

3 MATERIAL UND METHODE

3.1 Versuchsbeschreibung

3.1.1 Technische Anordnung

Die Probanden wurden auf einer frei kippbaren Untersuchungs- liege mit Gradmesser gelagert. Die Standardpositionierung erfolgte in Anlehnung an die Lagerung nach Hallpike (Scherer 1984) in der sogenannten Optimum- bzw. Pessimumposition. Es handelt sich hierbei um jene Positionen, bei denen die horizontalen Bogengänge annähernd senkrecht stehen (Abb. 15/16).

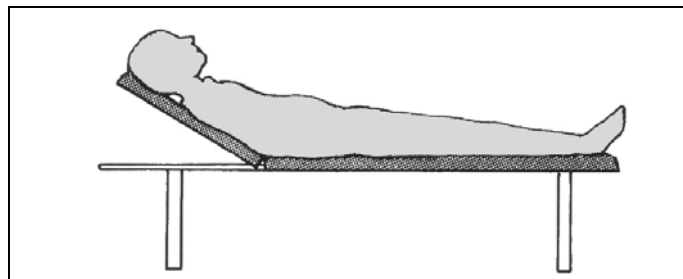


Abb.15:
Lagerung nach Hallpike

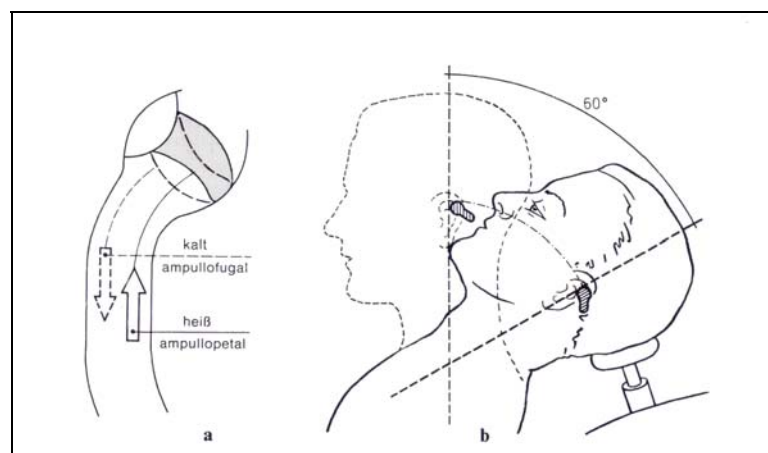


Abb.16:
Thermische Prüfung.
a Bewegung der Endolymphe
b Optimumstellung des horizontalen Bogenganges
(aus: Boenninghaus 1990)

Dem entsprechend wurde die Liege in Rückenlage zum Kopfende hin 30° angehoben, in Bauchlage um 30° aus der Waagerechten abgesenkt.

Für die Dauer der Untersuchung wurde den Probanden eine Videobrille aufgesetzt, mit deren Hilfe die Augenbewegungen als analoges Signal auf einem handelsüblichen Videorecorder (Betacam/High8) aufgezeichnet wurden.

Zur Erzeugung der kalorischen Reizantwort kam ein thermisches Reizgerät (Aquamatic, Fa. Hortmann) zum Einsatz. Die Reizgrößen und die Reihenfolge der kalorischen Stimulation (rechts warm, links warm, links kalt, rechts kalt) erfolgte gemäß den Empfehlungen der ADANO (Arbeitsgemeinschaft deutscher Audiologen und Neurootologen, Mulch und Scherer 1980). Mittels eines kleinen Gummischlauches wurde das temperierte Wasser in den Gehörgang eingespült (Abb. 17).

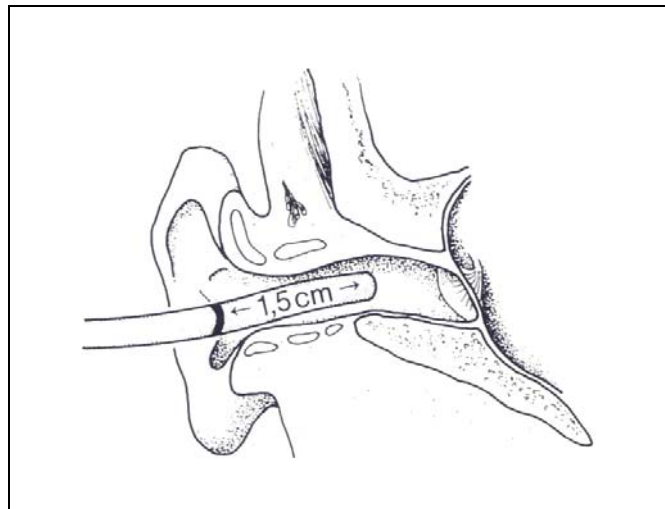


Abb. 17:
Spültechnik
(aus: Scherer 1984)

3.1.2 Datenerfassung

Die kalorisch induzierten vestibulo-okulären Reaktionen wurden mit Hilfe der VOG-Technik auf Videoband bzw. auf Festplatte aufgezeichnet und schließlich offline mit entsprechender Software ausgewertet. An der Videobrille bzw. dem Eye-Tracker (Abb. 18) werden die vor jedem der beiden Augen angeordneten Miniaturkameras durch Stellschrauben, der Kopfform und dem Augenabstand des jeweiligen Probanden angepasst, individuell justiert.

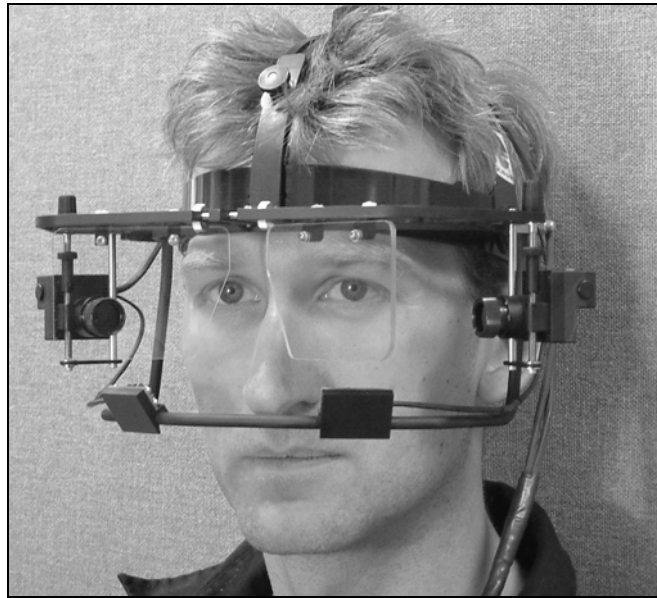


Abb. 18
Videobrille mit Kameras

Jede Kamera wurde so eingerichtet, dass die Pupille beim Blick geradeaus im Mittelpunkt des Bildes dargestellt war. Der korrekte Sitz der Brille wurde mittels Monitor im Verlauf der Untersuchungen kontinuierlich kontrolliert. Vor der vestibulären Untersuchung wurde eine Kalibrierung durchgeführt, die die Umwandlung der Bildkoordinaten in Blickwinkel ermöglicht. Ansonsten wurde die gesamte Messphase der Untersuchung in Dunkelheit durchgeführt. Dabei wurden die Augen mittels unsichtbaren Infrarot-Leuchtdioden beleuchtet. Auf diese Art und Weise wurde eine Fixation und damit die Unterdrückung des Vestibulo-Okulären-Reflexes (VOR) vermieden.

In der Regel wurde nur monokulär aufgezeichnet. Bei einer ausgewählten Gruppe ($n = 8$) wurden binokuläre Aufzeichnungen gemacht um die Konjugiertheit des Vestibulo-Okulären-Reflexes zu klären.

3.2 Probandenkollektiv

$n=36$, ♀=20, ♂=16

Alter: min. 22, max. 45, Mittelwert: 30 Jahre (tabellarische Auflistung siehe Anhang)

3.2.1 Ein-/Ausschlusskriterien

Zunächst wurden bei allen sechsunddreißig Probanden anamnestisch Vorerkrankungen und Operationen der Ohren ausgeschlossen, insbesondere hatte keiner der Probanden jemals an einer Störung des Gleichgewichtssystems oder einer neurologischen Erkrankung gelitten. Die untersuchten Personen waren Herz-Kreislauf gesund und litten nicht unter wesentlichen Vorerkrankungen.

Am Untersuchungstag wurde mittels Ohrmikroskopie ein aktueller Trommelfellbefund erhoben, um Defekte und Adhäsivprozesse als absolute oder relative Kontraindikationen für die thermische Prüfung auszuschließen und eventuelle Störfaktoren (z.B. Cerumen obturans) zu beseitigen. Alle Probanden wiesen reizlose, intakte Trommelfelle auf. Lediglich ein Proband musste wegen extrem enger Gehörgänge und dadurch nahezu Unmöglichkeit der thermischen Reizung aus der Studie ausgeschlossen werden. Es konnte bei keinem Patienten ein Spontan- oder Provokationsnystagmus festgestellt werden.

Die Probanden wurden darüber aufgeklärt, dass sie mindestens vierundzwanzig Stunden vor dem vereinbarten Untersuchungstermin keinen Alkohol, Medikamente oder sonstige Substanzen zu sich nehmen dürfen. Die Beherzigung dieser Aufforderung konnten alle Probanden am Untersuchungstag glaubhaft versichern. Brillen- oder Kontaktlinsenträger mussten für die Untersuchung ihre Sehhilfe ablegen.

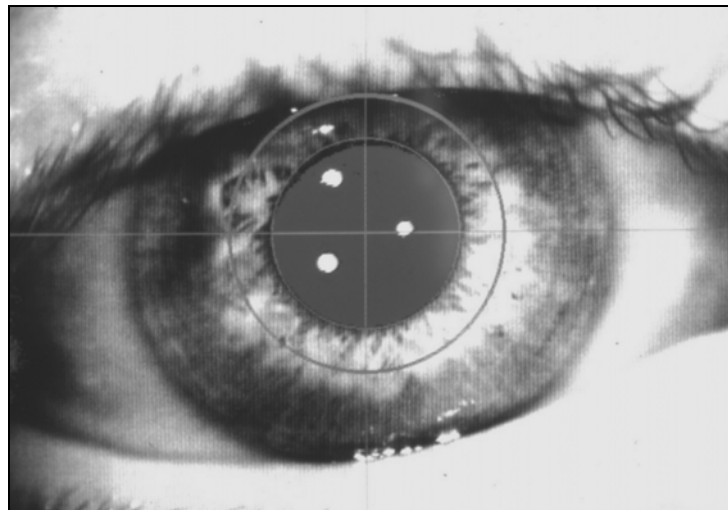
3.3 Versuchsdurchführung

Nach Lagerung in Optimumposition und Anpassung der Videobrille wurde bei freigegebenem Blickfeld eine erste Systemkalibrierung durchgeführt. Zu diesem Zweck erhielt der Proband ein Kalibrierkreuz, welches Blicksprünge von zehn Grad in horizontaler wie in vertikaler Richtung vorgab. Dieses wurde in definiertem Abstand (dreißig Zentimeter ab Apex nasi) von dem Patienten selbst derart gehalten, dass die vier markierten Endpunkte des Kreuzes gut sichtbar waren und sich die horizontale Ausrichtung mit der subjektiven Horizontalen eines jeden Probanden deckte. Sodann wurde der Proband vom Untersucher in regelmäßigem Zeittakt aufgefordert, die markierten Endpunkte des Kreuzes zu fixieren. Es wurden alle zwanzig Sekunden im Wechsel horizontale bzw. vertikale Blicksprünge durchgeführt und über eine Gesamtdauer von neunzig Sekunden mittels Videookulographie aufgezeichnet.

Anschließend wurde nach Lichtausschluss mittels Kopfabdeckung eine klassische thermische Reizung der Gleichgewichtsorgane via äußeren Gehörgang mit dreißig Grad Celsius und

vierundvierzig Grad Celsius temperiertem Wasser durchgeführt. Die durch diese Reizung erzeugte komplexe Nystagmusreaktion wurde ebenfalls mittels Videookulographie aufgezeichnet (Abb. 19). Die Aufzeichnungszeit umfasste die dreißig Sekunden Spüldauer und daran anschließend zweieinhalb Minuten der Reizantwort. Auf diese Art und Weise konnten Beginn und langsames Abflauen der Reaktion beobachtet werden. Zwischen den einzelnen Spülungen wurde eine Pause von jeweils zehn Minuten eingehalten.

Am Ende jeder Versuchsreihe wurde erneut eine Kalibrierung durchgeführt. Während der gesamten Untersuchung wurde die Position des bzw. der Augen mittels Monitor überwacht und ggf. eine erneute zwischenzeitliche Kalibrierung vorgenommen, um einen eventuellen Messfehler durch Verrutschen der Maske zu vermeiden.



*Abb. 19:
Augenausgangsposition (Monitor)*

Bei fünf der sechsunddreißig untersuchten Probanden wurde der oben beschriebene Versuch zusätzlich in Bauchlage mit gleicher zeitlicher Abfolge und entsprechenden Kalibrierungen durchgeführt.

Bei weiteren acht Probanden wurden die vestibulo-okulären Reaktionen binokulär aufgezeichnet.

Der gesamte Versuch wurde in einem abgedunkelten, von äußeren Reizen abgeschlossenen Raum durchgeführt.

3.4 Datenauswertung

Wie bereits erwähnt wurden Aufzeichnung sowie Auswertung der erhobenen Daten mit Hilfe speziell entwickelter Computerprogramme durchgeführt. Diese ermöglichen eine qualitative und quantitative Auswertung der aufgezeichneten Videosequenzen. So kann eine objektive Messung der dreidimensionalen Augenposition über die Zeit dargestellt werden. Das Vorgehen gestaltete sich wie folgt.

3.4.1 Digitalisierung der analogen Daten

Das Videosignal des Augenbildes wird vom Videorekorder in ein Bildverarbeitungssystem eingespeist, dort zunächst gefiltert und anschließend mit einem Signalverstärker durch Einstellung von Offset und Verstärkung ein kontrastreiches Bild der Iris erzeugt. Die Einstellungen werden interaktiv vom Bearbeiter durch Betrachten des digitalisierten Bildes auf dem Kontrollmonitor am Computer vorgenommen. Dieses Signal wird mit 10 MHz und 8 Bit Auflösung abgetastet und so kontinuierlich 25 Bilder/s mit einer räumlichen Auflösung von 768 (horizontal) mal 512 (vertikal) Bildelementen (Pixel) digitalisiert.

Bei den späteren Aufzeichnungen wurde ein Nachfolgemodell benutzt, das mit Digitalkameras ausgestattet ist und eine entsprechende digitale Aufzeichnung auf der Festplatte des Systemrechners erlaubt.

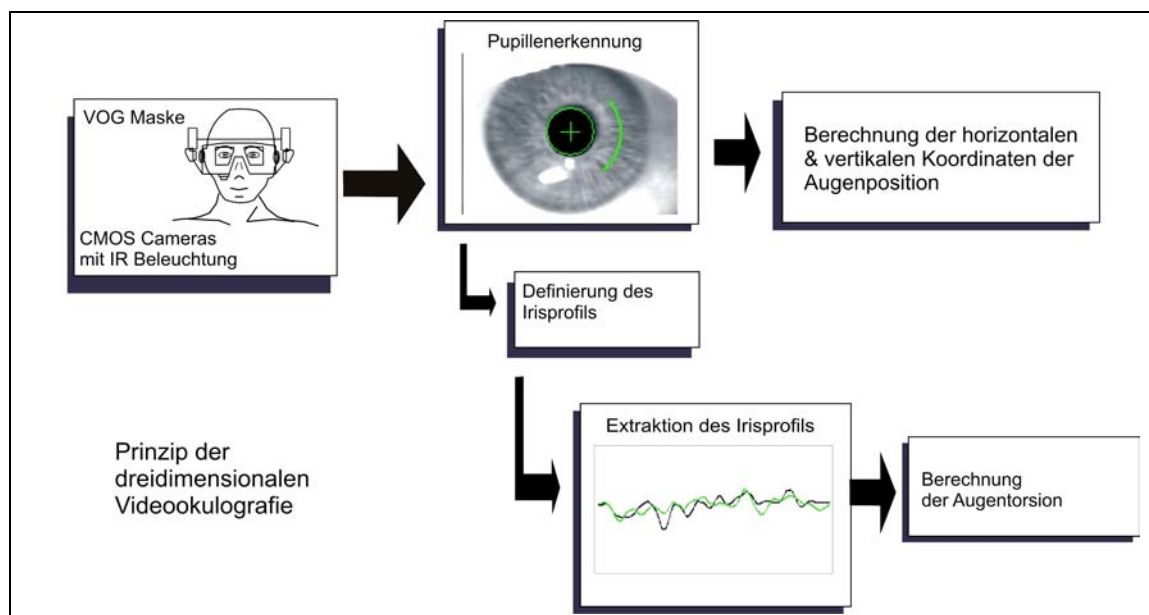


Abb. 20:
Aufzeichnungs- und Analysesystem der Videookulografie

3.4.2 Kalibrierung des Systems

Die Bewegung des Auges wird auf dem Bildschirm in Pixel dargestellt und in dieser Dimension gemessen und muss daher in Grad umgerechnet werden. Nach Digitalisierung der Videoaufzeichnungen wurden daher für jeden Probanden einzeln anhand der aufgezeichneten Kalibrierungen die unterschiedlichen Kalibrierungsfaktoren für die horizontale und vertikale Achse ermittelt und zur Berechnung herangezogen. Somit entsteht schließlich die in der Abbildung 22 gezeigte kalibrierte Kurve, aus der die Geschwindigkeit der langsamen Phase (GLP) des Nystagmus als quantitativer Parameter in Grad/Sekunde entnommen werden kann.

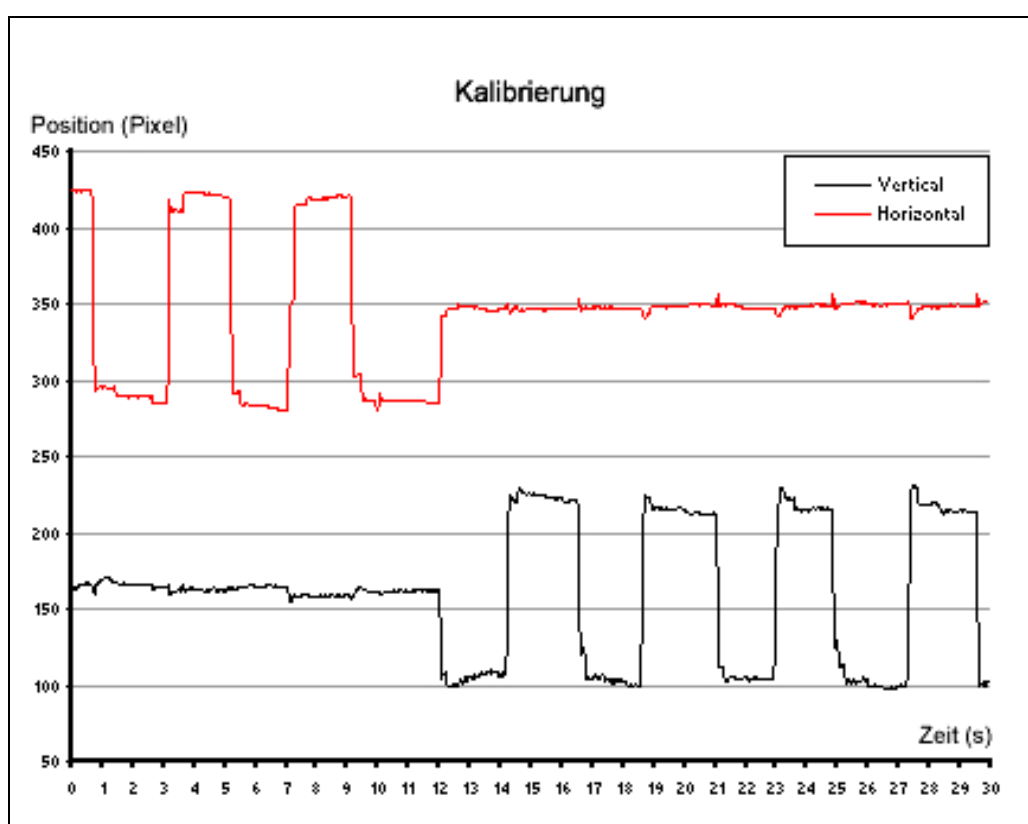


Abb. 21:
Kalibrierungskurve

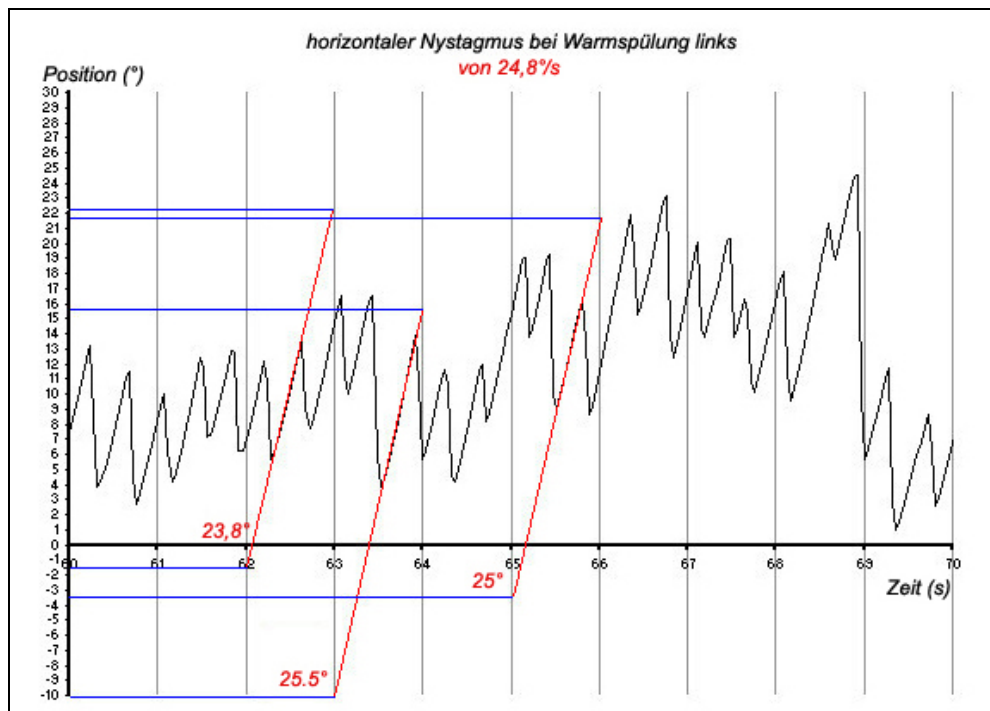


Abb. 22:
Horizontaler Nystagmus (kalibriert) 61.-70. Sekunde nach Beginn der Spülung
Ermittlung der mittleren GLP

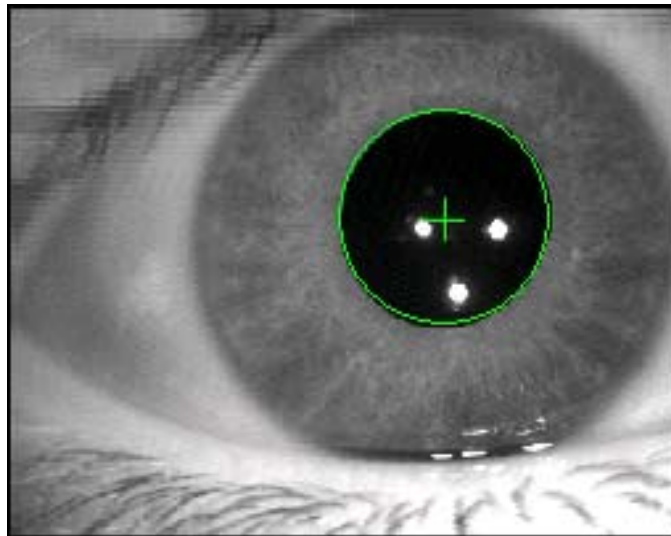
Die Augenausgangsposition, welche naturgemäß nicht bei allen Probanden gleich ist, wurde numerisch vereinheitlicht, so dass die Daten später direkt verglichen werden konnten.

Würde die interindividuelle Differenz der Augenposition nicht ausgeglichen, so wären die Kurvenverläufe artifiziell in die eine oder andere Richtung verschoben und so erstens die Vergleichbarkeit nicht mehr gegeben und zweitens könnten sich falsch positive oder negative Werte ergeben.

Bei der Betrachtung der torsionalen Komponente der Augenbewegungen erübrigt sich eine derartige Kalibrierung, zumal der Bulbus um einen annähernd fixen Mittelpunkt dreht.

3.4.3 Auswertungsverfahren horizontal und vertikal

Zunächst wurde individuell, an die Helligkeit der Aufnahme, die Ausleuchtung der Umgebung sowie den Kontrast des aufgezeichneten Auges angepasst, das Abbild der Pupille durch Setzen einer Helligkeitsschwelle identifiziert. Auf diese Weise wird dem Rechner ermöglicht, die Pupille als einzelnes Objekt zu erkennen und ihren Mittelpunkt zu bestimmen. Die Verschiebungen dieses Mittelpunktes im Vergleich zur Referenzposition werden in Pixel erfasst und in Grad umgerechnet. Es wurden fünfundzwanzig Bilder pro Sekunde von der aufzeichnenden Kamera erfasst. Zur Auswertung wurde bei jedem einzelnen Bild die Position des Pupillenmittelpunktes bestimmt, welcher den jeweiligen horizontalen bzw. vertikalen Koordinaten des Auges entspricht, die über die Zeit aufgetragen werden können. Die so gewonnenen Kurven zeigen die horizontale und die vertikale Komponente der komplexen Augenbewegung (Abb. 25/26).



*Abb.23:
Pupillenmarkierung zur vertikalen und horizontalen Analyse*

3.4.4 Auswertungsverfahren torsional

Die Bestimmung der torsionalen Bewegungen des Auges bedarf eines höheren Rechenaufwandes, zumal der Pupillenmittelpunkt als ein annähernd fixer Drehpunkt nicht als Vergleichsgröße herangezogen werden kann, wenngleich sich die Iris um die Blickachse dreht. Bei dem verwendeten Verfahren macht man sich die individuelle Ausprägung der Textur-Merkmale der Iris hinsichtlich ihrer Struktur und ihre Pigmentierung zu Nutze. Zunächst wird die Aufnahme des Probandenauges derart verarbeitet, dass die Pigmentierung seiner Iris in Grauwerten erfasst und die Gestaltung ihre Oberfläche festgehalten werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, den gesamten Irisbereich abzutasten, und diejenige Stelle auszumachen, an der die Irisstruktur am ausgeprägtesten ist und die Spannbreite der Grauwerte am größten. Diese Merkmale werden "landmarks" genannt. Ebenso wie ein Fingerabdruck sind Irisstruktur und Färbung bei jedem Individuum unterschiedlich. So wird es erklärlich, dass die eine Iris bessere „landmarks“ bietet als die andere. In der Regel bieten dunkle Augen die besseren Voraussetzungen für die Analyse mittels VOG. Zur Auswertung wird durch ein wie oben beschrieben ermitteltes „landmark“ ein Ringsegment gelegt, dessen Zentrum der Mittelpunkt der Pupille ist. Dieser Ring kann in seinem Radius und in seiner Breite variiert werden, um die vorhandenen „landmarks“ bestmöglich zu erfassen. Anschließend werden genau jene Areale der Iris abgetastet, die dieses Ringsegment markiert. Der Rechner tastet nun bei jedem der aufgezeichneten Bilder das durch den Ring markierte Areal ab und vergleicht die dortige Irisstruktur bzw. die sich daraus ergebende Signatur mit der Referenzstruktur, die vom Untersucher derart festgelegt wird, dass sie auf dem entsprechenden Bild gut zu sehen ist. Letztlich ist die relative Bewegung des Auges entscheidend, zumal das erste Bild auch nachträglich als Nullpunkt bzw. Ausgangslage definiert werden kann. Auf diese Weise entsteht Bild für Bild eine Messung der torsionalen Position des Auges (Bulbus) mit einer Auflösung von kleiner als 0,1 Grad, die wiederum über die Zeit aufgetragen werden kann. Eine so gewonnene Kurve zeigt die torsionale Komponente des komplexen Nystagmusbildes (Abb.25/26).

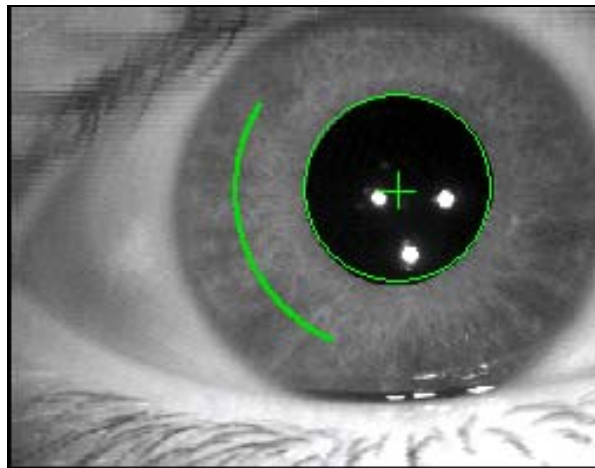


Abb 24:
Markierung von landmarks zur torsionalen Analyse

Etwaige Blinzelschläge, die sich als solche gut ausmachen lassen, zumal sie in allen Freiheitsgraden gleichzeitig auftreten, wurden als „Ausreißer“ betrachtet und manuell aus den Kurven eliminiert.

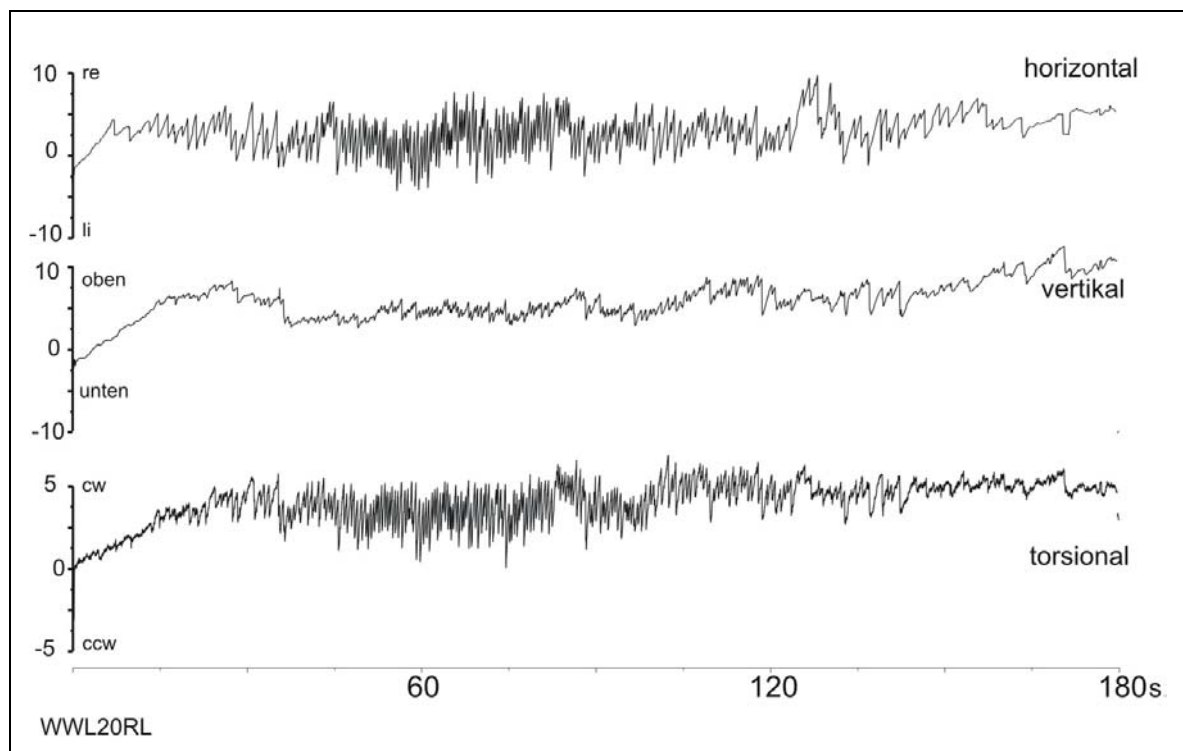


Abb. 25:
Rohdaten des dreidimensionalen Nystagmus

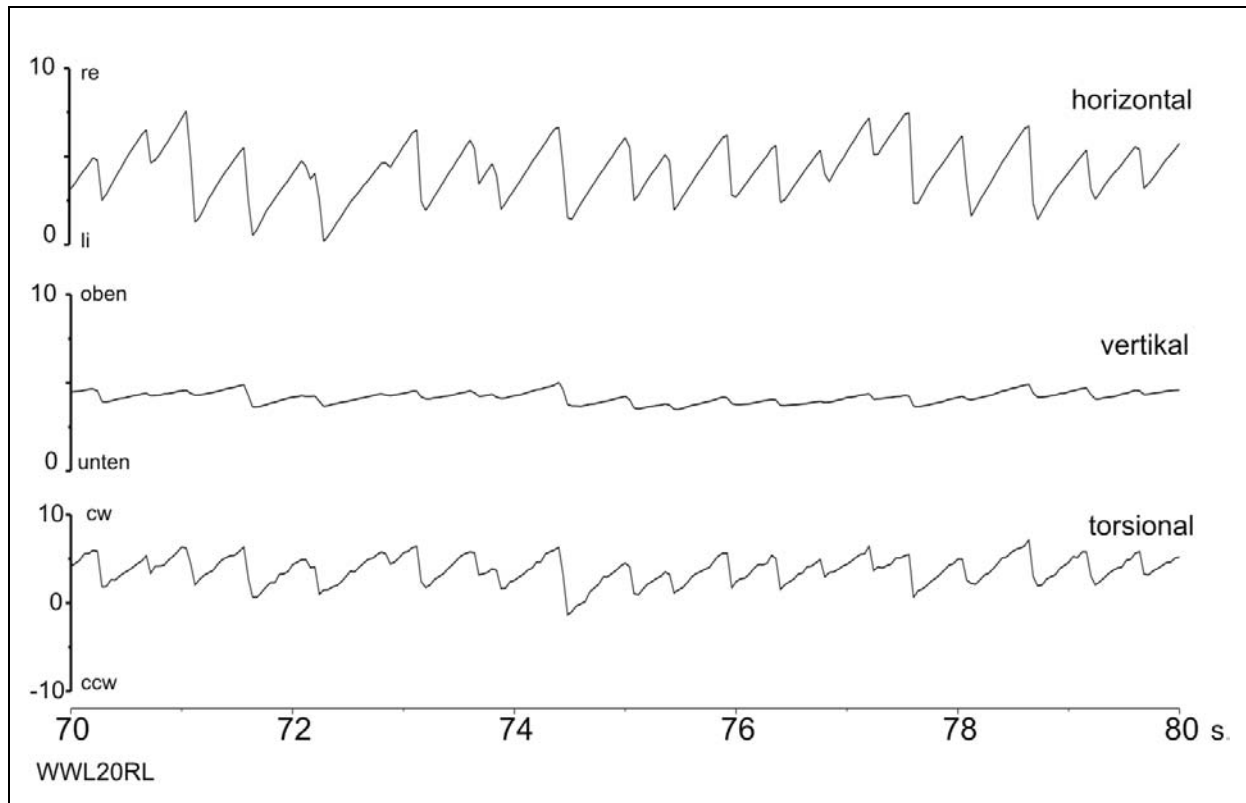


Abb. 26:
Dreidimensionales Nystagmusbild

Weiterhin wurden durch Anwendung eines Tiefpassfilters die durch Nystagmen entstandenen Kurvenbewegungen geglättet, um die tonischen, das heißt die langsamen Augenbewegungen explizit betrachten zu können (Abb. 27).

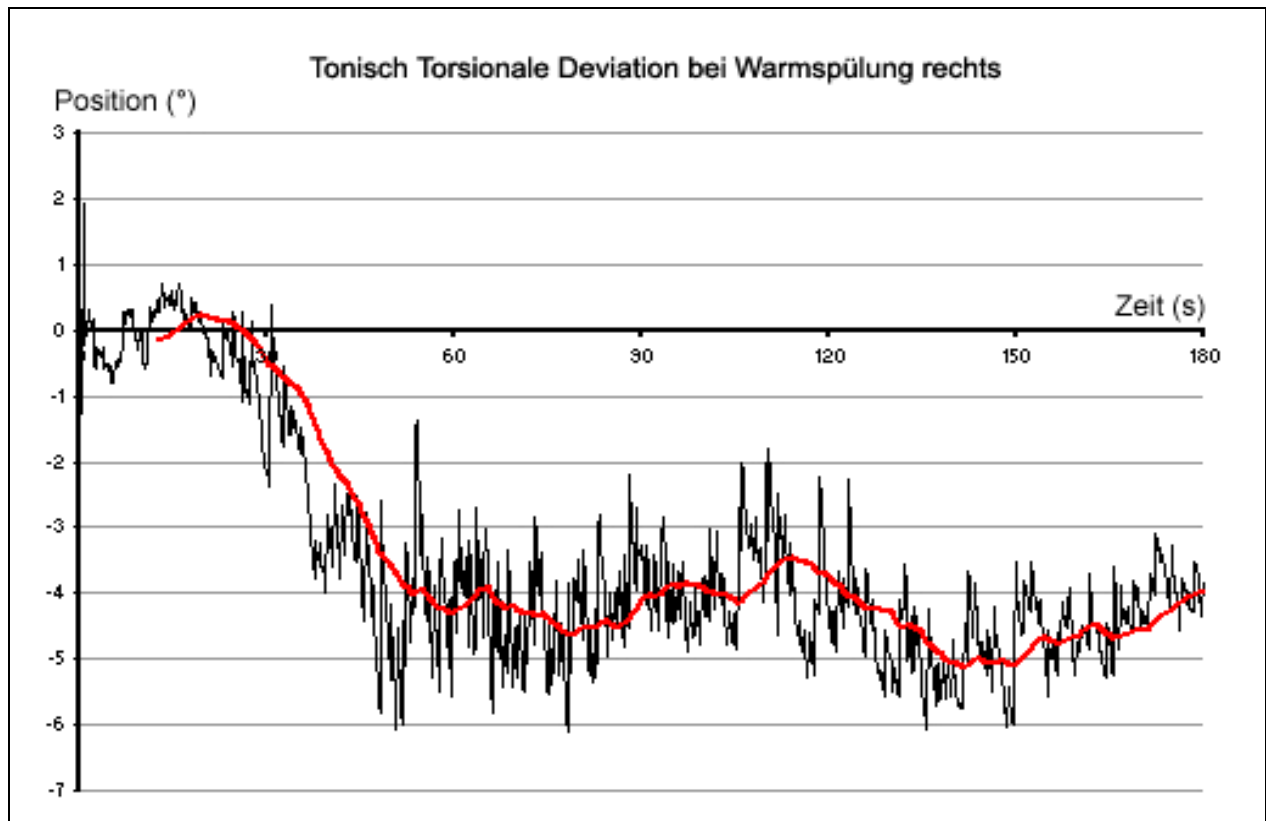


Abb. 27:
Darstellung der TTD

Die auf diese Art und Weise entstandenen Verläufe der Augenbewegungskomponenten wurden nun für alle vier thermischen Reizungen getrennt betrachtet, und es wurden aus den Daten der sechsunddreißig untersuchten Probanden Mittelwerte und Streubereiche ermittelt. Die ermittelten Werte und Kurven werden im Ergebnisteil dargestellt. Ebenso wurden die Aufzeichnungen von fünf Probanden in Bauchlage, sowie acht Probanden mit binokulärer Aufzeichnung ausgewertet.

3.4.5 Kriterien zur Auswertung

Zunächst wurden die erzeugten Augenbewegungen hinsichtlich ihres Freiheitsgrades, horizontal, vertikal und torsional, getrennt betrachtet. Dabei wurde das Augenmerk sowohl auf die schnellen (Nystagmen, dynamische Komponente; Abb. 26) als auch auf die langsamen Augenbewegungen (tonische Komponente; Abb. 25) gerichtet.

Darüber hinaus wurden die Reaktionen bei Kalt- und Warmspülung verglichen, bei binokulärer Aufzeichnung die Seitengleichheit der Reizantworten betrachtet und die unterschiedliche Ausprägung insbesondere der tonischen Augenbewegungskomponente in verschiedenen Körperlagen (Rückenlage-Optimumposition, Bauchlage-Pessimumposition) untersucht.

Die Tatsache, dass die Videookulographie zu Beginn dieser Arbeit noch in den Kinderschuhen steckte, hat dazu geführt, dass das Verfahren zur Auswertung der auf Videobändern aufgenommenen Reizantworten während der Durchführung der Arbeit verfeinert und auch vereinfacht wurde. Die Validität der resultierenden Daten wurde durch Vergleiche der mittels der Ausgangsmethode erhobenen Daten immer wieder gesichert.

Zwecks Qualitätssicherung wurde das Bildmaterial der fünf Probanden, die in Rücken- und Bauchlage untersucht wurden, schließlich mittels neuester 3D-Analysetechnik (Clarke et al. 2002) erneut ausgewertet. Die sich ergebenden Kurven waren sowohl für die schnellen Augenbewegungen als auch für die langsame torsionale Komponente, der unsere besondere Aufmerksamkeit galt, annähernd deckungsgleich. Es konnte festgehalten werden, dass die Anzahl der registrierten Nystagmen und deren Steigung sich in keiner Weise veränderten.