

Aus dem Institut für gerichtliche Medizin Göttingen (Direktor: Prof. Dr. Dr. OTTO SCHMIDT) und dem Institut für mathematische Statistik Göttingen (Direktor: Prof. Dr. HANS MÜNZNER).

## Zur Rekonstruktion der Körpergröße eines Menschen aus den langen Gliedmaßenknochen\*.

Von

DIETRICH LORKE, HANS MÜNZNER und EDWARD WALTER.

### *Einleitung.*

Schon frühzeitig wurde der Versuch unternommen, von Skeletmaßen auf die menschliche Körpergröße zu schließen. ORFILA und LESUEUR veröffentlichten 1831 eine tabellarische Zusammenstellung der Körpergrößen und Längen verschiedener Knochen von 71 Toten. Diese Tabellen gestatteten erstmalig einen Einblick in die Beziehungen zwischen Knochenlängen und Körpergröße. Zur Erfassung dieser Beziehungen teilte TOPINARD 1885 das Material in Körpergrößenklassen von 5 cm Breite ein und berechnete zu jeder dieser Klassen die entsprechenden Mittelwerte der Knochenlängen.

Sehr genaue Angaben über Arbeitsweise, Meßtechnik, Berechnungsverfahren, wie auch sämtliche Meßdaten brachte ROLLET in seiner 1888 veröffentlichten Arbeit, so daß sein Material späteren Autoren wiederholt als Grundlage dienen konnte. Er untersuchte 50 männliche und 50 weibliche Leichen aus den Krankenhäusern von Lyon. Wie seine Vorgänger verwendete er irrtümlicherweise die Beziehung, die die Abhängigkeit der Knochenlängen von der Körpergröße angibt, zum Schluß von der Knochenlänge auf die Körpergröße. MANOUVRIER (1) hatte 1890 diesen Fehler bemerkt und in einer weiteren Arbeit (2) 1892 das Material von ROLLET neu bearbeitet, wobei er die Knochenlängen als Tabelleneingangswerte wählte. Er glaubte aber noch, die Abhängigkeit der Körpergröße durch das Proportionalgesetz  $y = ax$  darstellen zu können, mußte jedoch dabei feststellen, daß er mit einem einzigen Proportionalitätsfaktor nicht auskam. Er teilte daher die Knochen in mehrere Größenklassen ein und benutzte für jede einen besonderen Proportionalitätsfaktor.

Erst K. PEARSON erkannte 1899, daß die in Frage stehenden Beziehungen im Mittel am besten durch lineare Funktionen  $y = ax + b$  dargestellt werden, hatte also durch Hinzunahme des konstanten Gliedes  $b$  den entscheidenden Fortschritt gemacht. Die auf der Methode der

---

\* Herrn Prof. Dr. KARL REUTER zu seinem 80. Geburtstage in dankbarer Verehrung gewidmet.

kleinsten Quadrate beruhende und von ihm weiter ausgebauten Regresstheorie lieferte ihm die nötigen Hilfsmittel zu einer mathematisch fundierten Bearbeitung des Problems. Er beschränkte sich nicht nur auf die Darstellung der Körpergröße durch die Länge jeweils eines Knochens, sondern benutzte auch gleichzeitig mehrere Knochen, wobei er zur Herleitung seiner Formeln ebenfalls das ROLLETSche Material verwendete. Das Ziel seiner Untersuchungen war die Ermittlung der mittleren Körpergröße prähistorischer Rassen. Seine dabei vertretene Ansicht, daß die aus französischem Material gewonnenen Formeln zur Berechnung der Körpergröße auch für andere Rassen Gültigkeit haben, wurde von STEVENSON 1929 widerlegt, der den PEARSONSchen „Franzosenformeln“ seine wesentlich davon abweichenden „Chinesenformeln“ gegenüberstellte.

Im Gegensatz zu den genannten Autoren, die Körpergrößen und Knochenlängen an *Leichen* festgestellt hatten, benutzte BREITINGER 1937 ein Material von 2400 *lebenden* Männern, das vom Münchner Anthropologischen Institut gesammelt worden war. Es wurden die Gliedmaßen gemessen und daraus erst die Knochenlängen errechnet. Die Umrechnung erfolgte auf Grund von nur im Mittel geltenden Beziehungen zwischen den Gliedmaßen- und den entsprechenden Knochenlängen, die mit Hilfe von Röntgenaufnahmen ermittelt worden waren. Zur Berechnung der Körpergröße wurden Formeln angegeben, die jeweils nur einen Knochen berücksichtigen. Auf die eingehende historische Darstellung und die umfangreichen Literaturangaben in dieser Veröffentlichung sei besonders hingewiesen.

#### *Fragestellung und Material.*

In der vorliegenden Arbeit sollen Formeln zur Schätzung der *Lebendkörpergröße* aus Knochenlängen mit der besonderen Absicht hergeleitet werden, diese Formeln bei der Identifizierung von Knochenfunden zu verwenden. Da bei gleichen Knochenlängen die Körpergröße immer noch eine starke Variabilität aufweist, muß dabei über die früheren Arbeiten hinaus ein besonderer Wert auf die Angabe von Grenzen gelegt werden, innerhalb derer die tatsächliche Lebendgröße mit großer Wahrscheinlichkeit gelegen haben muß. Aus diesem Grund wird hier die neue Methode der *Toleranzgrenzen* herangezogen. Entsprechend der speziellen Zielsetzung ist es nötig, die am *lebenden* Menschen gemessene Körperlänge zu den an *Skeleten* gemessenen Knochenlängen in Beziehung zu setzen, während die älteren Autoren Körpergröße und Knochenlänge nur an den *Leichen* festgestellt haben und BREITINGER beides nur am lebenden Menschen gemessen hat.

Die Exhumierungen, die anläßlich der Überführung der in den Kriegsjahren in Deutschland verstorbenen Kriegsgefangenen vorgenommen

wurden, boten eine einzigartige Gelegenheit, das gerade zu dieser Fragestellung erforderliche Material zu erhalten. Dank dem Entgegenkommen des französischen Suchdienstes konnten die Leichenreste in über 2000 Fällen genau untersucht werden. Die daraus getroffene Auswahl erstreckte sich auf solche Toten, die 1. durch Erkennungsmarke, Einzelgrab usw. sicher identifiziert werden konnten, 2. über 19 Jahre alt geworden waren, 3. nur endgültig verkalkte Knochen aufwiesen, 4. keine anatomischen Knochenveränderungen zeigten und bei denen 5. die Körpergröße eindeutig aus Soldbüchern, Lagerkarteien oder Personalausweisen entnommen werden konnte.

Immerhin genügten 200 männliche Personen diesen Anforderungen, von denen 161 Franzosen, 27 Holländer, 9 Belgier und 3 Italiener waren.

Ihr Altersaufbau ist aus folgender Tabelle ersichtlich:

Alter . . .	19—30	31—40	41—50	51—60
Anzahl . .	93	58	34	15

Das zur Verfügung gestellte Knochenmaterial erstreckte sich auf Humerus, Ulna, Radius, Femur, Tibia und Fibula der rechten und der linken Seite. Diese Knochen wurden ohne Knorpel mit Hilfe zweier parallel verschiebbarer Platten (Schublehre) in ihrer größten Länge auf Millimeter genau gemessen.

Selbst bei der sorgfältigen Auslese des Beobachtungsmaterials waren angesichts der zahlreich vorhandenen Fehlerquellen, von denen nur falsche Identifizierungen, ungenaue Größenangaben, Verwechslungen, Abschreibefehler und Hörfehler beim Diktieren der Zahlenwerte genannt seien, fehlerhafte Zahlenangaben nicht ganz ausgeschlossen, so daß eine mathematisch-statistische Überprüfung des Materials ratsam erschien. Derartige Untersuchungen haben den Zweck, extreme Beobachtungswerte und unwahrscheinliche Kombinationen von Beobachtungswerten festzustellen und die entsprechenden Individuen als sog. Ausreißer von den weiteren Berechnungen auszuschließen. Bei dem vorliegenden Material mußte auf Grund eines solchen Prüfverfahrens, auf das hier nicht näher eingegangen werden soll, ein Individuum weggelassen werden, so daß im weiteren die Beobachtungswerte von 199 Individuen verwendet werden konnten.

#### *Die allgemeine Methode<sup>1</sup>.*

Zunächst werden Schätzformeln (Regressionsgleichungen) zur Errechnung eines Schätzwertes für den Körpergrößenmittelwert aller

<sup>1</sup> Zum Verständnis der Ergebnisse dieser Arbeit sind nur die ersten 5 und die letzten 3 Abschnitte dieses Kapitels erforderlich, während die übrigen nur mathematische Begründungen und Herleitungen enthaltenden Abschnitte nicht unbedingt gelesen werden müssen. Ebenso kann das nächste Kapitel bis auf die Schätzformeln selbst überschlagen werden.

Personen hergeleitet, die die gleichen Knochenlängen einer bestimmten Knochenkombination (beispielsweise Femur, Fibula und Ulna) haben. Dabei gehen wir von der Annahme aus, daß diese Mittelwerte lineare Funktionen der Längen der jeweils benutzten Knochen sind, übernehmen also den PEARSONSchen Ansatz. Eigene Untersuchungen am vorliegenden Material, die mit Hilfe der Streuungsanalyse durchgeführt worden sind, haben keinen Widerspruch zu dieser Annahme ergeben.

Zur Berechnung der Regressionsgleichungen werden zunächst nur die Knochen der rechten Seite herangezogen. Da die zur Verfügung stehenden 6 Knochenarten einzeln, paarweise, zu Tripeln, Quadrupeln, Quintupeln oder gar alle 6 zusammen zur Schätzung der Körpergröße verwendet werden können, gibt es schon bei Beschränkung auf die rechtsseitigen Knochen insgesamt  $6 + 15 + 20 + 15 + 6 + 1 = 63$  verschiedene Knochenkombinationen und damit ebensoviele verschiedene Schätzformeln, von denen aber, wie sich später zeigen wird, *nur einige für den praktischen Gebrauch in Frage kommen.*

Zur Aufstellung einer allgemeinen, alle diese Fälle umfassenden Formel müssen zahlreiche Bezeichnungen eingeführt werden. Die Knochenlängen der rechten Seite seien mit  $x_H$  (Humerus),  $x_U$  (Ulna),  $x_R$  (Radius),  $x_{Fe}$  (Femur),  $x_T$  (Tibia) und  $x_{Fi}$  (Fibula) also allgemein mit  $x_k$  bezeichnet, wobei  $k$  die Symbole H, U, R, Fe, T und Fi annehmen kann. Kommen in einer Formel  $p$  verschiedene Knochen vor ( $p$  kann 1, 2, 3, 4, 5 oder 6 sein), ohne daß diese im einzelnen festgelegt werden, so bezeichnen wir ihre Längen mit  $x_{k_1}, x_{k_2}, \dots, x_{k_p}$ . Beispielsweise kann bei  $p=2$  mit  $x_{k_1}$  die Femurlänge  $x_{Fe}$  und mit  $x_{k_2}$  die Fibulalänge  $x_{Fi}$  gemeint sein, aber  $x_{k_1}$  und  $x_{k_2}$  können sich auch auf jedes andere beliebige aus den 6 Knochenarten ausgewählte Paar beziehen.

$\bar{x}_{G|k_1, k_2, \dots, k_p}$  bedeute den Schätzwert der Körpergröße, den wir bei Benutzung der Knochenlängen  $x_{k_1}, x_{k_2}, \dots, x_{k_p}$  erhalten. So ist  $\bar{x}_{G|Fe}$  der Schätzwert, der sich ergibt, wenn wir nur die Femurlänge und  $\bar{x}_{G|Fe, Fi}$  der Schätzwert, wenn wir Femur- und Fibulalänge verwenden. Die diesen beiden Spezialfällen entsprechenden Schätzformeln haben auf Grund des linearen Ansatzes die Form

$$\bar{x}_{G|Fe} = b_{G|Fe} + b_{G, Fe} x_{Fe}$$

und

$$\bar{x}_{G|Fe, Fi} = b_{G|Fe, Fi} + b_{G, Fe, Fi} x_{Fe} + b_{G, Fi|Fe} x_{Fi},$$

wobei, die  $b$ -Größen Konstante sind, deren numerische Werte auf Grund des vorliegenden Beobachtungsmaterials bestimmt werden müssen. Die Bezeichnungsweise der  $b$ -Größen ergibt sich dadurch, daß der erste Index vor dem senkrechten Strich sich auf die zu schätzende Größe, hier also auf die Körpergröße  $G$  bezieht, der zweite Index dagegen auf diejenige Knochenlänge, deren Koeffizient  $b$  ist, während hinter dem Strich alle

weiteren in der jeweiligen Formel auftretenden Knochenlängen stehen. Beim konstanten Glied (oben an erster Stelle) ist sinngemäß der zweite Index vor dem senkrechten Strich weggelassen, während hinter dem senkrechten Strich sämtliche in der Formel auftretenden Knochen angeführt sind.

Bei dieser Symbolik lautet die allgemeine Formel für den sich aus den Knochenlängen  $x_{k_1}, x_{k_2}, \dots, x_{k_p}$ , ergebenden Schätzwert der Körpergröße

$$\bar{x}_{G|k_1, k_2, \dots, k_p} = b_{G|k_1, k_2, \dots, k_p} + b_{G, k_1|k_2, k_3, \dots, k_p} x_{k_1} + \dots + b_{G, k_p|k_1, k_2, \dots, k_{p-1}} x_{k_p}, \quad (1)$$

woraus durch Spezialisierung sämtliche 63 verschiedenen Schätzformeln hervorgehen.

Die numerische Bestimmung der  $b$ -Konstanten erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate unter Benutzung des vorliegenden Beobachtungsmaterials. Für die Beobachtungswerte führen wir folgende Bezeichnungen ein.  ${}_i x_G$  bedeute die auf Zentimeter genau angegebene Körpergröße des  $i$ -ten Individuums; dabei sind die Individuen von 1—199 durchnummeriert. Die gemessenen Längen der rechtsseitigen Knochen seien mit  ${}_i x_k$  bezeichnet und ebenfalls in Zentimeter angegeben, wobei wegen der auf Millimeter genauen Messung eine Dezimalstelle zu berücksichtigen ist. Der Index  $k$  kann wiederum die Symbole H, U, R, Fe, T und Fi annehmen, so daß beispielsweise  ${}_{13} x_{Fe}$  die Länge des rechten Femur beim 13. Individuum bedeutet.

Wendet man die obige allgemeine Schätzformel auf das  $i$ -te Individuum an, so erhalten wir den Schätzwert  $i \bar{x}_{G|k_1, k_2, \dots, k_p}$  für die Körpergröße, der im allgemeinen von dem Beobachtungswert  ${}_i x_G$  etwas verschieden sein wird. Der Unterschied  ${}_i x_G - i \bar{x}_{G|k_1, k_2, \dots, k_p}$  wird Restfehler genannt.

Nach der Methode der kleinsten Quadrate werden nun die  $b$ -Konstanten so bestimmt, daß die Summe der Quadrate der Restfehler, also

$$Q_{G|k_1, k_2, \dots, k_p}^2 = \sum_{i=1}^{199} ({}_i x_G - i \bar{x}_{G|k_1, k_2, \dots, k_p})^2 \quad (2)$$

ein Minimum ist, woraus sich die nötige Anzahl von linearen Gleichungen für die unbekanntenen  $b$ -Werte ergibt.

In dieser Weise könnten die Konstanten aller 63 möglichen Schätzformeln bestimmt und damit die Schätzformeln selbst aufgestellt werden. Unter ihnen sind nun für den praktischen Gebrauch diejenigen auszusuchen, die möglichst gut aber auch möglichst einfach sind. Als Gütemaß der einzelnen Schätzformeln sei zunächst der empirische mittlere Restfehler  $s_{G|k_1, k_2, \dots, k_p}$  betrachtet, der aus (2) nach der Formel

$$s_{G|k_1, k_2, \dots, k_p} = \sqrt{\frac{Q_{G|k_1, k_2, \dots, k_p}^2}{199}} \quad (3)$$

berechnet werden kann. Er ist als der mittlere Fehler der beobachteten 199 Körpergrößen gegenüber den entsprechenden Schätzwerten aufzufassen und wird in der Regel mit jeder zusätzlich verwendeten Knochenart kleiner.

Es ist aber trotzdem nicht sinnvoll, alle 6 Knochenarten zu verwenden, da der bei bestimmten Kombinationen von nur wenigen Knochen auftretende mittlere Restfehler durch Hinzunahme von weiteren Knochen nur so geringfügig vermindert werden kann, daß diese Verminderung im Bereich zufälliger Schwankungen liegt. Wir können daher derartige Knochen weglassen und kommen so zu einfacheren Formeln. Die Entscheidung darüber, wann eine derartige Verminderung des mittleren Restfehlers als zufallsmäßig zu betrachten und damit das Weglassen dieser Knochen gerechtfertigt ist, erfolgt durch statistische Tests. Die für die Anwendung dieser Tests nötige Voraussetzung, daß die beobachteten Körpergrößen eine Zufallsstichprobe von gegenseitig unabhängigen Beobachtungen aus einer Gesamtheit darstellen, in der die Körpergröße gaußverteilt ist, darf mit praktisch ausreichender Annäherung als erfüllt betrachtet werden.

Es wäre zu zeitraubend, die Berechnung aller 63 Schätzformeln durchzuführen und die im Sinne obiger Betrachtungen brauchbarste unter ihnen aufzusuchen. Daher wird von den nur einen Knochen berücksichtigenden Schätzformeln ausgegangen und die Berechtigung der Hinzunahme weiterer Knochen jeweils durch Tests untersucht, wodurch verhältnismäßig schnell zu erkennen ist, welche Knochenkombinationen zu weniger brauchbaren Schätzformeln führen und deshalb außer acht gelassen werden können.

Dieses sukzessive Vorgehen läßt sich auch auf die Berechnung der Konstanten  $b$  und der mittleren Restfehler  $s$  anwenden und ist in unserem Falle der sonst üblichen Berechnung durch Auflösung von Gleichungssystemen vorzuziehen. Im einzelnen erfolgt die Berechnung in folgender Weise.

Zunächst bilden wir die Mittelwerte

$$m_k = \frac{1}{199} \sum_{i=1}^{199} {}_i x_k \quad (4)$$

und die mittleren Fehler

$$s_k = \sqrt{\frac{1}{199} \sum_{i=1}^{199} ({}_i x_k - m_k)^2} \quad (5)$$

der beobachteten Körpergrößen und Knochenlängen, sowie die Korrelationskoeffizienten

$$r_{k_1, k_2} = \frac{1}{199 s_{k_1} s_{k_2}} \sum_{i=1}^{199} ({}_i x_{k_1} - m_{k_1})({}_i x_{k_2} - m_{k_2}) \quad (6)$$

zwischen der Größe und den Knochenarten und zwischen den Knochenarten untereinander. In den Formeln (4), (5) und (6) kann  $k$  bzw.  $k_1$  also auch die Körpergröße  $G$  bedeuten.

Die Konstanten  $b$  der nur auf dem Knochen  $k_1$  ( $k_1 = H, U, R, Fe, T$  oder  $Fi$ ) beruhenden Schätzformel

$$\bar{x}_{G|k_1} = b_{G, k_1} + b_{G, k_1} x_{k_1} \quad (7)$$

ergeben sich aus

$$b_{G, k_1} = \frac{r_{G, k_1} s_G}{s_{k_1}} \quad \text{und} \quad b_{G|k_1} = m_G - b_{G, k_1} m_{k_1}. \quad (8)$$

Der dazugehörige mittlere Restfehler folgt dann aus der Formel

$$s_{G|k_1} = s_G \sqrt{1 - r_{G, k_1}^2}. \quad (9)$$

Die Überprüfung, ob die durch die Hinzunahme eines weiteren Knochens  $k_2$  verursachte Verminderung dieses mittleren Restfehlers groß genug ist, um die zusätzliche Berücksichtigung von  $k_2$  zu rechtfertigen, kann mit Hilfe des partiellen Korrelationskoeffizienten

$$r_{G, k_2, k_1} = \frac{r_{G, k_2} - r_{G, k_1} r_{k_1, k_2}}{\sqrt{(1 - r_{G, k_1}^2)(1 - r_{k_1, k_2}^2)}} \quad (10)$$

erfolgen. Ist sein Absolutbetrag kleiner als 0,14, wollen wir auf die Hinzunahme dieses Knochens verzichten. Erst wenn  $r_{G, k_2, k_1}$  größer als 0,14 ist, ist die Verminderung des mittleren Restfehlers als signifikant, d. h. als gesichert gegenüber dem Zufall zu betrachten, da bei Fehlen eines verminderten Einflusses des Knochens  $k_2$  dieser partielle Korrelationskoeffizient den Wert 0,14 nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% überschreiten würde.

Ist also der zusätzliche Einfluß der Knochenlänge  $k_2$  in diesem Sinne gesichert und ist der entsprechend zu berechnende Korrelationskoeffizient  $r_{G, k_1, k_2}$  ebenfalls größer als 0,14 — wäre er kleiner, würde man mit dem Knochen  $k_2$  allein auskommen — verwenden wir die Schätzformel

$$\bar{x}_{G, k_1, k_2} = b_{G|k_1, k_2} + b_{G, k_1|k_2} x_{k_1} + b_{G, k_2|k_1} x_{k_2}, \quad (11)$$

deren Konstanten wir aus den Formeln

$$b_{G, k_1|k_2} = \frac{r_{G, k_1, k_2} s_{G|k_2}}{s_{k_1|k_2}}, \quad b_{G, k_2, k_1} = \frac{r_{G, k_2, k_1} s_{G, k_1}}{s_{k_2|k_1}} \quad (12)$$

und

$$b_{G, k_1, k_2} = m_G - b_{G, k_1|k_2} m_{k_1} - b_{G, k_2|k_1} m_{k_2}$$

erhalten, worin  $r_{G, k_1, k_2}$ ,  $s_{k_1|k_2}$  und  $s_{k_2|k_1}$  aus

$$r_{G, k_1|k_2} = \frac{r_{G, k_1} - r_{G, k_2} r_{k_1, k_2}}{\sqrt{(1 - r_{G, k_2}^2)(1 - r_{k_1, k_2}^2)}}; \quad s_{k_1|k_2} = s_{k_1} \sqrt{1 - r_{k_1, k_2}^2}, \quad (13)$$

$$s_{k_2, k_1} = s_{k_2} \sqrt{1 - r_{k_1, k_2}^2}$$

zu berechnen sind. Für den mittleren Restfehler ergibt sich hier

$$s_{G|k_1, k_2} = s_G \sqrt{(1 - r_{G, k_1}^2)(1 - r_{G, k_2, k_1}^2)} = s_{G, k_1} \sqrt{1 - r_{G, k_2|k_1}^2} \quad (14)$$

In entsprechender Weise kann die zusätzliche Berücksichtigung eines dritten Knochens  $k_3$  und gegebenenfalls noch weiterer Knochen behandelt werden.

Die Angabe des Schätzwertes und des mittleren Restfehlers, auf die sich die anderen Autoren, soweit sie überhaupt Formeln bringen, beschränkt haben, ist bei der besonderen Zielsetzung dieser Arbeit nicht ausreichend. Es wird noch ein Kriterium benötigt, mit dessen Hilfe entschieden werden kann, ob auf Grund der aus einem Knochenfund sich ergebenden Körpergröße ein Vermißter als nichtidentisch mit dem gefundenen Toten erklärt werden kann. Ein solches Kriterium bilden zwei noch zu berechnende Grenzen, innerhalb deren die Lebendgröße des gefundenen Toten mit großer Wahrscheinlichkeit gelegen haben muß.

Bei der Berechnung dieser Grenzen müssen einmal die Zufallsschwankungen (d. h. die Variabilität) der Körpergröße des betreffenden Toten gegenüber dem Körpergrößemittelwert aller derer, die die gleiche Knochenlänge haben, berücksichtigt werden. Lägen nur diese Zufallsschwankungen vor, so ließen sich leicht Grenzen finden, zwischen denen beispielsweise die Körpergröße von 90% aller Personen mit gleicher Knochenlänge liegen würden. Da dieser Mittelwert aber nicht bekannt ist, muß für ihn der aus der benutzten Schätzformel errechnete Schätzwert verwendet werden. Damit kommen noch die Zufallsschwankungen hinzu, die diesem Schätzwert anhaften und vom Beobachtungsmaterial herrühren. Schließlich ist auch der mittlere Restfehler, auf dem die Berechnung der gesuchten Grenzen beruht, ebenfalls Zufallsfehlern unterworfen. Damit ist nur die Berechnung solcher Grenzen möglich, von denen man behaupten kann, daß zwischen ihnen die Körpergrößen von beispielsweise *mindestens* 90% aller Personen mit gleicher Knochenlänge liegen. Der gleiche Umstand bewirkt ferner, daß diese Behauptung nicht mit absoluter Sicherheit richtig ist, sondern mit der sog. Irrtumswahrscheinlichkeit auch falsch sein kann. Dieser Irrtumswahrscheinlichkeit kann beliebig klein gewählt werden, doch werden die Grenzen um so weiter, je kleiner man sie wählt. Derartige Grenzen sind eingehend von WALD und WOLFOVITZ 1946 behandelt worden und werden Toleranzgrenzen genannt.

Zur Berechnung der Toleranzgrenzen, die mindestens 90%, 95% bzw. 99% der Körpergröße aller Personen mit gleicher Knochenlänge einschließen, dienen die im nächsten Abschnitt hinter den einzelnen Schätzformeln in Klammern angegebenen 3 Zahlenwerte  $t_{90}$ ,  $t_{95}$  und  $t_{99}$ . Zieht man sie von dem jeweils sich ergebenden Schätzwert ab, so erhält man die untere, zählt man sie hinzu, so erhält man die obere Toleranzgrenze, wobei die zugrundegelegte Irrtumswahrscheinlichkeit 1% beträgt. Die Zahlenwerte selbst sind mit Hilfe der im Lehrbuch von DIXON und MASSEY veröffentlichten Tabellen berechnet worden und stellen nur

Annäherungen an die genauen Werte dar. Eigentlich sind die Toleranzgrenzen nicht ganz unabhängig von den Knochenlängen des zu identifizierenden Individuums, doch haben numerische Einzeluntersuchungen nach den von WALLIS 1951 hergeleiteten Formeln ergeben, daß die angegebenen Näherungswerte bis auf 1% genau sind, so daß es sich nicht lohnt, genauere Formeln anzugeben, die die Knochenlängen berücksichtigen.

*Die Durchführung der Methode.*

Die nach den Formeln (4) und (5) sich ergebenden Mittelwerte und Streuungen der beobachteten Körpergrößen und Knochenlängen sind in folgender Tabelle zusammengestellt.

*Tabelle 1.*

	Mittelwert $m_k$	Mittlerer Fehler $s_k$
Körpergröße (G) . . . . .	170,46	6,69
Humerus (H) . . . . .	33,35	1,54
Ulna (U) . . . . .	26,39	1,19
Radius (R) . . . . .	24,58	1,16
Femur (Fe) . . . . .	46,27	2,35
Tibia (T) . . . . .	37,56	2,10
Fibula (Fi) . . . . .	37,19	2,00

Die nach Formel (6) berechneten Korrelationskoeffizienten zwischen der Körpergröße und den einzelnen Knochenlängen (erste Zeile) und zwischen den verschiedenen Knochenlängen untereinander sind in nachstehender Tabelle enthalten.

*Tabelle 2.*

	G	H	U	R	Fe	T	Fi
G . .	<b>1,0000</b>	<b>0,7240</b>	<b>0,7137</b>	<b>0,6806</b>	<b>0,8293</b>	<b>0,7626</b>	<b>0,7914</b>
H . .	0,7240	1,0000	0,7604	0,7629	0,8406	0,7557	0,7658
U . .	0,7137	0,7604	1,0000	0,9376	0,7545	0,7702	0,7874
R . .	0,6806	0,7629	0,9376	1,0000	0,7337	0,7405	0,7660
Fe . .	0,8293	0,8406	0,7545	0,7337	1,0000	0,8306	0,8441
T . .	0,7626	0,7557	0,7702	0,7405	0,8306	1,0000	0,9529
Fi . .	0,7914	0,7658	0,7874	0,7660	0,8441	0,9529	1,0000

Aus diesen Größen können mit Hilfe der Formeln (7) und (8) die folgenden, nur einen Knochen benutzenden Schätzformeln (S 1) bis (S 6) berechnet werden. Zu ihnen wird der jeweils dazugehörige mittlere Restfehler, wie er sich nach (9) ergibt, angegeben, während die 3 Zahlen  $t_{90}$ ,  $t_{95}$ ,  $t_{99}$  in der Klammer der Ermittlung der 90%-, 95%- und 99%-Toleranzgrenzen  $\bar{x}_{G|k} \pm t_{90}$ ,  $\bar{x}_{G|k} \pm t_{95}$  bzw.  $\bar{x}_{G|k} \pm t_{99}$  dienen.

	Schätzformel	Mittlerer Restfehler	$t_{90}$	$t_{95}$	$t_{99}$
(S 1)	$\bar{x}_{G H} = 65,98 + 3,133 x_H,$	$s_{G H} = 4,63,$	(8,7;	10,3;	13,6)
(S 2)	$\bar{x}_{G U} = 64,20 + 4,026 x_U,$	$s_{G U} = 4,71,$	(8,8;	10,5;	13,8)
(S 3)	$\bar{x}_{G R} = 73,96 + 3,926 x_R,$	$s_{G R} = 4,92,$	(9,2;	11,0;	14,4)
(S 4)	$\bar{x}_{G Fe} = 61,34 + 2,358 x_{Fe},$	$s_{G Fe} = 3,75,$	(7,0;	8,4;	11,0)
(S 5)	$\bar{x}_{G T} = 79,28 + 2,428 x_T,$	$s_{G T} = 4,35,$	(8,1;	9,7;	12,7)
(S 6)	$\bar{x}_{G Fi} = 71,96 + 2,649 x_{Fi},$	$s_{G Fi} = 4,11,$	(7,7;	9,2;	12,0)

Wie die mittleren Restfehler zeigen, ist die vierte dieser Schätzformeln, also die, die den Femur benutzt, weitaus am besten, während die 3 auf den Armknochen beruhenden Schätzformeln verhältnismäßig schlecht sind, ein Ergebnis, das auch an den Korrelationskoeffizienten zwischen der Körpergröße und den einzelnen Knochen abgelesen werden kann.

Zur Überprüfung, ob die Hinzunahme eines zweiten Knochens zum Femur eine über den Zufall hinausgehende Verminderung des mittleren Restfehlers ergibt, werden nach (10) die partiellen Korrelationskoeffizienten

$$r_{G, H|Fe} = 0,089; \quad r_{G, U|Fe} = 0,240; \quad r_{G, R|Fe} = 0,190;$$

$$r_{G, T|Fe} = 0,237 \text{ und } r_{G, Fi|Fe} = 0,305$$

berechnet. Der Vergleich mit dem kritischen Wert 0,14 zeigt, daß es sich nicht mehr lohnt, den Humerus zum Femur hinzuzunehmen. Dagegen ist die Verwendung des Femur zusammen mit einem der 4 anderen Knochen sinnvoll. Mit Hilfe von (11), (12) und (13) können wir die folgenden Schätzformeln aufstellen, zu denen nach (14) wiederum der mittlere Restfehler berechnet wird.

	Schätzformel	Mittlerer Restfehler	$t_{90}$	$t_{95}$	$t_{99}$
(S 7)	$\bar{x}_{G Fe, U} = 51,21 + 1,920 x_{Fe} + 1,152 x_U,$	$s_{G Fe, U} = 3,63,$	(6,8;	8,1;	10,7)
(S 8)	$\bar{x}_{G Fe, R} = 54,27 + 2,033 x_{Fe} + 0,901 x_R,$	$s_{G Fe, R} = 3,67,$	(6,9;	8,2;	10,8)
(S 9)	$\bar{x}_{G Fe, T} = 58,89 + 1,797 x_{Fe} + 0,757 x_T,$	$s_{G Fe, T} = 3,63,$	(6,8;	8,1;	10,7)
(S 10)	$\bar{x}_{G Fe, Fi} = 57,08 + 1,595 x_{Fe} + 1,064 x_{Fi},$	$s_{G Fe, Fi} = 3,56,$	(6,7;	8,0;	10,5)

Unter diesen Formeln ist die, die Femur und Fibula benutzt, am besten, doch liegt die Genauigkeit der anderen nicht wesentlich darunter.

Für den Fall, daß die Femurlänge nicht vorliegt, sind noch weitere Untersuchungen angestellt worden. Ist nur Tibia und Fibula vorhanden, so genügt die Schätzung aus Fibula nach (S 6) allein, da  $r_{G, T|Fi} = 0,046$  ist, also die Verminderung des mittleren Restfehlers durch Hinzunahme von Tibia zu Fibula nicht signifikant ist. Andererseits ist die Schätzung aus Tibia durch Hinzunahme von Fibula verbesserungsfähig, da  $r_{G, Fi|T} = 0,330$  ist; doch wird man, wenn Fibula vorhanden ist, auf Tibia ganz verzichten. Ähnlich liegen die Verhältnisse für das Paar Ulna und Radius, wobei Ulna die bessere Schätzung liefert. Hier ist  $r_{G, R|U} = 0,047$  und  $r_{G, U|R} = 0,297$ .

Bei Vorliegen von Humerus und Tibia ist es dagegen sinnvoll, beide Knochen zur Schätzung heranzuziehen. Wir erhalten hier

$$(S\ 11) \quad \bar{x}_{G|H, T} = 60,69 + 1,491 x_H + 1,599 x_T, \quad s_{G|H, T} = 4,05, \\ (7,6; 9,1; 12,0).$$

Liegen nur Armknochen vor, so verwendet man am besten das Knochenpaar Humerus und Ulna zur Schätzung, wofür sich die Formel

$$(S\ 12) \quad \bar{x}_{G|H, U} = 50,84 + 1,861 x_H + 2,181 x_U, \quad s_{G|H, U} = 4,30, \\ (8,1; 9,6; 12,7)$$

ergibt.

Zur Untersuchung, ob die zusätzliche Verwendung eines dritten Knochens  $k_3$  eine signifikante Verminderung des mittleren Restfehlers ergibt, gehen wir von der besten der obigen Formeln, von (S 10), aus und berechnen die nächsthöheren partiellen Korrelationskoeffizienten  $r_{G, k_3|F_1, F_2}$  für  $k_3 = H, U, R$  und  $T$ . Der größte unter ihnen  $r_{G, U|F_1, F_2}$  hat nur den Wert 0,127, ist also nicht signifikant, so daß die *Hinzunahme irgendeines dritten Knochens zu Femur und Fibula keine verbessernde Wirkung mehr hat.*

Stehen Femur und Fibula nicht zur Verfügung, so gibt es allerdings auf 3 Knochen beruhende Schätzformeln, deren mittlere Restfehler signifikant kleiner sind als die mittleren Restfehler der Schätzformeln, die nur 2 von diesen 3 Knochen berücksichtigen. Als Beispiel sei hier die Schätzformel aus der Knochenkombination Humerus-Ulna-Tibia angegeben.

$$(S\ 13) \quad \bar{x}_{G|H, U, T} = 54,01 + 1,140 x_H + 1,101 x_U + 1,315 x_T, \\ s_{G|H, U, T} = 3,98, \quad (7,5; 9,0; 11,8).$$

Die vermindernde Wirkung, die durch Hinzunahme des 3. Knochens entsteht, ist, wenn auch signifikant, doch sehr gering. Wohl drückt die Hinzunahme von Tibia zu Humerus-Ulna  $s_{G|H, U} = 4,30$  auf  $s_{G|H, U, T} = 3,98$  herunter; aber, da die Hinzunahme von Ulna zu Humerus-Tibia  $s_{G|H, T} = 4,05$  nur auf  $s_{G|H, T, U} = 3,98$  erniedrigt, ist die Verwendung von Humerus und Tibia schon fast ebenso erfolgreich, wie die Verwendung von Humerus, Tibia und Ulna zusammen. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei weiteren Dreierkombinationen, so daß es sich nicht lohnt, auf sie näher einzugehen. Ebenso haben die Vierer- und Fünferkombinationen, sowie die Verwendung aller 6 Knochen zusammen keine praktische Bedeutung und würden den Abstand zwischen den beiden Toleranzgrenzen, d. h. das Toleranzintervall, nicht mehr nennenswert verkleinern.

Ein Vergleich der hier abgeleiteten Schätzwerte mit denen von K. PEARSON und E. BREITINGER ist nicht sinnvoll, da ersterer die Größe und letzterer die Knochenlängen in einer anderen Weise gemessen hat. Dagegen ist es interessant, die Toleranzintervalle einander gegenüberzustellen, die zu diesem Zweck von uns auch zu den PEARSONSchen

und BREITINGERSchen Schätzformeln berechnet worden sind. Dabei haben sich zu den PEARSONSchen Formeln ähnlich große Intervalle ergeben. Der dort erheblich kleinere mittlere Restfehler wird nämlich gerade durch die vom geringeren Material herrührende Unsicherheit kompensiert. Dagegen sind die zu BREITINGERS Untersuchung gehörenden Toleranzintervalle wesentlich größer, obwohl sein Material 2400 Fälle umfaßt. Die Ursache liegt in seinen erheblich höheren mittleren Restfehlern.

Die bisherigen Materialuntersuchungen und auch theoretische Erwägungen legen den Schluß nahe, daß von weiteren Untersuchungen ähnlicher Art keine nennenswerte Verringerung des Toleranzintervalls zu erwarten ist. Die Hauptursache für dessen Größe ist die unbekannte Rumpflänge, die bei der Schätzung der Körpergröße aus den langen Gliedmaßenknochen naturgemäß den eigentlichen Unsicherheitsfaktor bildet.

*Der Gebrauch der Schätzformeln und Toleranzgrenzen.*

Der allein an der Anwendung der hergeleiteten Schätzwerte und Toleranzgrenzen interessierte Leser benötigt aus den vorhergehenden Abschnitten nur die Schätzformeln (S 1) bis (S 13) mit den dazugehörigen Zahlenangaben zur Berechnung der Toleranzgrenzen. Befinden sich unter den gemessenen Knochen Femur und Fibula, so wird er Formel (S 10) benutzen, wenn er es nicht vorzieht, sich auf die Femurlänge allein zu beschränken, d. h. die Berechnungen des Schätzwertes und der Toleranzgrenzen nach Formel (S 4) durchzuführen, die zwar etwas weitere Toleranzgrenzen liefert, aber dafür auch einfacher ist. Erst wenn Femurlänge bzw. Femurlänge und Fibulalänge nicht vorliegen, wird man je nach den vorhandenen Knochen auf eine der anderen Schätzformeln zurückgreifen.

Ist beispielsweise die Femurlänge  $x_{Fe} = 48,5$  (cm) und die Fibulalänge  $x_{Fi} = 39,2$  (cm) gemessen worden, so ergibt sich nach Formel (S 10) der Schätzwert

$$\bar{x}_{G|Fe, Fi} = 57,08 + 1,595 \cdot 48,5 + 1,064 \cdot 39,2 = 176,1 \text{ (cm)}.$$

Mit Hilfe der mittleren der 3 angegebenen Zahlen lassen sich die Toleranzgrenzen  $176,1 - 8,0 = 168,1$  (cm) und  $176,1 + 8,0 = 184,1$  (cm) berechnen, die besagen, daß bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1%, mindestens 95% aller Individuen mit den gleichen Knochenlängen eine zwischen diesen Grenzen gelegene Körpergröße haben. Wäre nur die Femurlänge  $x_{Fe} = 48,5$  (cm) allein bekannt, so ergäbe (S 4) den Schätzwert

$$\bar{x}_{G|Fe} = 61,34 + 2,358 \cdot 48,5 = 175,7 \text{ (cm)}$$

mit den wiederum 95% umfassenden Toleranzgrenzen  $175,7 - 8,4 = 167,3$  (cm) und  $175,7 + 8,4 = 184,1$  (cm).

Liegen mehrere oder gar sämtliche 6 Knochen vor, so wird man trotzdem immer nur eine dieser Formeln, wenn möglich (S 10) benutzen. Es ist aus theoretischen Erwägungen heraus abzulehnen, gleichzeitig nach mehreren Formeln Schätzwerte zu berechnen und deren Mittelwerte zu bilden, denn das ergäbe eine schlechtere Schätzung als nach der besten der dabei verwendeten Formel allein.

Die angegebenen Schätzformeln beziehen sich ausschließlich auf die Knochen der rechten Seite. Weitere Berechnungen haben ergeben, daß die linken Knochen nur wenig davon abweichende Schätzformeln liefern, so daß man, falls keine rechten Knochen vorliegen, die Knochenlängen der linken Knochen in die obigen Formeln einsetzen kann. Wohl ergeben bei Humerus, Ulna, Radius und Femur die Mittelwerte der beiden Seiten gesicherte Unterschiede, doch sind diese so klein, daß sie sich auf die Schätzung der Körpergröße nur unwesentlich auswirken. Auch lohnt es sich nicht, Formeln herzuleiten, die die Mittelwerte der Knochen beider Seiten berücksichtigen.

Die Gültigkeit der hergeleiteten Formeln hängt von den Voraussetzungen ab, daß die 199 Individuen des Beobachtungsmaterials *zufallsmäßig* aus einer Gesamtheit entnommen worden sind und daß das auf die Körpergröße zu untersuchende Individuum als zu der gleichen Gesamtheit gehörend betrachtet werden kann. Wenn im allgemeinen diese Voraussetzungen wenigstens näherungsweise erfüllt sein dürften, so ist doch Vorsicht geboten, wenn das zu untersuchende Individuum irgendeine Abnormalität in den Knochen zeigt oder wenn es einer in den Körpermaßen stark abweichenden Bevölkerung oder einem extremeren Lebensalter angehört hat.

#### *Zusammenfassung.*

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Herleitung von Gebrauchsformeln zur Schätzung der Lebendkörpergröße eines Toten aus den langen Gliedmaßenknochen seines Skeletons. Ein geeignetes Material hierzu lieferten die zahlreichen Exhumierungen, die anlässlich der Überführung der im letzten Kriege in Deutschland verstorbenen Kriegsgefangenen vorgenommen worden waren. Es umfaßte nach sorgfältiger Auswahl 199 Franzosen, Belgier, Holländer und Italiener und erstreckte sich auf die Körpergröße (aus Soldbüchern, Lagerkarteien usw.) und die Längen von Humerus, Ulna, Radius, Femur, Tibia und Fibula.

Für die Abhängigkeit der Körpergrößenschätzwerte von den einzelnen Knochenlängen wurden lineare Funktionen angesetzt und deren Koeffizienten nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Bei der systematischen Untersuchung der Frage, ob sämtliche 6 Knochenarten herangezogen werden müssen oder schon ein Teil von ihnen ausreicht, wurde durch statistische Tests festgestellt, daß es im allgemeinen überflüssig ist, mehr als 2 Knochen zur Schätzung zu verwenden. Es zeigte

sich, daß Femurlänge und Fibulalänge zusammen die genaueste Schätzung der Körpergröße ergeben, daß aber auch schon die Schätzung aus Femurlänge allein brauchbar ist.

Zu jeder der 13 in der Arbeit angegebenen Schätzformeln wurden der mittlere Restfehler und die Toleranzgrenzen angegeben, innerhalb derer mit 99%iger Sicherheit die Körpergrößen von mindestens 90, 95 bzw. 99% aller Personen gelegen sind, deren Knochen, soweit sie zur Schätzung herangezogen werden, die gleiche Länge haben. Damit ist es möglich, Vermißte, deren Körpergröße außerhalb des auf Grund eines Knochenfunds berechneten Toleranzintervalls liegt, als nicht identisch mit dem Toten zu erklären.

### Literatur.

BREITINGER, E.: *Anthrop. Anz.* **14**, 249 (1937). — DIXON, W., and F. MASSEY: *Introduction to Statistical Analysis*. New York 1951. — MANOUVRIER, L.: (1) *Bull. Soc. d'Anthrop. Paris* **4**, 4. sér. **1**, 906 (1890). — (2) *Mém. Soc. d'Anthrop. Paris*, 2. sér. **4**, 347 (1892). — ORFILA et O. LESUER: *Traité des Exhumations juridiques*, Bd. 2. Paris 1831. — PEARSON, K.: *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, Ser. A **192**, 169 (1899). — ROLLET, E.: *De la mensuration des os longs des membres dans ses rapports avec l'Anthropologie, la Clinique et la Médecine judiciaire*. Lyon 1888. — STEVENSON, P. H.: *Biometrika* **21**, 303 (1929). — TOPINARD, P.: *Rev. d'Anthrop.* **8**, 73, 134 (1885). — WALD, A., u. J. WOLFOWITZ: *Ann. Math. Statist.* **17**, 208 (1946). — WALLIS, W. A.: *Proc. Berk. Symp. Math. Stat.* **2**, 43 (1951).

Dr. DIETRICH LORKE, Göttingen,  
Institut für gerichtliche Medizin der Universität.

---