

Funktionelle computergestützte Kauflächenmodellation

Vom Promotionsausschuß der
Technischen Universität Hamburg - Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor - Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Philip von Schroeter
aus Wiesbaden

1999

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Rall

2. Gutachterin: Prof. Dr. med. dent. Ursula Platzer

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Dezember 1999

Schriftenreihe des Arbeitsbereichs
Werkzeugmaschinen und Automatisierungstechnik
der Technischen Universität Hamburg-Harburg

Band 12

Philip von Schroeter

**Funktionelle computergestützte
Kauflächenmodellation**

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

von Schroeter, Philip:

Funktionelle computergestützte Kaufflächenmodellation/Philip von Schroeter.

- Als Ms. gedr. - Aachen : Shaker, 2000

(Schriftenreihe des Arbeitsbereichs Werkzeugmaschinen und
Automatisierungstechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg;
Bd. 12)

Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 1999

ISBN3-8265-7198-3

Copyright Shaker Verlag 2000

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 3-8265-7198-3

ISSN 1438-8529

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Für

Paul Merton, John Clees, Michael Palin,
Angus Deayton, Billy Connolly, Rowan Atkinson,
Matt Groening, Steve Coogan und Loriot

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zum größten Teil während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Arbeitsbereich Werkzeugmaschinen und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. **Klaus Rall**, der den Arbeitsbereich leitet und die Arbeit betreut hat, danke ich für präzise, konstruktive Kritik und die Schaffung der nötigen Freiräume zum konzentrierten, wissenschaftlichen Arbeiten.

Frau Prof. Dr. med. **Ursula Platzer**, Direktorin der Zahn-, Mund- und Kieferklinik des Universitätskrankenhauses Hamburg-Eppendorf, danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Mein Dank gebührt weiterhin folgenden Personen, die wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben:

Dr. Dr. med. dent. **Dieter Edinger**, niedergelassener Zahnarzt in Hamburg und engagierter Wissenschaftler, der diese Arbeit angeregt hat, für zahlreiche Gespräche sowie praktische Hilfe;

Dr. med. dent. **Oliver Ahlers**, Oberarzt in der ZMK-Klinik des UKE, für viel Wissensvermittlung und gemeinsame Stunden beim Verfassen eines erfolgreichen DFG-Antrags;

Herrn Ztm. **Michael Heinz Polz**, der mir bei zwei Treffen eindrucksvoll Zusammenhänge von Morphologie und Funktion der Kauflächen erklärt hat;

den ebenfalls wissenschaftlich aktiven Zahnärzten Dr. med. dent. **Franz Josef Ahrens** in Dormagen und Dr. med. dent. **Wolfram Bücking** in Wangen/Allgäu für ausführliche Gespräche mit vielen guten Anregungen;

auch Dr. rer. nat. **Günter Saliger**, Fa. Sirona, und Dr. med. dent. **Klaus Wiedhahn** für detaillierte Informationen über das CEREC-System.

Meinen ehem. Kommilitonen und Institutsmitarbeitern möchte ich danken, speziell Dr.-Ing. **Andreas Bregas** und Dr.-Ing. **Holger Gräßner**: Herrn Bregas für die maßgeschneiderte Entwicklung spezieller Elemente seines hervorragenden Graphikprogramms *Fastdraw* und Herrn Gräßner für Hilfestellungen in Wort und Programm.

Dank gebührt schließlich meinem Bruder **Thomas** für viele Anregungen und eine sehr gründliche Korrektur des Entwurfs.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	1
1 Einleitung	4
2 Stand der Forschung und Technik	7
2.1 Morphologie und Funktion der Seitenzähne	7
2.1.1 Kauflächenmorphologie der ersten Molaren	7
2.1.2 Statische Okklusion	9
2.1.3 Dynamische Okklusion	12
2.1.4 Kräfte	14
2.2 Konventionelle Restaurationstechniken	16
2.2.1 Werkstoffe	16
2.2.2 Methoden	17
2.2.3 Instrumente und Hilfsmittel	17
2.2.4 Berücksichtigung der Kaufunktion	18
2.3 Computergestützte zahntechnische Verfahren	19
2.3.1 Zahnvermessung	20
2.3.2 Vermessung der relativen Kaubewegung	21
2.3.3 Integrierte Verfahren: Zahnvermessung, Modellation, Fertigung	22
2.3.4 Vergleich zweier Modellationsverfahren	24
3 Zielsetzung und Vorgehen	28
3.1 Funktionelle computergestützte Kauflächenmodellation	28
3.2 Vorgehen	29
3.2.1 Verfahren	29
3.2.2 Implementierung und Erprobung	30

4	Eingangsdaten	31
4.1	Zahngeometrie und Kieferbewegungen	31
4.2	Simulation der registrierten Kieferrelation	35
4.2.1	Ermittlung der Transformationsmatrix	35
4.2.2	Umrechnung auf das Oberkiefer-Grundgitter	38
4.2.3	Kontrolle der erzielten Kieferrelation	39
4.3	Berechnung des funktionellen Gegenkiefers	40
5	Aufbau einer funktionellen Kauffläche	42
5.1	Systematik der Aufwachstechniken	42
5.1.1	Fissuren	43
5.2	Gestaltungsregeln	45
6	Ermittlung der Flächenstützpunkte	46
6.1	Kaufflächenrand	46
6.2	Höckergrundgestalt	48
6.2.1	Zentrale Fossa und Höckerspitzen	48
6.2.2	Konstruktion des Höckergrundrisses	50
6.2.3	Räumliche Höckergestalt	53
6.2.4	Okklusale Kontakte auf tragenden Höckern	54
6.3	Kaufächendetails	57
6.3.1	Grundriß	58
6.3.2	Räumliche Detailgestalt	59
6.3.3	Okklusale Kontakte auf Detailelementen	60
6.4	Zahnspezifische Teilmodelle	61
7	Mathematisches Kaufflächenmodell	62
7.1	Anforderungen	62

7.2	CAD-Volumenmodellierer	63
7.3	Flächenmodellation mit verteilten Daten	65
7.3.1	Shepard- und radiale Basisfunktionsmethoden	66
7.3.2	Finite-Elemente-Methoden	66
7.4	Berechnung von Ableitungsdaten	71
8	Verfahrenserprobung	73
8.1	Eingangsdaten	73
8.2	Höckermodellation	74
8.3	Detailelemente	76
8.3.1	Transversalgrat	76
8.3.2	Mesiopalatinaler Höcker	77
8.3.3	Distobuccaler Höcker	77
8.3.4	Mesiobuccaler Höcker	77
8.3.5	Mesiale Randleiste und Kontaktlage	78
8.4	Beurteilung der Modellation	78
8.4.1	Schnittdarstellungen	78
8.4.2	Statische Okklusion	80
8.4.3	Dynamische Okklusion	82
8.5	Fazit	83
9	Zusammenfassung	85
	Literatur	87
	Begriffsindex	93

Abkürzungen und Formelzeichen

In Klammern ist für jedes Zeichen das Kapitel des ersten Auftretens angegeben.

Falls in der Definition Begriffe aus dem Index verwendet werden, sind diese durch einen Pfeil (\rightarrow) gekennzeichnet.

Abkürzungen und Kennzeichnungen

A	\rightarrow Anatomischer Gegenkiefer	(2.2.4)
a	Begrenzungslinie \rightarrow Fossa - Präparationsrand	(6.2.2)
b	Grat Höckerspitze - Präparationsrand	(6.2.2)
CAD/CAM	Computer-Aided Design and Manufacturing	(2.3)
C++	Programmiersprache	(3.2.2)
c	Grat \rightarrow Fossa - Höckerspitze	(6.2.2)
F	1) \rightarrow Funktioneller Gegenkiefer	(2.2.4)
	2) \rightarrow Fossa	(6.2.2)
FGP	Functionally Generated Path	(2.2.4)
K	Kontaktpunkt	(6.2.4)
OK	Oberkiefer	(4.2.2)
R	Punkt auf dem Präparationsrand	(6.2.2)
S	Höckerspitze	(6.2.2)
UK	Unterkiefer	(4.2.2)
3D	dreidimensional	(2.3.1)

Formelzeichen

Arabische Großbuchstaben

C^X	Kurven- bzw. Flächenanschluß; X=0: stetig; X=1: einfach differenzierbar	(5.2)
D_{min}	Minimale Wandstärke einer Keramikrestauration	(6.1)
F	Kraft im Kontaktpunkt einer Kaufläche	(2.1.4)

F_N	Normalkomponente von F	(2.1.4)
F_T	Tangentialkomponente von F	(2.1.4)
P	Dreieck auf dem Oberkiefer	(4.1)
Q	Dreieck auf dem Unterkiefer	(4.1)
R	Rotationsmatrix, Anteil von T	(4.2.1)
r	Index für Präparationsrand	(6.1)
S_A	Flächenelement des \rightarrow anatomischen Gegenkiefers	(4.3)
S_F	Flächenelement des \rightarrow funktionellen Gegenkiefers	(4.3)
s	Index für Höckerspitze	(6.2.2)
T	homogene Transformationsmatrix	(4.2.1)
V	Translationsmatrix, Anteil von T	(4.2.1)
L	Bogenlänge einer räumlichen Kurve $z(x, y)$	(6.2.3)
E	Dreiecksebene	(7.4)

Arabische Kleinbuchstaben

b	\rightarrow bucco-linguale (\rightarrow bucco-palatinale) Kronenbreite	(6.2.1)
c	Bernstein-Bézier-Koeffizient	(7.3.2)
e	Drehachse einer Rotation (Anteil von T)	(4.2.1)
k	Anfangssteigung	(6.3.2)
l	Längenparameter einer räumlichen Kurve $z(x, y)$	(6.2.3)
n	Gratexponent	(6.2.3)
n_P	Normalenvektor des Dreiecks P	(4.2.1)
n_Q	Normalenvektor des Dreiecks Q	(4.2.1)
p	Stützpunkt auf dem Oberkiefer	(4.1)
q	Stützpunkt auf dem Unterkiefer	(4.1)
r	Abstand von der momentanen Unterkiefer-Drehachse	(4.1)
r_d	Abstand eines \rightarrow distalen Zahnrandes von dieser Achse	(4.1)
r_m	Abstand des \rightarrow mesialen Zahnrandes von dieser Achse	(4.1)
r_p	Verzeichnung des Oberkieferkontaktpunktes p	(4.1)
r_q	Verzeichnung des Unterkieferkontaktpunktes q	(4.1)

s	Ableitungssprung	(6.1)
u	Baryzentrische Koordinate	(7.3.2)
v	Baryzentrische Koordinate	(7.3.2)
w	Baryzentrische Koordinate	(7.3.2)
x	Koordinate; positiv nach links	(4.1)
Δx	Translation oder Abstand nach links / rechts	(4.1)
y	Koordinate; positiv nach \rightarrow ventral	(4.1)
Δy	Translation oder Abstand nach \rightarrow ventral / \rightarrow dorsal	(4.1)
z	Koordinate; positiv nach \rightarrow caudal	(4.1)
Δz	Translation oder Abstand nach \rightarrow caudal / \rightarrow cranial	(4.1)
z_x	$\delta z / \delta x$	(7.3.2)
$z_{i,x}$	$\delta z_i / \delta x$	(7.3.2)

Griechische Buchstaben

α	1) Richtungscosinus der Drehachse e bezüglich x	(4.2.1)
	2) Winkel der resultierenden Kontaktkraft (x/z -Ebene)	(8.4.2)
β	1) Richtungscosinus der Drehachse e bezüglich y	(4.2.1)
	2) Winkel der resultierenden Kontaktkraft (y/z -Ebene)	(8.4.2)
γ	Richtungscosinus der Drehachse e bezüglich z	(4.2.1)
Δ	Fehlermaß für den Abstand zweier Kontaktpunkte	(4.1)
ϑ	Drehwinkel einer Rotation R	(4.2.1)
σ	Gewichtsfunktion zur Berechnung von Ableitungsdaten	(7.4)
φ	Kieferöffnungswinkel um die x -Achse	(4.1)
ω	Gewichtsfunktion zur Berechnung von Ableitungsdaten	(7.4)

Schreibweise

Die in abgesetzten und zentrierten Formeln auftretende Summendarstellung

$$\sum_a^b C$$

ist identisch mit der im Text verwendeten Schreibweise $\sum_a^b C$.