, 80809 München

Geburtsdatum: 16. November 1962

Geburtsort: Forchheim/Oberfranken

Staatsangehörigkeit: deutsch

Familienstand: verheiratet, eine Tochter (10 Jahre)

Schulische Ausbildung:

9/ 1968 – 7/ 1972 Grundschule, Forchheim

9/ 1972 – 2/ 1976 Gymnasium, Forchheim

3/ 1976 – 7/ 1978 Staatliche Realschule Forchheim

7/ 1978 Mittlerer Bildungsabschluß

9/ 1978 – 7/ 1991 städt. Abendgymnasium für Berufstätige

7/ 1991 Allgemeine Hochschulreife

Berufliche Ausbildung:

1981 Arzthelferin

1984 Staatliche Anerkennung zur medizinisch-technische Laboratoriumsassistentin (MTLA)

Studienverlauf

ab 11/ 1991

Studium des Faches Biologie (Diplom) an der

Ludwig-Maximilian-Universität München

Hauptfach: Anthropologie und Humangenetik

Nebenfächer: Genetik, Immunologie, Zoologie (Molekulare Evolution)

Diplomarbeit: „Simulationsversuch von microwear mit Merkmalsvergleich an frühmittelalterlichen Molaren“

7/ 1998 Verleihung des Grades Diplom-Biologin Univ.

10/ 1998 – 9/2001 Promotionsstudium Biologie am vormaligen Institut für Anthropologie und Humangenetik der LMU München

seit 11/ 1999 Bearbeitung des vorliegenden Dissertationsgegenstandes

11/1999- 10/2000 Wissenschaftliche Tätigkeit im Rahmen des DFG-Projektes GR 959/7-1 am Institut für Anthropologie und Humangenetik, LMU München

7/ 2001 – 6/ 2002 Förderung des Promotionsvorhabens durch ein Stipendium nach dem Gesetz zur Förderung des wissenschaftlichen und künstlerischen Nachwuchses (umgewandelt s.u.)

1/ 2002 – 6/ 2002 Förderung des Promotionsvorhabens durch ein Stipendium im Rahmen des Hochschul- und Wissenschaftsprogrammes (HWP)

9/ 1999 – 5/ 2003 regelmäßige Tätigkeit als Wissenschaftliche Hilfskraft in der Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie München und im Institut für Anthropologie und Humangenetik der LMU München (jetzt Fakultät für Biologie Department I, Biodiversitätsforschung / Anthropologie, LMU München); Leitung des Kursteiles „Rasterelektronenmikroskopie an historischen Zahnproben zur Ermittlung des dentalen Microwear Musters“ im Wahlpflichtpraktikum Anthropologie II (2001 – 2003); Mitarbeit bei der Konzepterstellung, Gestaltung und Durchführung der Ausstellung der Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie München im Paläontologischen Museum, München

Berufliche Tätigkeiten vor dem Studium

- 9/ 1978 – 10/ 1982 Allgemein- und Lungenfachpraxis, Forchheim und Erlangen
11/ 1984 – 2/ 1985 Dr. med. Dipl. biochem. Seuffer, Reutlingen
6/ 1985 – 12/ 1990 Institut für pharmazeutische Biologie, Lehrstuhl Prof. Dr. H. Wagner
Abt. Immunbiologie
2/ 1991 – 10/ 1991 Fa. Pharmed Dr. Liedtke, Grünwald

Berufliche Tätigkeiten während und nach dem Studium

- 1991 - 1993 Mitarbeit bei Projekten während der Semesterferien, Prof. Dr. H. Wagner, München
4/ 1992 - 12/ 1994 Prof. Dr. H. Wiczorek, München
5/ 1994 Institut für Anthropologie und Humangenetik,
Mitarbeit im Grundpraktikum Anthropologie II
12/ 1997 - 08/ 1999 Studentische Hilfskraft in der Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie,
München. Magazinierung und Aufbau einer Datenbank
1/ 2003 - 09/ 2005 Unfallchirurgische Klinik Dr. Rinecker, München

Publikationen

Ein Teil der in der vorliegenden Arbeit dargestellten experimentellen und anthropologischen Untersuchungen bzw. Ergebnisse sowie weitere Analysen aus dem Gebiet der Dentalen Microwear wurde bereits im Rahmen von Vorträgen bzw. als Poster vorgestellt und in Abstract-Form sowie als Kongressbeitrags-Veröffentlichung sowie als Originalartikel publiziert.

Vorträge

I.L. Gügel (1999): Simulation von Dentaler Microwear. Vortrag auf dem APPA-Workshop „Binnengliederungen - Biokulturelle Differenzierungen in historischen Bevölkerungen in Göttingen 07. - 08.10.1999.

I.L. Gügel (2000): Microwear und Abrasion: Untersuchungen an Zahnschmelz historischer Populationen und von Simulationsexperimenten. Vortrag. 4. Kongreß der Gesellschaft für Anthropologie (GfA) in Potsdam 25. - 28.09.2000.

I.L. Gügel, G. Grupe, K.-H. Kunzelmann (2001): Simulation and 3D-Laser-Scanning of Dental Abrasion. Vortrag. XIV Congress of International Union of Prehistoric and Protohistoric Sciences in Liege, Belgien 02. - 08.09.2001.

I.L. Gügel (2002): Variation in dental microwear and abrasion in Southern Germany: 7500 BP to the Early Middle Ages. Vortrag. International Workshop “Deciphering ancient bones: The research potential of bioarchaeological collections” in München, Germany 19. – 20. July 2002.

I.L. Gügel (2004): Dentale Microwear von Erwachsenen und Kindern aus dem Spätmesolithikum des Süddeutschen Raumes. Vortrag auf dem APPA-Workshop, Göttingen, 1.-2. Oktober 2004.

I.L. Gügel (2005): Dentale Microwear: Worin liegt ihre Bedeutung? Vortrag. Kongress des wissenschaftlichen Nachwuchses der Anthropologie, Göttingen, Germany 18. – 20.03.2005.

Originalarbeiten in Wissenschaftlichen Zeitschriften

I.L. Gügel, G. Grupe, K.-H. Kunzelmann (2001): Simulation of dental microwear: Characteristic traces by opal phytoliths give clues to ancient human dietary behavior. Amer J Phys Anthropol 114, 124-138.

I.L. Gügel (2001): Microwear und Abrasion: Untersuchungen an Zahnschmelz historischer Populationen und von Simulationsexperimenten. In: Homo – unsere Herkunft und Zukunft. Band zum Proceedings of the 4th Congress of the Gesellschaft für Anthropologie (GfA), Cuvillier Verlag Göttingen, S 384-390.

I.L. Gügel, K.-H. Kunzelmann (2002): Simulation and 3D-Laser-Scanning of Dental Abrasion. (eds.) In: Mafart B., Delingette H. (Eds) Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Actes du XIVème Congrès UISPP, Université de Liège, Belgique, 2-8 Septembre 2001, pp 83–88. (BAR International Series 1049).

I.L. Gügel (2003): Variation in dental microwear and abrasion in ancient human groups of southern Germany: 7500 BP to the Early Middle Ages. In: Grupe G. and Peters J. (eds.). Documenta Archaeobiologica. Deciphering ancient bones. The research potential of bioarchaeological collections. Marie Leidorf GmbH, Rahden/Westf. pp 227 - 246

Posterpräsentationen

I.L. Gügel, K.-H. Kunzelmann, G. Grupe (1998): Simulation of abrasion and microwear on prepared segments of human enamel. Posterpräsentation. 11th Congress of the European Anthropological Association „Humans and Environment“. 30. 08. - 03.09.1998, Jena, Germany.

G. Grupe, I.L. Gügel, N. Strott (2003, Poster): Life-histories in human teeth on the microstructural, ultrastructural and molecular level. Posterpräsentation. 72th Annual Meeting of the American Association of Physical Anthropology. Tempe, Arizona 23. – 26. April 2003.

Erklärung

Hiermit erkläre ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst zu haben und dabei keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben.

München, Juni 2005

Irene Luise Gügel